

# **INGENIERÍA AMBIENTAL SUBTERRÁNEA Y APLICACIONES**

**Autores:**

**Vidal Félix Navarro Torres**

**Carlos Dinis da Gama**

**Editor:**

**Roberto C. Villas-Bôas**

## INGENIERÍA AMBIENTAL SUBTERRÁNEA Y APLICACIONES

---

Copias extras:

Roberto C. Villas Bôas  
CETEM/CYTED/CNPq  
Av. Pedro Calmon, 900, Cidade Universitária  
21941-908, Ilha do Fundão  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
Tel.: 55 21 3865-7219 Fax: 55 21 3865-7232

---

Foto da capa: Veta de cuarzo com wolframita, mina Panasqueira de Portugal

Beatriz Olivo Chacín  
Composición y Ejecución Grafica

Fátima Engel  
Composición y Ejecución Version Digital

Navarro Torres, Vidal Félix

Ingeniería ambiental subterránea y aplicaciones/Vidal Felix  
Navarro Torres e Carlos Dinis da Gama – Rio de Janeiro:  
CETEM/CYTED, 2012.  
610p. il.

1. Ingeniería ambiental. 2. Desarrollo sostenido. I. Centro de  
Tecnología Mineral II. Gama, Carlos Dinis da III. Villas Bôas,  
Roberto C. (ed.) IV. Título

ISBN 978-85-61121-88-4

CDD 628.16832

Rio de Janeiro, 2012

## *Presentación*

*D*efinen los autores el ambiente subterráneo como “el medio subterráneo donde sucede la interacción de los cuatro dominios ambientales que son: atmósfera subterránea, agua subterránea, roca y las componentes biológicas (principalmente el hombre)”.

A partir de allí nos llevan a nosotros, lectores ávidos por una buena literatura técnica en lengua ibérica, principalmente en español, por todo un viaje a la ingeniería ambiental por el interior de las rocas, a través del propuesto “Sistema de Gestión Ambiental Subterráneo (SGAS)”.

A la par de los análisis y discusiones teóricas, de guía y orientación de las cuestiones abordadas, nos presentan aplicaciones a minas portuguesas y peruanas, homenajeando, así, a estos dos simbólicos países de la Historia común acontecida en la península Ibérica y Continente Americano, tan rica y seductora, que por las minas comenzó, estremeció y se unió!

A los colegas Vidal y Dinis, solo nos resta agradecer, por la grata oportunidad de trasportarnos por este mundo subterráneo, literatura que solo enriquece la Ingeniería de Minas!

Rio de Janeiro, marzo de 2012

*Roberto C. Villas Bôas*

Gestor Área Promoción Industrial  
CYTED – AREA 3  
<http://www.cyte.org>



PRIMERA PARTE  
EL AMBIENTE Y LA INDUSTRIA EXTRACTIVA

CAPITULO 1. LA CRECIENTE IMPORTANCIA DE LA INGENIERÍA AMBIENTAL .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Conceptos ecológicos .....	1
1.3. Evolución de la temática ambiental .....	8
1.4. Desarrollo sustentable .....	13
1.5. El suelo y los impactos ambientales .....	15
1.6. El agua y la contaminación .....	29
1.7. Contaminación de la atmósfera .....	30
1.8. Los cambios climáticos .....	37
1.9. Técnicas de análisis ambiental .....	39
1.10. Evaluación de impacto ambiental .....	40
1.11. El ciclo de vida del producto .....	45
1.12. Normas de la serie ISO 14000 .....	46
1.13. Costo ambiental .....	52
CAPITULO 2. METODOLOGIA PARA MINAS SUBTERRÁNEAS .....	57
2.1. Minería y ambiente .....	57
2.2. Concepción del ambiente subterráneo .....	63
2.3. Ambiente, salud y seguridad .....	69
2.4. Situación actual de la ingeniería ambiental subterránea .....	71
2.5. Propuesta de ingeniería ambiental subterránea .....	72
2.6. Minas subterráneas para la aplicación del estudio .....	76

SEGUNDA PARTE  
GESTIÓN DEL AMBIENTE SUBTERRÁNEO

CAPITULO 3. CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA SUBTERRÁNEA...	79
3.1. Temperatura .....	79
3.2. Gases tóxicos en el ambiente subterráneo .....	108
3.3. Polvos en el ambiente subterráneo .....	125
3.4. Velocidad y caudal del aire .....	141
3.5. Iluminación y radiación .....	155
3.6. Explosión e incendio .....	168
3.7. El ruido en la atmósfera subterránea .....	188
CAPITULO 4. AGUA SUBTERRÁNEA Y DRENAJE ÁCIDO .....	207
4.1. Efectos ambientales por la alteración de las condiciones naturales de las aguas subterráneas .....	207
4.2. Fuentes de riesgos ambientales relacionadas con aguas subterráneas .....	209
4.3. Caracterización de las aguas subterráneas .....	216
4.4. Normas y estándares sobre la calidad del agua .....	223
4.5. Matriz base para la identificación del riesgo ambiental debido a la alteración del agua subterránea .....	228

4.6. Medidas correctivas para el impacto ambiental con relación al agua subterránea .....	229
4.7. Monitoreo y control .....	237
<b>CAPITULO 5. INESTABILIDAD Y DESLIZAMIENTO DE ROCAS .....</b>	<b>239</b>
5.1. Efectos de la inestabilidad y deslizamiento de rocas .....	239
5.2. Causas de la inestabilidad y deslizamiento de las rocas .....	240
5.3. Caracterización geotécnica del macizo rocoso del ambiente subterráneo .....	240
5.4. Estándares geotécnicos .....	253
5.5. Matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental geotécnico .....	258
5.6. Medidas correctivas para atenuar el impacto ambiental geotécnico .....	258
5.7. Monitoreo y control geotécnico .....	270
<b>CAPÍTULO 6. ECONOMÍA DEL AMBIENTE SUBTERRÁNEO .....</b>	<b>273</b>
6.1. Costo ambiental en la industria minera .....	273
6.2. Procedimientos del plan de protección y costo ambiental .....	278
6.3. Costos de protección ambiental .....	279
6.4. Análisis del valor actual .....	284
6.5. Análisis de sensibilidad .....	286
6.6. Relación costo/beneficio en la gestión ambiental .....	287

### TERCERA PARTE

#### APLICACIÓN A MINAS PORTUGUESAS Y PERUANAS

<b>CAPÍTULO 7. APLICACIÓN EN LA MINA NEVES CORVO .....</b>	<b>293</b>
7.1. Introducción .....	293
7.2. Definición del ámbito de acción .....	293
7.3. Contaminación de la atmósfera subterránea .....	300
7.4. Impacto ambiental geotécnico .....	334
<b>CAPÍTULO 8. APLICACIÓN EN LA MINA PANASQUEIRA .....</b>	<b>345</b>
8.1. Introducción .....	345
8.2. Definición del ámbito de acción .....	345
8.3. Evaluación del impacto ambiental en la atmósfera subterránea .....	349
8.4. Evaluación del riesgo ambiental acústico en el ambiente subterráneo .....	373
8.5. Evaluación del riesgo ambiental en el dominio ambiental del agua subterránea .....	385
8.6. Evaluación del riesgo ambiental debido a vibraciones del macizo rocoso .....	399
<b>CAPÍTULO 9. APLICACIÓN EN LA MINA SAN RAFAEL .....</b>	<b>405</b>
9.1. Introducción .....	405
9.2. Definición del ámbito de acción .....	405
9.3. Caracterización térmica y dinámica de la atmósfera subterránea .....	412
9.4. Identificación del riesgo ambiental térmico, dinámico y volumétrico .....	420

9.5. Alternativas de mitigación del riesgo ambiental térmico, dinámico y volumétrico.....	423
---	-----

**CUARTA PARTE**  
**APLICACIÓN A NUEVOS PROYECTOS Y SISTEMAS DE GESTIÓN**  
**AMBIENTAL SUBTERRÁNEA**

<b>CAPÍTULO 10. ANÁLISIS DE CASOS ESTUDIADOS</b> .....	433
10.1. Introducción .....	433
10.2. Localización e información general de las tres minas .....	433
10.3. Impacto ambiental térmico .....	433
10.4. Impacto ambiental dinámico y volumétrico del aire .....	439
10.5. Impacto ambiental acústico .....	445
10.6. Agua subterránea e impacto ambiental .....	450
10.7. Inestabilidad y deslizamiento de rocas .....	453
<b>CAPÍTULO 11. APLICACIÓN A NUEVOS PROYECTOS</b> .....	457
11.1. Introducción .....	457
11.2. Metodología propuesta .....	458
11.3. Análisis del proyecto de explotación subterránea .....	460
11.4. Definición del área de influencia del proyecto .....	462
11.5. Caracterización del ambiente subterráneo .....	463
11.6. Predicción del impacto ambiental .....	473
11.7. Medidas de prevención y corrección para el impacto ambiental .....	487
11.8. Programa de monitoreo y control .....	492
11.9. Informe final .....	493
<b>CAPÍTULO 12. SISTEMAS DE GESTIÓN PARA EL AMBIENTE</b> <b>SUBTERRÁNEO</b> .....	539
12.1. Sistema de Gestión Ambiental (EMS) /ISO 14001 .....	539
12.2. Sistema de Gestión del Ambiente, Salud y Seguridad Ocupacional EHSMS.....	512

**QUINTA PARTE**  
**ASPECTOS FINALES**

<b>CAPÍTULO 13. RESULTADOS Y REFERENCIAS</b> .....	525
13.1. Resumen de los resultados del desarrollo de la ingeniería ambiental subterránea .....	525
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	529
<b>ANEXOS</b> .....	543





## **RESUMEN**

El presente libro aborda la ingeniería ambiental subterránea (IAS) enmarcada en el concepto del ambiente subterráneo como un sistema dinámico de interacción mutua e integral de cuatro importantes dominios: atmósfera subterránea, agua subterránea, roca y componente biológico (hombre); a los cuales se asocia la tecnología, la economía y los sistemas de gestión ambiental, dividiéndose en cinco partes.

La primera parte presenta una revisión sobre la creciente importancia de la ingeniería ambiental y la situación actual de su especialización en el ámbito subterráneo.

La segunda parte aborda el desarrollo de la IAS teniendo en cuenta los siguientes pasos: identificación de las fuentes de los impactos ambientales, caracterización de la interrelación de los parámetros ambientales expresándolos en modelos matemáticos, identificación del nivel de impacto ambiental, búsqueda de las medidas de prevención y corrección, aplicación de las mejores alternativas y finalmente acompañar con monitoreo y control. También, en esta parte, se trata sobre aspectos relacionados con los costos de la protección ambiental subterránea.

La tercera parte corresponde a la aplicación de los conocimientos antes referidos a dos minas portuguesas y una mina peruana, con el objeto de validar su eficacia y confiabilidad.

La cuarta parte del libro incluye la aplicación de la IAS desarrollada a nuevos proyectos, abordándose también, los sistemas de gestión ambiental e integrada del ambiente, salud y seguridad.

Finalmente, en la quinta parte se presenta un resumen de los resultados obtenidos como una contribución a la ingeniería ambiental, no dejando a lado las recomendaciones para futuras investigaciones.

## **ABSTRACT**

The present book concerns the underground environment engineering (UEE) based on the concept of a dynamic system of mutual and integral interaction of four important environmental domains: underground atmosphere, groundwater, rock and the biological component (man), to which including the technology, economy and underground environmental management systems, are associated, and it is divided in five parts.

The first one contains a revision on the increasing importance of environment engineering and the current situation of its underground specialization.

The second part addresses of the development of UEE, according to the following steps: identification of the sources of environmental impacts, characterization the interrelation of environmental parameters and expressing them in mathematical models, identification of the environmental impacts levels, search of prevention and remedial actions, application the best alternative searched and finally monitoring and control. Also, in this part deals the underground environmental protection costs.

The third part assesses the application of that knowledge developed in two Portuguese mines and one Peruvian mine, aiming to validate its effectiveness and reliability.

The fourth part of the boob includes the UEE applications to new projects, also boarded the environmental management systems (EMS) and integrated environmental, health and safety system (EHS).

Finally, the fifth part presents the main results of the engineering contribution, with suggestions for further research.

## **AGRADECIMIENTOS**

Para la realización y publicación de este libro fue decisiva la participación de varias personas e instituciones, que sin ellos no hubiera sido posible, a los cuales expresamos nuestros más sinceros agradecimientos.

A la Fundación para la Ciencia y la Tecnología FCT de Portugal, por el soporte financiero, del autor, a través del Programa Ciencia.

Al Centro de Recursos Naturais e Ambiente CERENA del Instituto Superior de la Universidade Técnica de Lisboa, donde el autor es investigador fundador.

Al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED, por el soporte financiero de la Red Iberoamericana de “Medio Ambiente Subterráneo y Sostenibilidad” MASyS-CYTED, la que es coordinado por los autores.

Al editor Roberto C. Villas Bôas, Gestor el Área de Desarrollo Industrial de CYTED, por su gran dinamismo y sugerencias para que este libro sea publicado en idioma Español.

A Carlos López Jimeno, de la Universidad Politécnica de Madrid.

A los colegas Heitor Simões Santos, Pedro Bernardo, Matilde Costa y Silva y Paula Falcão Neves de la Universidade Técnica de Lisboa.

A la mina de Panasqueira, en las personas de los ingenieros Ramachondra Naique, Edmundo Nobre y Luís Lopes.

A la mina de Neves Corvo, en las personas de los ingenieros Antonio Correia de Sá y José Lobato.

A la mina de San Rafael, en las personas de los ingenieros Fausto Zavaleta y Luís Alva.

A Adilson Curi, Mario Sánchez Medina, José Enrique Sánchez Rial, Vilma Pasmíño Quiña, Diosdanis Guerrero Almeida, Walter Ramirez Meda, Osvaldo Aduvire, Jaime Huamán Montes, Rafael Barrionuevo Giménez y Beatriz Olivo Chacín, integrantes de la Red Iberoamericana MASyS-CYTED.

**Los autores**

# **PRIMERA PARTE**

## **EL AMBIENTE Y LA INDUSTRIA EXTRACTIVA**

---



## Capítulo 1

# LA CRECIENTE IMPORTANCIA DE LA INGENIERÍA AMBIENTAL

---

### 1.1. Introducción

En los últimos veinte años y cada vez con mayor intensidad, existe una justificada preocupación sobre el antagonismo economía-ecología y sobre la calidad ambiental en la Tierra. Esta preocupación está permitiendo el desarrollo de políticas que conduzcan a una sociedad industrializada ecológicamente sostenible.

Entre los factores ambientales susceptibles de ser modificados por el hombre con cambios que podrían ocasionar problemas, y que por su magnitud son difíciles de evaluar a mediano y largo plazo, se pueden citar el propio hombre, la flora, la fauna, el suelo, el agua, el aire, el clima, el paisaje y los bienes del patrimonio cultural.

Muchas actividades industriales, como la explotación minera y algunas obras públicas, desarrollan trabajos en ambientes subterráneos, cuya duración puede variar de algunos días a decenas de años. Este tipo de ambiente se ve afectado por muchos factores susceptibles de modificaciones que pueden ocasionar daños al hombre, como serían la ocurrencia de gases, polvos, altas temperaturas, ruido, desprendimiento de rocas, incendios, radiaciones, inundaciones, etc.

Por lo tanto, las experiencias, procedimientos, políticas, gestiones, normas, evaluaciones de impacto ambiental y otros importantes avances en la ecología, son también definitivamente importantes para el ambiente subterráneo, por lo que en este capítulo se presenta un enfoque integrado sobre la creciente importancia contemporánea.

### 1.2. Conceptos ecológicos

La ecología es una ciencia relativamente joven, se inicia con las expediciones de los siglos XVIII y XIX, que constituyeron las bases de los estudios del balance que parecían mantener las plantas y los animales y su distribución en formas determinadas en el ambiente geográfico.

En la segunda mitad del siglo XIX, Haeckel (1868) definió la *ecología* como la ciencia de las relaciones que mantienen los organismos vivos, entre sí y su entorno físico-químico.

Revalle, P. (1984) señala que la palabra *ecología* proviene de dos vocablos griegos *oikos* que significa casa o morada y *logos* estudio o tratado. Así, en general, la ecología estudia los organismos vivos y su distribución en el ambiente.

Conesa Fernández, V. (1997) define la *ecología* como el estudio de los animales y las plantas en relación con su hábitat y costumbres, haciendo referencia a Colinvaux (1980).

La ecología es, entonces, una ciencia integradora y multidisciplinaria, que requiere procesar una gran cantidad de datos para interpretar, relacionar y conocer, utilizando como herramientas instrumentales y de apoyo otras ciencias tales como

la Química, Física, Fisiología, Botánica, Zoología, Demografía, Matemáticas, Genética, Sociología, Sistemas, Geoclimatología, Geografía, Geología, etc.

### 1.2.1. Introducción a la perspectiva ecológica

El papel multidisciplinario de la ingeniería ambiental de hoy exige un mayor conocimiento del funcionamiento de los seres vivos y de la interacción con su ecosistema.

Entonces, ¿qué es el ambiente?

El ambiente global, entendido como el ambiente de la Tierra, es una entidad que abarca muchos aspectos, tal como se muestra en la fig. 1.1.

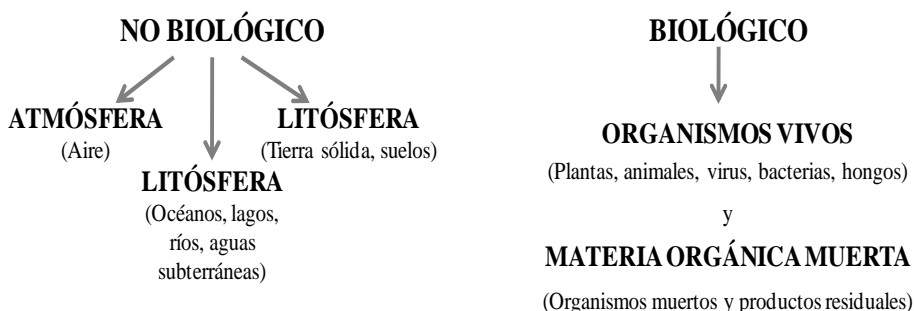


Figura 1.1 Componentes y subcomponentes del medio natural (Kiely, G., 1999)

Los componentes del sistema ambiental global (biológico y no biológico) aportan a la comunidad un conjunto de servicios indispensables e insustituibles que mantienen el equilibrio del ecosistema en la Tierra, como son los alimentos, los medicamentos, los combustibles, los materiales de vestir, de construcción, etc. Los sistemas vivos también proporcionan servicios funcionales, como la conservación de la mezcla adecuada de gases, la generación y protección de los suelos, la transformación de residuos, la restauración de los sistemas luego de las alteraciones, etc. Así, no solo la humanidad es totalmente dependiente del medio natural, sino que también la totalidad del planeta depende de la conservación del medio natural y de su interacción entre los organismos vivos y los componentes físico-químicos de la Tierra (Erlich, P.R., 1991).

### 1.2.2. Niveles de la organización biológica en el ambiente

Uno de los mayores axiomas en el ambiente global es que todo está ligado con todo, de tal manera que los cambios en un componente pueden afectar muchos otros, tanto en el tiempo como en el espacio.

En el nivel más elemental, las células son las unidades básicas estructurales y funcionales de la vida, constituyendo los organismos procesadores activos de materia y energía. Los principales niveles de la organización ecológica pueden resumirse en cinco (Kiely, G., 1999):

a) *Individuos*: poseen funciones fisiológicas y responden a las condiciones de un determinado ambiente. Pertenecen a una especie que comprende todos los individuos que potencialmente son capaces de reproducirse.

b) *Especie*: grupos de individuos caracterizados por su raza y parentesco, por consiguiente poseen genes comunes y/o hereditarios. Las especies no se distribuyen al azar dentro del ecosistema, ya que dependen de las interacciones con otras especies y de las condiciones físicas y químicas de su hábitat. Cada especie tiene un nicho particular, definido por factores físicos (humedad, temperatura, etc.), biológicos (tipo de nutrientes y cantidad de depredadores que actúan sobre ella) y etológicos (ciclos estacionales y temporales, organización, etc.).

c) *Población*: son los miembros de una especie que viven en conjunto en una determinada localidad y al mismo tiempo. Las poblaciones de una misma especie pueden diferir en tamaño, ritmo de reproducción, de muerte y, por lo tanto, del crecimiento. Las poblaciones funcionan como sistemas autónomos, regulando su densidad por sus propias características y las de su ambiente, pero por la complejidad y variedad de nichos, la regulación se debe a más de un factor.

d) *Comunidades*: incluye los organismos vivos, es decir, plantas y animales (incluidos microorganismos), que interactúan mutuamente en un ambiente particular que comprende las poblaciones y sus respectivas especies. Las comunidades están sometidas a tres mecanismos dentro del ecosistema: *selección* (sobreviven los individuos mejor adaptados a las condiciones del medio), *evolución* (proceso de cambios acumulados y adaptación de las generaciones sucesivas de organismos a partir de un antecesor común) y *competencia* (que consiste en la lucha por un recurso). Estos tres mecanismos propician la sucesión de unas comunidades por otras.

e) *Ecosistema*: Se refiere al sistema de organismos vivos o biológicos y sus componentes ambientales no biológicos, de tal manera que el proceso ecológico constituye un *ecosistema* (fig. 1.2).

En el ecosistema global el *Sol* constituye la fuente de luz, de calor y de energía, que da vida al planeta Tierra. El calor que emite mantiene una temperatura adecuada para los seres vivos y contribuye con la capa de ozono que filtra los rayos ultravioleta perjudiciales para la vida.

Sin el *Sol* no habría evaporación de las aguas, que es fundamental para el *ciclo del agua*, ni del proceso de fotosíntesis que hace posible que las plantas eliminen el gas carbónico del aire y produzcan el *oxígeno*.

Los animales, durante su respiración, retienen oxígeno y liberan dióxido de carbono que las plantas utilizan durante la *fotosíntesis*, reiniciando el proceso.

La *fotosíntesis* es un proceso químico a través del cual los vegetales, ciertas bacterias y algas marinas azules producen su propia materia orgánica, a partir de la energía luminosa y de sustancias simples (agua y/o dióxido de carbono), liberando en el proceso oxígeno al medio.

El *nitrógeno* es otro de los componentes esenciales para la vida debido a los aminoácidos, proteínas (DNA y RNA), y forma parte de la atmósfera cerca del 80%. Los animales y las plantas absorben el nitrógeno bajo la forma de amoníaco o nitrato.

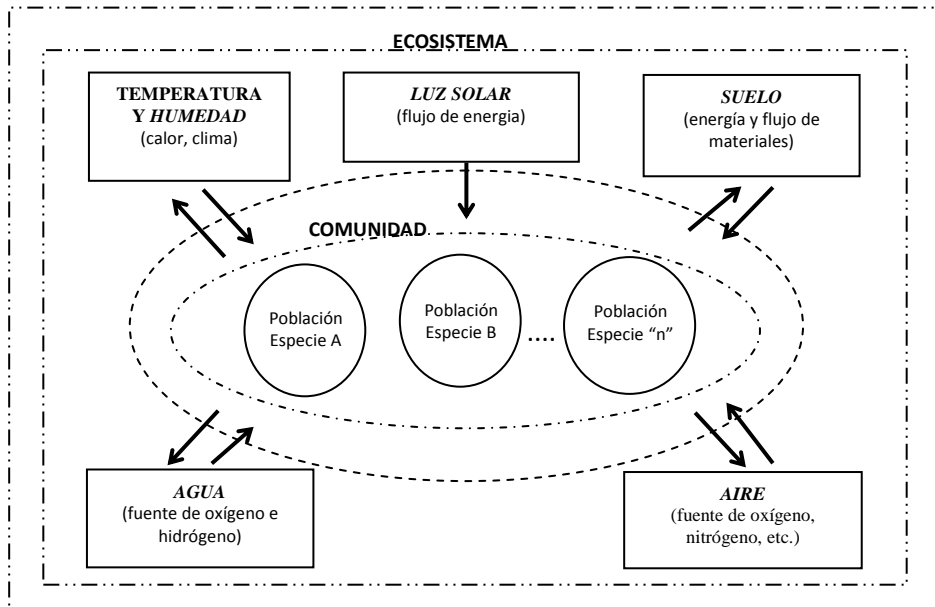


Figura 1.2 Esquema de un ecosistema (modificado de Revelle, P., 1984)

Las bacterias transforman el amoníaco en *nitritos* y luego en *nitratos*, que son utilizados por las plantas como *proteínas*.

Los animales herbívoros al comer las plantas absorben nitrógeno. Los animales *carnívoros* que se comen a los herbívoros y otros animales también terminan absorbiendo nitrógeno. Esta secuencia en que algunos animales se comen a otros es conocida como *cadena alimentaria* (fig. 1.3 derecha), que se inicia con el proceso de *fotosíntesis* de las plantas y raramente excede cuatro o cinco niveles o grupos de seres vivos.

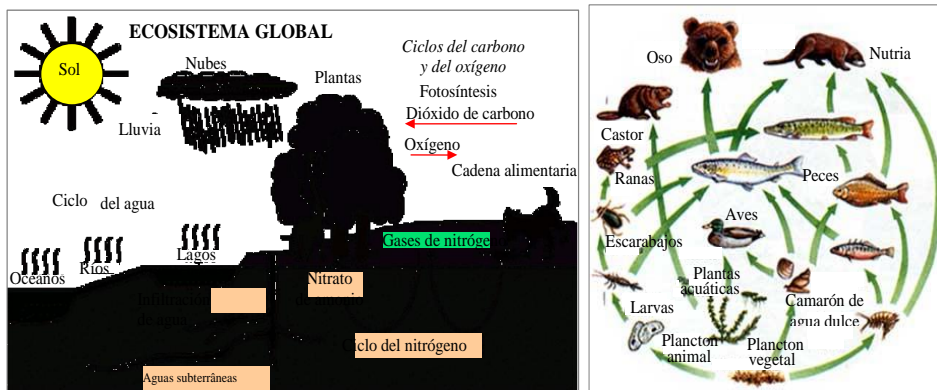


Figura 1.3 Ecosistema global de la cadena alimentaria ([www.uol.com.br](http://www.uol.com.br))



Cuando los animales y las plantas mueren, ciertas bacterias y hongos convierten sus compuestos de nitrógeno en *gases de nitrógeno*, reiniciando el ciclo del nitrógeno.

El *ciclo del agua* es otro de los ciclos básicos para la vida en la Tierra, tiene su inicio con la evaporación del agua de los océanos, lagos y ríos, formando *nubes* y retornando a la Tierra en forma de *lluvia* y *nieve*.

En áreas con vegetación, el suelo retiene el agua que usan las plantas y la restante acaba yendo para los *ríos* y *lagos*.

El agua no utilizada por las plantas pasa a través del suelo y se infiltra hasta los grandes reservorios subterráneos, formando los llamados *acuíferos*, que fluyen en dirección a los *océanos*.

Como se puede observar, el ecosistema global está formado por ciclos y procesos interdependientes y de forma sincronizada y equilibrada. Los seres humanos, a lo largo del tiempo, vienen creando productos y procesos que interfieren directa o indirectamente en este equilibrio.

f) *Biomasa*: constituye un nivel más alto de organización, como el bosque tropical que se origina en zonas de altas temperaturas e intensas lluvias.

g) *Biosfera*: es el mayor nivel de organización, que es la parte de la tierra y de la atmósfera en la cual existe la vida. Incluye la corteza terrestre, los océanos y los fondos marinos y, la parte inferior de la atmósfera ocupada por la vida. En este nivel ecológico se producen los ciclos biogeoquímicos de grandes dimensiones con la participación de elementos naturales y contaminantes. Uno de los objetivos del estudio ecológico es entender como funcionará la biosfera (cómo se forma un gran ecosistema) en el futuro y cómo solucionar los problemas ya causados.

Los factores *no biológicos del ecosistema* influyen en número y género los organismos existentes.

*La luz natural del Sol* es uno de los principales factores, porque las plantas de color verde al usar la energía solar producen el proceso de fotosíntesis, generando materia orgánica y casi todas las criaturas vivas dependen de este organismo para su alimentación.

*El agua* es el componente necesario para todas las formas de vida en la Tierra, la cual es parte del proceso precipitación/evaporación. Es el mayor solvente de la naturaleza para la disolución de los agentes contaminantes que afectan el ambiente, como la lluvia ácida que se forma cuando el óxido de sulfuro producido por la combustión de los combustibles fósiles se disuelve en la lluvia, limitando el desarrollo de los bosques y causando la contaminación de las aguas.

*La temperatura* tiene un profundo efecto en el desarrollo de los organismos, incluso la reacción bioquímica necesaria para la vida depende de la temperatura. Los cambios de temperatura por la acción del hombre en el ambiente podrían producir efectos negativos o devastadores en el ecosistema.

*El oxígeno* es un elemento no biológico muy importante, pues tanto las plantas como los animales lo usan para obtener la energía que les permite su desarrollo y metabolismo. En la Tierra, el oxígeno es variable dependiendo de la altitud y su abastecimiento puede variar dependiendo de las plantas existentes. Las

aguas naturales contienen oxígeno, que es vital para los animales y plantas, pudiendo ocurrir su contaminación por la acción del hombre.

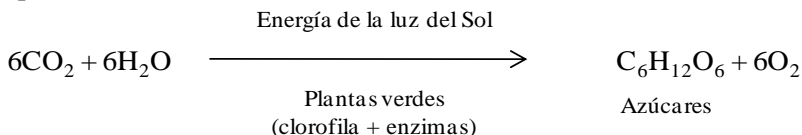
*El suelo* también es importante porque sirve de soporte para el desarrollo de los seres vivos, principalmente a través de los pastizales y bosques.

### 1.2.3. Procesos ecológicos en el ecosistema

Entre los componentes biológicos y no biológicos, interactúan dos procesos, que son el flujo de energía y la descomposición/reciclaje de nutrientes.

La vida sobre la Tierra es promovida a través del trabajo realizado en los intercambios entre la energía no aleatoria (luz) y la energía aleatoria (calor). En los ecosistemas, una parte de la energía de radiación solar se transforma en energía química, que es la base energética de los sistemas vivos. En estos organismos la energía se deposita a través de la materia orgánica viva o muerta, compuesta básicamente por carbono. Parte de la materia orgánica se transforma en el complejo químico trifosfato de adenosina, denominado ATP, que se rompe durante el metabolismo para liberar la energía química almacenada y permitir la realización de trabajos, como la locomoción, reacciones bioquímicas, etc.

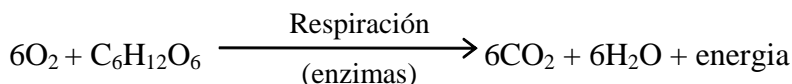
La producción de materia orgánica rica en energía se realiza casi en su totalidad dentro del ecosistema, por medio de las plantas verdes en presencia de luz solar por la vía de la *fotosíntesis*, generando su propio alimento mediante reacciones químicas complejas, impulsadas por la radiación solar y utilizando los pigmentos vegetales denominados clorofila. El proceso de la reacción química se puede expresar por:



En la fotosíntesis, inicialmente se libera el *oxígeno* creando una atmósfera donde sobreviven los organismos que requieren de este elemento y después, mediante la transformación de los complejos de ozono, se bloquea la penetración de los rayos ultravioletas, haciendo posible la existencia de la vida sobre la Tierra.

Las plantas verdes utilizan del 1 al 5% del total de la radiación solar para la transformación en materia orgánica, combinando el dióxido de carbono con el agua. La materia orgánica formada incluye una variedad de azúcares, almacenados en forma de almidón que, en combinación con otras moléculas de azúcar, forman hidratos de carbono como la celulosa (células y tejidos de las plantas). Las plantas necesitan sustancias inorgánicas (nitrógeno, fósforo, magnesio y hierro) que reaccionan con la glucosa y forman las grasas, proteínas y ácidos nucleicos.

Tanto los animales como las plantas verdes necesitan de energía para su crecimiento y otros procesos metabólicos. Esta energía se obtiene a través de una serie de reacciones bioquímicas denominadas *respiración*. En esta serie de reacciones, la materia orgánica como los azúcares y glucosas son descompuestos a través de catalizadores (enzimas), siendo utilizada la energía liberada para generar otras reacciones en las células. La reacción se expresa en la siguiente ecuación:



### 1.2.4. El hombre como parte del ecosistema

El ambiente es un sistema dinámico, extremadamente complejo y de múltiples componentes que trasciende grandes espacios. Además del espacio físico que lo compone, en él se incluyen cuatro importantes áreas: litósfera, hidrósfera, atmósfera y biósfera (fig. 1.4).

El ambiente incluye el componente antropocéntrico, que trata de las causas y efectos provocados por el hombre para la satisfacción de sus necesidades y el logro de sus más nobles aspiraciones. El estado del ambiente depende de las influencias conjuntas de la atmósfera, clima, procesos químicos, suelos, cobertura vegetal, fauna y seres humanos (Dinis da Gama, C., 2000).

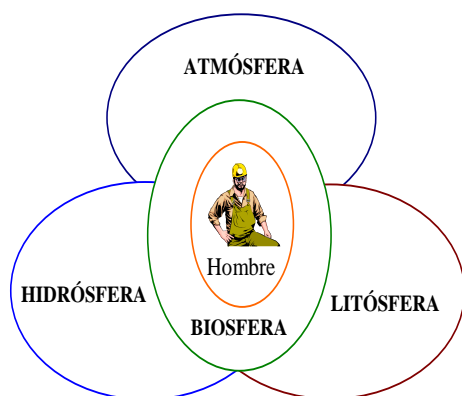


Figura 1.4 Principales componentes del ambiente en la Tierra (Dinis da Gama, C., 2000)

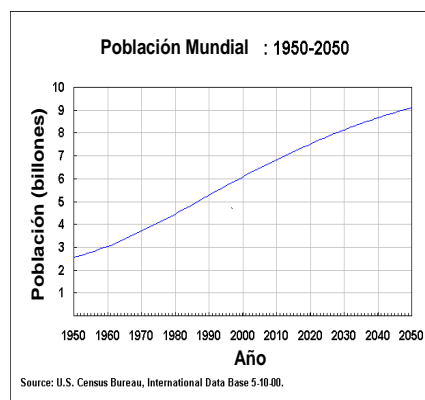


Figura 1.5 Evolución de la población mundial (www.census.gov/)

El hombre es el componente biológico más importantes dentro del ecosistema y quien además de las naturales relaciones con las plantas, animales y con los componentes físico-químicos, genera acciones relacionables (voluntarias e involuntarias) que pueden alterar el ecosistema y comprometer la sobrevivencia y fecundidad del elemento biológico, incluido el *mismo hombre*.

El desequilibrio ambiental provocado por el hombre y su crecimiento cuantitativo (fig. 1.5) genera problemas y consecuencias (fig. 1.6) que, en general, obedecen a dos causas principales:

a) La tendencia que el hombre siempre ha tenido por la mecanización, como ningún otro ser vivo, consiguiendo transformar las materias primas de que dispone, para hacerlas útiles para sí, bien sea como herramientas o máquinas, o con el objetivo de esparcimiento o arte. Durante la elaboración de todos estos materiales se forman apreciables cantidades de residuos inútiles, que con el tiempo acaban por comprometer el ambiente. Por otra parte, consume energía proveniente de otras

fuentes cuya producción también está asociada a la contaminación del ambiente. Por lo tanto, todo el proceso de *industrialización* constituye uno de los principales responsables de la contaminación ambiental.

b) La segunda causa de contaminación ambiental reside en el aumento continuo de la población (fig. 1.5) que, entre otros, implica una creciente producción de alimentos con el consiguiente uso intensivo de fertilizantes y pesticidas, que contaminan el ambiente. El crecimiento de la población, así como la mejora en las condiciones de vida, también ocasionan el incremento del efecto contaminador del alcantarillado urbano. Estos contienen, además de detritos orgánicos, restos de alimentos, jabones y detergentes, incluyendo hidratos de carbono, grasas, material proteico, fosfatos y bacterias.

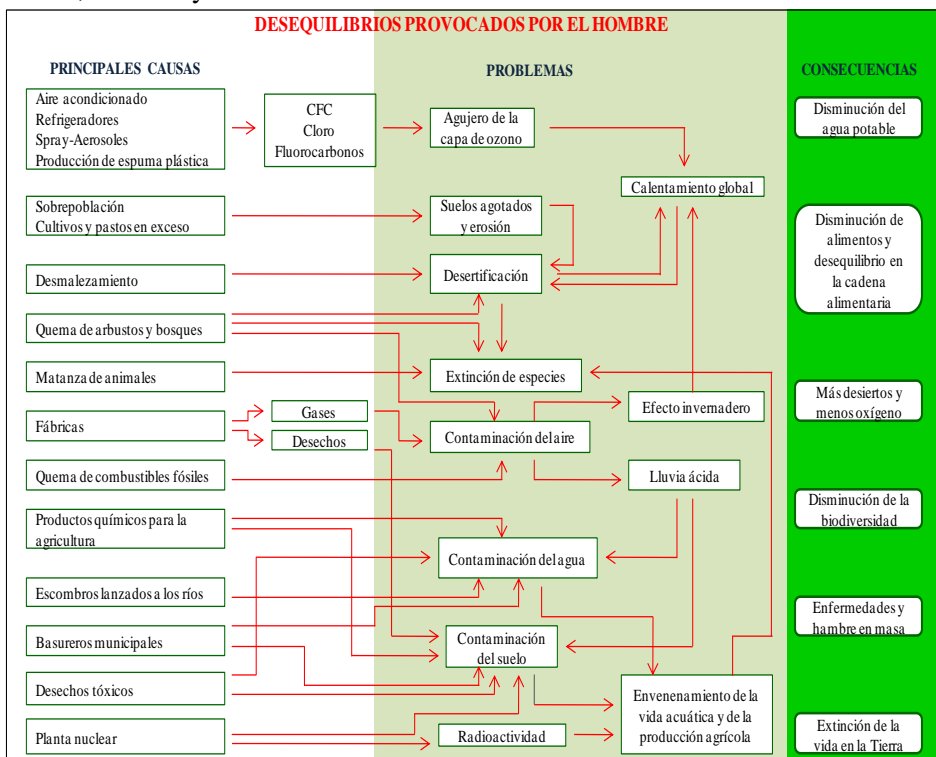


Figura 1.6 Esquema de las causas, problemas resultantes y consecuencias del desequilibrio ambiental provocado por el hombre ([www.geocities.com](http://www.geocities.com))

### 1.3. Evolución de la temática ambiental

#### 1.3.1. El ambiente en el pasado

Un resumen de la *gran* preocupación del hombre sobre el ambiente está referido por Soler, M.A., (1997) y Lamprecht, J.L., (1997), quienes hacen un análisis histórico del ambiente en los siguientes términos:

- En el siglo III antes de Cristo, Eratóstenes describió el grave problema de erosión que afectaba a la isla de Chipre a causa de la deforestación para la

- construcción de naves, la fundición del cobre y la extracción de la plata. Platón, Estrabón y Aristóteles reconocieron la disminución gradual de peces por efectos de la erosión y la sedimentación fluvial generadas por este fenómeno.
- El historiador Clive Ponting relata que en el año 312 antes de Cristo, el río Tíber estaba tan contaminado que los romanos buscaron otra fuente de agua potable. De igual modo refiere que la deforestación total en la isla de Pascua llevó al colapso de la cultura existente en esa isla.
  - En el año 1556, Georgius Agrícola en su obra *De Res Metallica*, hace referencia al efecto negativo causado por la actividad minera a los animales y al ambiente, situación esta ya conocida por los filósofos griegos.
  - Entre 1707 y 1788 Georges Louis Leclerc, conocido como el Conde Bufón, elaboró un amplio tratado relacionado con los profundos efectos provocados en la naturaleza por la acción del hombre, como la domesticación y selección artificial de animales y plantas.
  - Posterior al siglo XVII aparecen a nivel de los estados-naciones, iniciativas para regular las actividades del hombre que atentaban contra la naturaleza, como fue el caso de Francia, con la *Ordenanza Forestal* de Colbert. A estas alturas, los científicos comenzaron a definir y documentarse sobre la relación entre la contaminación industrial y ciertas enfermedades.
  - En los años 1682-1717 Bernardino Ramazzini, profesor de la Universidad de Módena y Padua, identifica la *enfermedad del ceramista*, influenciada por el plomo. También consiguió asociar las lesiones en los pulmones y en la boca de los artesanos del vidrio debido al uso del bórax y del antimonio.
  - En el siglo XIX, ya en el período industrial moderno, algunos gobiernos promulgaron leyes para proteger a la sociedad de la contaminación industrial. En 1821 el parlamento británico promulgó una ley para evitar la excesiva emisión de partículas de los hornos de las fundiciones y en 1863 promulgó una norma donde exigía a los fabricantes de los productos alcalinos utilizados en la fabricación de jabones, vidrio y telas, la eliminación del 95% del ácido clorhídrico y, para su cumplimiento, crea por primera vez una institución de control denominada *Inspectoría del Alkali*.
  - En los años 1842 a 1860 se inician los intentos de control de residuos urbanos con proyectos de alcantarillado como en Hamburgo, Chicago y Berlín.
  - En 1840-1866 el alemán Ernst Heinrich Haeckel, por primera vez utiliza el término ecología.
  - Entre 1859 y 1872, se observa un aumento de la literatura científica relacionada con los efectos negativos de la revolución industrial, siendo uno de los primeros ejemplos documentados sobre la contaminación del aire y la lluvia ácida, la obra de Robert Smith denominada *Ácido y Lluvia*.
  - Entre 1838 y 1914 el norteamericano Jhon Muir contribuye con la creación de la primera reserva natural del mundo en California.
  - En 1949 Inglaterra promulga un decreto de parques nacionales y de acceso a las campiñas.

- En el período 1890-1950 en los E.U.A se realizaron estudios ocasionales de contaminación del agua y del aire, sobresaliendo el tratado de Aguas Limítrofes con Canadá.
- Entre 1929-1933 en Europa el *Water Pollution Research Board* investigó sobre la descarga de materia orgánica al río Teeside de Inglaterra, concluyendo que generaba un descenso en la población de aves migratorias y del salmón.
- Ya en 1955, del 16 al 20 de junio, se celebró una conferencia titulada “El papel del hombre en los cambios de la faz de la Tierra” en Princeton Nueva Jersey; pero abordaron muy poco el tema de la contaminación industrial.
- En 1962 Barry Commover de los E.U.A resume sus conocidas leyes básicas de la ecología en los siguientes cuatro enunciados: 1) Todas las cosas están relacionadas con las demás; 2) Todas las cosas van a parar a algún lugar; 3) La naturaleza es sabia; 4) No hay nada que sea gratuito.
- El 2 de diciembre de 1979 se creó la Agencia de Protección Ambiental de los E.U.A (EPA). Esta agencia y otras analizan los efectos nocivos del plomo en el agua potable, los agentes contaminantes en el aire, los productos químicos tóxicos que la industria vierte al ambiente y los pesticidas que se infiltran a los acuíferos y muchos otros temas.
- En 1974 en California se establecieron organismos gubernamentales como el *Southern California Air Management District* para las tareas de control de los índices de contaminación del aire, suelos y agua.
- En 1986, 10 años antes de la elaboración de la norma ISO 14001 y 6 años antes que el Reino Unido publicara la norma BS 7750 sobre gestión ambiental, la administración de California introdujo un método de Certificación de Auditores Ambientales REA (*Registered Environmental Assessors*) (capítulo 1507, estatutos de 1986) en el Decreto de Evaluación de la Calidad.

### **1.3.2. Conciencia global del ambiente**

Años después de realizada la conferencia internacional en Princeton (Nueva Jersey), se celebra la conferencia internacional de Estocolmo (1972), que se ocupó ampliamente del ambiente, enfatizando lo referente a su uso, degradación, conservación y preservación, promoviendo una conciencia sobre un desarrollo equilibrado.

El siguiente acontecimiento histórico en el debate ambiental a escala global fue en 1987 cuando aparece el famoso informe Brundtland, fruto del trabajo realizado entre 1984 y 1987 por la *Comisión Mundial para el Ambiente y el Desarrollo*, donde se identifican las amenazas relacionadas con la capa de ozono, el cambio climático, la acidificación de los suelos, la erosión de los suelos, etc., esbozando las necesidades de conciliar el desarrollo y la naturaleza.

El informe considera la sostenibilidad del desarrollo para las generaciones futuras. Este documento sirvió de base para las negociaciones de una convención sobre el ambiente y para la convocatoria de la Conferencia de Río de Janeiro ECO/92.

En ECO/92 se acentúa la visión antropocéntrica, destacándose los aspectos socioculturales y económicos en temas como la capa de ozono, la biodiversidad, el

efecto invernadero, los recursos naturales, etc. En esta conferencia se firmaron tres acuerdos principales: La Declaración de Río, la Agenda 21 y la Convención sobre la Biodiversidad. Estos acuerdos consolidan al hombre como el centro de las preocupaciones, la responsabilidad nacional sobre los recursos naturales y el desarrollo de líneas de cooperación futura. De los tres acuerdos la *Agenda 21* fue el principal, por el hecho de abordar temas de dimensión social y económica, del desarrollo sustentable, la cooperación internacional, la pobreza, los cambios en los patrones de consumo, etc.

Puede decirse que en los últimos 28 años se han establecido acuerdos internacionales sobre la necesidad de introducir cambios en las políticas económicas de los países en las áreas de la conservación del desarrollo sostenible. Los acontecimientos más importantes se resumen en el Cuadro 1.1.

Más recientemente, casi todos los países han promulgado leyes nacionales de protección ambiental para abordar este tema de manera seria y formal, pero todavía existe el problema de su aplicación objetiva y real.

Finalizando la década de los 70, la EPA estaba consciente de la imposibilidad de controlar la industria en el caso de no poder contar con la capacidad de sanción y también de investigación. Durante la década de los 90, la EPA, la SEC (*Securities and Exchange Commission*), la OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) y la IRS (*International Revenue Service*), comparten los recursos de la administración para identificar y sancionar a las empresas que no cumplieren con las leyes consideradas críticas.

Las dos décadas de la política de *comando y control* causaron cierto resentimiento en la mayoría de los sectores y de los empresarios industriales, por lo que la EPA abandonó este concepto en 1989, acogiéndose el nuevo concepto de *reducción en la fuente de la contaminación*, mediante programas de prevención.

Otro cambio, resultado de la experiencia de la EPA y del Proyecto denominado XL (Excelencia y Liderazgo), es el de que cada empresa desarrolle sus propios métodos para mejorar el ambiente. Este proyecto tiene aspectos en común con la norma internacional ISO 14001.

Basado en las recomendaciones hechas en el informe Brundtland, muchos países trataron de conformar un “movimiento verde” (E.U.A., Dinamarca, Alemania, Holanda, Noruega, Suecia y Suiza) mediante la implantación del denominado *Plan Verde*. En vez de leyes aisladas que enfrentaban los problemas uno por uno, estos países unieron los esfuerzos de sus ministerios y agencias para mejorar la calidad del ambiente. Un buen ejemplo es el Plan Nacional Holandés sobre política ambiental, que considera que no es posible realizar una política nacional ambiental sin la existencia de una política de alcance mundial (NEPPI y NEPP2).

Cuadro 1.1 Acontecimientos mas importantes relacionados con la conciencia global del ambiente

Año	Acontecimientos
1955	Primera Conferencia Internacional sobre “El papel del hombre en los cambios de la faz de la Tierra”. Princeton, Nueva Jersey
1972	Se celebra en Estocolmo la primera Conferencia Internacional sobre el Ambiente, patrocinado por la ONU
1972	El Club de Roma presenta su controvertido informe con aspectos apocalípticos, titulado: Los límites del crecimiento (The Limits of Growth)
1980	El Informe Mundial 2000, se publica durante el mandato del presidente Carter. El informe tuvo buena aceptación a nivel internacional
1987	El Protocolo de Ozono de Montreal aborda el tema de la capa de ozono.
1987	La Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, presidida por el Primer ministro de Noruega, Gro Harlem Brundtland, publica “Nuestro futuro común” donde se da a conocer el término de desarrollo sostenible (DS)
1989	Holanda publica el primer Plan Nacional de Política Ambiental (NEPP) conocido como el Plan Verde. Le siguen Canadá y Nueva Zelandia en un plazo inferior a dos años
1992	Se celebra la Conferencia de Medio Ambiente y Desarrollo, patrocinado por la ONU conocida como la Cumbre de Río. La Agenda 21 proclama el DS
1992	El Consejo Empresarial para el DS de Stephan Schmidheing publica Cambiando el Rumbo: una perspectiva del ámbito mundial para el desarrollo del medio ambiente (Changing course: a Global Business Perspective on Development and the Environment)
1996	Se publica la norma ISO 14001 para la gestión ambiental.
1997	Se aprueba el Protocolo de Kioto, estableciendo como meta reducir las emisiones de gases contaminantes de los países industrializados en 5,2%, sobre los niveles existentes en 1990 antes de 2012
2002	Los Estados-Miembros de la Unión Europea aprueban reducir, en conjunto, sus emisiones de gases con efecto invernadero en 8%, entre 2008 y 2012
2002	Se celebra la Conferencia sobre DS en Johannesburgo, resultando dos documentos: una declaración política, que expresa los compromisos de los países y el rumbo para el DS; y el otro sobre el plan de acción, que establece metas y acciones de forma de guiar esta implementación

Por último, la norma de la Organización Internacional de Normalización (ISO), con la reciente aparición de la familia de normas para los sistemas de gestión ambiental conocida como ISO 14001, tiene la característica de ser una norma de nivel internacional.

Del 1º al 10 de diciembre de 1997 se realizó en Kioto, Japón, la III Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, con el objetivo de luchar contra las alteraciones climáticas a través de una acción internacional de reducción de las emisiones de determinados gases con efecto invernadero, responsables del calentamiento global. El Protocolo de Kioto señala las emisiones de seis gases: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Según el protocolo (Anexo I) las partes se



comprometen a reducir sus emisiones de gases con efecto invernadero por lo menos en un 5% con relación a los niveles de 1990 durante el período 2008-2012.

En la Unión Europea se tomó la decisión 2002/358/CE del Consejo, relativa a la aprobación del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático y el cumplimiento conjunto de los respectivos compromisos, en el sentido de que los Estados-Miembros de la Unión tienen que reducir, en conjunto, sus emisiones de gases con efecto invernadero en un 8% entre 2008 y 2012 (<http://europa.eu.int/scadplus/leg/>).

## **1.4. Desarrollo sustentable**

### ***1.4.1. Conceptos sobre desarrollo sustentable***

El concepto de *desarrollo sustentable* es conocido desde 1987, cuando la Comisión de Comercio Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo publicó el trabajo *Our Common Future* (Nuestro Futuro Común) conocido como el informe Brundtland, cuya conclusión considera que los grandes problemas ambientales deben ser abordados con el desarrollo sustentable.

El documento *Cuidar la Tierra – Una estrategia para vivir de manera sustentable* publicado en 1991 por la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), señala que la humanidad necesita vivir cuidando los límites de la capacidad de carga de la Tierra y afirma que existe un gran riesgo de degradación ambiental por las acciones de desarrollo que el propio hombre realiza, por lo que si no se utilizan los recursos de la Tierra de modo sustentable y prudente se hipotecará el futuro de las personas.

La WCED (Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo) define desarrollo sustentable como aquel desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras.

La conferencia Cumbre de Río de Janeiro realizada en 1992, en su primer principio proclama que los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sustentable. Todos tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza. Indica también que el derecho al desarrollo debe ser de forma que responda equitativamente a las necesidades ambientales y del desarrollo de las generaciones presentes y futuras.

### ***1.4.2. Principios del desarrollo sustentable en la Agenda 21***

Según Sands, P., (1995) el concepto de desarrollo sustentable se identifica con el principio de la igualdad de las generaciones y los principios que establecen el uso equitativo y sustentable de los recursos naturales.

Brow, W.E., (1989) afirma que el principio del desarrollo sustentable consiste en la obligación de conservar la diversidad natural y cultural de los recursos con el fin de no restringir las opciones de las generaciones futuras.

La Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo (WCED) indica que el principio de la vida sustentable está en el establecimiento de una *ética* basada en el respeto y la consideración para todos y cada uno de nosotros con la Tierra. El desarrollo no se puede conseguir comprometiendo las generaciones futuras, ni debe constituir una dificultad para la supervivencia de otras especies.

Asimismo, los principios de uso equitativo y sustentable implican el objetivo de la explotación de los recursos naturales de manera *prudente, racional y/o apropiada*. En otra óptica, el principio del desarrollo sustentable está referido al establecimiento de estándares para el uso y explotación de los recursos naturales. Se trata por lo tanto, de garantizar la óptima utilización de los recursos, sin comprometer la capacidad del planeta de generar recursos renovables y sin poner en peligro el agotamiento de los recursos no renovables.

La *Agenda 21*, documento de la Conferencia de Naciones Unidas para el Ambiente y el Desarrollo del año 1992, define las acciones a realizar en la última década del siglo XX (que ya pasó), y las primeras del siglo XXI (que se está iniciando), agrupadas en las cuatro secciones siguientes:

*Sección I:* define las acciones de *cooperación internacional*, de la integración de los procesos de decisión, de las exigencias ambientales en el tema del desarrollo, de la lucha contra la *pobreza* y de la protección de la *salud*.

*Sección II:* define las acciones necesarias para la *protección y uso sustentable* de los recursos naturales, considerando varios aspectos: atmósfera, deforestación, aguas, gestión de residuos, etc.

*Sección III:* identifica los grupos de *actores implicados* y el papel que tienen en la implementación de la Agenda: mujeres, niños, jóvenes, pueblos indígenas, ONG, autoridades locales, miembros de la comunidad científica, etc.

*Sección IV:* considera los medios para garantizar la aplicación de la Agenda 21, relacionados con los recursos y mecanismos financieros, transferencia de tecnología, educación, participación pública, etc.

La Agenda 21 se pronuncia en el sentido de que *la humanidad de hoy tiene la capacidad de desarrollarse de manera sustentable, siendo sin embargo necesario garantizar las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades* y señala que eso será posible con un desarrollo sustentable (DS), definido como el equilibrio entre la tecnología y el ambiente con la participación consciente de los grupos sociales en la búsqueda de la equidad y la justicia.

El DS tiene seis aspectos prioritarios entendidos como metas (Mendes, M.C., 2002, [www.educar.sc.usp.br](http://www.educar.sc.usp.br)):

- La satisfacción de las necesidades básicas de la población (educación, alimentación, salud, esparcimiento, etc);
- La solidaridad para con las generaciones futuras (preservar el ambiente de modo que ellas también tengan oportunidad de vivir);
- La participación de la población (todos deben tomar conciencia sobre la necesidad de conservar el ambiente y hacer cada uno la parte que le corresponde para ello);
- La preservación de los recursos naturales (agua, oxígeno, suelos, etc);
- La creación de un sistema social que garantice el empleo, la seguridad social y el respeto a otras culturas (erradicación de la miseria, del prejuicio y la matanza de las poblaciones oprimidas, como por ejemplo los indígenas);
- La efectividad de los programas educativos.

En la tentativa de alcanzar el DS la educación ambiental es parte vital e indispensable, porque es la manera más directa y funcional de alcanzar por lo menos una de las metas que es la participación de la población.

### 1.5. El suelo y los impactos ambientales

Para el objetivo del presente libro, es indispensable tomar como base los conceptos y experiencias de gestión ambiental desarrollados hasta el momento; por lo tanto, a continuación se presenta una breve revisión del tema, iniciándose con lo relacionado con los suelos y posteriormente con los problemas ambientales en la atmósfera y el agua.

#### 1.5.1. Condición y calidad natural de la litósfera

La parte superior del sustrato rocoso de la Tierra, tiene en promedio una fracción sólida de 50% (45% minerales y 5% materia orgánica) y un espacio poroso de 50% (agua y aire).

El movimiento del aire y la humedad originan la lixiviación y el escurrimiento superficial, que constituyen una acción potencial para la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

La textura de los suelos es una importante *propiedad física* que está relacionada con la conductividad hidráulica y la capacidad de retención de agua. Así, una textura gruesa permite *mayor* conductividad hidráulica y *menor* capacidad de retención de agua. Otra propiedad de los suelos, también importante, es la cantidad de poros (Kiely, G., 1999).

Las *propiedades químicas* de los suelos son importantes debido a que contienen nutrientes, y de no estar disponibles en las plantas no existe amenaza para la calidad ambiental, en tanto que si están disponibles son un potencial para la contaminación. Por eso, la capacidad de intercambio de cationes y aniones es particularmente importante. Los Cuadros 1.2 y 1.3 presentan la composición elemental y mineralógica del suelo natural.

Los cuadros muestran que el mayor predominio elemental es de *oxígeno* y *silice*, que en conjunto alcanzan el *80% del total*, y ocurren formando minerales con predominio de Si-O. Los principales minerales son cuarzo, mica, anfibolita, piroxena y olivina, que tienen su origen en la roca madre.

Cuadro 1.2 Componentes elementales más importantes del suelo y la corteza terrestre (adaptado de Kiely, G., 1999 y de Sposito, 1989)

Elemento	Suelo (mg/kg)	Corteza (mg/kg)	Elemento	Suelo (mg/kg)	Corteza (mg/kg)
O	490000	474000	K/Na	15000	23000
Si	310000	277000	Na/K	12000	21000
Al	72000	82000	Mg/Ti	9000	5600
Fe	26000	41000	Ti/P	2900	1000
C/Ca	25000	41000	S/Mn	1600	950
Ca/Mg	24000	23000	F/C	950	480

Cuadro 1.3 Componentes mineralógicos mas importantes del suelo  
(adaptado por Kiely 1999, de Sposito 1989)

Nombre	Fórmula química	Nombre	Fórmula química
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Feldespato	(NaK)AlO <sub>2</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>
Mica	K <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> Al <sub>4</sub> (OH) <sub>4</sub>	Piroxena	(Ca,Mg,Fe,Ti,AlSi,Al)O <sub>3</sub>
Anfibolita	((Si, Al) <sub>4-11</sub> ) <sub>2</sub>	Epídoto	Ca <sub>2</sub> (Al,Fe) <sub>3</sub> (OH)Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>
Olivina	(Mg, Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Turmalina	NaMg <sub>3</sub> Al <sub>6</sub> B <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>27</sub> (OH,F) <sub>4</sub>

El aire presente en el suelo tiene una composición similar al aire atmosférico; pero puede variar en ciertas condiciones, como por ejemplo el aire atmosférico tiene una concentración de O<sub>2</sub> de 209000 ppm y el aire del suelo apenas está cercano a los 20000 ppm; el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico son unos 300 ppm y en el suelo varía de 3000 a 30000 ppm. El agua no es pura porque contiene minerales disueltos, coloides y suspensiones.

Entre la fase sólida y la líquida del suelo existe una fase coloidal donde hay intercambio de cationes/aniones. La fase coloidal generalmente posee carga negativa por lo que retiene los cationes en la lámina de agua, y esta retención disminuye la pérdida de cationes (por ejemplo Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>), que pueden intercambiar con otros iones por procesos naturales o artificiales (riego, fertilización, etc.). Así, una solución de sulfato de amonio puede producir una ampliación del sulfato de calcio, donde el catión dominante NH<sup>4+</sup> cambia a Ca<sup>2+</sup>, hecho que influencia el pH del suelo. Según Sposito, 1989, el intercambio de Mg<sup>2+</sup> por Ca<sup>2+</sup> está representado por CaCO<sub>3</sub>(s) + Mg<sup>2+</sup> (ac) = MgCO<sub>2</sub>(s) + Ca<sup>2+</sup> (ac). La salinidad se determina por la conductividad eléctrica (suelo salino > 4000 μS/cm), donde μS representa microsiemens.

### 1.5.2. Alteraciones e impacto ambiental

A nivel general el impacto ambiental producido en el suelo está asociado a los siguientes aspectos: a) Destrucción directa del suelo; b) Contaminación del suelo; c) Alteración morfológica; d) Pérdida de recursos minerales y rocas industriales; e) Modificaciones debido a la erosión y desertificación (fig. 1.7); f) Alteraciones en la estabilidad de taludes; g) Subsistencia; h) Alteración en la sedimentación; i) Alteración en la dinámica de lechos y zonas de inundación; j) Sismicidad inducida y vibraciones; k) Alteraciones en la calidad e impacto visual. Cada uno de estos factores que ocasionan impactos ambientales merece estudios específicos, como ejemplo se muestra el Cuadro 1.4 relativo a la erosión del suelo.

Cuadro 1.4 Contaminación e impacto ambiental del suelo/tierra  
(basado en Conesa, V., 1997)

Agente contaminador	Fuente de contaminación	Impacto sobre el medio	Medidas preventivas y correctivas
<p>-El clima: intensidad y frecuencia de las precipitaciones y su distribución en un área definida.</p> <p>Intensidad y régimen de vientos y temperatura.</p> <p>-El suelo: tipos, textura y estructura, litología o composición mineralógica.</p> <p>-Geomorfología: forma y textura del relieve, topografía</p> <p>-Vegetación: configuración y clases de vegetación, calidad y cantidad.</p> <p>-Otros: geología, hidrología, derrumbes, salinización, fuego, etc.</p>	<p>- La industria y las actividades consumen energías fósiles que producen un incremento de la energía en la atmósfera por contaminación térmica.</p> <p>-La industria y las actividades queman gas natural, petróleo y los bosques, aumentando el anhídrido carbónico que se incorpora al ciclo de carbono. El CO<sub>2</sub> al ser emitido al exterior frena la salida de energía generando calentamiento que modifica las precipitaciones que provocan aridez y erosión.</p> <p>-La explotación minera, al destruir los bosques y alterar la superficie mediante el movimiento de tierra provoca la erosión.</p> <p>-El pastoreo y la agricultura en laderas.</p>	<p>-Erosión hídrica expresada en: selección de partículas de suelo por erosión laminar, aumento de la erosión en surcos y cárcavas, deslizamientos de lodo por la gran cantidad de agua en el suelo, deslizamientos superficiales y profundos por efecto de la presencia de capas de suelo saturadas de agua.</p> <p>-Intensificación de la erosión eólica, obstrucción de canales de agua, cauces y daños en la superficie de edificios y otros.</p> <p>-Desertificación de suelos en zonas áridas y semiáridas.</p> <p>-Impacto visual.</p>	<p>-Al planificar o proyectar, considerar los niveles de tolerancia, controlando así:</p> <p>.Tipo de cobertura vegetal;</p> <p>.Porcentaje de cobertura herbácea y grado de consolidación.</p> <p>.Forma topográfica del cultivo;</p> <p>-Métodos basados en la vegetación y tipo de cultivo.</p> <p>-Gestión adecuada del ganado, evitando el sobrepastoreo.</p> <p>-Métodos mecánicos como: técnicas de cultivos con riego localizado, virutas de madera, sembradoras, etc.</p> <p>.Terrazas en canales, con colectores y taludes con césped.</p> <p>Desvíos para evacuación de agua, etc.</p>



Figura 1.7 Erosión por la acción de la explotación minera (izquierda) y la desertificación eólica (derecha)

La predicción del promedio anual de la pérdida de suelos causada por la erosión laminar denominada USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos), no adecuada para calcular los acontecimientos fluviométricos específicos (Mark, N., 1996) está dada por:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

donde, *A* es la pérdida de suelo (t/ha.año), *R* es el *factor* de erosividad de la lluvia, *K* es el *factor* de erodabilidad del suelo, *L* es el *factor* de longitud de la pendiente basado en sus valores, *S* es el *factor* de declividad basado en los valores en porcentajes, *C* es el *factor* de uso y manejo, y *P* es el *factor* de prácticas conservacionistas.

La mayor parte del mundo sufre con la desertificación, con el deterioro de los suelos, la vegetación y las aguas (Cuadro 1.5).

Cuadro 1.5 Áreas afectadas por la desertificación  
(UNEP, 1991, www.desert.org.br)

Áreas degradadas	Km <sup>2</sup>	% del total de tierras secas
Por la irrigación	430000	0,8
Por la agricultura de secano	2160000	4,1
Por la ganadería (suelos y vegetación)	7570000	14,6
Por el hombre (1+2+3)	10160000	19,5
Por el pastoreo	25760000	50,0
Total de áreas degradadas (4+5)	35920000	69,0

Las regiones áridas y secas ocupan más del 37% de toda la superficie del planeta, albergando más de 1 billón de personas, o sea, 1/6 de la población mundial, cuyos principales indicadores son los bajos niveles de ingresos, bajos estándares tecnológicos, bajo nivel de escolaridad e ingesta de proteínas por debajo de los niveles aceptables de la OMS (Organización Mundial de la Salud). A pesar de todas estas restricciones, las tierras áridas son responsables por más del 22% de toda la producción mundial de alimentos y en el pasado fueron la cuna de grandes imperios y civilizaciones, como el de Egipto, Persia, China e India.

Los datos del ISRIC (*International Soil Reference and Information Centre*), concluyen que el 19,5% de las regiones áridas del mundo estarían sufriendo algún tipo de degradación.

Un problema ambiental relacionado a los suelos es la subsidencia provocada por la explotación minera subterránea (fig. 1.8 izquierda) y la degradación por el procesamiento de los productos mineros (fig. 1.8 derecha).



Figura 1.8 Impacto paisajístico debido a la subsidencia y procesamiento de minerales en las operaciones mineras (www.folhadomeioambiente.com.br)

### 1.6. El agua y la contaminación

El agua es uno de los elementos de mayor importancia para todas las formas de vida en la Tierra. Está presente en todos los organismos vivos, siendo parte de una infinidad de sustancias y organismos. Además, transporta diversos compuestos nutritivos dentro del suelo, ayuda a controlar la temperatura de la atmósfera y ofrece una serie de funciones de valor extremo.

Las principales fuentes de contaminación de las aguas son los residuos, sean ellos agrícolas (de naturaleza química u orgánica), las aguas residuales, los residuos industriales, la basura y los sedimentos provenientes de la erosión. La contaminación de las aguas se presenta de varias maneras, incluyendo la contaminación térmica, que es la descarga de efluentes a altas temperaturas, la contaminación física, que es la descarga de material en suspensión, la contaminación biológica, que es la descarga de bacterias patógenas y virus, y la contaminación química, que puede ocurrir por deficiencia de oxígeno, toxicidad y eutrofización.

La *eutrofización* es ocasionada por procesos de erosión y descomposición que aumentan el contenido de nutrientes, lo que aumenta la *productividad biológica*, permitiendo la proliferación periódica de algas, que tornan el agua turbia, lo que puede causar deficiencias de oxígeno por su putrefacción, aumentando la toxicidad para los organismos que en ella viven (como los peces, que aparecen muertos junto a espumas tóxicas).

En la naturaleza existen aguas superficiales (ríos, lagos, mares y océanos) y subterráneas. Más del 97% del agua dulce disponible en el planeta para uso humano es la subterránea. En muchas partes del planeta el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento para uso doméstico, agrícola e industrial. Más de 1,5 billones de habitantes de áreas urbanas se abastecen de aguas subterráneas.

### 1.6.1. Propiedades y cualidades naturales

#### 1.6.1.1. Propiedades físicas

Son de dos tipos: *estandarizadas* (peso molecular, densidad, punto de fusión, punto de ebullición, etc.), y las que presentan *una amplia variación* (Barnes, D., *et al.*, 1986) como son las que se describen a continuación:

- *Color*: producido por el mineral disuelto o ácido fúmico de las plantas y se mide en mg/litro de platino, en las aguas de los ríos oscila entre 5 y 200 mg/litro.
- *Turbidez*: causada por la materia en suspensión, se mide en mg/litro de SiO<sub>2</sub>, en las aguas de los ríos oscila de 2 a 200 mg/litro.
- *Olor*: es inodora cuando está limpia (destilada). El H<sub>2</sub>S torna el agua con mal olor. Se mide al diluir una muestra de agua sin olor (valor 1) hasta detectar olores perceptibles.
- *Sabor*: varía en presencia de microorganismos, algas o sales, como Ca<sub>2</sub><sup>+</sup>, Mg<sub>2</sub><sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>.
- *Temperatura*: cuando esta propiedad aumenta reduce la cantidad de oxígeno pudiendo presentar estratificaciones en profundidad.
- *Sólidos presentes*: son de origen orgánico e inorgánico. La cantidad, tamaño y tipo de sólidos está en función del tipo de agua. Los sólidos se determinan en función de: *sólidos totales* (ST) que es el residuo que queda después de la evaporación a una temperatura de 105 °C, *sólidos en suspensión* o no filtrados (SS) con tamaño de 10<sup>-3</sup> a 1 mm, *sólidos totales disueltos* (STD) que es la diferencia de ST-SS, con tamaños de 10<sup>-3</sup> a 10<sup>-9</sup> mm, *sólidos totales volátiles* (STV) que son una fracción orgánica e inorgánica gasificada a 550 °C, siendo el restante no volátil o *sólidos fijos en suspensión* y finalmente *sólidos coloidales* cuyo tamaño es de 10<sup>-3</sup> a 10<sup>-6</sup> mm.

#### 1.6.1.2. Propiedades químicas

a) *Propiedades químicas de las sustancias inorgánicas de las aguas*, se relacionan con las propiedades específicas (Ca<sub>2</sub><sup>+</sup> y Mg<sub>2</sub><sup>+</sup>) o los metales (Pb, Cu, Zn, Sn, Hg) y las propiedades generales (alcalinidad, dureza, conductividad eléctrica, acidez, etc.).

Las *especies iónicas* principales de algunas aguas naturales se indican en el Cuadro 1.6. Las especies iónicas secundarias son: Al<sup>3+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, As<sup>+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, BO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, F<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, S<sup>2-</sup> y SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.



Cuadro 1.6 Especies iónicas principales en aguas naturales  
(basado en Kiely, G., 1999)

Grupo iónico	Ión constituyente	Concentraciones (mg/litro)			
		Agua de lluvia	Agua de río, promedio mundial	Agua Subterránea, Dayton Ohio	Agua de mar
Cationes	Calcio $\text{Ca}^{2+}$	0,09	1,5	92	400
	Magnesio $\text{Mg}^{2+}$	0,27	4,1	34	1350
	Sodio $\text{Na}^+$	1,98	6,3	8,2	10500
	Potasio $\text{K}^+$	0,30	2,3	1,4	380
Aniones	Bicarbonato $\text{HCO}_3^-$	0,12	58,4	339	142
	Sulfato $\text{SO}_4^{2-}$	0,58	11,2	84	2700
	Cloruro $\text{Cl}^-$	3,79	7,8	9,6	19000
	Nitrato $\text{NO}_3^-$	-	1,0	13	-
	STD	7,13	120	434	34500
Características generales	Dureza total	-	56	369	-
	PH como $\text{CaCO}_3$	5,7	-	-	-

Las propiedades generales que determinan la calidad de las aguas son: pH, alcalinidad y acidez, dureza y conductividad.

El *pH* es el logaritmo decimal negativo (base 10) de la concentración del ión hidrógeno y sin dimensión, o sea:  $\text{pH} = -\text{Log}(\text{H}^+)$ . El agua se disocia muy poco en  $\text{H}^+$  (ión hidrógeno) y en  $\text{OH}^-$  (ión hidróxilo). Cuando no hay presencia de sustancias extrañas en el agua (agua destilada) la concentración resulta  $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-]$  y en el caso de electroneutralidad  $\Sigma\text{cationes} = \Sigma\text{aniones}$ ; por lo tanto, la definición de *neutralidad para el agua es  $\text{pH} = 7 = \text{pOH}$* .

*La acidez implica un  $\text{pH} < 7$  y la basicidad implica un  $\text{pH} > 7$  (fig. 1.9).*

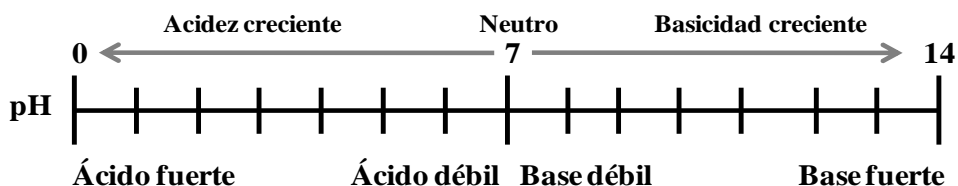


Figura 1.9 La escala del pH del agua

El pH aceptable para el tratamiento de las aguas residuales es de 6 a 8. El aumento de alúmina como coagulante reduce el pH, lo cual puede ser requerido para la corrección con el uso de la cal ( $\text{CaCO}_3$ ). Para fines ambientales el Cuadro 1.7 refiere los valores típicos expresados en  $\text{CaCO}_3/\text{litro}$ , que es el resultado de la medición volumétrica con  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{N}/50$ .

Cuadro 1.7 Valores típicos de la alcalinidad del agua (Kiely, G., 1999)

Uso	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /l)	Uso	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /l)
Aguas arriba (piedra caliza)	50 - 200	Água con lodo anaerobio	2000 - 8000
Lago en marea baja	10 - 30	Corriente de agua ácida	10 - 20
Água potable	50 - 200	Corriente no ácida	750
Água residual doméstica	200 - 400	Água de suelo ácido	10 - 20

La *alcalinidad* es la capacidad del agua para aceptar los iones H<sup>+</sup> o la capacidad de desneutralización de la base. Stumm y Morgan en 1981 lo definieron como  $[Alc] = [OH^-] + 2[CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] - [H^+]$ .

La *dureza* es normalmente la suma de los cationes metálicos bivalentes Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, siendo considerada para el agua potable y no para el agua residual, y se expresa en mg/litro de CaCO<sub>3</sub> o en meq/litro. Los iones responsables de la dureza son: Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Si<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. El Cuadro 1.8 presenta la dureza relativa de las aguas.

Cuadro 1.8 Dureza relativa de las aguas

Dureza	meq/l	mg/l como CaCO <sub>3</sub>	Dureza	meq/l	mg/l como CaCO <sub>3</sub>
Blanda	<1	0 - 75	Dura	3 - 6	150 - 300
Moderada	1 - 3	75 - 150	Muy dura	> 6	> 300

La *conductividad* es la capacidad de la solución de transportar una corriente eléctrica, mediante el movimiento de iones, de manera que cuanto *mayor* es el número de iones (mayor concentración de sales) *mayor* es la movilidad iónica y consecuentemente *mayor* es la conductividad. En el Cuadro 1.9 se puede observar la conductividad para diferentes tipos de aguas. Como este parámetro no está relacionado con la salud, los E.U.A establece un límite superior de 1500 µS/cm (µS es microsiemens).

Cuadro 1.9 Valores típicos de conductividad para diferentes aguas

Agua	Conductividad (µS/cm)	Agua	Conductividad (µS/cm)
Químicamente pura	0,05	Agua dura	200 - 500
Destilada	0,1 - 4	Agua de ríos	100 - 1000
Agua de lluvia	20 - 100	Aguas subterráneas	200 - 1500
Agua blanda	40 - 150	Agua de estuario	200 - 2000

b) *Propiedades químicas de las sustancias orgánicas del agua*, corresponden a los componentes orgánicos cuya presencia en el agua constituyen contaminantes de origen natural o sintético. Los componentes sintéticos son producidos por la industria química, petrolera o agrícola, tales como: pesticidas, productos agroquímicos, productos tensoactivos (emulsiones, espumantes, etc.), hidrocarburos halógenos (cloroformo, bromoformo, etc.). Los componentes naturales pueden ser: proteínas (bacterias C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>), lípidos (grasas, parafinas, aceites e hidrocarburos),

hidratos de carbono (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> glucosa, celulosa, almidón) y pigmentos vegetales (clorofila, etc.).

c) *La solubilidad de los sólidos* ocurre por el proceso de disolución o precipitación. Por ejemplo: 1) La eliminación por precipitación del fósforo usando un elemento férrico; 2) Algunos gases (O, N, Ca<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) se disuelven en contacto con el agua, por lo que las aguas expuestas a la atmósfera pueden contener estos gases; 3) La saturación de O<sub>2</sub> en algunas aguas a temperatura de 20 °C es de 7,5 mg/litro, lo que equivale al 80% de saturación. Para la pesca es necesario un nivel de oxígeno por encima de 3 mg/litro.

d) *El sistema carbonatado*, está siempre presente en el ambiente y normalmente en el agua. Las especies químicas inorgánicas que son originadas por los minerales (Ca<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y en la atmósfera (CO<sub>2</sub>) se pueden disolver en agua y producir un impacto sobre el pH, la alcalinidad y la capacidad de desagüe de las aguas. Por ejemplo HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>2</sub><sup>3-</sup> y OH<sup>-</sup> se oponen al cambio de pH al aumentar su fortaleza ácida como HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Las *aguas subterráneas* en zonas con formaciones de rocas calcáreas son duras debido a la alta concentración de calcio, magnesio y carbonatos, y en formaciones volcánicas y de areniscas son blandas. En el Cuadro 1.10 se muestra la composición química de algunas aguas.

Cuadro 1.10 Química del agua subterránea – Irlanda (Kiely, G., 1999; Daly, D., 1994, analizada en *Irish Geological Survey State Laboratory*)

Parámetro (mg/litro)	Emplazamiento del pozo				
	Gorey Wexford	Knocktopher Kilkenny	Ballaghareen Roscommon	Ballencurry Tipperary	Mortarstown Carlow
Sólidos totales disp	92	280	360	283	500
Dureza tot en CaCO <sub>3</sub>	60	185	307	225	320
Alcalinidad como	18	184	295	237	304
CaCO <sub>3</sub>	80	54	102	60	118
Calcio	9,7	1\2,2	12,9	13,4	6,3
Magnesio	24	16	8,8	18,8	12
Sodio	3,1	1,9	3	1,3	0,6
Potasio	35	20	26	17	22
Cloruro	45	Nada	Nada	2	2
Sulfato	0,5	3,0	0,9	1,4	2,8
Nitrato como N	0,1	0,01	0,05	0,04	0,04
Amonio libre y sal N	-	0,01	0,08	-	0,01
Amonio albúmina N	0,1	Nada	Nada	Nada	Nada
Hierro	Nada	Nada	Nada	0,01	Nada
Manganeso	Nada	Nada	Nada	0,01	Nada

Las aguas subterráneas tienden a ser más ricas en sales disueltas que las aguas superficiales. Las cantidades presentes reflejan no solamente los sustratos rocosos por donde fluyen sino también están en función del comportamiento geoquímico de los compuestos químicos involucrados.

Como existen variaciones sensibles en la composición química de las rocas, es de esperar la existencia de una cierta relación entre la composición del agua y de las rocas predominantes en el área (Cuadro 1.11). De esta forma el sodio y el potasio, dos elementos que ocurren en concentraciones muy próximas en la corteza

continental participan en cantidades sensiblemente diferentes en las aguas subterráneas.

El olor y el sabor del agua (Cuadro 1.12) dependen de las sales y gases disueltos. En general, las aguas subterráneas están desprovistas de olor. Algunas fuentes termales pueden exhalar olor de huevo podrido debido a su contenido de H<sub>2</sub>S (gas sulfídrico). Del mismo modo, las aguas con presencia de materia orgánica en descomposición (hierbas por ejemplo) pueden presentar H<sub>2</sub>S.

El hierro en contacto con el oxígeno del aire se precipita y se torna de color rojo a castaño y el sabor del agua es metálico.

Cuadro 1.11 Composición media de la corteza continental  
(www.meioambiente.pro.br)

Compuesto	Composición	Elemento	Composición
SiO <sub>2</sub>	61,9 %	Bario (Ba)	425 mg/L
TiO <sub>2</sub>	0,8 %	Estroncio (Sr)	375 mg/L
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,6 %	Zirconio (Zr)	165 mg/L
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6 %	Cobre (Cu)	55 mg/L
FeO	3,9 %	Escandio (Sc)	22 mg/L
MnO	0,1 %	Plomo (Pb)	12,5 mg/L
MgO	3,1 %	Uranio (U)	2,7 mg/L
CaO	5,7 %	Mercurio (Hg)	0,08 mg/L
Na <sub>2</sub> O	3,1 %	Plata (Ag)	0,07 mg/L
K <sub>2</sub> O	2,9 %	Oro (Au)	0,004 mg/L
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3 %		

Cuadro 1.12 Sabor de las aguas subterráneas por la influencia de sales y gases disueltos

Composición	Sabor
Cloruro de Sodio (NaCl)	Salado
Sulfato de Sodio (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Ligeramente salado
Bicarbonato de Sodio (NaHCO <sub>3</sub> )	Ligeramente salado a dulce
Carbonato de Sodio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	Amargo y salado
Cloruro de Calcio (CaCl <sub>2</sub> )	Fuertemente amargo
Sulfato de Calcio (CaSO <sub>4</sub> )	Ligeramente amargo
Sulfato de Magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	Ligeramente amargo en saturación
Cloruro de Magnesio (MgCl <sub>2</sub> )	Amargo y dulce
Gas Carbónico (CO <sub>2</sub> )	Astringente, picante

El sulfuro de hidrógeno es un gas con olor a huevo podrido, y existe en aguas desoxigenadas de las rocas como las arcillas negras, la roca calcárea con piritita o depósitos de sal.

Algunos contribuyentes de las industrias en la contaminación de las aguas subterráneas son:

*Pesticidas* que pueden ser de uso agrícola o no. Los E.U.A considera como estándar una concentración máxima de 0,1 µg/litro para pesticidas individuales y de 5 µg/litro para pesticidas totales.

*Disolventes industriales* son degradantes de las grasas lubricantes en las industrias de metal, eléctrica, química, papel, pieles, etc. (percloroetileno, tricloroetileno, cloruro de metileno, etc.).

*Aceites minerales refinados* como la gasolina, gasóleo, etc., en el caso de E.U.A el límite máximo permisible es cercano a los 10 µg/litro.

Las principales causas de la contaminación de las aguas subterráneas ocasionadas por la actividad humana se pueden agrupar en cuatro grupos, dependiendo de la actividad humana que la origina (fig. 1.10): contaminación urbana y doméstica, contaminación agrícola, contaminación industrial y contaminación inducida por las aguas residuales.

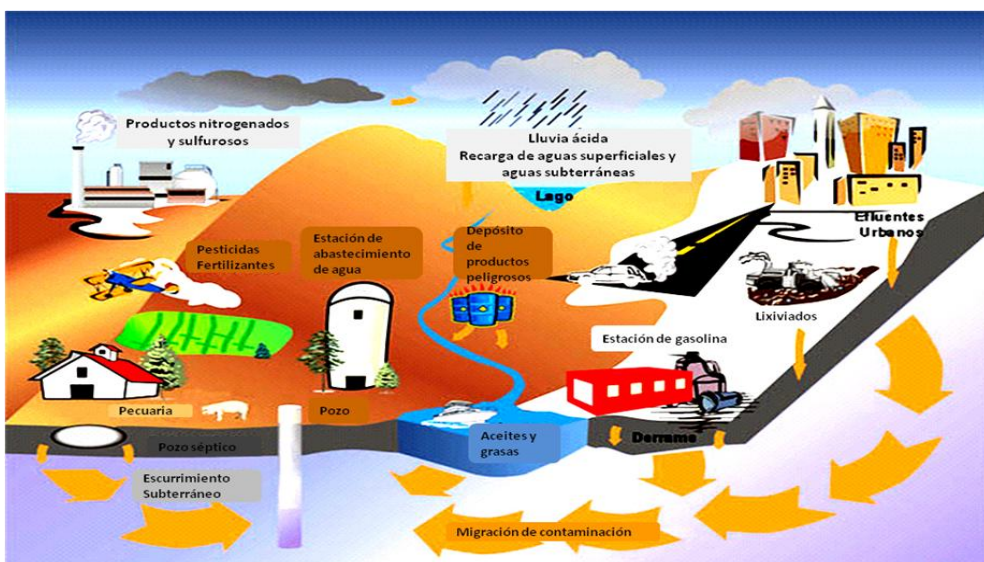


Figura 1.10 Fuentes de contaminación de las agua subterráneas (www.igm.pt)

Para el estudio de las muestras de aguas subterráneas, algunos autores recomiendan limitar los componentes. La presencia de *E. Coli* indica la presencia de bacterias fecales. El nitrato es el contaminante más común y en los niños puede producir metahemoglobinemia. E.U.A considera como concentración máxima permisible 50 mg/litro. El amoníaco, potasio, cloro, hierro y magnesio no generan problemas de contaminación significativos para el hombre.

### 1.6.2. Contaminación e impactos ambientales en los recursos hídricos

Existen varias fuentes de contaminación de las aguas (Cuadro 1.13) y la mayor de ellas está en las ciudades, donde la falta de saneamiento básico adecuado contribuye a que gran parte de las aguas servidas de las casas y las industrias sean descargadas a los ríos y arroyos. Muchas de las plantas de tratamiento de aguas servidas descargan directamente el residuo producido en las corrientes de agua.

Cuadro 1.13 Formas de contaminación de las agua  
(www.terravista.pt/Ancora/1245/ipolágua.html)

Fuentes	Ejemplo
Industrial	Fábricas de pulpa de papel, fábricas de químicos, fábricas de textiles, fábricas de productos alimenticios.
Municipal	Plantas de tratamiento de aguas residuales que pueden recibir descargas indirectas de complejos industriales.
Aguas residuales/ drenaje urbano	Drenaje de superficies impermeables incluyendo calles, edificios y otras áreas pavimentadas, por alcantarillas o tuberías antes de su descarga a las aguas superficiales.
Agrícola	Exceso de fertilizantes que se infiltran al suelo y a aguas subterránea y a su vez a los ríos o arroyos donde ellos van a dar.
Extracción de recursos	Minas, petróleo, carbón, gas, etc.
Modificaciones hidrológicas	Canalizaciones, construcción de presas.

Los lixiviados de los vertederos municipales cuando escapan llegan a las aguas subterráneas. Productos químicos usados en las casas y apartamentos como solventes de tinta, limpiadores de hornos, etc, son lanzados a la basura o alcantarillas. De una u otra manera siempre acaban yendo a parar a las aguas que abastecen las ciudades.

La lluvia ácida y otras grandes fuentes de contaminación del agua y su capacidad de destrucción son tan grandes que llegan a acabar con la vida acuática. Los productos agrotóxicos utilizados en las granjas se infiltran al suelo y escurren a los ríos, lagos y hasta a las aguas subterráneas.



Figura 1.11 Contaminación ambiental mediante aguas ácidas (Boca de mina *Dólar*, mina abandonada de *Tres Paisanos* Huancavelica – Perú, Vidalón J., 2001)

Las aguas que provienen de las minas subterráneas en operación o abandonadas (figura 1.11) contaminan las aguas superficiales (ríos, arroyos, lagos, mares, etc.) por su acidez y concentración de metales.

La contaminación del agua consiste en la alteración de su calidad natural por la acción del hombre, hecho este que torna parcial o totalmente inadecuada su utilización (Bolea, E., 1984).

En el Cuadro 1.14 se presentan los principales contaminantes, fuentes, el impacto producido y las medidas de prevención y corrección comúnmente utilizadas.

Cuadro 1.14 Contaminación e impacto ambiental del agua  
(elaborado con base en Conesa V., 1997)

Contaminantes	Fuentes de contaminación	Impactos sobre el medio	Medidas preventivas y correctivas
-Sólidos en suspensión: suelos, minerales, subproductos industriales, etc. -Elementos que alteran el calor: agua caliente, colorantes, entre otros. -Compuestos inorgánicos: sal común, ácidos, sales metálicas, etc. -Nutrientes: compuestos de nitrógeno, fósforo, potasio, etc. -Residuos que demandan nitrógeno: materia orgánica descompuesta de bacterias aeróbicas, que requieren oxígeno disuelto. -Compuestos orgánicos tóxicos: detergentes, plaguicidas, etc. -Contaminantes biológicos: bacterias y virus, productos de enfermedades, etc.	-Erosión, inundaciones, efluentes de plantas de celulosa, etc. -Plantas de energía, fábricas de acero, refinerías, unidades de refrigeración. -Explotaciones mineras, procesos industriales, depósitos naturales, agua de riego. -Aguas residuales urbanas e industriales, aguas procedentes de riego con arraste de fertilizantes, aguas residuales de explotaciones, zootécnicas, etc. -Residuos domésticos y de industrias alimenticias etc. -Efluentes domésticos, industriales y de explotaciones agropecuarias. -Residuos humanos, de animales y de industrias de carne y mataderos.	-Obstrucción de corrientes, lagos, presas y canales. -Reducción de oxígeno disuelto y descomposición de los contaminantes que afectan la vida acuática. -Efectos tóxicos sobre el hombre y la vida silvestre, malos olores y sabor, corrosión de equipos. -Excesivo crecimiento de la vida acuática, aumento de la demanda de oxígeno, mal sabor y olor. -Afectación de peces por falta de oxígeno. -Amenaza para la pesca y vida silvestre, riesgos para el hombre a largo plazo por ingestión. -Necesidad de tratamiento intenso del agua potable.	-Aguas superficiales: . Reducción del volumen de vertidos y contaminantes (recirculación, separación, eliminación, recuperación y cambio de uso). .Implantación de tratamiento de vertidos. .Eliminación de aguas residuales no tratadas. -Aguas subterráneas: .Perímetros de protección. .Impermeabilización y drenajes adecuados. .Control de inyección de residuos con sonar. .Depuración artificial y natural. .Reducción de la cantidad de vertidos de la industria. .Reducción de fertilizantes. .Implantación de barreras de presión y depresión. .Interceptación de contaminantes. .Tratamiento de aguas ácidas.

Es necesario precisar que las leyes ambientales cubren cada vez mayores zonas continentales, como en el caso de E.U.A donde la norma se aplica a todos los estados. En los países de la Unión Europea, la comisión de la Unión Europea (Bruselas), define las normas para todos los países miembros. Ni en E.U.A ni en la

Unión Europea (EU) está permitido que un estado o país miembro adopte menores exigencias que las dadas. Por lo tanto, las normas portuguesas que a continuación se presentan son prácticamente iguales a las normas de la EU.

### ***1.6.3. Estándares de calidad de agua***

Los estándares de calidad de las aguas son las características físicas, químicas y biológicas deseables en las aguas en función de los usos preponderantes establecidos por la sociedad.

Los principales parámetros físicos de la calidad de las aguas son: color, turbidez, sabor, olor y temperatura. Los químicos: pH (acidez y alcalinidad), dureza, metales (hierro y manganeso), cloruros, nitrógeno (nutriente), fósforo (nutriente), oxígeno disuelto, materia orgánica, microcontaminantes orgánicos y microcontaminantes inorgánicos como los metales pesados (zinc, cromo, cadmio, etc.).

Finalmente, los parámetros biológicos se analizan bajo el punto de vista de organismos indicadores: algas y bacterias.

Los estándares de los Cuadros 1.15, 1.16 y 1.17 corresponden al Decreto Ley n.º 236/98 del 1º de agosto permitidos en Portugal, que trasponen las siguientes Directivas de la actual Unión Europea: Directiva n.º 75/440/CCE del Consejo del 16 de Junio, relativa a la calidad de las aguas dulces superficiales destinadas a la producción de agua para consumo humano, la Directiva n.º 78/659/CEE del Consejo del 18 de Julio, relativa a la calidad de las aguas dulces superficiales para fines acuícolas, Directiva n.º 76/464/CEE del Consejo del 14 de mayo, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas al medio acuático, así como la Directiva n.º 80/68/CEE del Consejo del 17 de Diciembre, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación provocada por ciertas sustancias peligrosas.



Cuadro 1.15 Valor máximo admisible (VMA) del agua para consumo humano (Decreto-Ley n.º 236/98)

Grupo	Componente	VMA	Grupo	Componente	VMA	
Físicoquímico	Temperatura	25°C	Organoléptico	Color	20 mg/l, escala Pt/Co	
	PH	6,5<pH<8,		Turbidez	10 mg/l SiO <sub>2</sub>	
	Conductiv.	5		Olor	Dilución de 2 a 12°C	
	Cloruros	400 µS/cm		Sustancias indeseables	Sabor	3 a 25 °C
	Sulfatos	25 mg/l Cl			Nitratos	Dilución de 2 a 12°C
	Calcio	250 mg/l			Nitritos	50 mg/l NO <sub>3</sub>
	Magnesio	SO <sub>4</sub>			Nitrógeno amoniacal	0,1 mg/l NO <sub>2</sub>
	Sodio	100 mg/l			Nitrógeno Kjeldahl	0,5 mg/l NH <sub>4</sub>
	Potasio	Ca			Oxidabilidad	mg/l N
	Aluminio	50 mg/l			Sulfuro de hidrógeno	5,0 mg/l O <sub>2</sub>
	Sólidos	Mg			Hidrocarburos	No detectable
	Disueltos total	150 mg/l			Fenoles	10,0 µg/l
		Na			Sulfato de lauril y sodio	0,5 µg/l C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH
		12 mg/l K			Organoclorados	200 µg/l
	0,2 mg/l	Hierro	µg/l			
	Al	Manganeso	200 µg/l Fe			
Sustancia tóxica	Arsénico	0,2 mg/l	Cobre		50 µg/l Mn	
	Cadmio	Al	Fósforo	100 µg/l Cu		
	Cianuro	1500 mg/l	Flúor	5.000 µg/l P		
	Mercurio	50 µg/l As	Sólidos	1.500 µg/l F		
	Níquel	5 µg/l Cd	Plata	100 µg/l Ba		
	Plomo	50 µg/l Cd		10 µg/l Ag		
	Antimonio	50 µg/l Cn				
	Selenio	1 µg/l Hg				
	Pesticidas	50 µg/l Ni				
		50 µg/l Pb				
		10 µg/l Sb				
		10 µg/l Se				
		0,1 µg/l				

Cuadro 1.16 Valor máximo admisible (VMA) de aguas piscícolas (Decreto-Ley n.º 236/98)

Parámetros	Agua de salmonídeos	Agua de Ciprinídeos
	VMA	VMA
Fuente térmica (aguas abajo) (°C)	ΔT <1,5 de temp. natural	ΔT <3 de temp. natural
Oxígeno disuelto (mg/l O <sub>2</sub> )	50% ≥ 9, 100% >7	50% ≥ 7
pH	6 – 9	6 – 9
Sólidos suspendidos (mg/l)	25	25
Nitrito (mg/NO <sub>2</sub> )	0,01	0,03
Amoníaco no ionizado (mg/l NH <sub>3</sub> )	0,025	0,025
Nitrógeno amoniacal (mg/l NH <sub>4</sub> )	1	1
Cl residual disuelto total (mg/l HOCl)	0,005	0,005
Zinc total (mg/l Zn)	0,3	1,0
Cobre soluble (mg/l Cu)	0,4	0,04

Cuadro 1.17 Valor máximo admisible (VMA) de las aguas destinadas a riego expresado en mg/l (Decreto-Ley n.º 236/98)

Parámetros	VMA	Parámetros	VMA
Aluminio (Al)	20	Arsénico (As)	10
Berilio (Be)	1,0	Boro (B)	3,75
Cadmio (Cd)	0,05	Plomo (Pb)	20
Cobalto (Co)	10	Cobre (Cu)	5,0
Cromo (Cr)	20	Flúor (F)	15
Litio (Li)	5,8	Manganeso (Mn)	10
Molibdeno (Mo)	0,05	Níquel (Ni)	2,0
Selenio (Se)	0,05	Vanadio (V)	1,0
Zinc (Zn)	10	pH	4,5-9,0

## 1.7. Contaminación de la atmósfera

### 1.7.1. Calidad natural y química del aire

La región atmosférica de mayor interés para el tratamiento del ecosistema es la que está próxima a la superficie del suelo que se denomina tropósfera, donde existe el componente biológico del ecosistema.

La densidad de la atmósfera a nivel del mar es de  $1,29 \text{ kg/m}^3$  y disminuye a medida que aumenta la altitud, acentuándose a partir de los 10 km. Esta realidad implica que a bajas alturas el número de moléculas se eleva en un volumen determinado de aire y cuanto mayor la altura disminuye este número de moléculas, por lo que el choque molecular es menos frecuente que en las capas bajas y en consecuencia la temperatura del aire es menor. Por lo tanto, a medida que aumenta la altura disminuye la temperatura en unos  $0,65 \text{ }^\circ\text{C}$  por cada 100 m de altura, lo que se conoce como *gradiente vertical*. A una altitud de 20 a 35 km se forma la capa de ozono ( $\text{O}_3$ ).

La concentración de los gases en la tropósfera es de 78% de  $\text{N}_2$ , 21% de  $\text{O}_2$ , 1% de A (argón) y pequeñas fracciones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ , etc. (Cuadro 1.18). Además, en la atmósfera existen componentes variables de origen natural como: vapor de agua,  $\text{NaCl}$ , polvo de mereoritos, compuestos de origen volcánico (polvo de cenizas:  $\text{HCl}$ ,  $\text{HFl}$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ), ozono, bacterias, esporas, núcleos de condensación (Magil, 1956).

En la atmósfera los gases se presentan en partes por millón (ppm), partes por billón (ppb) e incluso en partes por trillón (ppt), como el  $\text{SO}_2$  en zonas de atmósfera limpia que existe en 200 ppm, pero en un ambiente contaminado puede alcanzar los 200000 ppt o 0,0002% en volumen, que en conjunto es insignificante, sin embargo no es deseable por su toxicidad para el hombre y otras formas de vida.

Existen dos tipos de contaminantes: primarios y secundarios. Los *contaminantes primarios* ( $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , metales, partículas e hidrocarburos, aerosoles) son emitidos por las acciones realizadas por el hombre y, los *contaminantes secundarios* ( $\text{O}_3$ , oxidantes fotoquímicos, nitrato de peroxiacetilo NPA, hidrocarburos oxidados y lluvia ácida) son producidos por la reacción química/fotoquímica de los contaminantes primarios.

Cuadro 1.18 Concentración natural de gases en la atmósfera  
(Rasiwell, R., *et al.*, 1992)

Gas	Composición en volumen (ppm)	Gas	Composición en volumen (ppm)
N <sub>2</sub>	780900	H <sub>2</sub>	0,5
O <sub>2</sub>	209500	Xe	0,08
A	9300	O <sub>3</sub>	0,02
CO <sub>2</sub>	300	NH <sub>3</sub>	0,006
Ne	18	NO <sub>2</sub>	0,001
He	5,2	NO	0,0006
CH <sub>4</sub>	2,2	SO <sub>2</sub>	0,0002
Kr	1	H <sub>2</sub> S	0,0002
N <sub>2</sub> O	1		

El SO<sub>2</sub> tiene olor picante y no arde; sin embargo, el SO<sub>3</sub> es altamente reactivo. El SO<sub>x</sub> se forma de la manera siguiente:



Generalmente, el SO<sub>3</sub> está presente cuando la concentración de agua es muy baja; sin embargo, cuando es alta el SO<sub>3</sub> y el H<sub>2</sub>O se combinan para formar el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

El CO es incoloro, inodoro e insípido, un poco más ligero que el aire y está formado por las siguientes reacciones:

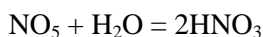
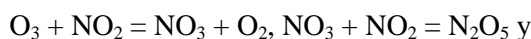
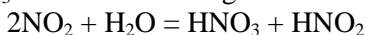
- Combustión,  $2C + O_2 = 2CO$  y  $2CO + O_2 = CO_2$
- Disociación de CO<sub>2</sub> a  $> 1.700$  °C,  $CO_2 = CO + O$
- Reacción de CO<sub>2</sub> y C a  $> 1.700$  °C (motores),  $CO_2 + C = 2CO$

El NO es incoloro, inodoro e insípido, sin embargo, el NO<sub>2</sub> es picante. El NO<sub>2</sub> se emite en menores cantidades que el NO. La reacción se produce a 1200 °C.  $N_2 + O_2 = 2NO$  y  $2NO + O_2 = 2NO_2$ .

El contaminante NO<sub>x</sub> se genera al formarse los oxidantes fotoquímicos mediante un proceso cíclico y consiste en:  $NO_2 + H\nu = NO + O^*$ , donde Hν es fotón de energía solar y O\* es oxígeno atómico muy reactivo; luego  $O^* + O_2 = O_3$  y finalmente  $O_3 + NO = NO_2 + O_2$ .

Los hidrocarburos contienen hidrógeno y carbono en estado gaseoso y son de tres clases: *alifáticos* (propano C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), *aromáticos* (benceno C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, tolueno C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>) y *acíclicos* (ciclohexano O<sub>6</sub> H<sub>12</sub>). Estos hidrocarburos interactúan desequilibrando el ciclo, de modo que el NO se convierte en NO<sub>2</sub> y consecuentemente aumenta O<sub>3</sub>. Cuando el NO<sub>x</sub>, los hidrocarburos y la luz solar se combinan, se producen contaminantes secundarios denominados fotoquímicos: Hidrocarburos + NO<sub>x</sub> + luz solar = niebla fotoquímica.

El HNO<sub>3</sub> (ácido nítrico) y el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ácido sulfúrico) son los componentes de la lluvia ácida. El HNO<sub>3</sub> se forma de las siguientes maneras:



**1.7.2. Contaminación acústica de la atmósfera**

La contaminación acústica es uno de los problemas ambientales mas frecuentes en la actualidad, y está relacionada con los medios de transporte, industrias, construcciones, instalaciones y servicios (Cuadro 1.19), generando distintos niveles de impacto ambiental.

Cuadro 1.19 Contaminación e impacto ambiental sonoro (elaborado con base en Conesa, V., 1997)

Contaminantes	Fuentes de contaminación	Impactos sobre el medio	Medidas de prevención y corrección
-Estímulos que directa o indirectamente interfieren desfavorablemente al hombre a través del oído, dando lugar a sonidos indeseables o ruidos.	-Medios de transporte (tráfico de automóviles, ferroviario, aeronaves, etc.). -Industria y construcción (maquinarias en las obras). -Instalaciones y servicios (Aire acondicionado, ascensores, bombas, etc.)	-Organismo (fisiológicos, psicológicos, sociológicos y psicosociales; reversibles e irreversibles). -Comunidades (perturbación de actividades típicas como trabajo, estudio, sueño, etc.). -Psicosociales.	-Planificación urbana. -Mapas acústicos. -En la industria llevar el control y corrección, además de la adopción de sistemas de protección adecuados.

En la industria y en particular en las explotaciones mineras (fig. 1.12) el ruido tiene un carácter laboral cuyos efectos se manifiestan: en la *productividad* y la *seguridad* (ruidos constantes por encima de 80 dB (A) perjudican la producción al ocasionar en el trabajador irritabilidad, dificultades de concentración, disminución de la productividad, errores y accidentes de trabajo), *efectos sobre el trabajador* (agresividad, enfermedades psicosomáticas y depresión, conduciendo a largo plazo a la sordera profesional que ocurre a los niveles de 4000 Hz con características de pérdida auditiva lenta, gradual, progresiva e irreversible), *fatiga auditiva* (ocurre en individuos expuestos a altos niveles de ruido, es reversible y desaparece algunas horas después cuando el individuo deja el ambiente ruidoso), *sordera profesional* (ocurre por la destrucción de las células del órgano de Corti en el oído interno, la pérdida de la audición principalmente a 4000 Hz y con el transcurso del tiempo alcanza las frecuencias de 3000 a 6000 Hz).

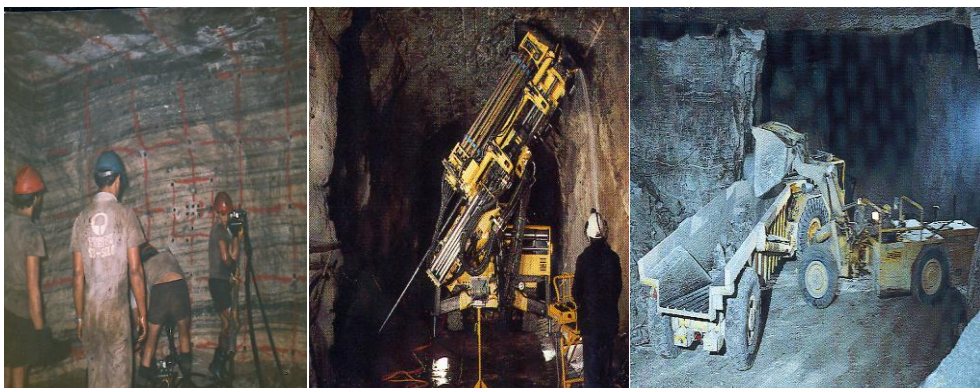


Figura 1.12 Fuentes de ruido en las operaciones de explotación minera subterránea (Navarro, V.F., 1999)

Cuadro 1.20 Niveles permisibles de ruido del Departamento de Trabajo de E.U.A (1971-1979) a escala comparativa de presión sonora y del nivel de sonido (Kiely G., 1999)

Ruido dB (A)	Duración (h/día)	Escala comparativa presión sonora ( $\mu\text{Pa}$ ) y nivel de ruido dB (A)
90	8	Motores a reacción $\rightarrow$ 100.000.000 $\mu\text{Pa}$ $\rightarrow$ 140 dB Umbral de dolor
92	6	$\leftarrow$ 120 Despegue de avión (100 metros de distancia)
95	4	Música $\rightarrow$ 10.000.000 $\mu\text{Pa}$ $\rightarrow$ 100 $\leftarrow$ Martillo
97	3	$\leftarrow$ 80 Tráfico urbano medio
100	2	1.000.000 $\mu\text{Pa}$ $\rightarrow$ 80 $\leftarrow$ Oficinas
102	1.5	Camión $\rightarrow$ 100.000 $\mu\text{Pa}$ $\rightarrow$ 60
105	1	Conversación oral $\rightarrow$ 10.000 $\mu\text{Pa}$ $\rightarrow$ 40 $\leftarrow$ Sala de estar (con TV, radio, etc)
110	0,5	Biblioteca $\rightarrow$ 100 $\mu\text{Pa}$ $\rightarrow$ 20
115	< 0,25	Dormitorio $\rightarrow$ 20 $\mu\text{Pa}$ $\rightarrow$ 0 Umbral auditivo

El oído humano capta una enorme gama de presiones sonoras. La potencia más débil de sonido es captada sin dolor, ya que el mecanismo auditivo responde de forma relativa a los cambios de las presiones sonoras. La presión de referencia es el umbral de audición, es decir el sonido mas leve que el oído puede detectar (presión sonora de 0 dB), pero niveles de sonido inferiores a 25 dB no se detectan normalmente. Los sonómetros convencionales pueden medir desde 38 dB. Los niveles típicos de presión sonora se presentan en el Cuadro 1.20.

### 1.7.3. La contaminación de la atmósfera por gases y partículas

La contaminación de la atmósfera por gases y partículas sólidas es causada en la mayoría de los casos por la acción del hombre que ocasiona la emisión de diversos contaminantes, existiendo los que provocan alteraciones ambientales

locales, regionales y globales, que requieren la adecuada aplicación de medidas de prevención y correctivas (Cuadro 1.21).

Cuadro 1.21 Contaminación e impacto ambiental en la atmósfera por gases y partículas (elaborado con base en Conesa, V., 1997 y [http://www.brasil.terravista.pt/albufeira/1950/Poluição%20ar%20\(2\).htm](http://www.brasil.terravista.pt/albufeira/1950/Poluição%20ar%20(2).htm))

Contaminantes	Fuentes de contaminación	Impactos sobre el medio	Medidas preventivas y correctivas
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Radiaciones y ruido.</li> <li>-Aerosoles (partículas sólidas y líquidas de <math>10^{-1}</math> a <math>10^3</math> <math>\mu\text{m}</math>).</li> <li>-Gases (<math>\text{SO}_2</math>, <math>\text{SO}_3</math>, <math>\text{SH}_2</math>; <math>\text{NO}</math>, <math>\text{NO}_2</math>, <math>\text{NO}_x</math>; <math>\text{Hn Cm}</math>; <math>\text{CO}</math>, <math>\text{CO}_2</math>).</li> <li>-Metales pesados (<math>\text{Pb}</math>, <math>\text{Cr}</math>, <math>\text{Cu}</math>, <math>\text{Hn}</math>, <math>\text{Ni}</math>, <math>\text{As}</math>, <math>\text{Cd}</math>, <math>\text{Hg}</math>).</li> <li>-Halógenos (<math>\text{ClH}</math>, <math>\text{Cl}_2</math>, <math>\text{FH}</math>, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, sustancias radioactivas, etc.).</li> <li>-Aparición de <math>\text{O}_3</math> y radicales libre activos.</li> <li>-Lluvia ácida.</li> <li>-Disminución de la capa de ozono.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Naturales (cenizas volcánicas, incendios forestales, descomposición de materia orgánica en suelos y océanos).</li> <li>-Industrias (<math>\text{SO}_x</math>, hidrocarburos, <math>\text{CO}</math>, sólidos en suspensión).</li> <li>-Domésticos (calefacción: <math>\text{SO}_2</math>, hidrocarburos).</li> <li>-Centrales térmicas (<math>\text{SO}_x</math>, <math>\text{NO}_x</math>).</li> <li>-Refinería de petróleo (<math>\text{SO}_2</math>, <math>\text{C}_n\text{H}_m</math>, <math>\text{NO}_x</math>, <math>\text{NH}_m</math>, <math>\text{CO}</math>).</li> <li>-Vehículos con motores de combustión interna, aeronaves, barcos (<math>\text{CO}</math>, <math>\text{Pb}</math>, <math>\text{SO}_2</math>, <math>\text{NO}</math>, <math>\text{C}_n\text{H}_m</math>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Salud y bienestar del hombre (irritaciones, afecciones pulmonares, daños fisiológicos).</li> <li>-Cambios en las precipitaciones, niebla y radiación solar, efecto invernadero.</li> <li>-Abrasión, ataque químico y electrolítico.</li> <li>-Disminución de la capa de ozono (cáncer de piel, cataratas, etc.).</li> <li>-Precipitación y absorción por el suelo.</li> <li>-Posibilidad de generación de sustancias tóxicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Programas de control de la calidad del aire.</li> <li>-Evaluación de impacto ambiental.</li> <li>-Tecnologías de baja o nula emisión de residuos.</li> <li>-Evaluación de daños a la vegetación.</li> <li>-Concentrar y retener los contaminantes.</li> <li>-Motores ecológicos en vehículos.</li> <li>-Control de emisiones de los combustibles y carburos.</li> <li>-Uso de productos alternativos no contaminantes.</li> <li>-Planificación de los usos del suelo.</li> <li>-Áreas verdes.</li> </ul>

La contaminación del aire está caracterizada por la presencia de gases tóxicos y partículas líquidas o sólidas en suspensión. Las descargas de gases de los vehículos, de las chimeneas de las fábricas, los incendios de vegetación, las industrias como la explotación minera (figura 1.13) lanzan constantemente al aire grandes cantidades de sustancias perjudiciales a la salud.



Figura 1.13 Fuentes de contaminación del aire por partículas (polvos) y gases

La excesiva emisión de contaminantes ha provocado serios daños a la salud, tales como problemas respiratorios (bronquitis crónica y asma), alergias, lesiones degenerativas en el sistema nervioso y en órganos vitales y hasta producir cáncer. Estas perturbaciones se agravan por la ausencia de vientos en el invierno debido al fenómeno de la *inversión térmica* (ocurre cuando una capa de aire frío forma una barrera en la atmósfera que impide el paso del aire caliente y la dispersión de los contaminantes). Murieron como consecuencia de este fenómeno cerca de 4000 personas en Londres en el año 1952.

Los daños no se restringen solo a la especie humana, toda la naturaleza se ve afectada. La toxicidad del aire ocasiona la destrucción de bosques, fuertes lluvias que provocan la erosión del suelo y la obstrucción de los ríos. Los principales impactos al ambiente son la reducción de la capa de ozono y el efecto invernadero.

#### 1.7.4. Estándares de calidad de gases y partículas

Los estándares de calidad del aire presentados en los Cuadros 1.22, 1.23 y 1.24 son los definidos por la Ordenanza n.º 286/93 del 12 de marzo del gobierno de Portugal como uno de los instrumentos de política de gestión de la calidad del aire adecuada a la protección de la salud y del ambiente, permitiendo el avance en la transposición de directivas de la Unión Europea relativas a los valores límites y valores guías para el dióxido de sulfuro y partículas en suspensión (n.º 80/779/CEE y 89/427/CEE), dióxido de nitrógeno (n.º 85/203/CEE), valor límite para el plomo (n.º 82/884/CEE) y valores guía para el ozono.

Cuadro 1.22 Valores límites admisibles (VLA) para NO<sub>2</sub>, Pb, CO, expresados en µg/m<sup>3</sup> (elaborado de Ordenanza n.º 286/93)

Período considerado	NO <sub>2</sub>	Pb	CO
Año.....	(.) 200	(..) 2	
Una hora.....			(...) 40000 (h)
Ocho horas.....			(...) 10000 (hh)

(.) Percentil 98 calculado a partir de los valores horarios o de períodos inferiores a una hora obtenidos durante el año

(..) Media aritmética de los valores medios diarios obtenidos durante el año.

(...) Estos valores pueden ser excedidos una vez al año.

(...) Valor medio calculado cada hora con base en los ocho valores horarios entre h y h9. Valor medio horario.

(hh) Valor medio de 8 horas consecutivas, calculadas cada hora con base en los 8 valores entre h y h9.

Cuadro 1.23 Valores límites admisibles (VLA) para SO<sub>2</sub> y valores asociados (VA) para las partículas en suspensión expresados en µg/m<sup>3</sup> (elaborado de Ordenanza n.º 286/93)

Período considerado	Medidos por método de humos negros (simultáneo)		Medidos por método de gravimetría (simultáneo)		VLA de SO <sub>2</sub> (1)	VLA de SO <sub>2</sub> (2)	VA para partículas en suspensión (3)
	VLA para SO <sub>2</sub>	VS para partículas	VLA para SO <sub>2</sub>	VS para partículas			
Año..... (*)	120	> 40	80	> 150	80	100	150
	120	≤ 40	120	≤ 150			
Invierno (1º Octubre a 31 Marzo) (**)	130	> 60	130	> 200	130	-	-
	180	≤ 60	180	≤ 200			
Año (período medición (24 horas) (***))	(i)250	> 150	(i)250	> 350	(i)25	(i)250	300
	(i)30	≤ 150	(i)350	≤ 350			

(\*) Mediana de los valores medios diarios obtenidos durante el año.

(\*\*) Mediana de los valores medios diarios obtenidos durante el invierno.

(\*\*\*) Percentil 58 calculado a partir de los valores medios diarios obtenidos durante el año.

(1) En los casos que no se justifique un monitoreo simultáneo de SO<sub>2</sub> y de las partículas suspendidas (por el método de los humos negros), se aplicarán para las partículas suspendidas los valores indicados.

(2) En los casos que no se justifique un monitoreo simultáneo de SO<sub>2</sub> y de las partículas suspendidas (bien sea por el método de los humos negros, bien sea por el método gravimétrico) se aplicarán para el SO<sub>2</sub> los valores indicados.

Cuadro 1.24 Valores límites de emisión de aplicación general expresados en mg/m<sup>3</sup> para toda la industria y para un valor de 8% de O<sub>2</sub> (elaborado de Ordenanza n.º 286/93)

Contaminante	VLA	Sustancias cancerígenas
Partículas	300	Sustancias cancerígenas:
Dióxido de sulfuro SO <sub>2</sub>	2700	
Sulfuro de hidrógeno H <sub>2</sub> S	50	Categoría 1: para volumen total ≥ 0,5 g/h
Óxido de N expresado en NO <sub>2</sub>	1500	Categoría 2: para volumen total > 5 g/h
Monóxido de carbono CO	1000	Categoría 3: para volumen total ≥ 25 g/h
Compuestos orgánicos, expresados en C total	50	Categoría 1: Amianto, fibras de todos los tipos, benceno, cloruro de vinilo, cromatos de zinc y potasio, 2-naftilamina, trióxido de arsénico.
Compuestos inorgánicos fluorados, expresados en F	50	Categoría 2: Acrinonitrilo, benzopireno, 1.3
Compuestos inorgánicos clorados, expresados en Cl	250	butadieno, 1-cloro, 2 3-epoxipropano
Metales pesados totales	8	(hipocloridina), cromato de calcio, cromato de cromo III, cromato de estroncio,
Cd, Hg	0,2	dibenzoantraceno, 1 2-dibromoeteno, 3 3-
As, Ni	1	diclorobenzidina, 1.2-exporipropano, óxido de etileno, sulfato de dimetilo.
Pb, Cr, Cu	5	Categoría 3: Cromato de plomo.

La norma de la Unión Europea (86/188/CEE) trata sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido en el trabajo, y especifica que cuando el nivel de exposición diario sea mayor de 85 dB (A) el trabajador debe ser prevenido de los riesgos y entrenado para el uso de



protectores de los oídos, pero cuando se exceden los 90 dB (A) es necesario implementar un programa de reducción. Los valores límites de los niveles de sonido del ruido producido por los vehículos automotores contemplados por el Decreto-ley n.º 292/89 del 2 de septiembre de Portugal se presentan en el Cuadro 1.25.

Cuadro 1.25 Valores límite del nivel de sonido continuo equivalente (Leq) (Decreto-Ley n.º 292/2000)

Categoría de vehículo	VLA Leq dB (A)
Zonas sensibles (usos habitacionales, escuelas, hospitales, espacios de ocio)	55 diurno 45 nocturno
Zonas mixtas (comercio, servicios)	65 diurno 55 nocturno
Vehículos a motor (tolerancia en relación al valor fijado) Para vehículos que no tienen valor fijado, la medición será con base en NP 2067	5
Tráfico aéreo (prohibido aterrizajes o despejes de aeronaves civiles, entre 0 a 6 horas)	

La ISO (*International Organization for Standardization*) 1996 establece los límites permisibles de ruido para zonas residenciales y ambientes de trabajo, los que fueron tomados como referencia por algunos países del mundo (Cuadro 1.26).

Cuadro 1.26 Límites de ruido dB (A) para instalaciones industriales en áreas residenciales (Falch, E. *et al*, 1998)

País	Hora del día	Período de descanso	Hora de la noche
Austria	50-55	-	40-45
Bélgica	45-50	40-45	35-40
Dinamarca	45-50	40-45	35-40
Francia	50-55	45-50	40-45
Alemania	50-55	Ajuste 6 dB	35-40
Hong Kong	60-65	-	50-55
Italia	50-55	-	50-55
Japón	50-60	45-50	40-45
Corea	50-55	45-50	40
Holanda	50	45	40
Noruega	50	45	40
Suecia	50-55	45-50	40-45
Suiza	55	-	45

## 1.8. Los cambios climáticos

El balance de energía del sistema tierra/atmósfera tiene un importante efecto modificador en la radiación terrestre: se trata del efecto invernadero, por medio del cual parte de la energía térmica emitida por el suelo se regresa y es absorbida por las moléculas de vapor de agua y otros gases, llamados gases invernadero, los cuales después de absorber dicha energía emiten de nuevo

radiación térmica en todas las direcciones. De esta forma la temperatura próxima a la superficie es unos 33 °C superior a la que tendría la Tierra en caso de no ser influenciada por este fenómeno.

Desde el comienzo de la era industrial, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono aumentaron casi un 30%, las concentraciones de metano se duplicaron y las concentraciones de óxido de nitrógeno aumentaron aproximadamente un 15%.

Se cree que los combustibles fósiles quemados para el funcionamiento de carros, camiones, casas, negocios de calor y plantas de energía son responsables en los E.U.A de aproximadamente el 98% de las emisiones de dióxido de carbono, 24% de las emisiones de metano y 18% de las emisiones de óxido de nitrógeno.

En 1997, los E.U.A emitieron aproximadamente un quinto de los gases globales totales de invernadero. Para 2010, en ausencia de políticas de control de las emisiones, las concentraciones de dióxido de carbono se proyectaron en un 30-150% mas elevado que los niveles actuales.

Las temperaturas promedio globales en superficie, influyentes en el cambio del clima, han aumentado de 0,5 a 1,0 °F desde el pasado siglo XIX. La cobertura de nieve en el hemisferio norte y el hielo flotando en el océano Ártico han disminuido. El nivel del mar se elevó de 4 a 8 pulgadas en el siglo pasado (fig. 1.14). Las precipitaciones sobre la Tierra aumentaron aproximadamente 1%.

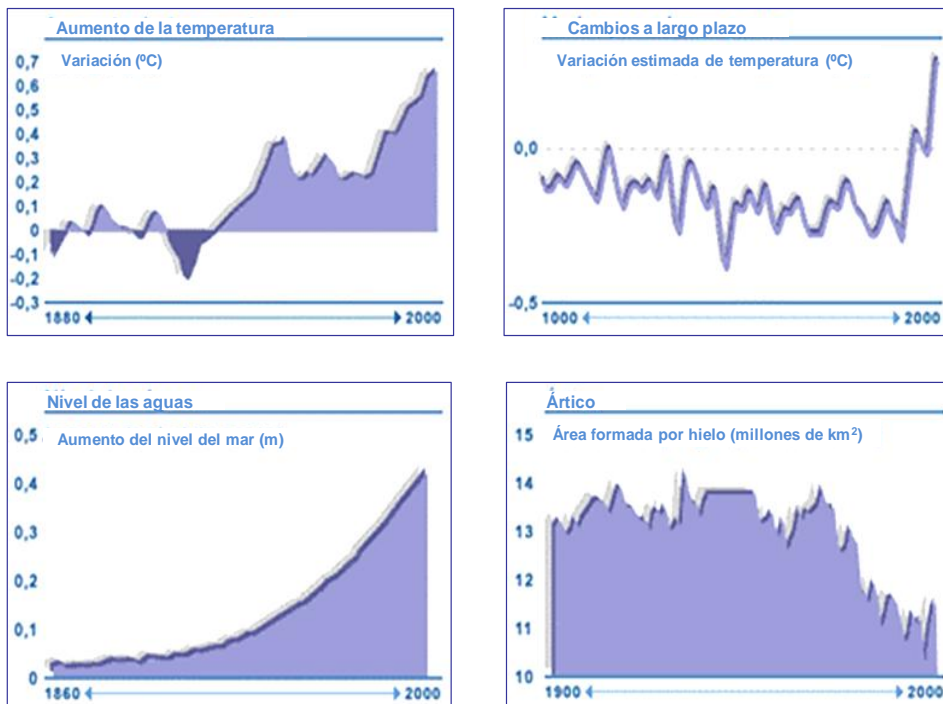


Figura 1.14 Cambio climático global (Centro de Estudios Integrados sobre medioambiente y cambios climáticos, disponible en <http://www.centroclima.org.br/aquecimento.htm>)

La concentración creciente de gases de invernadero es probable que acelere el cambio del clima. Se espera que la temperatura media global de la superficie aumente de 1 a 4,5 °F (0,6 a 2,5 °C) en los próximos cincuenta años, y de 2,2 a 10 °F (1,4 a 5,8 °C) en el siguiente siglo, con variaciones regionales significativas. La evaporación aumenta cuando el clima se calienta, aumentando la precipitación media global. La humedad del suelo es probable que decrezca en muchas regiones, y es probable que las intensas tempestades se tornen más frecuentes. El nivel del mar es probable que aumente 0,60 m a lo largo de la mayoría de la costa de los E.U.A.

El Protocolo de Kioto aprobado en 1997, estableció como meta reducir las emisiones de gases contaminantes de los países industrializados en 5,2% antes de 2012, sobre los niveles existentes en 1990.

### **1.9. Técnicas de análisis ambiental**

Las técnicas de análisis ambiental tienen relación con la economía, la contaminación y el uso del ambiente con las externalidades. La preocupación por el ambiente implica más respeto con el ambiente para lo cual es necesario establecer medios o herramientas que permitan su protección. En la Unión Europea se aconsejan las siguientes herramientas: a) *Auditoría ambiental*; b) *Identificación de riesgos*; c) *Análisis de riesgos*; d) *Análisis de riesgos de vida*; e) *Gestión y control de la calidad ambiental*; f) *Análisis costo/beneficio*; g) *Estudios de impacto ambiental* y h) *Control integral de la contaminación*.

Estas técnicas tienen diferentes aplicaciones, así, el *análisis del ciclo de vida* es aplicable a los productos para disminuir su impacto ambiental negativo; la *auditoría ambiental* es aplicable a una empresa o instalación para adaptarse a las normas ambientales; los *estudios de impacto ambiental* a los proyectos para decidir, entre varias opciones, la que sea menos dañina para el ambiente.

#### **1.9.1. Metodología de minimización: Objetivos**

La minimización es un proceso productivo relacionado con el consumo de materias y servicios y la producción de residuos y emisiones. Para ello, se adoptan medidas de organización y de operación que procuren la minimización viable técnica y económicamente. Siempre es muy importante la *reducción en el origen* de los productos contaminantes y así reducir los procesos de tratamiento y eliminación final.

La minimización consiste en aplicar las ecuaciones de balance de masas y de energía, de forma selectiva y dirigida específicamente a una mejora y un mínimo contacto ambiental, implica acciones de organización del trabajo, de control de la calidad, la gestión de todas las materias y servicios utilizados, lo que dará como resultado una producción más económica, de mejor calidad y de mejor competitividad. La aplicación de esta metodología requiere tres etapas:

*Primera etapa:* acciones frente a la legislación y normas sobre vertidos de agua, de residuos, de emisiones a la atmósfera y sobre los daños al ambiente, que contemplan sanciones económicas y hasta pena privativa de libertad.

*Segunda etapa:* va más allá del estricto cumplimiento de las normas, adoptándose un comportamiento ambiental con fuerte orientación a la reducción de costos. La norma es reducir, reciclar y recuperar (RRR).

*Tercera etapa:* considera el comportamiento ambiental del entorno relacionado al uso del producto, embalajes, relaciones con el cliente, imagen, etc. En esta etapa es importante el cumplimiento de las normas existentes.

Los componentes de un proceso de minimización son: a) Plan de minimización; b) Auditoría de residuos y, c) Cambios en las técnicas y en la organización.

### **1.9.2. Auditoría ambiental**

Es similar a la evaluación de impactos ambientales, con la diferencia de que en la auditoría se realiza una evaluación para un proceso, para una actividad o una operación y no para todo un proyecto. Consiste en una inspección sistemática relacionada con el ambiente. El Consejo de la UE adoptó en 1993 un esquema de Auditoría de Gestión Ambiental (EMAS), pasando a ser obligatorio desde 1995. Las EMAS son un proceso continuo y gradual de mejora ambiental en relación con las actividades de las industrias.

En el caso de la auditoría para una industria, se pretenden identificar y evaluar los efectos ambientales tanto directos como indirectos, como son: a) Las emisiones controladas y no controladas a la atmósfera; b) Los vertidos controlados y no controlados a las aguas y alcantarillas; c) Los residuos sólidos y de otro tipo, particularmente los peligrosos; c) La contaminación del suelo; d) La utilización del suelo, agua, combustibles y energía, y otros recursos naturales; e) Las emisiones de energía térmica, ruido, olores, polvos, vibraciones e impacto visual; f) Las repercusiones en sectores específicos del ambiente y del ecosistema.

### **1.9.3. Gestión del riesgo ambiental**

La responsabilidad por los daños ambientales lleva a las empresas a prever la gestión del riesgo ambiental en las empresas, fundamentalmente en empresas cuyas actividades revisten peligrosidad.

La imagen pública, las regulaciones, los seguros, los costos financieros, etc. hacen necesario prevenir la gestión del riesgo de un accidente industrial.

Esta gestión se realiza en diversos niveles de la empresa y con diferentes prioridades previendo diversos escenarios de accidentes y planificando lo inesperado.

La modelización y la formación juegan un gran papel en la gestión del riesgo ambiental, conjuntamente con la prevención de la contaminación y su control.

## **1.10. Evaluación de impacto ambiental**

Tiene por finalidad la identificación, predicción, interpretación, prevención, corrección y la evaluación de los impactos ambientales que un proyecto o actividad puede producir en caso de su realización, así como las posibilidades de evitarlos o reducirlos a niveles aceptables. Se puede tipificar en:

- *Evaluación simplificada*, para proyectos de bajo riesgo de afectación, es solo una evaluación cualitativa del impacto;
- *Evaluación preliminar*, realizada con información existente y sin investigación específica, puede dar paso a una evaluación detallada;
- *Evaluación detallada*, para proyectos de alto riesgo y varios niveles de afectación. A nivel general la metodología de evaluación de impacto ambiental se resume en la fig. 1.15.

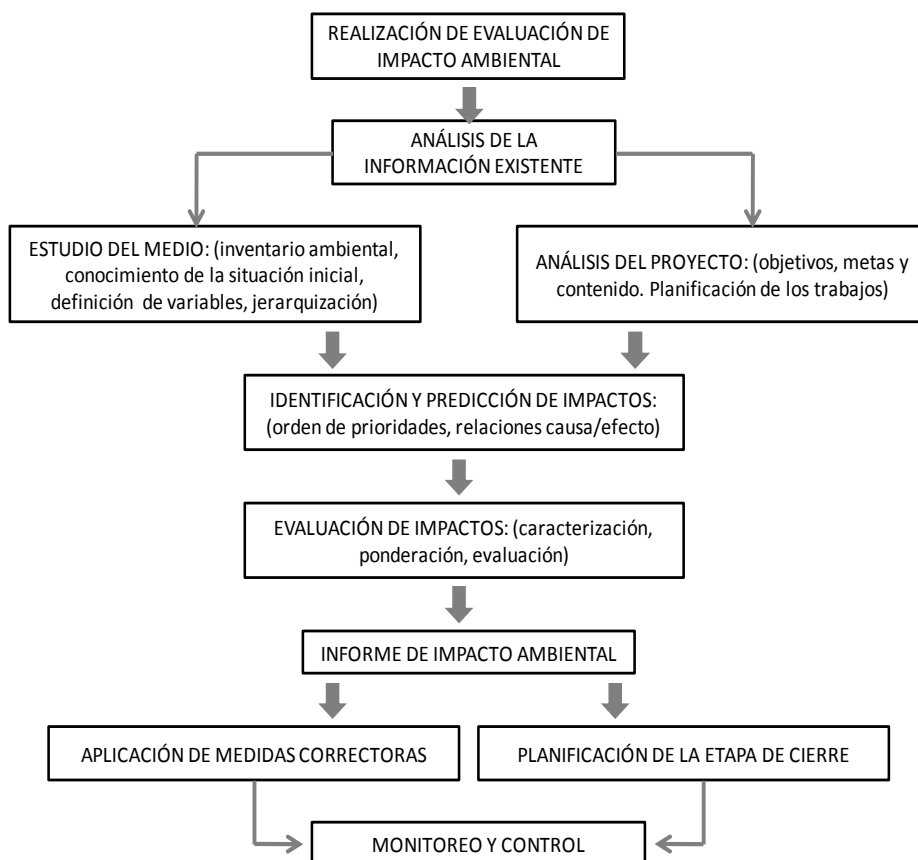


Figura 1.15 Metodología general de evaluación de impacto ambiental (Sanz, J.L, 1992)

### 1.10.1. Inventario ambiental e identificación de factores vulnerables

Describe el estado de *referencia* o pre-operacional del ambiente, así como también la predicción de su evolución sin las acciones del proyecto. Los elementos y factores ambientales (Cuadro 1.27), pueden ser inventariados en términos cartográficos, debiendo ser una información sensata y moderada. El inventario es útil al momento de la evaluación de impactos y comparar opciones.

Cuadro 1.27 Elementos y factores ambientales (Barettino Fraile, D., 1992)

Elemento del medio	Factor ambiental
Tierra	Suelo, morfología, elementos singulares, recursos minerales y rocas industriales.
Atmósfera	Composición de la atmósfera, clima, ruido, olores.
Agua	Superficiales y subterráneas.
Proceso geofísico	Dinámica de las corrientes, zonas inundables, erosión, sedimentación, estabilidad de laderas, subsidencia, sismicidad inducida, vibraciones, recarga de acuíferos.
Paisaje	Calidad del paisaje, incidencia visual.

Es necesario identificar los factores susceptibles de recibir impactos por la ejecución del proyecto, utilizando para ello los siguientes criterios: a) Representatividad del entorno afectado; b) Relevancia en relación a la magnitud del impacto; c) La no sobreposición con otros factores; d) Facilidad para su identificación y, e) Posibilidad de su cuantificación.

**1.10.2. Identificación de las acciones que causan impactos ambientales**

Es conveniente identificar las acciones y elementos relacionados para cada fase del proyecto. Por ejemplo, estas acciones pueden ser: movimiento de tierras, ocupación del suelo por las instalaciones y equipos de la industria, emisión de contaminantes, eliminación de la cobertura vegetal, cambios temporales o permanentes de los cauces de agua, construcción de entradas y accesos. Para tal fin se pueden usar los instrumentos existentes: lista general, consulta a grupo de expertos, métodos comparados, matrices generales y particulares de relación causa/efecto.

**1.10.3. Identificación y predicción de impactos**

Utiliza las técnicas de superposición de cartografía temática, métodos comparados, matrices causa/efecto, matrices cruzadas, redes y gráficos de interacción, etc. Los impactos ambientales pueden ser directos e indirectos. Así, un impacto directo sobre el agua supone la alteración de su calidad y como consecuencia indirectamente impacta la fauna y flora e incluso la salud humana.

**1.10.4. Caracterización y ponderación de impactos**

La caracterización de los impactos ambientales puede ser realizada considerando diversos criterios, según: a) Su carácter genérico: beneficioso o positivo, adverso o negativo; b) El tipo de relación causa/efecto: directos e indirectos; c) La proyección en el tiempo: temporal o permanente; d) La proyección en el espacio: local o puntual o extensivo; e) La proximidad espacial del impacto: próximo a la fuente o alejado de la fuente; f) Su reversibilidad por los propios mecanismos del medio: reversible o irreversible; g) Su recuperación con medidas correctoras: recuperable o no recuperable.

La evaluación puede ser cualitativa, estableciendo una escala siguiente: compatible, moderada, severa y crítica. También puede ser cuantitativa mediante indicadores de impacto.

#### **1.10.5. Metodología de evaluación de impactos ambientales**

Según Sanz, J.L., (1992) existen más de cincuenta metodologías de evaluación de impactos ambientales elaborados para proyectos específicos, que pueden ser aplicados a otros similares.

Estos métodos se agrupan así: a) *Redes y gráficos*: matriz causa/efecto, listas, CNERPAB, Bereano, Sorensen, guías metodológicas del MOPU y del Banco Mundial; b) *Cartográficos*: superposición de transparencias, Mc Harg, Tricart y Falque; c) *Indicadores, índices e interpretación de evaluación*: Holmes, Universidad de Georgia, Hill-Schechter y Fisher-Davis; d) Cuantitativos: Batelle – Columbus.

#### **1.10.6. Matriz causa/efecto**

Es un método cualitativo muy útil para evaluar diversas opciones de un mismo proyecto, siendo más conocido como matriz de *Leopold*. Este método considera en las *filas* los factores ambientales que pueden ser afectados y en las *columnas* las acciones que ocasionarían los posibles impactos (Cuadro 1.28).

Cada cuadrícula de interacción se divide en líneas diagonales, haciendo constar del lado izquierdo la *magnitud M* del posible impacto, precedido del signo positivo (+) o negativo (-) conforme el impacto sea favorable o desfavorable, en una escala del 1 al 10, respectivamente mínimo y máximo (el cero no es válido).

En la parte derecha de la línea diagonal se hace constar la *importancia* del posible impacto, también en una escala del 1 al 10 (con idéntica estructura). El texto que acompaña la matriz consiste en la discusión de los impactos más significativos, esto es, de aquellas cuadrículas cuyas filas y columnas indiquen las mayores calificaciones y de aquellos valores aislados con números superiores.

La sumatoria de las magnitudes por filas indica las incidencias del conjunto sobre cada factor ambiental y por lo tanto, de su *fragilidad* ante el proyecto, y la sumatoria por columnas dará el valor relativo al *efecto* que cada acción podrá producir en el ambiente y por tanto, de su *agresividad*.

Cuadro 1.28 Ejemplo de matriz de impactos ambientales (modificado de Sanz, J.L., 1992)

Matriz de impactos ambientales			Acciones que causan efectos ambientales									Evaluación	
			Operaciones de infra-estructura			Procesos de arranque	Procesos de vertido y transporte	Procesos de clasificación y tratamiento	Generación de escombreras		Medidas correctivas (restauración)		
			Construcción de edificios y plantas	Aeropuertos	Drenajes y alcantarillas				Implantación	Acciones de red de drenajes			
Factores Ambientales	Impacto geoambiental	Tierra	Suelo	-8/3	-4/2	-2/2	-10/8	-8/7	-9/5	-10/6		+10/8	-41/41
			Morfología	-2/2	-1/5		-10/17			-10/8		+5/9	-18/31
		Agua	Superficiales	-2/7	-1/2	-5/2	-5/9		-10/10	-8/9	+10/+10	+5/10	-16/59
			Subterráneas				-5/6		-8/9		+10/10	+5/10	0/35
			Calidad						-10/10		+2/10	+7/10	-1/30
		Atm.	Composición (gases, polvos)				-3/4	-5/9				+3/5	-5/18
			Ruido				-3/4	-8/8	-2/5				-15/17
		Procesos	Erosión			-4/1	-6/5			-7/5	+4/7	+5/7	-8/25
			Inundación				-5/7			-5/6	+2/8	+5/7	-3/28
			Sedimentación							-5/5		+5/7	0/12
	Subsistencia								-2/1			-2/1	
	Inestabilidad								-7/9		+7/10	0/19	
	Disolución								-5/5		+5/5	0/10	
	Compactación y asentamientos							+10/10				+10/10	
	Impacto Bioambiental	Flora	Árboles	-5/10	-1/2		-10/10		-3/5	-10/7		+10/6	-19/40
			Arbustos y herbáceas	-8/8			-8/10		-3/5	-4/7	+1/5	+7/6	-15/41
			Micro flora						-5/5				-5/5
		Fauna	Aves						-2/1	-2/2			-4/3
	Animales terrestres					-5/7	-3/4	-3/5	-4/4	+2/5	+2/6	-11/31	
	Micro fauna								-5/5			-5/5	
	Impactos social y económico		Cultivos							-3/8	+6/9		+3/17
			Paisaje	-10/8			-10/10		-5/8	-10/10		+5/10	-30/46
			Espacios abiertos				-10/10		-5/8	-10/10		+2/7	-18/27
Empleo			+5/10			-10/10	-10/10		+2/10		+2/10	+29/50	
Usos del suelo (Turismo, etc.)						-5/10			-5/10		+8/7	-2/27	
Evaluación			-30/48	-7/11	-11/5	87/117	-6/49	-65/74	-103/120	35/64	98/140		

1.10.7. Método del Instituto Batelle – Columbus

Este método está basado en la definición de una lista de indicadores de impacto con 78 parámetros ambientales que se ordenan primeramente según 18 componentes ambientales agrupados en 4 categorías (Cuadro 1.29), denominando a los del 1er nivel como *categoría*, al 2º nivel como *componentes*, al 3er nivel como *parámetros* y a los del 4º nivel como *medidas o índices*. El componente del 3er nivel es la clave del sistema de evaluación.



Cuadro 1.29 Categorías ambientales del método Batelle – Columbus

Categoría ambiental	Componente	Parámetros	Índice de calidad ambiental IQA			Señales de alerta
			Sin impacto	Con impacto	Cambio neto	
Ecología						
Contaminación						
Estética						
Humano						

Los 18 componentes que este método considera, entre otros son: especies y población, hábitats y comunidades, ecosistemas, contaminación del agua, contaminación atmosférica, contaminación del suelo, ruido, aire y agua, etc. Con la lista de parámetros ambientales se pretende obtener una representación de la calidad del ambiente, facilidad en la medición en el terreno, respuesta a las experiencias del proyecto y posibilidades de evaluación del mismo (Conesa, V., 1997).

### 1.11. El ciclo de vida del producto

El ciclo de vida del producto, denominado LCA (*Life Cycle Assessment*), analiza el impacto o carga ambiental ocasionado o asociado a los productos, procesos y actividades desde su origen (materias primas, secundarias o productos semielaborados) a partir de los cuales se fabrican o procesan, pasando por el uso de la energía, fabricación, transporte, distribución, almacenamiento, utilización, mantenimiento y reutilización, hasta retirarlo del mercado y su transformación en un residuo que será reciclado, dispuesto o eliminado.

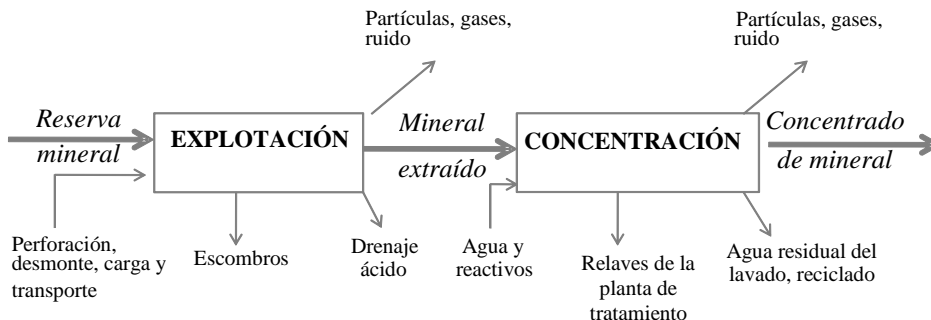


Figura 1.16 Esquema general del ciclo de vida en la explotación y concentración de minerales

La fig. 1.16 ilustra un esquema que representa en términos generales el ciclo de vida de un producto en el proceso productivo de las operaciones de explotación minera denominadas etapas de explotación y concentración.

En cada momento y lugar, la tecnología, las condiciones ambientales, los factores culturales, etc., condicionan de diferente manera los resultados del análisis del ciclo de vida.

Igual que en cualquier análisis de impacto ambiental, las etapas son: a) La realización del inventario, adquisición de recursos, fabricación, usos y gestión de los residuos; b) El análisis de los impactos, que supone una clasificación, caracterización y evaluación de los *impactos*; c) El análisis de las mejoras, que consiste en la búsqueda de alternativas de prevención y corrección de los impactos identificados.

La realización de las diversas etapas está normalizada por organismos como la ISO (International Organization for Standardization).

## **1.12. Normas de la serie iso 14000**

### ***1.12.1. Aspectos generales***

La ISO (International Organization for Standardization) es un organismo no gubernamental con sede en Ginebra, con más de 100 países miembros que está dedicada a la estandarización para productos, seguridad y ambiente, con alcance internacional.

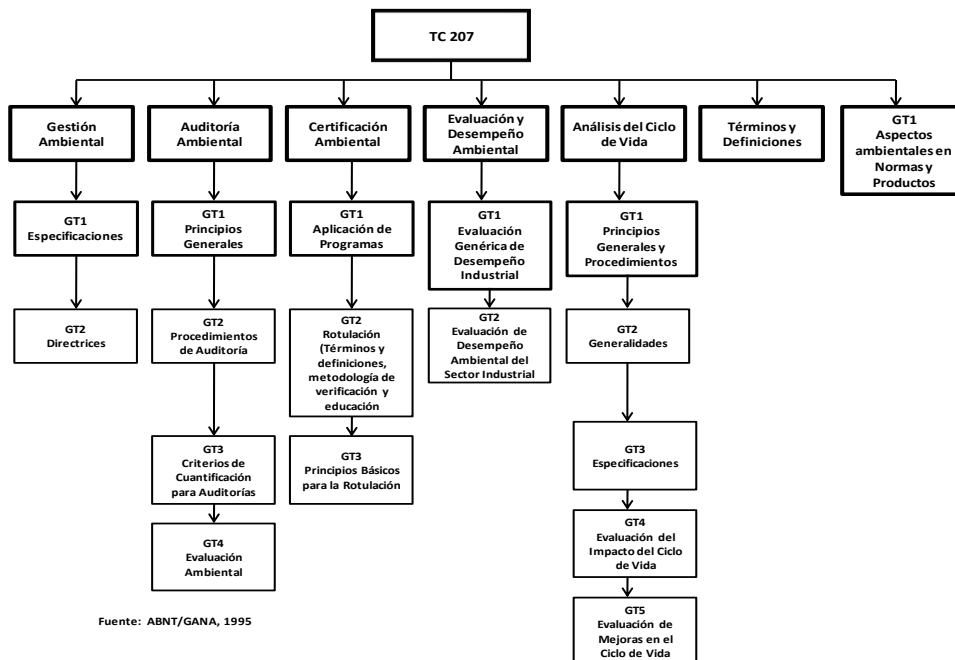
En 1987, la ISO concluyó las normas de la serie ISO 9000 adoptadas y reconocidas a nivel mundial, cuyo éxito permitió adquirir confianza para desarrollar otras normas.

A causa de la preocupación global sobre los problemas ambientales, la ISO estableció un compromiso con la UNCED (Conferencia sobre el Medio Ambiente y Desarrollo) para elaborar las normas ambientales, constituyendo un grupo de trabajo denominado SAGE (Strategic Advisory Group on the Environmental) que equivale a decir Grupo Asesor Estratégico sobre el Ambiente, que concluyó sus actividades en el año 1992.

En marzo de 1993 la ISO constituyó un comité técnico denominado ISO/TC 207 (fig. 1.17) con la finalidad de desarrollar los sistemas y herramientas de administración del ambiente para ciertas áreas ambientales.

Este comité (TC 207) fue dividido en seis grupos, cada uno de ellos dirigido por un representante de un país:

- Sistemas de administración ambiental: Reino Unido
- Auditoría ambiental: Países Bajos
- Clasificación ambiental: Canadá
- Desempeño ambiental (evaluación del desempeño ambiental): E.U.A.
- Análisis del ciclo de vida (evaluación del ciclo de vida): E.U.A.
- Aspectos ambientales en normas sobre productos: Alemania.



Fuente: ABNT/GANA, 1995

Figura 1.17 Organigrama de la ISO 14000

Entre las normas ISO 9000 e ISO 14000 existen algunas semejanzas, sin embargo existen marcadas diferencias (Cuadro 1.30).

### 1.12.2. Importancia de la Norma ISO 14000

Se considera a la norma ISO 14 000 como un factor de desarrollo y de comercio internacional (Casco, J. et AL., 1997), fundamentalmente porque:

*Facilita el comercio* eliminando las barreras comerciales, en los últimos años las normas nacionales y regionales en el campo ambiental, como en el caso de los E.U.A., Canadá, Inglaterra, Unión Europea entre otros, habían creado barreras comerciales, como la Ecoetiqueta por ejemplo.

*La norma permite una mejoría ambiental a nivel mundial*, por el hecho de ser unas normas de consenso internacional, proporcionan un concepto y terminología ambiental común y desempeñan un significativo papel en la evaluación ambiental del planeta, lo que facilita la armonización internacional de estrategias ambientales.

*Mejora la administración ambiental*, por estar preparada para atender todas las etapas de operación de una organización, sus productos y servicios, incluyendo elementos de política ambiental, recursos, capacitación, operaciones, respuesta a emergencias, auditorías, medidas y revisiones administrativas; obteniendo confiabilidad mediante la opinión continua y la participación de todos los directivos y empleados.

Cuadro 1.30 Comparación entre las normas ISO 9000 e ISO 14000

Partes	ISO 9000	ISO 14000
Metas	Proporciona a las organizaciones una manera de demostrar ante el cliente los requisitos y objetivos de la calidad.	Proporciona un elemento del sistema de administración ambiental, incluyendo la asesoría y el logro de las expectativas de un buen desempeño ambiental
Estructura	Mezcla de actividades de la administración con requerimientos de proceso y de verificación. Norma aparte.	Está dentro de un modelo basado en: <i>planificar, hacer, verificar y actuar</i> . La norma está separada
Contenido	Tanto ISO 9001 como ISO 14001 incluyen elementos de compromiso y responsabilidad de la dirección, documentación de la administración del sistema, control de documentos, control operacional, capacitación, supervisión, inconformidades y medidas correctivas, registros y auditorías.	
	ISO 9001 incluye elementos de planificación de la calidad particulares, identificación de productos, monitoreo y técnicas estadísticas.	ISO 14001 incluye elementos ambientales particulares, requerimientos legales, objetivos y metas, programa de administración, comunicaciones y respuesta a emergencia.

### 1.12.3. La ISO 14001 o Sistema de Gestión Ambiental

Según la serie ISO 14001, la gestión ambiental es la declaración de una organización de sus intenciones y principios en relación con su comportamiento ambiental, que proporciona el marco para sus actuaciones y para el establecimiento de sus objetivos y metas ambientales.

Según la norma francesa NF (X-30-200 *Système de Management Environnemental*), la gestión ambiental es un conjunto de actividades de gestión que define la política ambiental, sus objetivos y responsabilidades y que sirve para implantar tales actividades mediante la planificación de los objetivos, la medida de los resultados y el control de los efectos. Esta norma indica que la responsabilidad en las tareas de gestión ambiental es competencia de todos los escalones de la gerencia de la empresa, que debe ser conducido por la dirección, considerando los aspectos económicos y sociales pertinentes.

El plan Verde Holandés indica que el objetivo principal de la gestión ambiental es la conservación de la capacidad de carga del ambiente para el desarrollo sustentable y que supone prevenir o minimizar los efectos no deseados provenientes de la actividad humana.

El sistema de gestión ambiental incluye una estructura organizacional, la planificación de las actividades, las responsabilidades, las prácticas, los procedimientos, los procesos y los recursos para desarrollar, implantar, realizar, revisar y mantener actualizada la política ambiental.

1.12.3.1. La serie ISO 14001 como el elemento más importante de la norma ISO 14000

Los temas que abarca la norma ISO 14000 se pueden dividir en dos áreas separadas: La primera está relacionada con la administración de una organización y sus sistemas de evaluación y la segunda con las herramientas ambientales para la evaluación del producto (fig. 1.18).

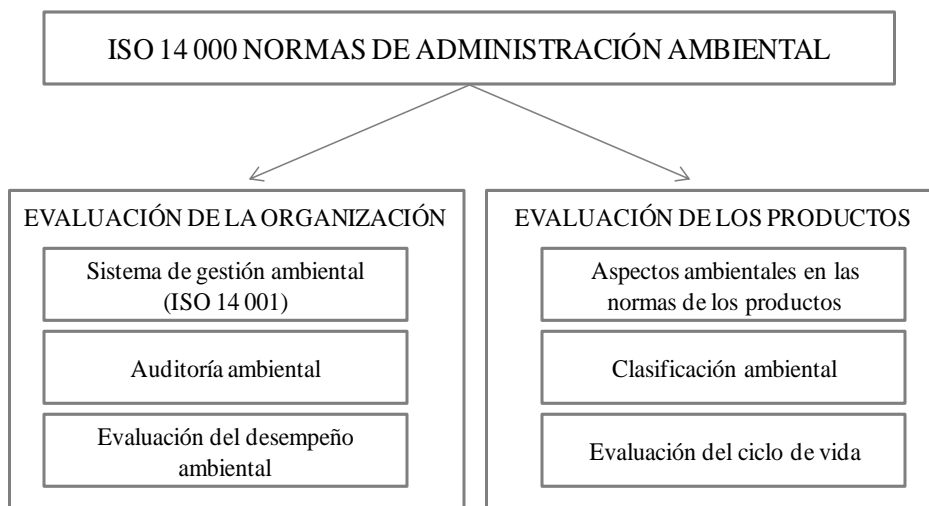


Figura 1.18 Familia de las normas ISO 14000 (basado en Cascio, J. *et al.*, 1997)

1.12.3.2. Evaluación de la organización

La norma de la *serie ISO 14001* es la base de toda la norma ISO 14000, denominada norma del sistema de administración ambiental EMS (*Environmental Management System*) y es el documento que contiene las especificaciones del sistema de administración de la serie ISO 14000 que debe cumplir una organización que procura el registro o certificación de la norma después de pasar una auditoría de un tercero independiente y debidamente acreditado y registrado.

La función de la norma ISO 14001 es similar a la de las normas ISO 9001, 9002 y 9003 de la serie ISO 9000.

La ISO 14001 también fue concebida para aquellas organizaciones que desean declarar su conformidad a segundas partes que están dispuestas a aceptar una autodeclaración sin la participación de un tercero.

El desafío principal para la organización y para el auditor es que exista uniformidad en las interpretaciones de las especificaciones.

La estructura del EMS incluye el compromiso y la política ambiental con metas y objetivos definidos, la planificación, actividades de implantación y operación, programa de control o comprobación, revisión o auditoría administrativa, de manera que coadyuve en alcanzar las metas y objetivos antes establecidos (fig. 1.19 izquierda).

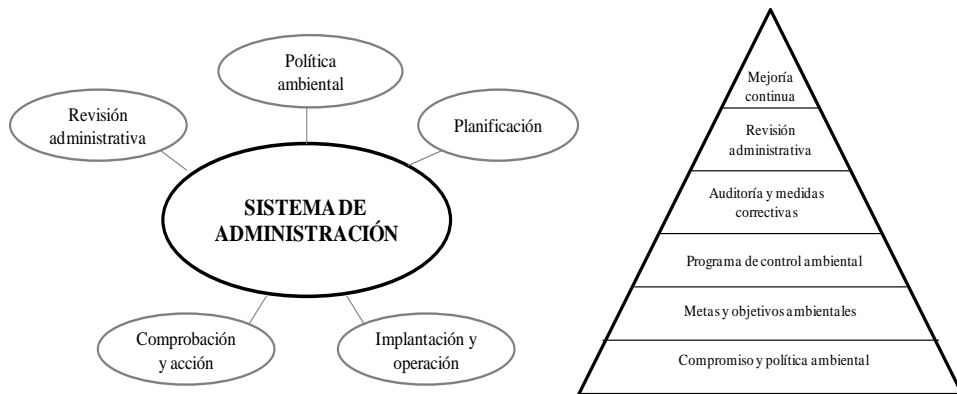


Figura 1.19 Elementos principales (izquierda) y pirámide (derecha) de un sistema de administración ambiental EMS ISO 14001

La fig. 1.19 (derecha) ilustra en términos generales los elementos del EMS donde los de mayor importancia están en la parte inferior.

Las normas ISO 14000 se pueden agrupar, en términos generales, en dos: a) Del sistema de gestión (14010, 14011, 14012 y 14031) y b) Normas de productos (14020, 14021, 14023, 14024, 14040, 14041, 14042, 14043 y 14060) (Cuadro 1.31). La ISO 14000 es aplicable tanto a grandes como a pequeñas empresas, teniendo alcance mundial.

Es importante precisar que la ISO 14001 no tiene nada que ver con la manera en que la empresa opta por mitigar o reducir los impactos ambientales para obtener una mayor eficiencia ambiental. La ISO 14001 aborda la manera en que una empresa puede proceder para establecer una estructura de gestión que garantice la implantación de programas de mitigación o reducción de los impactos ambientales, que los procesos estén documentados, que se definan y alcancen las metas ambientales y que se imparta una formación adecuada.

A diferencia de la ISO 9000 la ISO 14001 fija objetivos y metas, y también la forma cómo realizar el seguimiento de estas medidas.

Las *guías generales sobre principios, sistemas y técnicas (ISO 14004)* tienen carácter informativo y no se utilizan para la certificación o registro, incluye algunos ejemplos, decisiones, opciones y recomendaciones prácticas que ayudan a la implementación del EMS.

Cuadro 1.31 ISO 14000 normas de administración ambiental  
(basado en Cascio, J. *et al.*, 1997)

Serie	Evaluación de la organización	Serie	Evaluación del producto
14001	<i>Sistema de Gestión ambiental (EMS)</i> : especificaciones con la guía para su uso	14020	<i>Clasificación ambiental (EL)</i> : principios básicos para las clasificaciones ambientales
14004	<i>Sistema de gestión ambiental (EMS)</i> : guías generales sobre principios, sistemas y técnicas de soporte	14021	<i>Clasificación ambiental (EL)</i> : auto declaración de afirmaciones, términos y definiciones
14010	<i>Guía para auditoría ambiental (EA)</i> : principios generales	14022	<i>Clasificación ambiental (EL)</i> : símbolos y rotulado ambiental
14011/1	<i>Guía para auditoría ambiental (EA)</i> : procedimientos de auditoría. Parte 1 – auditoría de sistemas de administración ambiental	14023	<i>Clasificación ambiental (EL)</i> : metodología de pruebas y verificaciones
		14024	<i>Clasificación ambiental (EL)</i> : principios, guía y procedimientos para certificados de programas de criterios múltiples
14012	<i>Guía para auditoría ambiental (EA)</i> : criterios de calificación para auditores del sistema de administración ambiental	14040	<i>Evaluación del ciclo de vida (LCA)</i> : principios generales y guías para el análisis del ciclo de vida
		14041	<i>Evaluación de ciclo de vida (LCA)</i> : análisis de metas y definiciones/ámbito de inventario
14031	<i>Evaluación del desempeño ambiental (EPE)</i> : guías para la evaluación del desempeño ambiental	14042	<i>Evaluación de ciclo de vida (LCA)</i> : evaluación del impacto
		14043	<i>Evaluación de ciclo de vida (LCA)</i> : evaluación de las mejoras
14050	<i>Términos y definiciones (T&amp;D)</i>	14050	<i>Términos y definiciones (T&amp;D)</i>

Las ISO 14010, 14011 y 14012 son documentos a ser utilizados como guías para los empleados del registro, *auditores* y organizaciones que pongan en práctica el documento de especificaciones ISO 14001.

La ISO 14010 señala que una auditoría debe tener claramente definido y documentado el tema a auditar, por lo que los auditores no están en libertad de escoger el tema, siendo responsabilidad de la organización definir los objetivos de la auditoría. El ámbito y criterios de la auditoría son establecidos entre el auditor y la organización. Los miembros del equipo de auditoría deben ser independientes de las actividades que están por auditar, aunque la intervención de un auditor externo o interno es opción de la organización. El informe final incluye numerosos temas, siendo la conclusión lo más delicado del juicio profesional del auditor.

La ISO 14011 es de uso opcional de la norma ISO 14001 y su elemento clave es el desarrollo de un plan de auditoría. Indica lo relacionado a los aspectos que los auditores deben auditar, los procesos de revisión administración interna para asegurar la adecuación y efectividad del EMS y no el desempeño o efectividad del sistema.

La ISO 14012 también es opcional de la ISO 14001 y establece los criterios de calificación de los auditores ambientales internos y externos en relación a su nivel de educación, capacitación, experiencia, cualidades, habilidades personales y grado de competencia.

La ISO 14031 está relacionada con la evaluación del desempeño ambiental, que también para la norma ISO 14001 es opcional, aunque se recomienda que las organizaciones pueden utilizarla como referencia. Proporciona una base de indicadores de desempeño ambiental para todo tipo de organizaciones con carácter de ejemplo.

#### *1.12.3.3. Evaluación del producto*

Las series correspondientes para la evaluación del producto incluyen las guías para los aspectos ambientales en las normas de los productos EPAS (ISO 14020, 14021, 14022, 14023 y 14024) y para la clasificación ambiental y evaluación del ciclo de vida LCA (ISO 14041, 14042 y 14043), pero no son necesariamente parte del EMS por lo que no son exigidas por la ISO 14001.

Las series EPAS solamente advierten que los redactores de las especificaciones de las normas de productos consideren las consecuencias positivas y negativas que ellas generan.

En relación a la clasificación y evaluación del ciclo de vida LCA, tampoco la norma ISO 14000 define los estándares ambientales por su complejidad y diversidad de organizaciones existentes.

### **1.13. Costo ambiental**

Es evidente que la protección ambiental tiene un costo económico. Por ejemplo, una preocupación global es sin duda el impacto ambiental negativo en la atmósfera terrestre producido por la contaminación del aire o el efecto invernadero y la capa de ozono.

Se estima que a nivel mundial existen cerca de 800000 muertes cada año debido a la contaminación del aire (bronquitis crónica, cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares, neumonía y asma), de las cuales un 80% ocurren en los países desarrollados (World Health Organization WHO y World Resources Institute, WRI, 2000). Se estima que en Europa provoca cerca del 6% de la mortalidad total con un costo de 1,7% del PIB en el caso de Francia, Suecia y Austria (*Europe Ministerial Conference for Environment*, 2000).

En los países en vías de desarrollo se atribuye que la contaminación del aire provoca la muerte por infecciones de los pulmones en el 80% de los niños menores de 5 años (Cuadro 1.32).



Cuadro 1.32 Cargas ambientales que provocan riesgos de enfermedades en la salud humana (Murray y López 1996; Smith, 1998)

Grupo de salud ambiental	Porcentaje del total de DALY's							
	África	India	China	Asia/Pacífico	América Latina	FSE	LDCs	EME
Água/saneamiento	13	11	4,5	10	7	2	9	1,5
Malaria	9	0,5	0	1,5	0	0	3	0
Contaminación del aire interior	5,5	6	9,5	4	0,5	0	5	0
Contaminación del aire urbano	1	2	5	2	3	3	2	1
Efluentes agroindustriales	1	1	1,5	1,5	2	2	1	2,5

FSE - Former Socialist Economies of Europe (no incluye Asia Central); LDCs - (Less Developed Countries); EME - Established Market Economies.

Nota: En Asia/Pacífico se incluyen los países de este y sur de Asia, excepto China, India y Paquistán.

Un estimado del costo ambiental global realizado por el *Grupo Yokohama* (2000), con base en el año fiscal 2000 basado en el concepto de *Indicador de Carga Ambiental* denominado Eco Punto (EP) (Cuadro 1.33), considera las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CFC (cloruros), DQO (Demanda Química de Oxígeno), P, metales pesados, etc., generados por las actividades productivas y de servicios.

Cuadro 1.33 Costos ambientales globales ocasionados por las actividades productivas y de servicios (*Grupo Yokohama*, 2000)

Categoría de costos ambientales de producción y servicios	Medida	Costos	
		Millones de yenes	%
Prevención de contaminantes	Aire, agua y suelo	186	15,8
Protección ambiental global	Uso eficiente de energía, etc.	84	7,1
Reciclaje	Papel, disposición y tratamientos de efluentes	182	15,8
Impactos por reducción y aumento de área	Adquisición "verde"	11	0,9
Actividades de gestión	EMS y educación ambiental	543	46,2
Investigación y desarrollo	Procesos y tecnología limpia	101	8,6
Protección en actividades sociales	Reservas naturales y comunidades	60	5,1
Daños ambientales	Investigación y restauración de suelos	8	0,5

En 1999 una Comisión Europea (Amann, M. *et al.*, 2000) estimó el costo de reducción del nivel de contaminación ambiental del aire atmosférico de los países miembros de la Unión Europea (15) en 70 millones de euros por año para los principales contaminantes identificados (Cuadro 1.34).

En la República Popular China los costos de monitoreo y mitigación estimados para diversas industrias representan un valor promedio de 23% (Cuadro

1.35) (*Consultants, Ecology and Environment, Inc., United States, 2001*), siendo para la industria minero metalúrgica de 2% a 43%.

Finalmente, el problema de la economía ambiental se relaciona con el costo y el beneficio de las distintas empresas dedicadas a la explotación y transformación de recursos naturales.

Cuadro 1.34 Costos de reducción de algunos contaminantes atmosféricos que causan efecto invernadero en países de la Unión Europea (*Amann, M., et al., 2000*)

Contaminante	Reducción de 1999 a 2010 (%)	Costo de reducción (billones de Euros/año)
NO <sub>x</sub> y VOC	50 – 53	54
SO <sub>2</sub>	75	14
NH <sub>3</sub>	15	1,6

VOC: Compuestos Orgánicos Volátiles

El objetivo básico de una empresa es la generación de ganancias, por lo tanto, debe generar recursos para invertir en la recuperación de lo que utilizó de la naturaleza.

En la actualidad aumenta la importancia de las auditorías en las grandes organizaciones sociales para evaluar los costos ambientales presentes y futuros (contabilidad social y ambiental). Aumentan las inversiones de las organizaciones sociales en la recuperación y preservación del ambiente; por lo tanto, los activos y los pasivos ambientales no pueden ser ignorados.

El pasivo ambiental se evalúa mediante una auditoría especializada en las unidades productivas de la empresa, identificando las no conformidades con los requisitos legales y con su política ambiental, para después hacer la evaluación del área contaminada para que finalmente las soluciones sean valoradas monetariamente.

Cuadro 1.35 Costo de protección ambiental en la República Popular de China (*Consultants, Ecology and Environment, Inc., E.U.A., 2001*)

Nombre	Inversión fija (Y 100.000)	Inversión en protección ambiental (Y 10.000)	Porcentaje (%)
ATC	57058	19112	33,5
CNM	17984	5097	28,3
WFW	31930	564	1,8
WHC	19339	882	4,6
WSC	38045	8573	22,5
WZM	39981	4550	11,4
HTS	26026	7727	29,7
JTS	16094	7064	43,9
Monitoreo	4263	4263	100,0
Total	250720	57832	23,1

ATC=Anhui Tongdu Copper Limited Company; CNM=Chizhou Non-Ferrous Metals Group Company; WFW=Wuhu Felying Wood Chemicals Limited Company; WHC=Wuhu Hengxin Copper Group Company; WSC=Wuhu Shangjiang Chemicals Limited Company; WZM=Wuhu Zhengxing Materials Limited Company; HTS=Huangshan Tourist Group Limited Company; JTS=Jihua Tourism Group Company.  
 1Yuan = 0,1208 \$US

Las tres principales categorías de costos que componen el pasivo ambiental son: (1) Multas, tasas e impuestos a ser pagados por el incumplimiento de los requisitos legales; (2) Costos de implantación de procedimientos y tecnologías para atender las no conformidades; (3) Erogaciones necesarias para la recuperación del área degradada y la indemnización a las poblaciones afectadas.

Un concepto interesante es que el agotamiento de los recursos minerales o forestales es idéntico a la depreciación del estimado de la producción (Gouveia, N., 1976). Consiste en obtener el valor de agotamiento por unidad y se multiplica por la cantidad extraída cada año, hasta el agotamiento total de los recursos. La vida útil, en caso de los recursos minerales y forestales, se determina por la estimación de las unidades de producción que serán extraídas de esas fuentes.

Ejemplificando, supongamos un depósito de mineral X adquirido por € 100000,00, siendo estimada su capacidad en 800000 toneladas (vida útil).

El valor de agotamiento de cada tonelada será:  $100000\text{€}/800000 \text{ t} = 0,125\text{€/t}$ .

Suponiendo que en el primer año son extraídas 200000 toneladas de mineral, el valor del agotamiento de ese año sería de € 25000 ( $200000 \text{ t} \times € 0,125$ ). Siendo extraídas 120000 toneladas en el segundo año, el agotamiento será de € 15000. Cuando el depósito esté completamente agotado, el valor del agotamiento total corresponderá al costo histórico del depósito.

El agotamiento de los recursos naturales puede dañar el ambiente como también a la empresa que hace uso de estos recursos como materia prima.

La escasez de materia prima utilizada generará ineficacias a la empresa por no satisfacer sus necesidades y también generará ineficacias al ambiente por agotar los recursos naturales.

Una compañía de celulosa que no provea los recursos para la reforestación llegará a un punto en que no tendrá más árboles para ser utilizados como materia prima.

La industria del pescado debe tratar de que no haya desequilibrios en la reproducción de los peces. De lo contrario tendrá ineficacia con los medios patrimoniales.

El progreso de todos se debe hacer con el uso racional del ambiente natural, devolviendo al mismo tiempo aquello que fue tomado.



## **Capítulo 2**

### **METODOLOGÍA PARA MINAS SUBTERRÁNEAS**

---

#### **2.1. Minería y ambiente**

##### **2.1.1. Introducción**

Históricamente, la minería es vista esencialmente como una actividad industrial incompatible con la protección del ambiente. Sin embargo, en años recientes, los problemas ambientales de esta industria han sido abordados de manera importante, ocupando una posición significativa en los aspectos político, social y económico (Singh, R.N., 1998).

En el aprovechamiento de los recursos minerales de la naturaleza, participación humana utilizando diversos procesos, genera impacto ambiental, no sólo por el movimiento de tierras o rocas, sino también por el uso de sustancias químicas peligrosas.

La explotación y el aprovechamiento de los recursos minerales, dentro del concepto de conservación del ambiente, debe realizarse mediante una gestión racional e integral. El esquema de la fig. 2.1 representa un modelo de funcionamiento del proceso minero, donde se observa el carácter dinámico, espacial y temporal de sus actividades.

Las actividades básicas, que son: prospección y evaluación de reservas, explotación, concentración o beneficio y refinación, provocan impacto ambiental de diversas formas e intensidades, tales como: uso original de los terrenos, emanación de diversos contaminantes en cada actividad unitaria y, finalmente, en el agotamiento de reservas, etapa en que se debe realizar un cierre sistemático y restauración de los terrenos afectados. El uso racional, integral y eficiente del medio natural, en el proceso de la industria minera, requiere de una gestión adecuada de los recursos minerales, para lo cual es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Aprovechamiento integral de materias primas;
- Reciclaje de efluentes o residuos resultantes del proceso operacional;
- Uso eficiente de la energía;
- Explotación racional de los yacimientos minerales;
- Planificación de la producción acorde con la oferta y la demanda;
- Legislación y normas ambientales.

La mayor parte de las actividades que el hombre desarrolla son en mayor o menor grado agresivas para la naturaleza. En el caso de minería, por ejemplo, la restauración de los terrenos afectados al final de la vida de la mina es importante porque, de lo contrario el terreno estará en una situación de degradación. Por lo tanto, en la actualidad el concepto se basa en considerar la operación de explotación como transitoria y no como definitiva.

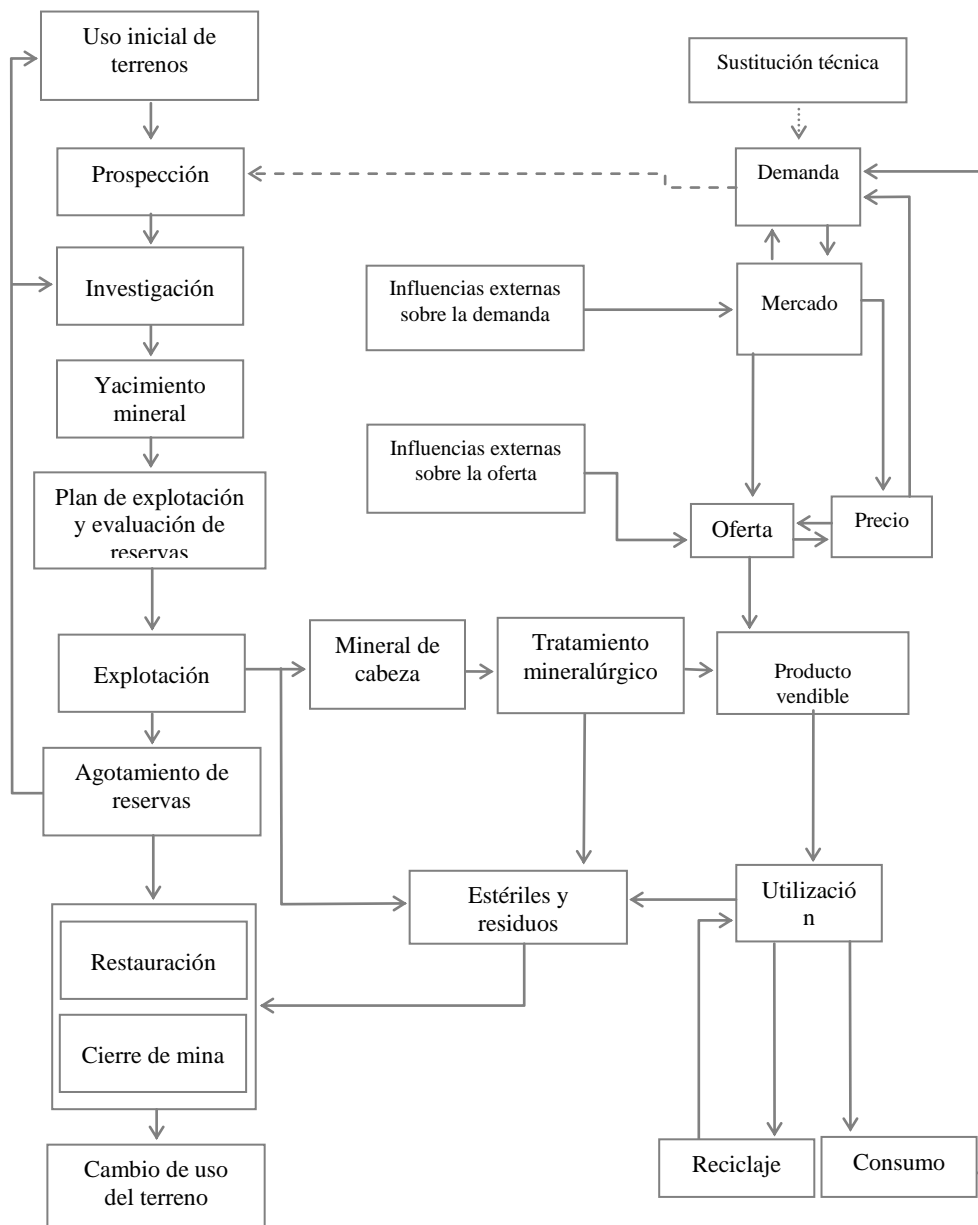


Figura 2.1 Esquema general de actividades de la industria minera (López Jimeno, C., 1989)

**2.1.2. Actividades mineras y su relación con el ambiente**

La OGMC (*Oil, Gas, Mining, Chemicals*) del IFC (International Finance Corporation) del Banco Mundial (<http://www.ifc.org/mining/key/environment/environment.html>), refiriéndose a la *minería y el ambiente* indica que la minería puede causar perturbaciones ambientales que varían desde el depósito de escombros y estériles, alteración de los suelos, polvo y ruido hasta el uso y contaminación del

agua. En caso que no se controlen adecuadamente, algunas de estas alteraciones pueden afectar negativamente la salud y la subsistencia de los grupos vulnerables y la biodiversidad de la zona de influencia de las operaciones.

La clave para la mitigación de los riesgos ambientales es la adaptación a normas apropiadas y al monitoreo. Todos los proyectos de minería tienen que acatar las normas sociales y ambientales que ayuden a asegurar que las operaciones mineras se lleven a cabo de manera responsable.

Para este fin, es necesario considerar seis aspectos principales: uso del suelo y del agua; gestión de los desechos; gestión de productos químicos y contaminantes; disposición de estériles; riesgos a la salud humana; riesgos ambientales potenciales y planes para mitigación de estos riesgos.

Por último, es importante tener en cuenta que la adecuada protección ambiental y social debe garantizarse en todas las fases de una operación minera como: prospección y evaluación del depósito mineral, construcción, operación y cierre de las operaciones de la mina.

El proceso de las actividades mineras debe llevarse a cabo dentro del principio de conservación del ecosistema y para ello es necesario realizar una adecuada gestión ambiental, teniendo en cuenta la interacción de las actividades del proyecto minero con el ambiente circundante.

El concepto actual de la relación de las actividades mineras con el ambiente está orientado principalmente al impacto causado por la actividad de explotación minera realizada por el hombre frente al ecosistema localizado en su ámbito de acción (fig. 2.2).

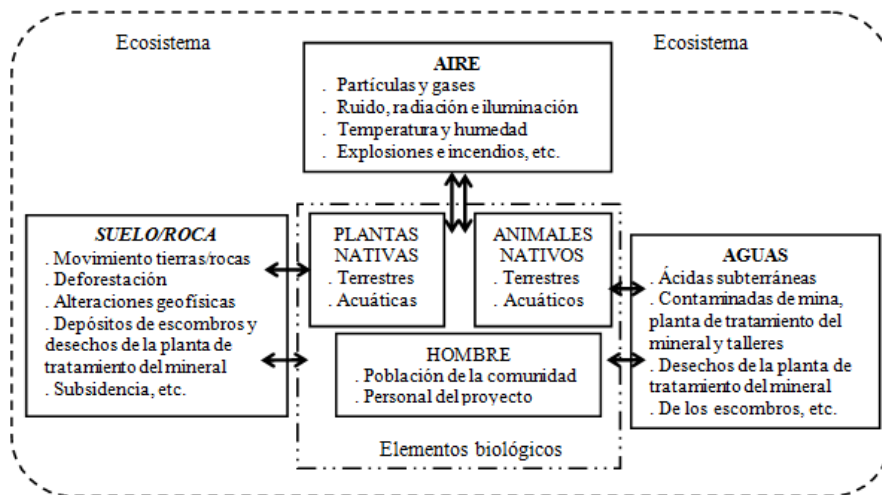


Figura 2.2 Concepción de la relación entre las actividades de minería y ambiente

Para una adecuada gestión ambiental en las operaciones mineras es fundamental realizar el estudio de impacto ambiental (Cuadro 2.1), que debe comprender la caracterización de las fuentes, la identificación de los impactos ambientales y la búsqueda de medidas correctivas, la aplicación de estas (medidas

correctivas) y, por último, el seguimiento a través del monitoreo sistemático que garantice el cumplimiento de la aplicación de las medidas adoptadas para así garantizar la protección ambiental de la naturaleza.

Cuadro 2.1 Fuentes de impacto ambiental y las medidas correctivas en el proceso de minería

Fuentes de impacto ambiental	Medidas correctivas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocupación de suelos por aperturas, escombreras, construcción de vías de acceso, edificios y planta de tratamiento mineralúrgico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retiro y recolección de capa vegetal de las áreas ocupadas con vegetación.</li> <li>• Plan y modelos de recuperación del terreno, después de la explotación, de modo que permita la utilización productiva y ecológica.</li> <li>• Revegetación de áreas afectadas.</li> <li>• Uso de métodos indirectos de explotación y métodos alternativos de disposición de escombros.</li> <li>• Estabilización física y química de las escombreras.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación de aguas superficiales (partículas sólidas, elementos tóxicos y no deseables disueltos, acidificación, presencia de elementos metálicos como Cu, Fe, Mn, Zn, etc.) por los escombros y el vertido de efluentes de aguas ácidas de una mina.</li> <li>• Alteración del régimen de aguas subterráneas por bombeos y aberturas en el macizo rocoso.</li> <li>• Contaminación de aguas subterráneas con aceites, hidrocarburos, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Canalización y drenaje a tanques de sedimentación para procesos de decantación antes del bombeo.</li> <li>• Monitoreo permanente sobre la cantidad y calidad del agua.</li> <li>• Aislamiento de materiales solubles y contaminantes, con protección mediante materiales estables de la propia mina.</li> <li>• Recolección de aceites y masas consistentes, hidrocarburos, etc., para evitar la contaminación del agua.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación del ambiente con polvos, gases, ruido, explosiones, incendios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prevención y control de polvo, gases, ruido y riesgos de incendio.</li> <li>• Riego de frentes de trabajo y estabilización físico-química de polvos.</li> <li>• Uso de equipos y maquinaria adecuados.</li> <li>• Utilización de dispositivos de protección.</li> </ul>

### 2.1.3. Explotación de yacimientos minerales

Es la etapa que comprende la construcción de la infra-estructura de la mina, el arranque, remoción y transporte de las reservas minerales, para su posterior tratamiento mineralógico y metalúrgico, utilizando métodos, equipos, materiales y productos de diversos tipos.

El método de explotación utilizado normalmente se divide en dos grupos: cielo abierto y subterráneo. La explotación a cielo abierto aporta más del 85% de la producción mineral en el mundo y la subterránea el 15% restante (fig. 2.3).



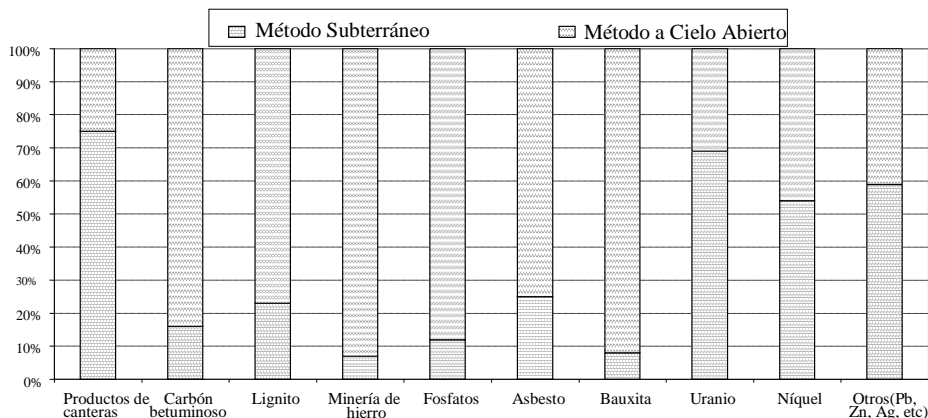


Figura 2.3 Relación de la minería subterránea y a cielo abierto en la producción de diferentes sustancias minerales (elaborado según López Jimeno, C., 1989).

En la mayoría de los países productores de minerales como Perú, entre el 80 y 90% de las minas emplean el método subterráneo y entre el 10% y 20% las que explotan por el método de cielo abierto (Llanque; Navarro, V.F., et al., 1999). La minería subterránea es el sector con mayor personal humano ocupado directamente (López Jimeno, c. 1989).

A nivel general la explotación a cielo abierto se caracteriza por la remoción de grandes volúmenes de material y como consecuencia utiliza maquinaria de gran capacidad, se realiza normalmente por proceso de bancadas descendientes con secciones transversales tronco cónico (fig. 2.4).

El movimiento de material puede alcanzar en el caso de Perú de 50000 a 150000 t/día, utilizando máquinas de perforación para realizar barrenos con 215 a 440 mm de diámetro, cargas explosivas en el orden de 0,15-0,20 kg/t, cargadores de hasta 23 m<sup>3</sup> de capacidad de cucharón y camiones con motor diesel de 200 a 350 t de capacidad. En el transporte algunas minas utilizan bandas transportadoras y locomotoras con motor diesel.

La remoción de escombros en la explotación subterránea es en menor cantidad que por el método a cielo abierto siendo, en este caso, uno de los problemas de control de la estabilidad de las aperturas subterráneas (fig. 2.4). La producción de mineral puede alcanzar entre 6000 a 30000 t/día utilizando máquinas de perforación neumáticas o electrohidráulicas (barrenos con diámetros de 33 mm hasta 165 mm) y carga explosiva del orden de 0,25 a 0,30 kg/t. En la carga y transporte se utilizan normalmente LHD eléctricas o a diesel, locomotoras eléctricas y camiones diesel.

Para la evaluación de los impactos ambientales generados por el proceso de explotación de yacimientos minerales, es muy importante identificar las fuentes de impacto o contaminación ambiental, las cuales tienen relación con el ciclo operacional o ciclo de vida (fig. 2.5) de esta etapa productiva.

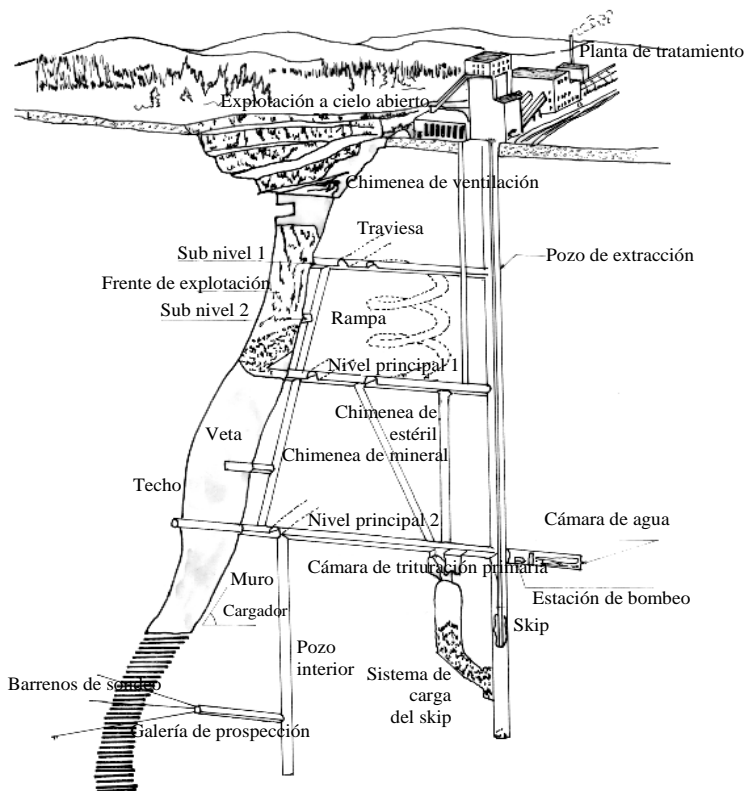


Figura 2.4 Métodos de explotación subterránea y a cielo abierto (Llanque, O; Navarro, V.F., et al., 1999)

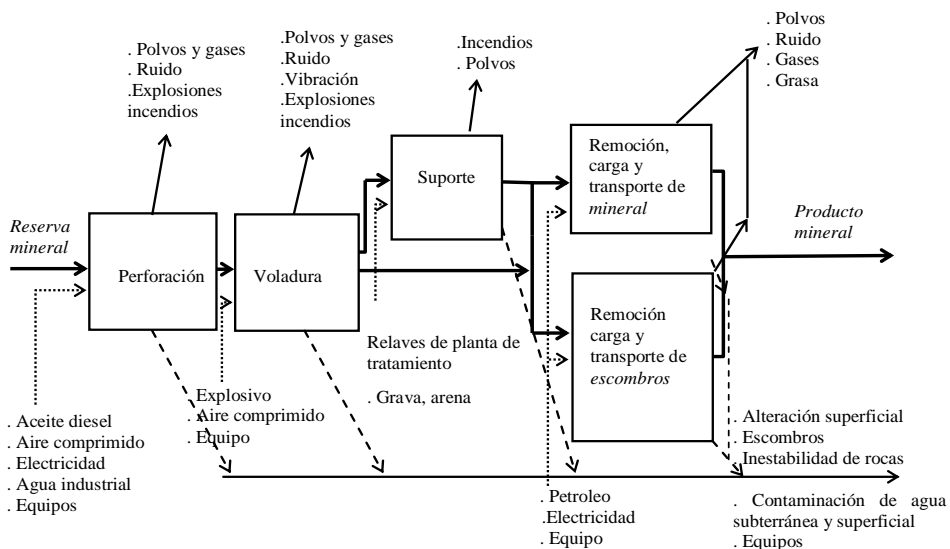


Figura 2.5 Etapas generales de la explotación de yacimientos minerales y fuentes de impacto ambiental

Cada método de explotación subterránea o a cielo abierto tiene ventajas e inconvenientes ambientales (Cuadro 2.2), debido a las particularidades en el proceso operacional.

El presente estudio de investigación está orientado a la ingeniería del ambiente subterráneo, que tiene relación con el proceso de explotación subterránea del yacimiento mineral. Por lo tanto, las fuentes de contaminación ambiental están relacionadas con las actividades del ciclo operacional, que en términos generales son: perforación, voladura (disparo), soporte, remoción, carga y transporte de mineral y/o estéril, que ocasionan la contaminación de la atmósfera subterránea, los riesgos ambientales por la alteración del flujo de las aguas subterráneas y el drenaje ácido y por la caída y desprendimiento de rocas.

Cuadro 2.2 Ventajas y desventajas ambientales de los métodos de minería (Ripley Earle, A., *et al.*, 1996; Llanque, O, Navarro, V.F., *et al.*, 1999)

Métodos de explotación	Ventaja ambiental	Desventaja ambiental
a) Subterráneo . Sin soporte	- Escaso arranque de roca con relación a minería a cielo abierto	- Potencial grande de subsidencia - Oxidación por exposición de material
. Con relleno	- Poco riesgo de subsidencia - Poco escombros	- Riesgo de oxidación y combustión de material de soporte - Drenaje ácido y afectación de acuíferos
b) Superficial . Cielo abierto	- Fácil acceso y menor riesgo para trabajadores, en comparación con la minería subterránea	- Grandes cantidades de escombros - Polvos, ruido y oxidación
. Aluvial	- Relativamente fácil control de daño ambiental	- Riesgo de emisión de partículas a la atmósfera e hidrosfera. - Alteración superficial
c) Indirecto . Lixiviación "in situ"	- Reducción de escombros, rechazos y alteración superficial - Reducción de riesgos de trabajo	- Grandes cantidades de soluciones salinas. - Riesgo de contaminación de aguas subterráneas y superficiales
. Utilización "in situ"	- Mínimo riesgo de subsidencia y escasa producción de residuos sólidos - Mínimo riesgos de trabajo	- Difícil control de proceso en subsuelo - Alto riesgo de contaminación de aguas subterráneas

## 2.2. Concepción del ambiente subterráneo

### 2.2.1. Definición de ambiente subterráneo

La búsqueda bibliográfica realizada en el capítulo 1, sobre el avance de la humanidad en el tema ambiental, permite caracterizar y definir lo que es el ambiente subterráneo.

Para tal fin es conveniente revisar algunas definiciones aceptadas sobre el ambiente, para después definir el ambiente subterráneo con el objeto de desarrollar la ingeniería ambiental para este ámbito.

Una definición aceptada del ambiente por la Conferencia de Estocolmo en 1972 es que el *ambiente es el conjunto, en un momento dado, de los agentes físicos, químicos, biológicos y de los factores sociales susceptibles de causar un efecto directo o indirecto, inmediato o a largo plazo, sobre los seres vivos y las actividades humanas.*

Gallopín en 1981, conceptualiza que *el ambiente de un sistema se puede definir como otro sistema que influye en el sistema considerado y recibe la influencia de este.*

Kielly, G. (1999), se pregunta *¿qué es el ambiente?* Luego se responde en el sentido de que en forma habitual nos referimos al ambiente, al medio o al medio ambiente. Continúa para indicar que el ambiente natural está compuesto por componentes no biológicos (*aire, agua, tierra*) y componentes biológicos (*plantas, animales, organismos muertos*). El hombre no solo es dependiente de los medios vivos, sino de la totalidad de la Tierra y depende de la conservación del medio natural y de la interacción entre los organismos vivos (*incluido el hombre*) y los componentes físico-químicos del planeta Tierra. Los componentes físico-químicos (inertes) y los biológicos (vivos) son los factores ambientales que pueden ser modificados por las actividades realizadas por el propio hombre.

Gómez Orea, D. (1988), define el ambiente o el medio ambiente como el medio vital o conjunto de factores físico-naturales, sociales, culturales, económicos y estéticos que interactúan entre sí, como un individuo y con la comunidad en que vive, determinando su forma, carácter y sobrevivencia. No se debe considerar como el medio envolvente del hombre, sino como algo indivisible de él, de su organización y su progreso.

Los factores ambientales son los componentes del ambiente donde se desarrolla la vida en el planeta Tierra, siendo el soporte de toda actividad humana. Estos factores son susceptibles de ser modificados por el hombre que, en un nivel determinado, puede ocasionar graves problemas de forma inmediata, a mediano o largo plazo. Estos factores son:

- El hombre, flora y fauna;
- El suelo, agua, clima y paisaje;
- Bienes naturales y patrimonio cultural.

Conesa, V., (1992) define *impacto ambiental* cuando una acción o actividad produce una alteración en el medio o en algún componente o subcomponente. Esta acción puede ser un proyecto de ingeniería, un programa, un plan, una ley o una disposición administrativa con implicaciones ambientales. Cuando un impacto ambiental es negativo produce una degradación ambiental pudiendo poner en riesgo la vida humana, por lo que es necesario tomar las medidas de prevención o mitigación correspondientes.

De forma similar, el ambiente subterráneo, es el medio con componentes ambientales no biológicos (*aire, agua y rocas*) y biológicos (*virus, bacterias, incluido el propio hombre*) (fig. 2.6).

La atmósfera subterránea está compuesta por el *aire* proveniente del aire del ambiente global, introducido bien sea por medio natural o artificial. La hidrósfera subterránea está representada por *las aguas subterráneas* y la litósfera

por la roca y en el caso de las aberturas próximas a la superficie por *suelos* y/o *rocas*.

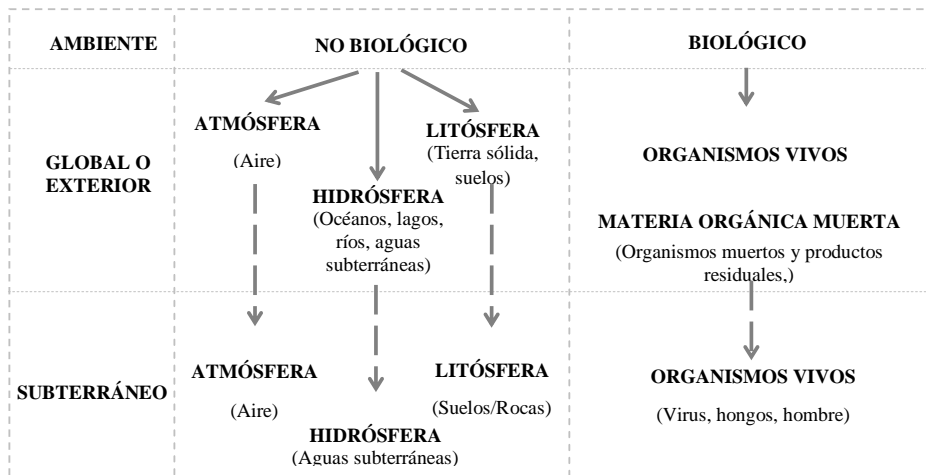


Figura 2.6 Componentes del ambiente global y del ambiente subterráneo

El componente biológico está conformado principalmente por el *hombre*, pero también por virus, bacterias y hongos que pueden ser el resultado de la descomposición de la madera utilizada en el soporte.

El ambiente subterráneo constituye parte del ambiente global o exterior, no siendo parte aislada o independiente del ecosistema (fig. 2.7).

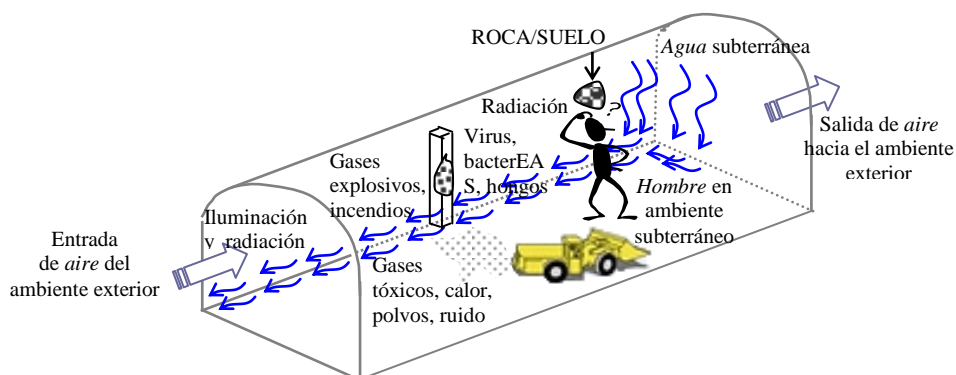


Figura 2.7 Ambiente subterráneo como parte del ambiente global o exterior

De forma similar a lo que sucede en el ambiente exterior, entre los componentes del ambiente subterráneo existe una interacción y relación, por lo que cualquier alteración de las condiciones naturales de estos componentes causa impactos ambientales que pueden poner en riesgo la vida humana (fig. 2.8).

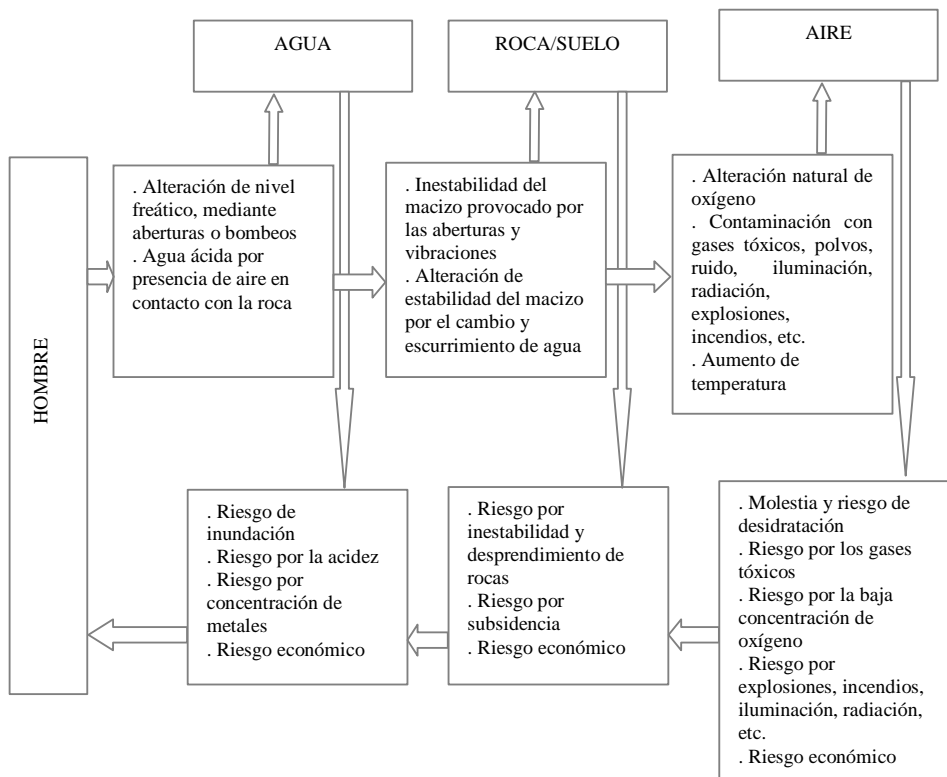


Figura 2.8 Interacción entre los componentes físico-químicos y el hombre en el ambiente subterráneo

Similar a las definiciones de ambiente revisadas, el *ambiente subterráneo* se puede conceptualizar como el medio subterráneo donde ocurre la interacción de los cuatro dominios ambientales que son: atmósfera subterránea, agua subterránea, roca y los componentes biológicos (principalmente el hombre). En el ámbito subterráneo, también el hombre es el componente biológico más importante y su acción ocasiona efectos ambientales negativos directos e indirectos, inmediatos, a mediano y largo plazo, provocando impactos en el medio subterráneo (vida humana) y en el exterior (subsidencia, escombros, agua ácida).

De igual forma, el Sistema de Gestión Ambiental Subterráneo (SGAS) se puede definir como el conjunto de acciones, de toda la estructura organizacional de la empresa, encaminadas a prevenir o minimizar los efectos no deseados sobre el ambiente, ocasionados por las actividades de explotación subterránea que realiza el hombre.

### 2.2.2. Hipótesis para el desarrollo de la ingeniería ambiental subterránea

Con los fundamentos y el análisis comparativo y visualizando desarrollar la ingeniería ambiental subterránea, se formula el axioma o hipótesis siguiente:

Siendo el ambiente subterráneo parte del ambiente exterior (global), en este ámbito también existe una natural interrelación e interacción de los cuatro dominios del ambiente (atmósfera subterránea, agua subterránea, macizo rocoso y el componente biológico – el hombre), los que, por la presencia y acción del propio hombre, son alterados en sus condiciones naturales, traduciéndose en impacto o riesgo ambiental, por consiguiente, reviste una gran importancia desarrollar una Ingeniería Ambiental Subterránea (EAS), considerando la interacción integrada de estos componentes y con enfoques contemporáneos.

### 2.2.3. Justificativos del trabajo de investigación

La Ingeniería Ambiental Subterránea (EAS) a desarrollar permitirá un enfoque global y una coherente gestión del ambiente subterráneo, para una adecuada protección ambiental, de cara a las alteraciones provocadas por las actividades de explotación de los recursos naturales (minerales) del subsuelo.

El desarrollo de la EAS está plenamente justificado por el hecho de que las acción humana en el subsuelo provoca una alteración de los componentes del medio del ambiente natural creando riesgos que afectan al medio y a la vida humana, reflejándose en los frecuentes accidentes mortales que ocurren en las minas subterráneas del mundo, como se muestra en la fig. 2.9, las estadísticas de accidentes mortales en minas subterráneas de E.U.A. y de la fig. 2.10 en minas peruanas.

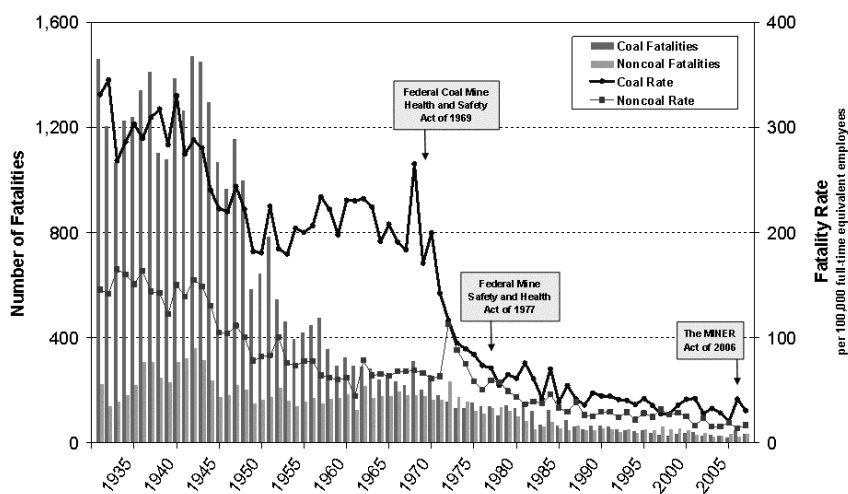


Figura 2.9 Pérdida de vidas humanas en minas subterráneas de E.U.A. de 1931 a 2007 (*Mine Safety, Health and Administration MSHA, E.U.A. [www.msha.gov](http://www.msha.gov)*)

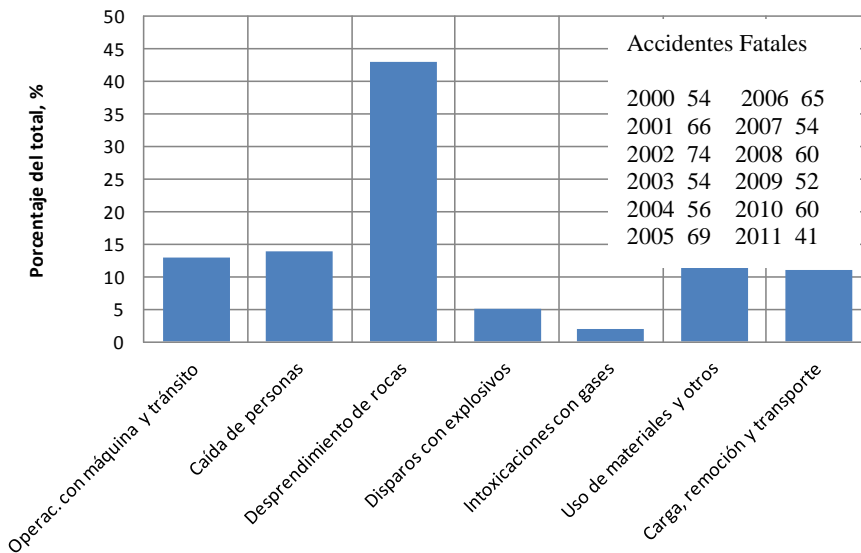


Figura 2.10 Pérdida de vidas humanas y causas en minas subterráneas de Perú (basado en estadísticas de los años 2000 a 2011 del Ministerio de Energía y Minas de Perú, disponible en <http://www.mem.gob.pe/>)

El Cuadro 2.3 presenta la relación entre los accidentes fatales y la cantidad de trabajadores mineros, elaborado con base en el promedio de trabajadores mineros de la minería subterránea y en el promedio de accidentes fatales en los últimos 10 años (1990-2000), de las estadísticas del MSHA de E.U.A. [www.msha.gov](http://www.msha.gov), 2001, *Sociedad Nacional de Minería, Energía y Petróleo de Perú*, [www.snmp.org.pe](http://www.snmp.org.pe), 2001 y de la revista Agua & Ambiente n.º 20 – Año 2, Especial industria extractiva (Portugal 2001).

Cuadro 2.3 Relación de accidentes mortales que se basa en el promedio de los trabajadores de la minería subterránea y el promedio de accidentes mortales

País	Cantidad promedio de trabajadores mineros	Cantidad promedio de accidentes fatales	Relación de accidentes fatales/trabajadores mineros
E.U.A.	229471	51	1/4499
Portugal	713	0,4	1/1783
Perú	48000	85	1/565

Además de la muerte, la contaminación de la atmósfera subterránea causa enfermedades profesionales (cáncer de los pulmones por el efecto de la emisión de los equipos con motor diesel y radiaciones, silicosis y enfermedades similares, sordera por el ruido, molestia por las altas temperaturas, explosiones e incendios), las aguas subterráneas y el drenaje ácido provocan inundaciones, alteraciones en la biodiversidad y el ecosistema y la inestabilidad del macizo rocoso ocasiona accidentes con inhabilitación física, psíquica y corporal.

Estos problemas del ambiente subterráneo son tradicionalmente abordados en todo el mundo a través de procedimientos, técnicas y sistemas de gestión de



Seguridad e Higiene, pero no como un aspecto ambiental. Por lo tanto, el abordaje ambiental, proporcionaría herramientas técnicas y sistemas de gestión *viabiles* para el aprovechamiento de los recursos naturales del subsuelo en armonía con la naturaleza y el ambiente.

## 2.3. Ambiente, salud y seguridad

### 2.3.1. Conceptos de ambiente, salud y seguridad

En relación con el término *ambiente*, en el nuevo diccionario de la lengua Portuguesa Aurelio (<http://www.redeambiente.org.br/Opiniaio.asp?artigo=62>) se encuentran siguientes las definiciones:

Ambiente, el conjunto de condiciones naturales y de influencias que actúan sobre los organismos vivos y los seres humanos.

Medio, es el lugar donde se vive, con sus características y condicionamientos geofísicos; ambiente, esfera social o profesional (donde se vive o trabaja).

Esto quiere decir que, todo lo que hacemos o dejamos de hacer en el día a día tiene repercusiones mínimas o grandes en el ambiente. Por lo tanto, es extremadamente necesaria una conciencia ambiental en todas las ramas de la sociedad, para nuestro bienestar y el de todas las generaciones (principios de desarrollo sustentable y de la Agenda 21).

Con relación al término *salud* el diccionario de la lengua Portuguesa de Porto Editora (<http://www.portoeditora.pt/dol/default.asp?param=08010100>) da la siguiente definición: *salud*, estado en que se es sano; ausencia de enfermedad; estado normal de los órganos; vigor; robustez.

Pero, a diferencia de la enfermedad, que en general es tangible, reconocible y fácilmente identificable, la *salud* es una condición difícil de definir. Una persona puede ser fuerte, resistente a las infecciones, apta para enfrentar el desgaste físico u otras presiones de la vida cotidiana, no obstante se considera enferma si su estado mental fuera juzgado frágil.

El concepto de *salud* implica algo más que el condicionamiento físico, implica también el bienestar mental y emocional. Una persona trastornada, frustrada, emocionalmente inestable, pero en excelente condición física no se puede considerar saludable, porque no está en perfecta armonía con su ambiente. Un individuo en ese estado es incapaz de emitir juicios correctos y tener reacciones racionales.

Una definición más precisa de la *salud* puede ser, por lo tanto, la capacidad que el organismo presenta de funcionar en completa armonía con su ambiente, lo que implica la capacidad para enfrentar física, emocional y mentalmente las tensiones cotidianas. De acuerdo con esa definición, la *salud* es interpretada en función del ambiente individual.

En resumen, la *salud* puede ser definida como la capacidad física, emocional, mental y social que el individuo tiene de interactuar en completa armonía con su ambiente.

Finalmente, con relación al término *seguridad* la mejor definición puede obtenerse del diccionario de Aurelio (<http://www.scua.net/seguranca/conceitos/seguranca.htm>) conforme se describe a continuación:

*Seguridad* es el estado, calidad o condición de seguro; condición de él o de aquello en que se puede confiar y finalmente, es la certeza, firmeza, convicción.

*Seguro* proviene del latín *securu*, que significa libre de peligro; libre de riesgo; protegido, custodiado, garantizado; en quien se puede confiar; cierto, indubitable, indiscutible y eficaz, eficiente.

### 2.3.2. Relación entre ambiente, salud y seguridad

El *ambiente*, la *salud* y la *seguridad* tienen una interrelación en el sistema productivo de la industria minera y en particular dentro de la actividad de la explotación de minas, que se denomina EHS por su denominación en idioma inglés, *Environmental, Health and Safety*. Se puede afirmar que una buena calidad ambiental puede implicar una buena salud humana y viceversa, de igual forma una buena seguridad se ve reflejada en pocos accidentes y, en consecuencia, buena salud ocupacional y viceversa, finalmente las acciones con seguridad pueden mejorar el entorno y viceversa. La relación entre la seguridad y el ambiente está en que una buena seguridad influye en una buena calidad ambiental (fig. 2.11).

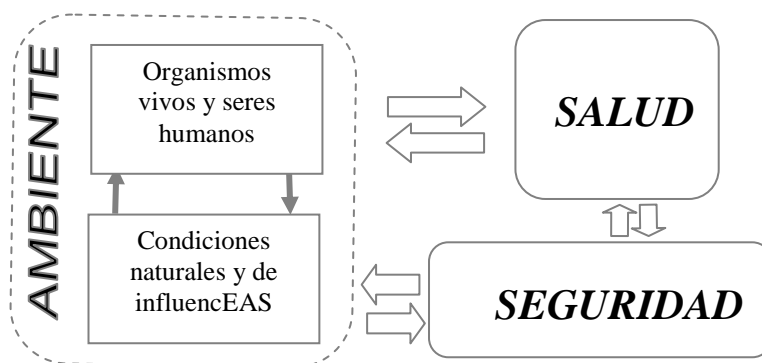


Figura 2.11 Relación entre ambiente, salud y seguridad (EHS)

Por lo tanto, en la actividad industrial minera y en particular en una mina subterránea, al poner en práctica un sistema de gestión integrado de ambiente, salud y seguridad permitiría optimizar la conservación de la calidad ambiental, de la salud y seguridad ocupacional del personal participante en las actividades de la industria.

Las empresas mineras tienen la obligación de cumplir con todas las leyes, normas y reglamentos ambientales aplicables, debiendo promover la conciencia, el interés y la formación o capacitación ambientales entre sus empleados y la comunidad en la que opera.

Las empresas mineras también deben proteger la salud y la seguridad ocupacional de sus empleados y harán exámenes en todas las etapas para eliminar o reducir la exposición del personal a circunstancias que afecten adversamente su seguridad y/o salud en el trabajo, incentivando la conciencia, el interés y capacitación del personal dentro y fuera del ambiente operacional.

## 2.4. Situación actual de la ingeniería ambiental subterránea

En la actualidad, el problema de la ingeniería ambiental subterránea viene siendo abordado desde el punto de vista de la seguridad e higiene de los trabajadores, sin considerar el concepto ambiental.

Además de tratar el ambiente de la mina como un tema de seguridad e higiene ocupacional, es considerado simplemente como la interacción de los componentes físico-químicos o inertes (polvos, temperatura, vibración, humedad, gases tóxicos, iluminación, ruido) existentes en la atmósfera subterránea o en el aire.

También se observa, en el esquema, que es considerada la velocidad y el flujo de aire; esto se debe a que estos aspectos son tratados en forma aislada y como un aspecto relacionado con la ventilación de las minas (fig. 2.12).

El ambiente subterráneo concebido de esa forma no considera la interacción de otros componentes del ambiente subterráneo, como son el *agua* y la *roca* (fig. 2.13).

La EAS debe considerar la interacción ambiental de los tres componentes ambientales (aire, agua, roca) que interactúan entre sí y, fundamentalmente, con el componente biológico o *vivo* que en este caso es principalmente la acción del hombre.

En la explotación de minas subterráneas y en general en excavaciones subterráneas (túneles, cámaras para el almacenamiento de ciertos materiales, etc.) la presencia del agua y la inestabilidad de las rocas constituyen un gran problema y preocupación histórica del hombre, pero son abordadas desde una óptica aislada y también dentro del concepto de seguridad y salud.

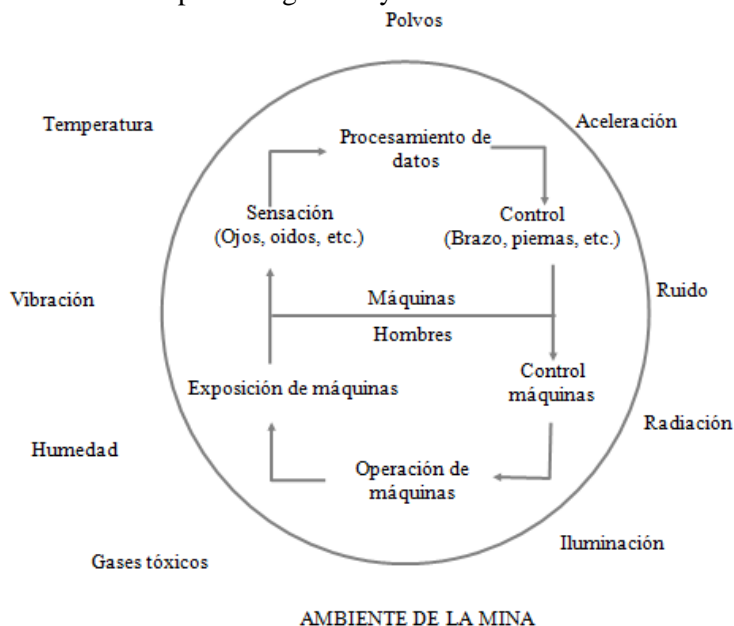


Figura 2.12 Seguridad y salud en el ambiente de operación de minas (Mutmansky, J.M., *et al.*, 1992)

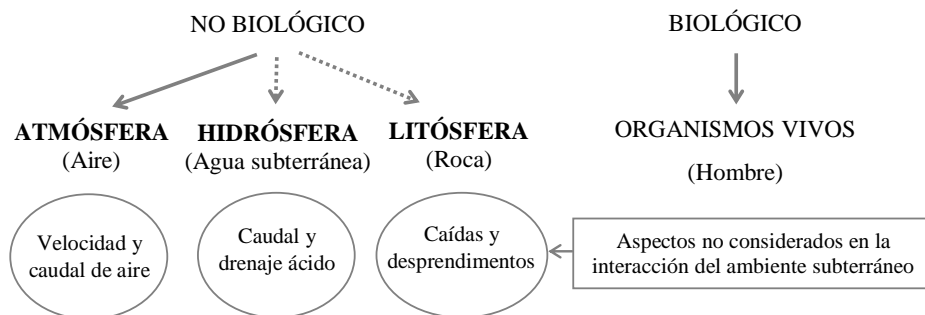


Figura 2.13 Componentes considerados y no considerados en el concepto actual de ambiente subterráneo

Una manera de expresar las enfermedades humanas es mediante los índices de frecuencia, de severidad y en algunos casos mediante el índice de accidentabilidad dados por:

$$IF = 1000000(NAP/THH) \quad IS = 1000(NDPA/THH)$$

Donde, *IF* es el índice de frecuencia, *NAP* es el número de accidentes que ocasionan pérdidas de horas de trabajo, *THH* es el total de horas hombre trabajadas, *IS* es el índice de severidad, *NDPA* es el número de días de trabajo perdidos por accidentes.

Los índices de accidentes de trabajo referidos relacionan fundamentalmente la seguridad y salud del trabajador minero; pero las horas de trabajo perdidas por accidentes fatales, discapacitantes o leves son registradas teniendo en cuenta todo tipo de situaciones de inseguridad, que son diferenciadas básicamente como actos inseguros y condiciones inseguras.

Por último la forma de cómo se aborda el ambiente subterráneo también se refleja en las normas jurídicas existentes como el Decreto ley nº 162/90 del 22 de mayo de 1990 en Portugal y el Decreto Legislativo Nro. 708-709 del 06 de noviembre de 1991 y el Decreto supremo Nro. 023-92-EM (*Reglamento de Seguridad e Higiene Minera*) en Perú.

Por lo tanto, el concepto actual de la ingeniería ambiental subterránea no tiene los fundamentos, bases y tratamientos de las corrientes modernas de la ingeniería ambiental en general, a pesar de constituir parte del ambiente o medio ambiente normalmente concebido.

### 2.5. Propuesta de ingeniería ambiental subterránea

La propuesta de la Ingeniería Ambiental Subterránea (IAS) está basada en el proceso de gestión ambiental del ambiente exterior, con las características propias del medio subterráneo, de modo que la explotación de los recursos naturales del subsuelo (minerales) se realice con un plan de protección ambiental y condiciones de calidad del ambiente cónsono con las normas vigentes.

Esta propuesta de IAS es para situaciones de ambiente subterráneo en minas en operación (fig. 2.14) y para situaciones de nuevos proyectos (fig. 11.2).

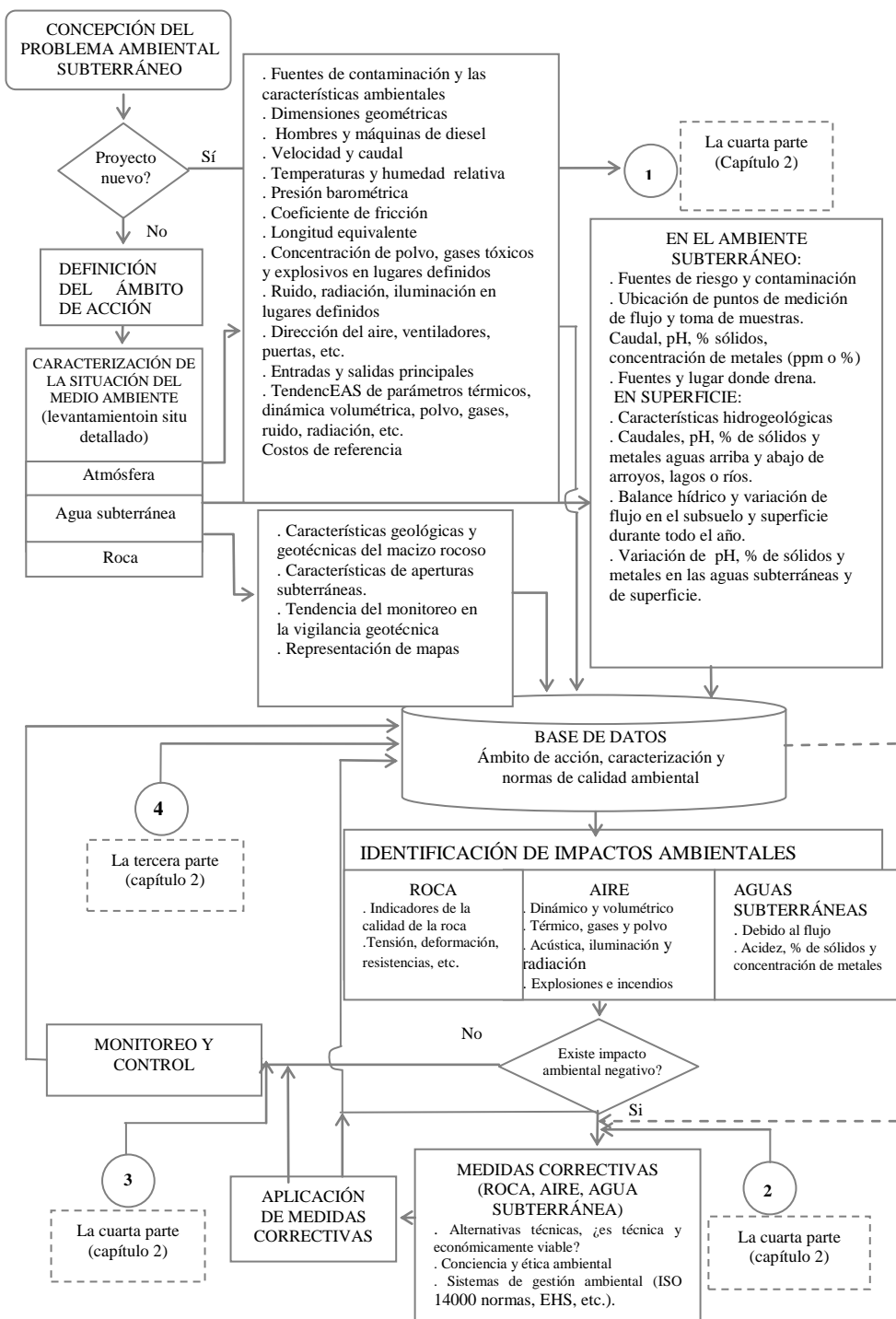


Figura 2.14 Metodología de la Ingeniería Ambiental Subterránea IAS para minas en operación que integra la figura 11.2

El diagrama de la fig. 2.14 ilustra el sistema y la secuencia de acciones de Ingeniería Ambiental Subterránea para una mina en operación que, en términos generales, comprende las siguientes acciones:

- Definición del ámbito de acción;
- Caracterización de la situación del ambiente;
- Identificación de los niveles de impacto ambiental;
- Medida correctiva a aplicar;
- Monitoreo y control.

Es la acción que refiere a la ubicación geográfica, principales características del macizo rocoso (suelo) y el depósito mineral, el medio ambiente subterráneo relacionado a toda la infraestructura existente, como son los trabajos de desarrollo y seguimiento (pozos, chimeneas, galerías, rampas, cámaras para la extracción, para bombeo, para trituración, mantenimiento, etc.), preparación y frentes de explotación (tajeos) que varían dependiendo del método de explotación.

### ***2.5.1. Definición del ámbito de acción***

### ***2.5.2. Caracterización de la situación del ambiente***

Consiste en un levantamiento detallado y minucioso de toda la información que permita caracterizar el ambiente. La investigación sobre los procesos de protección y el estudio de detalle se utiliza para recopilar la información necesaria, para seleccionar el proceso de protección ambiental o medida correctiva que se encuentre dentro las exigencias de las normas y leyes del programa.

La investigación sobre los procesos de protección incluye el muestreo y análisis para caracterizar la naturaleza y extensión de la contaminación; evaluación de los riesgos futuros, actuales y potenciales para la salud humana y el ambiente; este estudio es apropiado, para evaluar la eficacia de las tecnologías de tratamiento o de la recuperación para reducir la toxicidad, la movilidad o el volumen de las sustancias peligrosas o contaminadas.

La caracterización de la atmósfera subterránea se refiere a: dimensiones geométricas, características físicas, circuitos de aire (mapa adecuado) indicando las entradas y salidas principales, sentido del flujo de aire, velocidad y caudal del aire, ventiladores, puertas y cortinas de ventilación, temperatura y humedad relativa, presión barométrica, coeficiente de fricción, longitud equivalente, concentración de polvos, gases tóxicos y explosivos, ruido, radiación, iluminación, hombres y máquinas con motor diesel. Es importante determinar las tendencias de los parámetros térmicos, dinámicos, volumétricos, polvos, gases, ruido, radiación, etc. y considerar la referencia de costos.

La caracterización del agua subterránea, debe considerar: sitio de medición del caudal y de muestreo del agua, trechos de escurrimiento, caudal, pH, % de sólidos, concentración de metales (ppm o %), fuentes y lugar donde drena, representación adecuada en mapa, características hidrogeológicas de la zona, pH, % de sólidos y metales aguas arriba y aguas abajo de arroyos, lagos o ríos, balance hídrico y mapa de correlación, tendencia del caudal en el subsuelo y en superficie, tendencia del pH, % de sólidos y metales en aguas subterráneas y superficiales.

Características geotécnicas del macizo rocoso circundante, características geométricas de las aberturas subterráneas, la tendencia del monitoreo en la supervisión geotécnica, representación en mapas, entre otros.

### **2.5.3. Identificación de los niveles de impacto ambiental**

Se basa en los estándares de calidad ambiental definidos por las normas de cada país o región o por instituciones reconocidas a nivel nacional e internacional. En el caso de estándares de calidad ambiental para macizos rocosos, también es necesario considerar los resultados de parámetros experimentales que tengan una confiabilidad conseguida a través de mediciones repetidas y estudios.

Estos índices y estándares permiten elaborar una matriz base de niveles de impacto ambiental que, en el estudio se consideran a tres niveles: *leve*, *moderado* y *alto*. Esta matriz base sirve para la identificación del impacto ambiental negativo y expresa el nivel correspondiente utilizando el ámbito de acción definido y la caracterización del ambiente subterráneo.

La situación de los problemas ambientales identificados en los respectivos niveles, se recomienda representarlos en una matriz y un mapa de impactos ambientales.

### **2.5.4. Medidas correctivas**

La búsqueda de medidas correctivas consiste en dos etapas principales: 1) Desarrollo de alternativas de medidas correctivas y 2) Selección de la alternativa más viable, lo que pasa por un análisis detallado.

Una escala de alternativas de acciones correctivas se desarrolla durante el estudio con los datos disponibles de la caracterización local, esto ayuda a reducir las incertidumbres relacionadas con los costos y el desempeño de alternativas de tratamiento.

Durante la selección del proceso de protección ambiental, se identifica la alternativa preferida, presentada en la propuesta de plan para informar a la opinión pública.

Planos, especificaciones y otros documentos necesarios para construir o para ejecutar la alternativa son tomados en cuenta durante el proyecto de detalle de la medida correctiva.

En esta etapa se pueden utilizar procedimientos técnicos, modelos matemáticos y computacionales (simulación).

La alternativa más viable desde el punto de vista técnico y económico debe ser aplicada.

### **2.5.5. Monitoreo y control**

Consiste en establecer el seguimiento que verifique la eficacia y eficiencia de la medida correctiva adoptada.

De esta manera se pueden detectar alteraciones no previstas y posibles cambios. Además de la constante actualización del mapa de riesgos o impactos que permitan tomar medidas oportunas y cumplir con el plan original aprobado por la

autoridad competente o estar dentro de los estándares establecidos, como por ejemplo la ISO 14000.

## **2.6. Minas subterráneas para la aplicación del estudio**

Para el estudio de casos prácticos en el libro se incluyen tres minas en actalcooperación: la mina de cobre y estaño de Neves Corvo de la Sociedad Minera de Neves Corvo S. A., la mina de volframio de Panasqueira de Beralt & Tin Wolfram S.A. y la mina de estaño de San Rafael de MINSUR S.A.

Las dos primeras minas están localizadas en Portugal y la última en Perú. Los estudios de investigación prácticos en estas minas sirven bien para la validación de modelos matemáticos y procedimientos desarrollados bien para la aplicación de la ingeniería ambiental subterránea.

La mina de Neves Corvo, localizada en la zona de Alentejo, ofrece interesantes condiciones para el estudio, debido a su ubicación a una altitud próxima a los 200 m, a la geología y por el hecho de producir entre 6000 y 6500 t/día del mineral tal cual, utilizando métodos de explotación con un alto nivel de mecanización y como consecuencia aberturas subterráneas de grandes dimensiones, equipos con motor diesel de grandes capacidades, además de que los frentes de explotación se encuentran a profundidades cercanas a los 700 metros, donde la temperatura de la roca virgen se torna alta y su sistema de ventilación es 100% forzado. Estos aspectos, genéricamente referidos, hacen que esta mina sea propicia para la parte experimental del estudio.

La mina de Panasqueira, localizada en la parte montañosa de Portugal, a una cota aproximada de 750 m sobre el nivel del mar, también ofrece interesantes condiciones para la parte experimental del estudio, ya que es una mina medianamente mecanizada, con producción cercana a las 2000 t/día de mineral tal cual, con aberturas subterráneas de medianas dimensiones localizadas a poca profundidad (150 m) principalmente excavadas en esquisto, con sistema de ventilación mixto (natural y forzado), utilización de equipos diesel y agua subterránea de considerable caudal que son descargadas a un arroyo en superficie.

Y, la mina de estaño de San Rafael, por el hecho de estar ubicada en los Andes del Perú, a una altitud de unos 5000 metros, tener una profundidad cercana a un kilómetro, ser una mina mecanizada que utiliza equipos diesel de gran capacidad, ocurrir en roca volcánica, y existir agua termal en partes profundas de la mina.



# **SEGUNDA PARTE**

## **GESTIÓN DEL AMBIENTE SUBTERRÁNEO**

---



## Capítulo 3

# CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA SUBTERRÁNEA

## 3.1. Temperatura

### 3.1.1. Efectos fisiológicos en el hombre

El metabolismo del ser humano está acompañado por la generación de calor, con lo que la temperatura del organismo se mantiene cerca de 36,9 °C y en contacto con la temperatura del aire circundante el hombre puede sentir la sensación de frío o calor y los efectos fisiológicos de las bajas y altas temperaturas.

Cuando una persona está expuesta a una temperatura superior a la de *comfort*, sufre los efectos fisiológicos que se expresan de la siguiente manera: Pérdida de interés en las actividades realizadas, frecuentes descansos y flojera, deseo de concluir rápidamente la actividad, irritabilidad, reducción del grado de concentración, falta de orientación y de atención y hasta la muerte.

La exposición prolongada del hombre a condiciones térmicas desfavorables conduce inevitablemente al aumento de la temperatura corporal y, en consecuencia produce efectos fisiológicos que reducen su rendimiento (fig. 3.1) y hasta provocan la muerte, con temperaturas superiores a 42 °C y en tiempo prolongado.

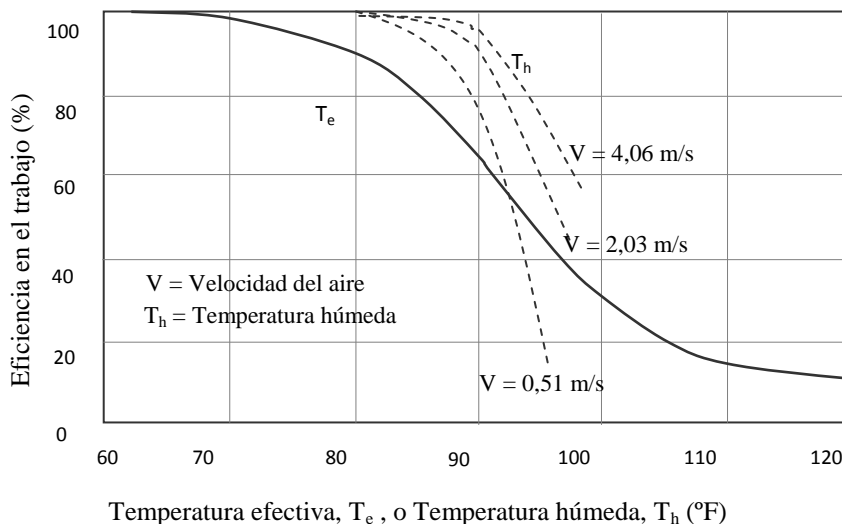


Figura 3.1 Efecto de la temperatura sobre el rendimiento del hombre (Hartman H.L., et al., 1982)

### 3.1.2. Fuentes y caracterización de la temperatura en el ambiente subterráneo

El aire atmosférico que entra en el ambiente subterráneo aumenta gradualmente su temperatura, cuando aumenta la profundidad del sitio a través del cual se filtra (fig. 3.2) y la causa principal es la transferencia de calor de la roca virgen, debido al conocido grado geotérmico. Otras fuentes de calentamiento del

aire en la atmósfera subterránea son causadas por la auto-compresión, por la operación de equipos con motores diesel, por la detonación de cargas explosivas, por la presencia de aguas termales y por el metabolismo humano.

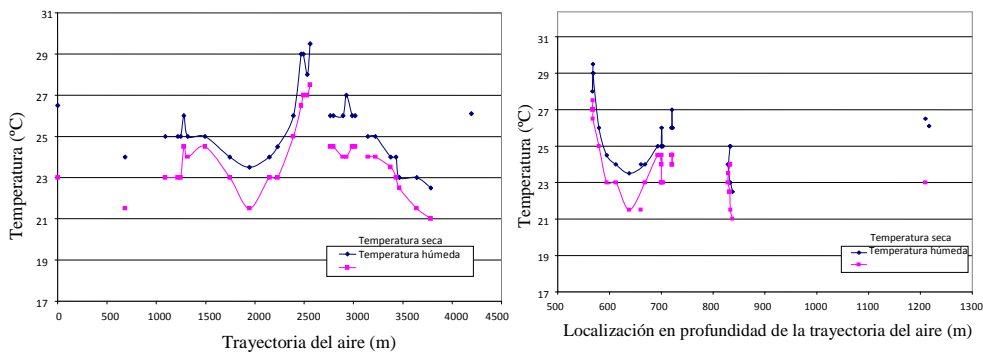


Figura 3.2 Variación de la temperatura del aire en el ambiente subterráneo de la mina de Neves Corvo, entrando por el pozo de Santa Bárbara y el Pozo CPV2 (con base en las mediciones realizadas en el mes de julio de 2000)

### 3.1.2.1 Temperatura de auto-compresión

Es un proceso que ocurre durante el descenso del aire por las aberturas subterráneas y debido a su propia compresión. La expresión matemática se deduce considerando la condición de equilibrio y propiedades del aire y está influenciada por las fuerzas verticales (fig. 3.3), expresada en:

$g \cdot dh = dp/\rho$ ;  $dh = dp/\gamma = v dp$ ,  $p v k = \text{constante}$  en el proceso adiabático, diferenciando la ecuación de Claperon:  $p v = R t$  se obtiene  $p dv + v dp = R dt$ , de donde resulta:  $p dv = R dt - v dp$ , con este resultado se tiene:  $dh + k(R dt + k dh) = 0$ , e integrando se obtiene:

$$(1-k) \int dh + kR \int dt = (1-k)h + kRt + C = 0,$$

donde:  $t = h \left\{ (k-1)/kR \right\} - C$ .

La constante de integración C, se determina con la condición  $h = 0$  y  $t = t_0$ , por lo tanto  $C = - t_0$

Con estos valores, la ecuación se transforma en:

$$t = t_0 + h \left\{ (k-1)/kR \right\},$$

pero como  $R = 29,27$ ,  $k = 1,302$  (valor medio)

$h = L \text{ sen} \alpha$ , (fig. 2.3) resulta finalmente:

$$t_2 = t_1 + 0,0098 \cdot L \text{ sen} \alpha, \text{ luego:}$$

$$\Delta t_{ha} = 0,0098 \cdot L \cdot \text{sen} \alpha \quad (3.1)$$

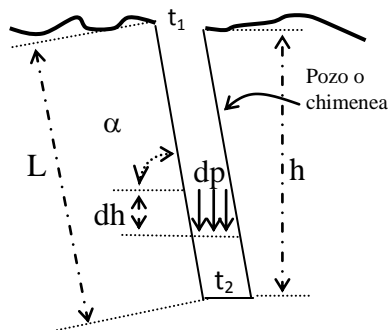


Figura 3.3 Esquema de auto-compresión

Cuando  $h = 1,0$  m de profundidad, el aumento de la temperatura para este metro es  $0,0098^{\circ}\text{C}$ , es decir, *por cada 100 m de profundidad la temperatura del aire aumenta en  $0,98^{\circ}\text{C}$ , que es aproximadamente de  $1^{\circ}\text{C}$ .*

En el proceso de análisis matemático realizado,  $g$  es la aceleración de la gravedad (m/s),  $h$  es la altura o profundidad (m),  $L$  es la longitud del pozo o chimenea,  $\alpha$  es la pendiente del pozo o chimenea,  $p$  es la presión ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ),  $\rho = \gamma/g$  es la densidad del aire ( $\text{Kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ ),  $v$  es el volumen específico ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ),  $R$  es la constante de los gases perfectos,  $k$  es el índice adiabático del gas,  $t$  es la temperatura del aire,  $t_1$  es la temperatura superficial del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_2$  es la temperatura de aire a profundidad  $h$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $\Delta t_{ha}$  es el aumento de la temperatura por auto-compresión ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Este aumento de temperatura es mucho más notable en los pozos verticales que en las aberturas inclinadas o en la rampa y, obviamente, es nulo en aberturas horizontales.

### 3.1.2.2 Transferencia de calor del macizo rocoso en el ambiente subterráneo

En la capa superficial de 15 m (Hartman, HL *et al.*, 1982), 20 m (Vutukuri, S.V. *et al.*, 1986) y de 20 a 40 m (Novitsky, A., 1962) de profundidad, la temperatura del macizo rocoso varía a lo largo del año y en relación con el cambio de la temperatura superficial del aire (fig. 3.4). Después de esta capa neutral térmica la temperatura del macizo rocoso aumenta gradualmente de acuerdo al aumento de la profundidad; a esta propiedad se la denomina *grado geotérmico* (Cuadro 3.1).

Para calcular el grado geotérmico, Vutukuri, V.S. (1986) propone la ecuación (3.2), donde  $g_g$  es el grado geotérmico ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ),  $f_c$  el flujo de calor del macizo rocoso que es cerca de  $0,05 \text{ W}/\text{m}^2$  y  $c_{tr}$  la conductividad térmica del macizo rocoso ( $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ).

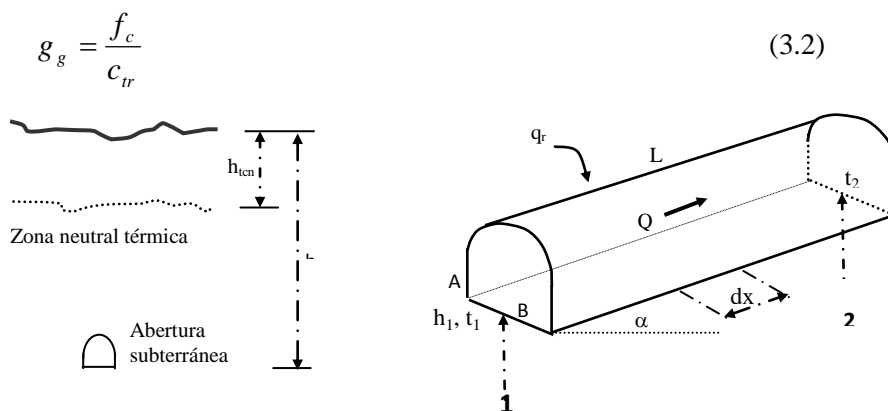


Figura 3.4 Capa de roca con influencia de la temperatura exterior y abertura subterránea elemental

Cuadro 3.1 Valores típicos del grado geotérmico (basado en Vutukuri, V.S., 1986, Hartman, H.L., 1982 y *Mine Ventilation Service, Inc.* E.U.A., 2000)

Lugar	$g_g$ (°C/100m)	Tipo de roca	$g_g$ (°C/100m)
<i>Magma Copper, Arizona</i>	3,8	Depósitos de cobre,	4,6 – 6,0
<i>Coal mines, United Kingdom</i>	1,8 – 4,0	Montana	4,5
<i>Agnew Nickel, Australia</i>	1,1	Depósito de cobre, Arizona	2,0 – 4,5
<i>Kolst gold, India</i>	0,7 – 1,3	Depósitos de carbón	3,3
<i>Witwatersrand, South Africa</i>	1,97	Arcilla	1,8
<i>Broken Hill, NSW, Australia</i>	5,0	Piedra caliza	1,7 – 3,3
<i>Ontario, Canada</i>	1,22	Arenisca	3,0
<i>Hungary</i>	0,91 – 3,65	Dolerita	0,8 – 1,5
<i>UK and Europe</i>		Cuarcita	0,8 – 1,7
<i>E.U.A.</i>		Silvita	1,0 – 4,0
		Halita	

Con el grado geotérmico  $g_g$  (m/°C), con la temperatura de la capa rocosa a la zona termal neutral  $t_{cn}$  (°C), con la profundidad desde la superficie hasta la zona neutral térmica  $h_{tcn}$  (m), la temperatura del macizo rocoso a una determinada profundidad  $h$  denominada:  $t_{hr}$  (°C) está dada por

$$t_{hr} = t_{cn} + (h - h_{tcn})/g_g$$

Con esta ecuación e indicación de los parámetros en la fig. 3.4 se deduce la ecuación (3.3) que expresa el aumento de la temperatura debido al grado geotérmico  $\Delta t_{gg}$  (°C), donde  $h_i$  es la profundidad del nodo inicial del trecho medido desde la superficie (m),  $L$  la longitud de la abertura subterránea (m),  $\alpha$  la inclinación del trecho (°,  $+\alpha$  cuando la pendiente es hacia abajo y  $-\alpha$  cuando la pendiente es hacia arriba).

$$\Delta t_{gg} = \frac{h_i - h_{tcn} \pm L \cdot \text{sen} \alpha}{g_g} \tag{3.3}$$

Aplicando a las aberturas subterráneas los fundamentos de la transferencia de calor al flujo de los gases en las tuberías, se sabe que el calor se propaga de un punto a otro de tres formas diferentes: conducción, radiación y convección. En la mayoría de los casos, estos tres procesos tienen lugar simultáneamente (Holman, J.P., 1983), por lo tanto la cantidad de calor  $q$  que proporciona un cuerpo de masa  $m$  y calor específico  $C_e$ , para que la temperatura se eleve de  $t_1$  a  $t_2$  está dada por

$$q = m \cdot C_e (t_2 - t_1) = m \cdot C_e \cdot \Delta t$$

Aplicada esta expresión al flujo de aire  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) el calor recibido del macizo rocoso  $q_r$  (W) resulta la ecuación 3.4

$$q_r = 1000 \cdot \rho_a \cdot C_e \cdot Q \cdot \Delta t_r = 1000 \cdot \rho_a \cdot C_e \cdot Q \cdot (t_2 - t_1) \tag{3.4}$$

Donde  $\rho_a$  es la masa volumétrica del aire ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_e$  es el calor específico del aire ( $\text{Kj/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) y  $\Delta t_r$  es la variación de la temperatura de  $t_1$  a  $t_2$ .

El calor del macizo rocoso  $dq$  recibido por el aire del ambiente subterráneo también se puede dar en términos del coeficiente de transferencia de calor del macizo rocoso ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ) (Holman, JP, 1983) mediante la ecuación diferencial

$$dq = \lambda \cdot P \cdot dx \cdot (T_p - T_m)$$

Donde  $T_p$  y  $T_m$  son las temperaturas en la pared y de la mezcla del aire en una posición particular  $dx$  ( $^\circ\text{C}$ ) y  $P$  es el perímetro de la abertura subterránea (m).

De forma similar, el calor total  $q_r$  transferido (W) puede ser expresado mediante la ecuación (3.5)

$$q_r = \lambda \cdot P \cdot L \cdot (T_p - T_m)_{\text{media}} \quad (3.5)$$

Dada la ecuación (3.3) y la nomenclatura de la fig. 3.4 se obtiene  $T_p = \{t_1 + [t_1 + (h_1 - h_{\text{tcn}} \pm L \cdot \text{sen} \alpha) / g_g]\} / 2$  y  $T_m = (t_1 + t_2) / 2$ , las que sustituidas en las ecuaciones (3.4) y (3.5) e igualando resulta la siguiente relación:

$$[(\lambda \cdot P \cdot L) / 2] [ (h_1 - h_{\text{tcn}} \pm L \cdot \text{sen} \alpha) / g_g + t_1 - t_2 ] = 1000 \cdot \rho_a \cdot C_e \cdot Q \cdot (t_2 - t_1)$$

Por último, la variación de la temperatura del aire que fluye en las aberturas subterráneas a causa del grado geotérmico  $\Delta t_r$  ( $^\circ\text{C}$ ) resulta la ecuación (3.6).

$$\Delta t_r = t_2 - t_1 = \frac{\lambda \cdot P \cdot L \cdot (h_1 - h_{\text{tcn}} \pm L \cdot \text{sen} \alpha)}{g_g (\lambda \cdot P \cdot L + 2000 \cdot \rho_a \cdot C_e \cdot Q)} \quad (3.6)$$

Para chimeneas o pozos (fig. 3.5), la profundidad inicial ( $h_1$ ) es cero y el trecho que recibe influencia del grado geotérmico es  $L \cdot \text{sen} \alpha - h_{\text{tcn}}$  con  $\alpha +$ , por lo que para estos casos resulta la ecuación (3.7).

$$\Delta t_r = t_2 - t_1 = \frac{\lambda \cdot P \cdot (L \cdot \text{sen} \alpha - h_{\text{tcn}})^2}{g_g [\lambda \cdot P \cdot (L \cdot \text{sen} \alpha - h_{\text{tcn}}) + 2000 \cdot \rho_a \cdot C_e \cdot Q]} \quad (3.7)$$

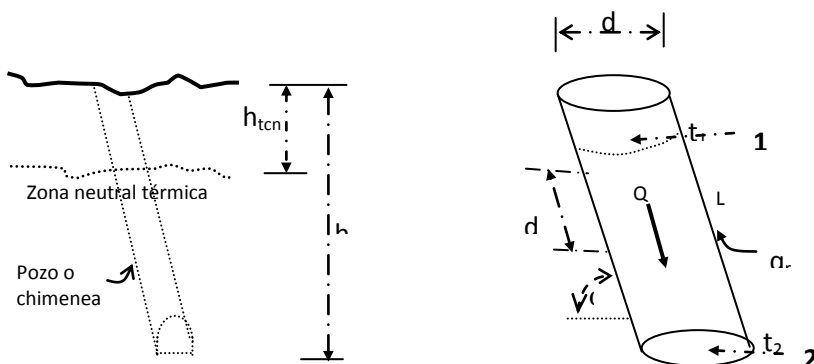


Figura 3.5 Zona neutral térmica y representación elemental de un pozo o chimenea

El coeficiente de transferencia de calor  $\lambda$  está dado por la ecuación (3.8) en función de la conductividad térmica  $K$  (W/m.°C), la relación de Dittus y Boelter  $Nu_d$  (sin dimensión) y el diámetro de la sección  $d$  (m); para trabajos horizontales e inclinados  $d = (B + A)/2$ , donde  $B$  es la base de la sección (m) y  $A$  corresponde su altura (m).

$$\lambda = \frac{K.Nu_d}{d} \quad (3.8)$$

La relación de *Dittus y Boelter*  $Nu_d$  fue determinada por *Petukhov* “ $\lambda$ ” (Holman, J.P., 1983) expresándola para gases (aire) mediante la ecuación (3.9), donde  $Re_d$  es el número *de Reynolds* (sin dimensión), calculado con  $Re_d = V.d/\mu$ ,  $V$  es la velocidad promedio de flujo del aire (m/s),  $d$  es el diámetro de la abertura subterránea (m),  $\mu$  es la viscosidad cinemática del aire (kg/m.s),  $f$  es el coeficiente de fricción de las paredes de la abertura subterránea (kg/m<sup>3</sup>) y  $Pr$  es el número *de Prandtl* (adimensional) calculado mediante  $Pr = Ce.\mu/K$ . Las propiedades físicas y térmicas del aire se pueden obtener del Cuadro 3.2.

$$Nu_d = \frac{\frac{f}{8} Re_d . Pr}{1.07 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{0.67} - 1)} \quad (3.9)$$



Cuadro 3.2 Propiedades de la presión atmosférica  
(National Bureau Standard E.U.A., Holman, J.P., 1983)

T (°K)	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_e$ (KJ/kg.°C)	$\nu$ (kg/m.s) x10 <sup>-5</sup>	$\mu$ (m <sup>2</sup> /s) x10 <sup>-6</sup>	K (W/m.°C)	Dif.Térm. (m <sup>2</sup> /s)x10 <sup>-4</sup>	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.488	9.49	0.02227	0.13161	0.722
300	1.1774	1.0057	1.983	16.84	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.30	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.2	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.1000	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

### 3.1.2.3 Transferencia de calor generado por equipos con motor diesel

Los equipos utilizados en los trabajos subterráneos que generan calor transmitido al aire de la atmósfera subterránea son:

1) Equipos móviles con motor diesel y con motor eléctrico (jumbos para perforación, camiones o *dumpers* para transporte, pala o LHDs para carga y remoción, locomotoras, etc.);

2) Equipos y sistemas eléctricos no móviles (ventiladores auxiliares, iluminación, bombas, guinchos, estaciones o subestaciones de transformación, etc.).

De la variedad de equipos utilizados en trabajos subterráneos, los movidos a diesel (fig. 3.6), contribuyen significativamente en la transmisión de calor al aire que fluye en la atmósfera subterránea.

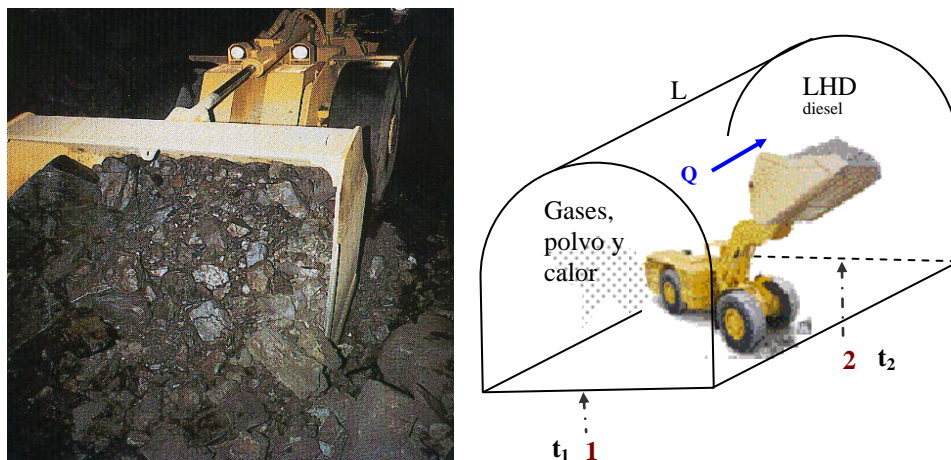


Figura 3.6 Equipo diesel en operación (LHD) que se desplaza en el ambiente subterráneo

El consumo de diesel por los motores de los equipos es de 0,24 kg/kWh, con un valor calorífico de 44 MJ/kg (Vutukuri, V.S. *et al.*, 1986), por lo que el total de energía liberada es de  $0,24 \times 44 \times 10^3 \text{ KJ/kWh} = 10,560 \text{ KJ/kWh} = 176 \text{ KJ/minuto}$ .  $\text{KW} = 2,9 \text{ kJ/s.KW} = 2,9 \text{ KW/KW}$ . De este total 1 KW se convierte en energía mecánica y 1,9 KW es liberada en gases expulsados por el motor. Esta cantidad de energía no es transferida en su totalidad al aire que fluye hacia el ambiente en que trabaja el equipo, visto que es función del tiempo efectivo de uso de la máquina, por lo tanto es particular y diferente para cada condición de trabajo subterráneo siendo el valor próximo de 0,9 KW.

La emisión de calor por equipos con motor diesel  $q_{ed}$  (KW) puede ser traducida por

$$q_{ed} = f \cdot q_d \cdot p_d$$

donde:  $q_d$  es la energía equivalente liberada por el petróleo (2,9 KW/KW),  $p_d$  es la potencia del equipo (KW),  $f = f_m \cdot f_t$  es el factor combinado de conversión a energía mecánica y de utilización del equipo, que es particular para cada mina y hasta diferente de una área de trabajo para otra.

De esta expresión el aumento de la temperatura provocado por la utilización de equipos a diesel  $\Delta T_{ed}$  (°C) se expresa por la ecuación (3.10).

$$\Delta t_{ed} = \frac{f_m \cdot f_t \cdot q_d \cdot p_d}{\rho_a \cdot C_e \cdot Q} \tag{3.10}$$

La influencia en el aumento de la temperatura del aire en este caso es a partir del sitio donde trabaja o trabajan las máquinas.

### 3.1.2.4 Transferencia de calor por causa de la detonación de explosivos

Los disparos realizados con explosivo en las excavaciones subterráneas generan calor que es transferido al macizo rocoso y al aire de la atmósfera

subterránea. *Mine Ventilation Service, Inc.* de E.U.A. (2000), recomienda la expresión indicada a continuación para calcular este calor  $q_{ex}$  (KW), en función del calor liberado por la carga explosiva  $c_e$  (KJ/kg), de la cantidad de explosivo utilizado  $e_u$  (kg/día), y de la energía calorífica del explosivo  $e_u$  (para el ANFO es de 3900 KJ/kg y para la dinamite 60% de 4,030 a 4,650 KJ/kg).

$$q_{ex} = (c_e \cdot e_u) / 86,400$$

Con esta expresión el aumento de la temperatura en el ambiente subterráneo por causa de la detonación de cargas explosivas  $\Delta t_{ex}$  resulta la ecuación (3.11).

$$\Delta t_{ex} = \frac{c_e \cdot e_u}{86.400 \cdot \rho_a \cdot C_e \cdot Q} \quad (3.11)$$

La influencia en el aumento de la temperatura se da también a partir del trecho del medio donde se realiza el disparo con explosivo.

### 3.1.2.5 Otras fuentes de transferencia de calor al ambiente subterráneo

Hartman, H. L. *et al.* (1982), refiere que el calor del metabolismo humano no es significativo y hasta puede ser ignorado, ejemplificando que 800 hombres en condiciones normales originan una liberación total de 192 KW (65000 BTU/h), correspondiendo a *cada hombre 0,25 KW de energía*.

Así, cuando la cantidad de hombres presentes en el ambiente subterráneo es grande, el aumento de la temperatura por causa del metabolismo humano  $\Delta t_h$  (°C) resulta lo expresado por la ecuación (3.12), donde  $q_h$  es el calor liberado por hombre, es función de la temperatura efectiva determinada usando ábacos (kW/hombre),  $n$  es el número total de hombres.

$$\Delta t_{he} = \frac{q_h \cdot n}{\rho_a \cdot C_e \cdot Q} \quad (3.12)$$

### 3.1.2.6 Transferencia de calor en redes típicas de aire

Para determinar la transferencia de calor en circuitos típicos de aire en el ambiente subterráneo (fig. 3.7) se aplica el fundamento de la dinámica del aire enunciado por Kreide, J. F. (2001).

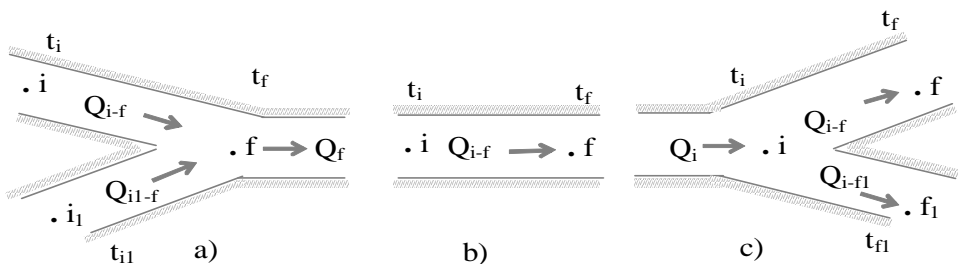


Figura 3.7 Diseño típico de circuitos de aire en el ambiente subterráneo

*Circuito típico “a”*: en este circuito  $m_{i-f} \cdot t_{i-f} + m_{i1-f} \cdot t_{i1-f} = m_f \cdot t_f$ ; donde  $m_{i-f}$ ,  $m_{i1-f}$ ,  $m_f$ ,  $t_{i-f}$ ,  $t_{i1-f}$ ,  $t_f$  son masas  $m$  y temperaturas  $t$  de aire en los trechos  $i-f$ ,  $i1-f$  en el trecho de conjunción con el nodo inicial  $f$  respectivamente. Este balance de masas tiene el mismo principio que el balance de caudales  $Q$  del aire, resultando

$$Q_{i-f} \cdot t_{i-f} + Q_{i1-f} \cdot t_{i1-f} = Q_f \cdot t_f, \text{ donde: } t_f = (Q_{i-f} \cdot t_{i-f} + Q_{i1-f} \cdot t_{i1-f}) / Q_f$$

Donde,  $Q_{i-f}$  es el caudal de aire en el trecho  $i-f$ ,  $t_{i-f} = t_i + \Delta t_{i-f}$ ,  $Q_{i1-f}$  es el caudal en el trecho  $i1-f$ ,  $t_{i1-f} = t_{i1} + \Delta t_{i1-f}$ ,  $Q_f$  es el caudal en el inicio del trecho de conjunción. Por la primera Ley de Kirchoff  $Q_f = Q_{i-f} + Q_{i1-f}$ , y así, la temperatura en el nodo de conjunción  $f$  representada como  $t_f$ , resulta la siguiente ecuación, que en términos de caudales de los trechos de junción resulta la ecuación (3.13).

$$t_f = [Q_{i-f}(t_i + \Delta t_{i-f}) + Q_{i1-f}(t_{i1} + \Delta t_{i1-f})] / Q_f$$

$$t_f = \frac{Q_{i-f}(t_i + \Delta t_{i-f}) + Q_{i1-f}(t_{i1} + \Delta t_{i1-f})}{Q_{i-f} + Q_{i1-f}} \quad (3.13)$$

En el circuito típico “a” se cumple la equivalencia entre el producto de resistencias y caudales demostrada a continuación. Deduciendo de esta equivalencia el caudal en función de las resistencias y sustituyendo en la ecuación (3.13) se obtiene la ecuación (3.14).

$R_{eq} \cdot Q_f^2 = R_{i-f} \cdot Q_{i-f}^2 = R_{i1-f} \cdot Q_{i1-f}^2$ , donde  $R_{eq} = \{1 / [(1 / R_{i-f})^{0.5} + 1 / R_{i1-f})^{0.5}]\}^2$  y,

$$t_f = \left(\frac{R_{eq}}{R_{i-f}}\right)^{0.5} (t_i + \Delta t_{i-f}) + \left(\frac{R_{eq}}{R_{i1-f}}\right)^{0.5} (t_{i1} + \Delta t_{i1-f}) \quad (3.14)$$

En la ecuación (3.14),  $R_{eq}$  es la resistencia equivalente del circuito inicial  $i$  y final  $f$ ,  $R_{i-f}$  es la resistencia del trecho  $i-f$ ,  $R_{i1-f}$  es la resistencia en el trecho  $i1-f$ ,  $\Delta t_{i-f}$ ,  $\Delta t_{i1-f}$  son los aumentos totales de las temperaturas en los trechos  $i-f$  e  $i1-f$ , respectivamente.

El aumento total de temperatura en la atmósfera subterránea  $\Delta t_{total}$  (°C) es la suma total de los incrementos causados (ecuación 3.15)

$$\Delta t_{total} = \Delta t_{ha} + \Delta t_r + \Delta t_{ed} + \Delta t_{ex} + \Delta t_h + \Delta t_t \quad (3.15)$$

Donde los aumentos son provocados por auto-compresión ( $\Delta t_{ha}$ ), macizo rocoso ( $\Delta t_r$ ), equipos diesel ( $\Delta t_{ed}$ ), detonación del explosivo ( $\Delta t_{ex}$ ), metabolismo humano ( $\Delta t_h$ ) y agua termal ( $\Delta t_t$ ).

*Circuito típico “b”*: en este tipo de circuito la temperatura  $t_f$  en el nudo final  $f$  es expresada por la ecuación (3.16).

$$t_f = t_i + \Delta t_{i-f}$$

*Circuito típico “c”*: en este tipo de circuito la temperatura en los nodos finales de los dos ramales  $t_f$  y  $t_{f1}$  están definidos con los mismos conceptos utilizados para el circuito típico “a”, por lo que:

$Q_i \cdot t_i = Q_{i-f} \cdot t_f + Q_{i-fl} \cdot t_{fl}$  donde,  $t_f = (Q_i \cdot t_i - Q_{i-fl} \cdot t_{fl}) / Q_{i-f}$ , y como :  $Q_i = Q_{i-f} + Q_{i-fl}$ , se tiene:

$t_f = (Q_{i-f} \cdot t_i + Q_{i-fl} \cdot t_i - Q_{i-fl} \cdot t_{fl}) / Q_{i-f} = t_i + Q_{i-fl} / Q_{i-f} (t_i + t_{fl})$ , mas como  $t_{fl} = t_i + \Delta t_{i-fl}$ , resulta:

$$t_f = t_i - \Delta t_{i-fl} \left( \frac{Q_{i-fl}}{Q_{i-f}} \right) \quad (3.17)$$

De forma análoga a lo procedido para el circuito típico “a” la ecuación (3.17) en términos de la resistencia de las aberturas subterráneas, resulta de la manera expresada por las ecuaciones (3.18) y (3.19).

$R_{eq} \cdot Q_i^2 = R_{i-f} \cdot Q_{i-f}^2 = R_{i-fl} \cdot Q_{i-fl}^2$ , donde  $R_{eq} = \{1 / [(1 / R_{i-f}^{0.5} + 1 / R_{i-fl}^{0.5})]^2\}$  y,

$$t_f = t_i - \Delta t_{i-fl} \left( \frac{R_{i-f}}{R_{i-fl}} \right)^{0.5} \quad (3.18)$$

$$t_{fl} = t_i - \Delta t_{i-f} (Q_{i-f} / Q_{i-fl})$$

$$t_{f1} = t_i - \Delta t_{i-f} \left( \frac{R_{i-f}}{R_{i-f1}} \right)^{0.5} \quad (3.19)$$

Estos modelos matemáticos fueron validados en la mina de Neves Corvo cuyo proceso se presenta en la sección 3.2.5.

### 3.1.2.7 Influencia de la temperatura exterior en la temperatura del ambiente subterráneo

A nivel general la temperatura media exterior del aire disminuye progresivamente con el aumento de la altitud, variando de 0,56 a 0,65 °C por cada 100 metros (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3 Presión y temperatura en relación con la altitud y en condiciones normales (*American Society of Heating and Ventilating Engineers, 1947*)

Altitud (pies)	Presión (pulgadas de Hg)	Temperatura (°F)
-1.000	31,02	+62,6
-500	30,47	+60,8
0	29,92	+59,0
+500	29,39	+57,2
+1.000	28,86	+55,4
+5.000	24,89	+41,2
10.000	20,58	+23,4
15.000	16,88	+5,50
20.000	13,75	-12,3
25.000	11,10	-30,1

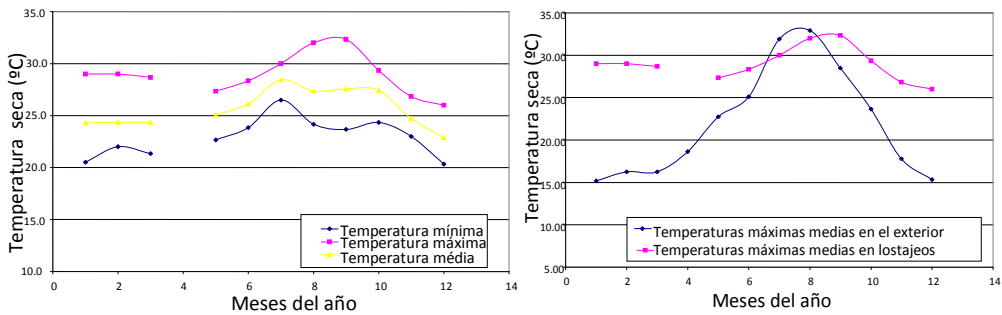


Figura 3.8 Típica de oscilación de la temperatura media mensual durante todo el año en el entorno externo y la mina subterránea de Neves Corvo (basado en información de la estación meteorológica de la mina de Neves Corvo y ventilación registros de Minas del Departamento de Investigación de Planificación DTS Somincor Minería de 1998, 1999 y 2000)

Las condiciones climáticas del aire exterior varían en función de las estaciones del año, hecho que provoca en verano la entrada de aire caliente en la atmósfera subterránea y en invierno aire frío. Así, existe influencia de la temperatura exterior en la temperatura del ambiente subterráneo tal como fue caracterizado en la mina de Neves Corvo (fig. 3.8).

La estimación de la variación de la temperatura en los frentes de explotación en función de la temperatura exterior se puede estimar con la ecuación (3.20).

$$\Delta T_f = f \cdot \Delta T_e \tag{3.20}$$

Donde  $\Delta T_f$  es la variación de temperatura en los frentes de exploración a lo largo del año,  $f = 0,24$  a  $0,35$  para grandes minas de Europa, y  $\Delta T_e$  la variación de la temperatura exterior entre estaciones de menor y mayor temperatura del año. Esta influencia es estudiada detalladamente en el proceso de la aplicación a las minas peruanas y portuguesas, que se aborda en la cuarta parte del presente trabajo. Un estudio detallado se realiza en la tercera parte del trabajo.

### 3.1.3 Normas y estándares de calidad ambiental térmico

En términos generales, las normas y regulaciones de distintos países, en relación al límite de la temperatura en el ambiente subterráneo varía de un país a otro (Cuadro 3.4), ya sea en la cantidad o en el parámetro indicador.

Cuadro 3.4 Valor límite permisible de temperatura

País	Temperatura seca (°C)	País	Temperatura seca (°C)
E.U.A.	30	Francia	28 (Efectiva)
Australia	27	Suráfrica	27,5
Bélgica	30 (Efectiva)	Brasil	30
Portugal	31	Zambia	32

En E.U.A. la OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) dependiendo de los valores límite permisibles indicados en la publicación de 1992-1993 de ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*) son adoptados los estándares indicados en el Cuadro 3.5. Estos límites de exposición son válidos para personas con ropa liviana, por lo que para otro tipo de ropa debe ser corregido. Para vestimenta total de algodón la corrección es de  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para ropa de invierno de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  y ropa impermeable (agua) de  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La Organización Mundial de la Salud (*World Health Organization*) recomienda una temperatura efectiva  $< 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  para actividades en condiciones *sedentarias*,  $< 28\text{ }^{\circ}\text{C}$  para actividades con *ritmo moderado* y  $< 26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  para el *trabajo fuerte*. En caso de un proceso de climatización individual el límite admisible aumenta en  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  en cada caso. Para temperaturas de  $27,7$  a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  existe un aumento del rendimiento humano (disponible en [www.who.int/](http://www.who.int/) y [www.cdc.gov/niosh/pdfs/86-113f.pdf](http://www.cdc.gov/niosh/pdfs/86-113f.pdf)).

Cuadro 3.5 Valores de límites permisibles de la temperatura del bulbo húmedo en  $^{\circ}\text{C}$  (OSHA E.U.A. disponible en [www.osha-slc.gov/dts/osta/otm/otm\\_iii/otm\\_iii\\_4.html#1](http://www.osha-slc.gov/dts/osta/otm/otm_iii/otm_iii_4.html#1), 1992)

Trabajo efectivo por hora	Intensidad del trabajo		
	Leve	Moderado	Alto
Continuo	30	26,7	25
75%	30,6	28	25,9
50%	31,4	29,4	27,9
25%	32,2	31,1	30

Jhonson, B., 1992 considera que un buen nivel de confort es cuando la temperatura efectiva varía de  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

En relación al confort térmico ambiental, la ASHARAE (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc*) define como temperatura operativa óptima  $22,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la velocidad del aire de  $0,15\text{ m/s}$  (invierno) y  $0,25\text{ m/s}$  (verano) para un *aislamiento con ropa* (*Clothing Insulation, clo*) de  $0,9\text{ clo}$  (invierno) y de  $0,5\text{ clo}$  (verano) (<http://ergo.human.cornell.edu/studentdownloads/DEA350notes/Thermal/thcomnotes1.html>).

Cuando esta temperatura es mayor de  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  es necesario aumentar la velocidad del aire hasta  $0,8\text{ m/s}$ . Para  $0,05\text{ clo}$  la temperatura operativa óptima es de  $24,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  con un máximo permisible de  $27,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  en esta condición. En Europa, la unidad de *aislamiento térmico de ropa* se expresa por *Tog* ( $1\text{ Tog} = 0,645\text{ clo}$ ).

En Portugal el Decreto-Ley n.º 162/90 del 22 de mayo de 1990, el Artículo 148 se refiere a la temperatura en trabajos subterráneos, reglamentados de la forma indicada en el Cuadro 3.6. El Decreto-Ley referido indica además, que cuando se sospeche de sitios de elevada temperatura y humedad que puedan alcanzar los valores límites especificados, se debe proceder a la medición de la temperatura por lo menos cada 15 días y cuando son afectados diariamente.

Cuadro 3.6 Decreto-ley n.º 162/90 del 22 de mayo, Artículo 148

Temperatura (°C)		Período de permanencia en el trabajo
Seca	Húmeda	
31	26	Permitido
31 – 35	26 - 30	Seis (6) horas
>35	>30	No permitido

Finalmente, el Decreto-Ley n.º 162/90 considera que los valores referidos en el Cuadro 3.6 se pueden modificar siempre que la temperatura efectiva no sea superior a los 28 °C y se determinará por la ecuación (3.21), donde,  $t_e$ ,  $t_h$  y  $t_s$  son la temperatura efectiva, las temperaturas húmeda y seca, respectivamente y V es la velocidad de la corriente de aire en metros por segundo.

$$t_e = 0.7T_h + 0.3T_s - V \tag{3.21}$$

En Perú el art. 83 del nuevo Reglamento de Seguridad e Higiene indica que en los lugares de trabajo donde se sobrepase una temperatura efectiva de 30 °C deben tomarse medidas tales como: período corto de descanso, suministro de agua para beber, aclimatación, saquitos de sal, entre otros, en fin de controlar la fatiga, deshidratación y otros efectos sobre el personal y recomienda la forma de obtener la temperatura efectiva permitida (Cuadro 3.7).

En la actualidad el concepto de confort para el hombre está relacionado con la temperatura operativa (*operative temperature*), la temperatura efectiva (*effective temperature*), y la humedad relativa (fig. 3.9).

Cuadro 3.7 Velocidad del aire (m/min) necesaria para obtener una temperatura efectiva de 30 °C  
(Anexo 3 del artículo 83, Reglamento de Seguridad e Higiene en Perú, 2001)

Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%) del aire										
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
30											
31											30
32									30	60	90
33							25	50	90	140	
34						30	50	100	150		
35					45	90	140				
36			35	95	140						
37		50	105								
38	55	100	150								
39	150										
40											



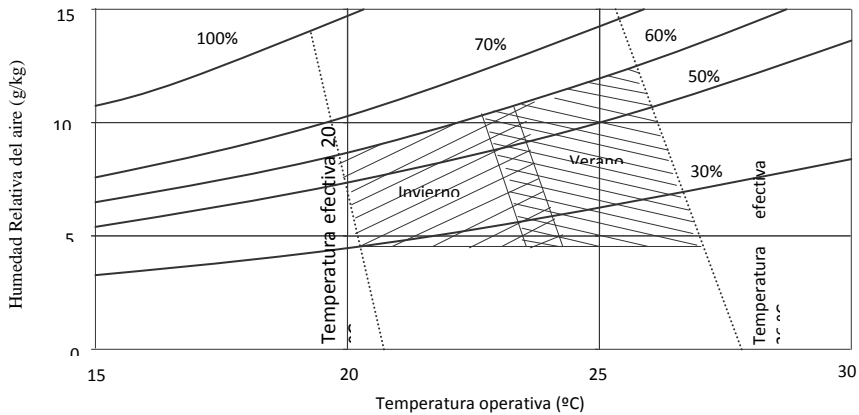


Figura 3.9 Rango de temperatura operativa y la humedad aceptable para las personas con actividad sedentaria ( $1,2 \leq \text{met}$ ), con base en un 10% de insatisfacción personal (basado en Kreider, J.F., 2001).

La temperatura operativa  $T_{op}$  (°F) viene dada por la ecuación (3.22) (ASHRAE American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, inc, 1997).

$$T_{op} = \frac{h_{com} \cdot T_s + h_{rad} \cdot T_r}{h_{com} + h_{rad}} \quad (3.22)$$

Donde,  $h_{com} = (M - 0,85)^{0,39}$ , para personas en actividad  $1,1 \leq M \leq 30$  met, donde  $M$  es la producción de calor por metabolismo humano (met), ( $1\text{met} = 1M = 18,4 \text{ BTU/h.pie}^2 = 58,2 \text{ W/m}^2$ ),  $T_s$  es la temperatura seca (°F),  $T_r$  es la temperatura mínima de radiación referencial del cuerpo humano (80 °F o 26,7 °C),  $h_{rad}$  es el valor estándar de la radiación en el cuerpo humano (0,83 BTU/h.pie<sup>2</sup>.°F).

La producción de calor por el metabolismo humano varía con relación al tipo de actividades que el hombre realiza y para las actividades en el subsuelo los valores adoptados son los que se presentaron en el Cuadro 2.9, que muestran un margen de valores de menor a mayor intensidad.

Kreide, J.F., (2001), determina la temperatura operativa admisible y óptima del *comfort humano* para actividades normales ( $\leq 1,2$  met) con 50% de humedad y velocidad del aire  $\leq 0,15$  m/s (Cuadros 3.8 y 3.9).

Cuadro 3.8 Valores típicos de producción de calor por el metabolismo humano (adaptado a las actividades humanas en el ambiente subterráneo por ASHRAE Kreider, J. F., 2001)

Actividad humana	Producción de calor por metabolismo humano (M)		
	BTU/h.pie <sup>2</sup>	2 W/m <sup>2</sup>	Met
Actividades de oficina (informes y otras)	18 – 39	55 – 120	1,0 – 2,1
Operador de máquinas livianas	18 – 37	60 – 115	1,0 – 2,0
Operador de máquinas pesadas (palas, jumbo, etc.)	33 – 74	105 – 235	1,8 – 4,0
Trabajo manual con pico, pala, mazo, martillo, etc.	74	235	4,0
Caminar (0,88 m/s – 1,8 m/s)	37 - 70	115 - 220	2,0 – 3,8

Cuadro 3.9 Temperatura operativa para actividades humanas normales (≤ 1.2 met), 50% de humedad y velocidad del aire ≤ 0,15 m/s (adaptado por Kreider, J.F., 2001)

Condiciones del ambiente	Tipo de vestido usado	T <sub>op</sub> óptima (°C)	Amplitud de T <sub>op</sub> de confort(°C)
Temperaturas bajas (invierno)	Camisa de manga larga y un suéter, ropa pesada (monos)	22	20 – 23,5
Temperaturas altas (verano)	Ropa ligera camisa de manga corta y monos	24,5	23 – 26
	Ropa mínima	27	26 – 29

Basado en la ecuación (3.22) y con simples transformaciones aritméticas la temperatura  $T_s$  de confort resulta como se expresa en la ecuación (3.23).

$$T_s = \frac{T_{op}(h_{com} + h_{rad}) - h_{rad} \cdot T_r}{h_{com}} \quad (3.23)$$

Se verifica que la condición de *confort térmico* del hombre está entre 20 °C y 29 °C (temperatura seca de 17 °C a 30 °C) de temperatura operativa y la *condición óptima* se manifiesta en temperaturas operativas de 22 °C a 27 °C (temperatura seca 20 °C a 27 °C) para las condiciones referidas en el Cuadro 3.9.

### 3.1.4 Matriz para la identificación del impacto ambiental térmico

La matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental térmico está sustentada en los estándares de calidad y confort definidos por las normas e instituciones reconocidas y desarrolladas en la sección 1.2.3, que permiten establecer tres niveles de impacto ambiental: *Leve, moderado y alto*.

Para identificar el impacto ambiental térmico se debe analizar la totalidad de los sitios con presencia de personas, basado en las redes de aire caracterizadas y comparando las temperaturas medidas con valores definidos por la matriz base (Cuadro 3.10). El resultado se debe representar en una matriz de impacto ambiental térmico (Cuadro 3.11) o en un mapa.

Cuadro 3.10 Matriz base para la evaluación del impacto ambiental térmico

Temperaturas (°C)	Niveles de impacto ambiental		
	Leve ∇	Moderado ⊗	Alto ◆
Seca ( $t_s$ )	$27 < t_s \leq 31$	$31 < t_s \leq 35$	$t_s > 35$
Húmeda ( $t_{he}$ )	$25 < t_{he} \leq 26$	$26 < t_{he} \leq 30$	$T_{he} > 30$

Cuadro 3.11 Modelo de matriz de impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico

Circuito	Tramos	Frente de trabajo	Niveles de impacto ambiental térmico
Pozo "X" a Pozo "E" etc.	1-2	Galeria "A"	⊗
	1-3	Rampa "B"	◆
	3-4	Chimenea "C"	⊗
	4-5	Mina "A"	◆
	12-13	Colector "D"	∇
	65-80	Galeria de transporte	∇

Leve: ∇ Moderado: ⊗ Alto: ◆

### 3.1.5 Medidas correctivas para atenuar el impacto ambiental térmico

Las técnicas para la atenuación o reducción de temperaturas que superen los niveles de comodidad dependen de la profundidad en la que se localizan los ambientes de trabajo subterráneo.

Para profundidades donde la temperatura final en los sitios de trabajo  $t_f$  influenciado por la temperatura de la roca virgen ( $\Delta t_r$ ) sobrepasa el límite admisible (VLA) establecido por las normas o estándares de confort, la técnica adecuada es el enfriamiento (caso de minas profundas), pero cuando esta temperatura  $t_f$  (por causa de  $\Delta t_r$ ) está por debajo y próximo al valor límite admisible (VLA) la técnica recomendable es la ventilación.

En el presente estudio se desarrollan las medidas correctivas para minas de este género (ventilación), por el hecho de que su aplicación es en minas de Portugal y Perú, países donde no existen actualmente minas de gran profundidad.

#### 3.1.5.1 Validación del modelo matemático desarrollado

La funcionalidad práctica del modelo matemático aplicado necesita ser comprobado, para considerar válida su aplicación. El ambiente subterráneo elegido fue el de la mina de Neves Corvo, donde fueron registradas las temperaturas próximas al VLA de la norma portuguesa.

##### 3.1.5.1.1. En aberturas subterráneas verticales

Para la validación del modelo matemático aplicado fue seleccionado el pozo CPV3 (fig. 3.10), construido con sistema *raise boring* entre las cotas 1222,40 hasta 973,64 (248,76 m), con diámetro de 2 m (perímetro 14,86 m y sección 13,85 m<sup>2</sup>). El coeficiente de fricción identificado es de 0,0362 kg/m<sup>3</sup>, el caudal del aire de

164,03 m<sup>3</sup>/s y la temperatura exterior de 24,4 °C (medidos en el mes de julio del año 2000).

- a). La *temperatura de auto-compresión* ( $\Delta t_{ha}$ ), se obtiene aplicando la ecuación (2.1), resultando un aumento de 2,44 °C.
- b). La *transferencia de calor del macizo al aire subterráneo* ( $\Delta t_r$ ), se calcula con la ecuación (3.6), siendo  $g_g$  igual a 30,3 m/°C (resultado de estudios hidrogeológicos realizados en los años 1984 y 1985, en la rampa de acceso y sondeo CVH1, Fernández Rubio R. *et al.*, 1990).

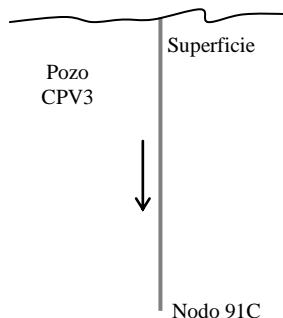


Figura 3.10 Esquema del pozo CPV3

Usando la ecuación (3.2) la *conductividad térmica media* del macizo rocoso en la mina de Neves Corvo es de 1,52 W/m.°C.

Los parámetros físico químicos del aire a temperatura de 24,4 °C (297,58 °K) se obtuvieron interpolando los valores del Cuadro 3.2 dando los siguientes resultados:  $\rho_a = 1,1888 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_e = 1,0056 \text{ KJ/kg.}^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 16,48 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $K = 0,026 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  y  $Pr = 0,709$ .

Aplicando la ecuación (3.9) con  $f = 0,0362 \text{ Kg/m}^3$ ,  $Pr = 0,709$  y  $Re_d$  (número de Reynolds) =  $1,44 \times 10^{-6}$  calculados con  $Re_d = V.d/\mu$  con velocidad  $V = 11,84 \text{ m/s}$ , la relación de Dittus y Boelter  $Nu_d$  resulta 5162,02.

Este valor permite calcular el coeficiente de transferencia de calor  $\lambda$  mediante la ecuación (3.8) y con  $d = 2 \text{ m}$ , resulta 76,106 W/m<sup>2</sup>.°C.

Con  $h_{tcn} = 30 \text{ m}$  (para la mina de Neves Corvo),  $L - h_{tcn} = 248,76 \text{ m} - 30 \text{ m} = 218,76 \text{ m}$ . Con todos estos valores y aplicando la ecuación (3.7) el aumento de la temperatura por causa del macizo rocoso resulta  $\Delta t_r = t_2 - t_1 = 2,79 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Finalmente el aumento de la temperatura por *auto-compresión* y por *el macizo rocoso* en el fondo del pozo CPV3 da un total de 5,23 °C.

En mediciones realizadas en el mes de julio de 2000 en la base del pozo CPV3, se registró una temperatura de 28 °C cuando en el exterior era de 23 °C, existiendo, por lo tanto, una diferencia de 5 °C. La diferencia entre el resultado obtenido mediante el modelo matemático (5,23 °C) y los registros de la medición (5 °C) es de apenas 4,6%, demostrando esto la validez del modelo matemático desarrollado expresado en las ecuaciones desde (3.1) a (3.7).

### 3.1.5.1.2. Validación en aberturas horizontales

Este caso corresponde al circuito típico “b” y la validación del modelo matemático es en el área de explotación Corvo, en particular en el acceso C0547GAM (fig. 3.11) los frentes de exploración 547GA1, 547GA2, 547GA3 y 547GA4, con las informaciones siguientes: producción de 6000 toneladas de mineral por disparo con 0,20 kg ANFO/t (Coupers, D. *et al.*, 1998), trabaja una pala (LHD) Toro 500D con motor diesel de 204 KW, con presencia de un máximo de

tres hombres por turno. El desmonte está incluido entre las cotas de 550,70 y 551,60 m en el sentido del flujo del aire, longitud 204,0 m, sección 27,56 m<sup>2</sup>, perímetro 20,96 m, coeficiente de fricción 0,0046 kg/m<sup>3</sup> y caudal 8 m<sup>3</sup>/s.

Para determinar  $\lambda$  por la ecuación (3.8) es necesario calcular  $Nu_d$ . Con la ecuación (3.9) y con  $f = 0,0046 \text{ kg/m}^3$ ,  $Pr = 0,709$  y  $Re_d = 0,0902 \times 10^{-6}$  calculado con  $Re_d = V.d/\mu$  siendo la velocidad  $V = 0,29 \text{ m/s}$ , la relación de Dittus y Boelter  $Nu_d$  resulta 36,693.

a) La transferencia de calor del macizo rocoso ( $\Delta t_r$ ), se calcula con los parámetros obtenidos del Cuadro 3.2 para una temperatura  $t_1$  de 28 °C (300 °K son:  $\rho_a = 1,1774 \text{ Kg /m}^3$ ,  $C_e = 1,0057 \text{ KJ/kg.}^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 16,84 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $K = 0,02624 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  y  $Pr = 0,709$

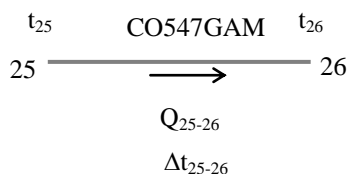


Figura 3.11 Esquema representativo del frente de explotación CO547GAM

Con este valor se calcula el coeficiente de transferencia de calor  $\lambda$  mediante la ecuación (3.8) y con  $d = 5,24 \text{ m}$ , resultando  $\lambda = 0,1837 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$ .

Finalmente con  $h_1 = 1210,00 - 550,70 = 659,30 \text{ m}$  y aplicando la ecuación (3.6) el aumento de la temperatura por causa de la roca virgen, para este caso (CO547GAM) y al final del tramo es  $\Delta t_r = t_2 - t_1 = 0,826 \text{ }^\circ\text{C}$ .

b) La temperatura por detonación de explosivos ( $\Delta t_{ex}$ ) se determina aplicando la ecuación (3.11) con  $C_e$  para ANFO de 3900 KJ/kg y  $e_u = (6000\text{t/disparo}) (2 \text{ disparos/semana-frente}) (1 \text{ semana}/6 \text{ días}) (0,2 \text{ kg ANFO/t}) = 342,86 \text{ kg ANFO/día-frente}$ , resultando un aumento de la temperatura de 1,63°C.

c) La transferencia de calor de los equipos ( $\Delta t_{ed}$ ) es un factor conjugado  $f_m.f_t$  y propio de cada área de trabajo, para el presente caso se determinó con base en los estudios realizados en julio de 2000 en condición de mina parada y registros de julio 1998 en condición operativa de la mina (Cuadro 7.11). En estas condiciones existe una diferencia media de 3,4 °C (8 m<sup>3</sup> /s) en Corvo, 4,6 °C (3,8 m<sup>3</sup> /s) en Gracia y 5,4 °C (7 m<sup>3</sup> /s) en Neves, para una potencia media de palas (LHDs) de 180,9 KW y sabiendo que en la condición de parada de la mina solo existe influencia de calor generado por el grado geotérmico, al aplicar la ecuación (2.15) se obtiene:  $\Delta t_{total} = \Delta t_{ex} + \Delta t_{ed} = 1,63 \text{ }^\circ\text{C} + \Delta t_{ed}$  e con  $\Delta t_{total} = 3,4 \text{ }^\circ\text{C}$  resulta  $\Delta t_{ed} = 1,77 \text{ }^\circ\text{C}$  para el área de Corvo. Por lo tanto, para esta condición y con la ecuación (3.10) el valor del factor  $f_m.f_t$  resulta de 0,032 para el área de Corvo.

Con el factor combinado el aumento de temperatura ( $\Delta t_{ed}$ ) y con la misma ecuación (3.10) resulta en 2 °C. Por lo tanto  $\Delta t_{total} = \Delta t_r + \Delta t_{ex} + \Delta t_{ed} = 0,83 + 1,63 + 2 = 4,46 \text{ }^\circ\text{C}$ . Estos resultados expresados en porcentajes son:  $\Delta t_r$  18,6%,  $\Delta t_{ex}$  36,5% y  $\Delta t_{ed}$  44,9%.

Hartman, H.L. (1982), refiere que en minas de E.U.A. el aumento de la temperatura es de 16,5% por causa del macizo rocoso, 31,1% debido a la detonación de explosivos y 52,4% por equipos. Los resultados obtenidos con la

aplicación del modelo matemático desarrollado están próximos a estos valores, indicando su viabilidad y la aplicación para fines de previsión de impacto ambiental térmico.

### 3.1.5.1.3. Validación en aberturas con unión y separación

Las aberturas subterráneas escogidas fueron en el *área Neves* que corresponden al colector N0900GV para el circuito típico “a” y la rampa NRAM02 (colector 900) para el circuito típico “c” (fig. 3.12).

a) Aplicando las ecuaciones (3.13) y (3.14) en el colector de aire N0900GV, que representa al circuito típico “a”, la temperatura final en el punto de unión 19 resulta en 24,6 °C, siendo un valor exactamente igual para ambas ecuaciones como era de esperar.

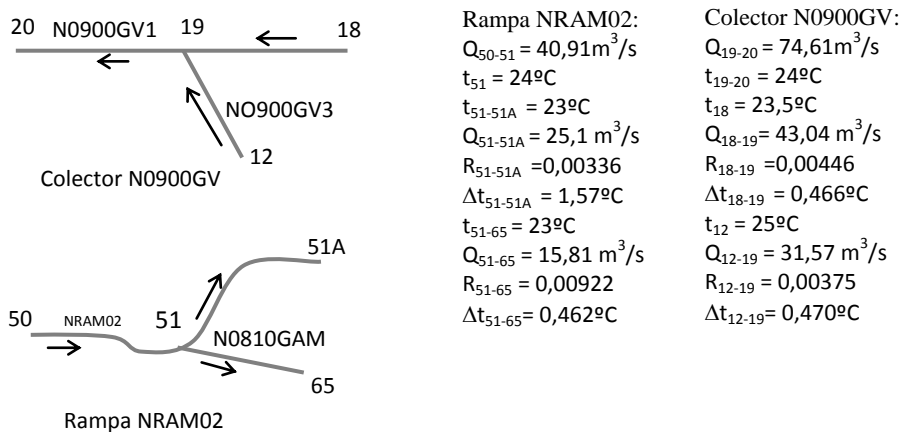


Figura 3.12 Circuitos típicos “a” y “c” del área Neves de la mina Neves Corvo

b) Aplicando las ecuaciones desde (3.17) hasta (3.19), en la rampa NRAM02 y ramificación correspondiente, que representa el circuito típico “c” (fig. 3.7), se obtiene en el punto 51A la temperatura de 23,7 °C y en el punto 65 una temperatura de 22,8 °C, cuyos cálculos fueron con caudales de aire medidos y con resistencias de la abertura subterránea determinadas.

En el colector N0900GV (área de Neves) la temperatura medida fue de 24 °C y la calculada de 24,6 °C dando una diferencia de 2,5%. En la rampa NRAM02, las mediciones dieron una temperatura de 23 °C en los tramos 51-51 y 51-65, dando una diferencia de 1% a 3%.

Estos resultados prueban que el modelo matemático desarrollado para uniones y disyunciones también tiene la validez esperada.

### 3.1.5.2 Modelaje de transferencia de calor en las redes típicas

Para la búsqueda de una medida correctiva adecuada, usando los modelos matemáticos desarrollados, se recorren trechos típicos utilizando los parámetros de las condiciones ambientales medidas en estos trechos (tramos) en la mina de Neves

Corvo, semejantes a los mostrados en la fig. 3.7. La modelación fue realizada utilizando Excel Microsoft 2000.

a) **Modelaje en circuitos en conjunto con los ramales en el nodo inicial de un trecho:** la expresión matemática particular para la conjunción típica del Colector N0900GV está basada en las ecuaciones (3.6), (3.10), (3.11), (3.13), (3.14), (3.15) y los parámetros medidos y determinados indicados en el lado derecho de la fig. 3.13.

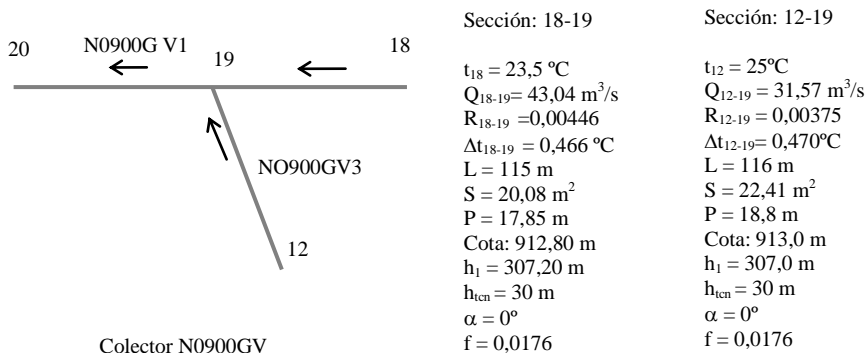


Figura 3.13 Conjunción típica en el Colector N0900GV del área de Neves

Las propiedades del aire a temperatura de 24,2 °C obtenidas del Cuadro 3.2 son:  $\rho_a = 1,1888 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_e = 1,0056 \text{ KJ/kg.}^{\circ}\text{C}$ ,  $K = 0,026 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$ ,  $\mu = 16,48 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $Pe = 0,709$ . Con las ecuaciones (3.8) y (3.9) se calcula  $\lambda$ , resultando  $\lambda = 5,56 \text{ W/m}^2.{}^{\circ}\text{C}$  para el trecho 18 -19 y  $\lambda = 3,66 \text{ W/m}^2.{}^{\circ}\text{C}$  para el trecho 12 -19.

En este ambiente subterráneo  $\Delta t_{ed} = 0$ ,  $\Delta t_{ex} = 0$  y  $\Delta t_h = 0$ , por ser un colector de aire contaminado, por lo que, las expresiones matemáticas de temperatura (t) en función del caudal (Q) y velocidad del aire (V), para este caso particular resultan las ecuaciones indicadas a seguir y los resultados de la simulación se ilustran en la fig. 3.14 y fig.3.15.

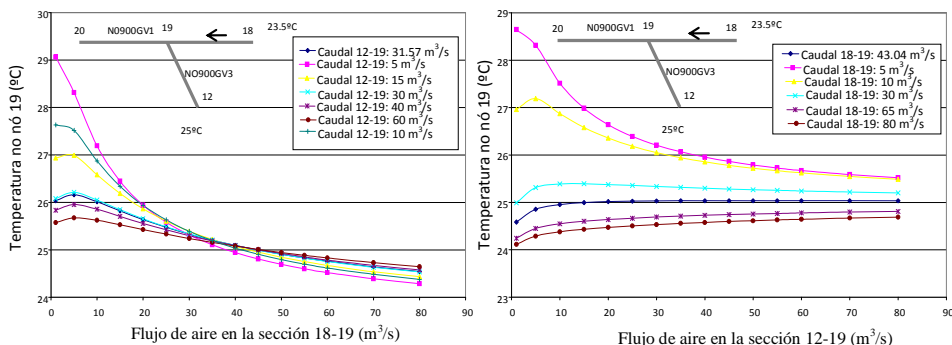


Figura 3.14 Tendencia de la temperatura del nudo 19 en función del caudal de aire en las secciones 12-19 del colector N0900GV del área de Neves

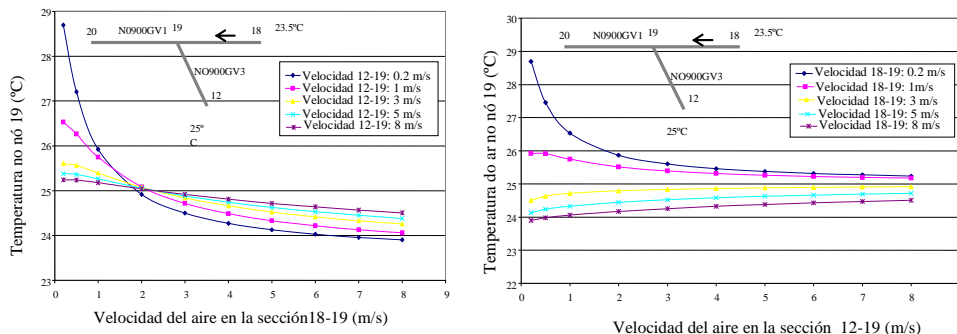


Figura 3.15 Tendencia de la temperatura en el nudo 19 en función de la velocidad del aire en las secciones 18-19 y 12-19 del colector N0900GV del área de Neves

$$t_{19} = \{Q_{18,19}[(23,5 + (43,67 / (4,77 + Q_{18,19})))] + Q_{12,19}[(25 + (30,32 / (3,34 + Q_{12,19})))]\} / (Q_{18,19} + Q_{12,19})$$

$$t_{19} = \{V_{18,19}[(471,88 + (43,67 / (0,24 + V_{18,19})))] + V_{12,19}[(560,25 + (30,32 / (0,15 + V_{12,19})))]\} / (V_{18,19} + V_{12,19})$$

Los resultados de la modelación de la temperatura en función de la velocidad y del caudal muestran un comportamiento similar.

El aumento del caudal en el trecho de menor temperatura (trecho 18-19,  $t_{18} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), da origen a una gradual disminución de la temperatura en el nodo de conjunción ( $t_{19}$ ), con tendencia para una temperatura similar a partir del caudal medio de referencia ( $37\text{ m}^3/\text{s}$ ) y con evolución más acentuada para caudales inferiores a este.

El aumento del caudal en el trecho de mayor temperatura (trecho 12-19,  $t_{18} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), muestra la tendencia asintótica de la temperatura en el nodo de conjunción, con evolución más acentuada en los caudales inferiores al caudal medio de referencia.

Las conclusiones permiten formular una *medida correctiva* en el sentido de *reducir el caudal del trecho con mayor temperatura hasta niveles permisibles y aumentar el caudal del otro trecho a niveles superiores al caudal de referencia*. Este caudal no debe generar una velocidad superior a la permitida por los estándares o leyes.

La resolución matemática de esta conclusión se desenvuelve, basada en la ecuación (3.13), con las condiciones de restricción contempladas por las normas o leyes.

Una máxima reducción de la temperatura  $t_f$ , sucede cuando el caudal de aire del trecho de *menor* temperatura *elimina* el aumento de temperatura del trecho de *mayor* temperatura, para un caudal mínimo en este trecho  $q$ , desde que sea permitido por los estándares.

$$\text{Si: } t > t_{i1} \text{ ou } (t_i + \Delta t_{if}) > (t_{i1} + \Delta t_{i1f}), \text{ las condiciones: } \Delta t_{i1f} = 0, Q_{if} = qy Q_{i1f} / S_{i1f} \leq 8\text{ m/s}$$

Donde  $S_{i1-f}$  es la sección de la abertura del trecho  $i1-f$  ( $\text{m}^2$ ); por lo que el caudal de aire  $QQ$  del trecho de menor temperatura que elimina el aumento para tales condiciones, resulta lo expresado por la ecuación (3.24) y la mayor reducción de temperatura  $t_f$  por la ecuación (3.25).



$$QQ_{i1-f} = \frac{q(t_i - t_f + \Delta t_{i-f})}{t_f - t_{i1}} \quad (3.24)$$

$$t_f = \frac{Q_{i-f}(t_i + \Delta t_{i-f}) + QQ_{i1-f}(t_{i1})}{Q_{i-f} + QQ_{i1-f}} \quad (3.25)$$

Si  $t_f \leq t_m$ , donde  $t_m$  es la temperatura máxima permitida por los estándares (en Portugal 31 °C), la solución será la mejor.

Si:  $t_{i1} > t_i$  o  $(t_{i1} + \Delta t_{i1-f}) > (t_i + \Delta t_{i-f})$ , las condiciones:  $\Delta t_{i-f} = 0$ ,  $Q_{i1-f} = q$  y  $Q_{i-f}/S_{i-f} \leq 8$  m/s

Donde  $S_{i-f}$  es la sección de la abertura del trecho  $i-f$  (m<sup>2</sup>), por lo que el caudal de aire  $QQ$  del trecho de menor temperatura que elimina el aumento para tales condiciones, es en este caso se expresa por la ecuación (3.26).

$$t_f = \frac{Q_{i1-f}(t_i + \Delta t_{i1-f}) + QQ_{i-f}(t_i)}{Q_{i1-f} + QQ_{i-f}} \quad (3.26)$$

En las ecuaciones (3.24) a (3.26),  $t_f$  es previamente calculado con los aumentos de los tramos de conjunción y los caudales pueden ser expresados en función de la velocidad  $Q = V.S$ .

La condición de mejoría de  $t_f$  menor que el máximo, es posible obtener en el caso en que la velocidad del aire  $V$  es permitido por las normas ( $0,2 \text{ m/s} < V < 8 \text{ m/s}$  en Portugal). Así:

$$t_f = \frac{q(t_i + \Delta t_{i-f}) + V_{i1} \cdot S_{i1-f}(t_{i1} + \Delta t_{i1-f})}{q + V_{i1-f} \cdot S_{i1-f}} \quad (3.27)$$

$$\text{o} \quad t_f = \frac{V_{i-f} \cdot S_{i-f}(t_i + \Delta t_{i-f}) + q(t_{i1} + \Delta t_{i1-f})}{V_{i1-f} \cdot S_{i-f} + q} \quad (3.28)$$

**b) Modelaje del comportamiento térmico en el trecho longitudinal:** el sitio objeto del modelaje es el acceso principal al frente de explotación CO547GAM del área Corvo, teniendo como base las ecuaciones (3.6), (3.10), (3.11), (3.15) y (3.16). Con los valores  $t_{25} = 28$  °C,  $\lambda = 0,1837$  W/m<sup>2</sup>.°C,  $P = 20,96$  m,  $h_1 = 659,30$  m,  $h_{\text{cen}} = 30$  m,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $g_g = 30,30$  m/°C,  $\rho_a = 1,1774$  kg/m<sup>3</sup>,  $C_e = 1,0057$  KJ/kg.°C,  $f_m \cdot f_t = 0,032$ ,  $q_d = 2,9$  kW/kW,  $P_d = 204$  kW,  $C_e = 342$  kJ/kg,  $e_u = 342$  kg ANFO/ día-frente y  $S = 27,56$  m<sup>2</sup>; las ecuaciones particulares en función del flujo y velocidad resultan en lo presentado a continuación e ilustrados en la fig.3.16.

$$t_{26} = 28 + [20,461/(1 + 2,97Q_{25-26})] + 29,025/Q_{25-26} \quad \text{y}$$

$$t_{26} = 28 + [20,461/(1 + 81,853V_{25-26})] + 1,0532/V_{25-26}$$

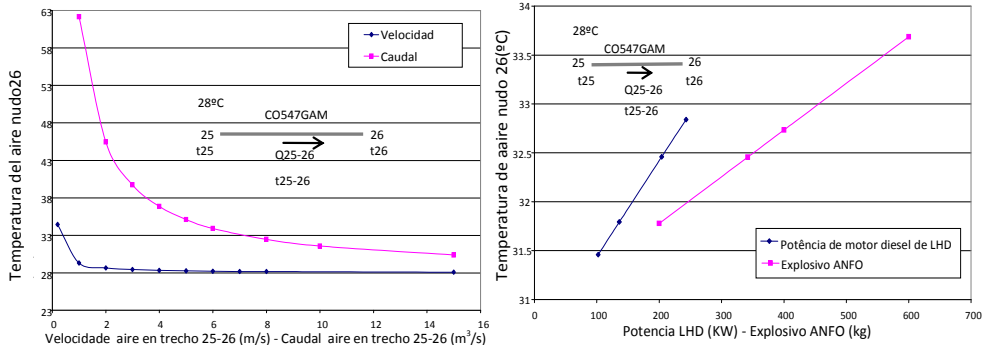


Figura 3.16 Tendencia de la temperatura en el nudo 26 de la sección 25-26 en el túnel C0547GAM del área Corvo en función de la velocidad, caudal, potencia del motor a diesel LHD y explosivo ANFO

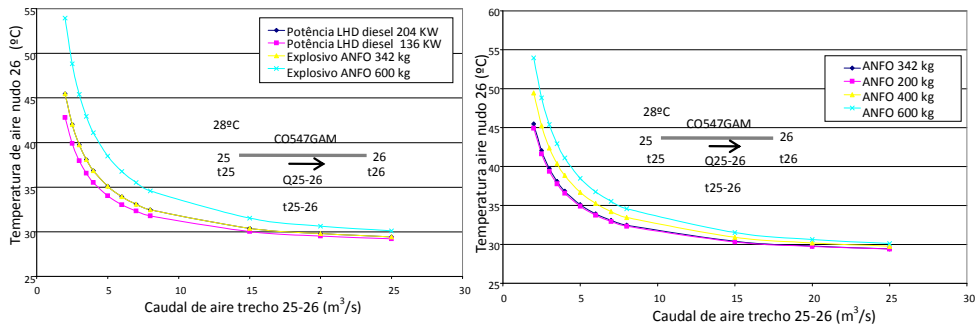


Figura 3.17 Tendencia de la temperatura en el nudo 26 de la sección 25-26 en el túnel C0547GAM del área Corvo en función del caudal, potencia del motor a diesel LHD y explosivo ANFO

Para el simulacro de la influencia la potencia del motor del equipamiento diesel y explosivo ANFO la temperatura  $t_{26}$ , las ecuaciones particulares se indican a seguir y los resultados se ilustran en la fig. 3.17.

De los resultados de los simulacros se concluye que:

- El *aumento* de la temperatura es mucho más sensible con la disminución del caudal que la variación de la velocidad del aire. Un alto aumento de la temperatura se nota para caudales menores de 10 m<sup>3</sup>/s y velocidades <1 m/s, siendo que las altas velocidades no producen prácticamente aumento de la temperatura;
- La *mayor* potencia de motor del equipo diesel y la *mayor* cantidad de explosivo, dan origen a una *mayor* temperatura;
- La influencia en el incremento de la temperatura producida por la potencia del motor de equipos diesel y por la cantidad de explosivo, es *mayor* cuanto *menor* (<10 m<sup>3</sup>/s) es el caudal del aire y *menor* cuanto *mayor* el caudal.

$$t_{26} = 30,46 + 9,797^{-3} P_d \quad \text{y} \quad t_{26} = 30,826 + 4,7556^{-3} e_u$$

Por lo tanto, en este caso la *velocidad del aire* no constituye una referencia importante para evaluar el impacto térmico y consecuentemente las condiciones de confort en estos casos. El parámetro más representativo es el *caudal del aire*.

Basado en los resultados de las simulaciones y las ecuaciones (3.15) y (3.16), con las condiciones del medio dentro de los márgenes definidos por los estándares existentes, se pueden obtener ecuaciones que permitan mitigar o disminuir la temperatura a niveles permitidos.

La *máxima reducción de la temperatura*  $t_f$ , se produce cuando se proporciona un mayor caudal de aire  $Q_m$  ( $m^3/s$ ) a una velocidad máxima permitida  $V_m$  (8 m/s en el caso de Portugal) para una sección de túnel  $S_{i-f}$  ( $m^2$ ) y para situaciones técnicas y económicas viables. En estas condiciones, la ecuación para la determinación de este flujo está indicada por la ecuación (3.29).

$$Q_{i-f} = Q_m = V_m \cdot S_{i-f} \quad (3.29)$$

Si  $t_f \leq t_m$ , donde  $t_m$  es la temperatura máxima permitida por los estándares, en el caso de Portugal 35 °C, la *solución será la mejor*.

La *condición de mejoría de  $t_f$* , es posible cuando la velocidad del aire  $V$  (m/s) es  $0,2 \text{ m/s} < V < 8 \text{ m/s}$  (en el caso de Portugal) para un caudal mínimo permitido por los estándares  $q$ .

$$Q_{i-f} = q \quad (3.30)$$

**c) Modelaje del comportamiento térmico en ambientes con ramificación:** para circuitos típicos con separación de ramales de un nodo inicial de otra extensión, el modelo matemático unificado está basado en las ecuaciones (3.6), (3.10), (3.11), (3.17), (3.18) y (3.19). El sitio escogido es la separación típica de la rampa NRAM02 del área de Neves (fig. 3.18).

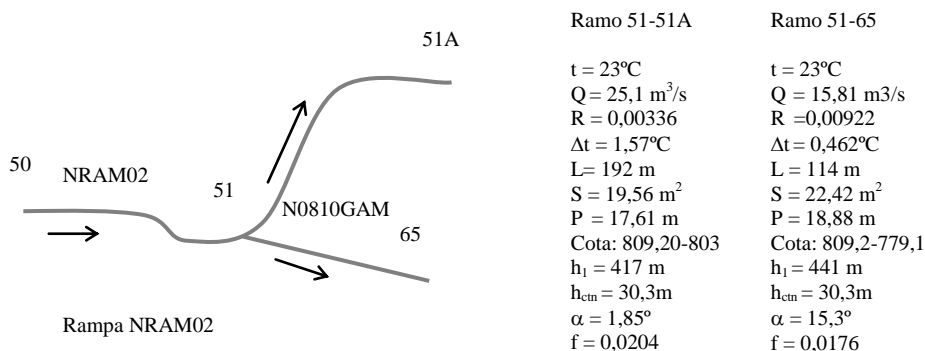


Figura 3.18 Separación típica en la Rampa NRAM02 del área Neves

Las propiedades del aire a la temperatura de 23 °C obtenidas del Cuadro 2.2 son:  $\rho_a = 1,1955 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $C_e = 1,0057 \text{ KJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 16,27 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $K = 0,02554 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  y  $Pr = 0,709$ . Con las ecuaciones (2.8) y (2.9), se tiene  $\lambda = 3,88 \text{ W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$  para el trecho 51-51A y  $\lambda = 1,83 \text{ W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$  para el trecho 51-65 y se sabe que en este sitio subterráneo  $\Delta t_{ed} = 0$ ,  $\Delta t_{ex} = 0$  y  $\Delta t_h = 0$  (zona no productiva).

Con todos los parámetros indicados las expresiones matemáticas particulares en función de las variables térmica, volumétrica y dinámica, resultan como se presenta de seguidas y los resultados del simulacro se ilustran en la fig. 3.19, fig. 3.20 y fig. 3.21.

$$t_{51A} = 24 - (Q_{51-65} / Q_{51-51A}) / 68,57(5,46 + Q_{51-65}), \quad t_{51A} = 24 - (V_{51-65} / V_{51-51A}) / 78,6(5,46 + 22,42V_{51-65})$$

$$t_{65} = 24 - (Q_{51-51A} / Q_{51-65}) / 20,58(1,64 + Q_{51-51A}), \quad t_{65} = 24 - (V_{51-51A} / V_{51-65}) / 17,95(1,64 + 19,56V_{51-51A})$$

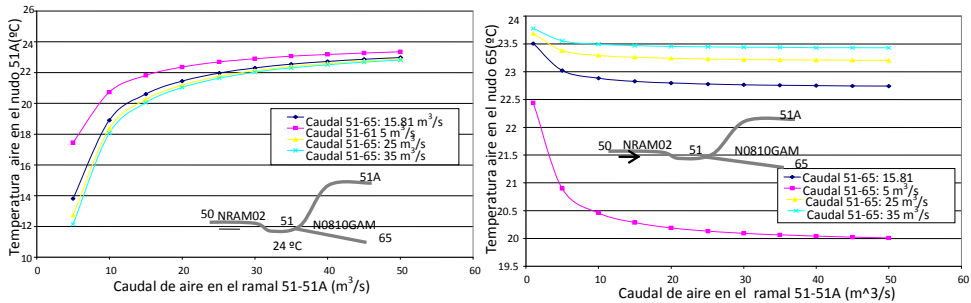


Figura 3.19 Tendencia de la temperatura en los nudos 51A y 65 en la rampa NRAM02 del área Neves, en función del caudal del trecho 51-51A

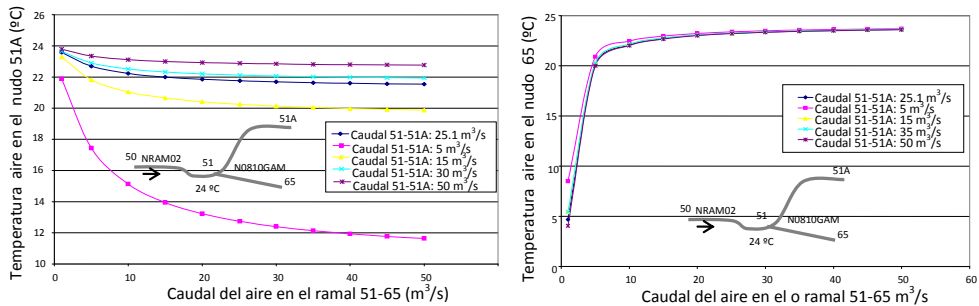


Figura 3.20 Tendencia de la temperatura en los nudos 51A a 65 en la rampa NRAM02 del área de Neves, en función del caudal del tramo 51-65

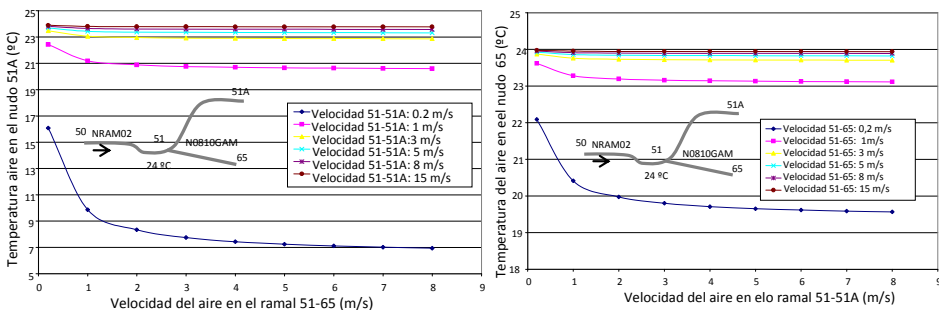


Figura 3.21 Tendencia de la temperatura en los nudos 51A a 65 en la rampa NRAM02 de área de Neves, en función de la velocidad en los ramales 51-65 a 51-51A

Los resultados de las simulaciones permiten las siguientes conclusiones:

- Cuanto mayor es el caudal del aire en el ramal de mayor longitud (51-51A), mayor es el incremento de la temperatura en el nodo final (51A) y viceversa. Es interesante observar que existe alta sensibilidad de la temperatura cuando el caudal es bajo ( $<10 \text{ m}^3/\text{s}$ ), con tendencia a la estabilización para caudales mayores.
- Cuanto mayor es el caudal en el ramal de menor longitud (51-65), mayor es la disminución de la temperatura en el nodo de este ramal (65) y disminución en el otro caudal (51-51A), también con alta sensibilidad para caudales bajos ( $<10 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y posterior tendencia a la estabilización
- Cuando la velocidad del aire es mayor existe poca sensibilidad de la temperatura. Para velocidades bajas (1 a 0,2 m/s) en un ramal u otro, las temperaturas son sensibles a la variación de la velocidad. En este caso, también la *velocidad del aire no* es una referencia significativa para evaluar el impacto térmico y consecuentemente las condiciones de confort.

Las conclusiones permiten desarrollar un modelo matemático para las medidas de corrección con base en las ecuaciones (3.17) y (3.19) y las restricciones de los estándares o normas.

La máxima reducción de la temperatura al final de un caudal ( $t_f$  o  $t_{fl}$ ), es cuando se proporciona el menor caudal del aire,  $q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), admitido por los estándares en el trecho de mayor incremento de la temperatura desde que la velocidad del aire en el ramal de menor aumento sea menor que la velocidad máxima permitida  $V_m$  (8 m/s en Portugal) para una sección de la abertura  $S_{i-f}$  o  $S_{i-fl}$  ( $\text{m}^2$ ). Para estas condiciones resultan las ecuaciones (3.31) y (3.32).

$$\text{Se } \Delta t_{i-f} > \Delta t_{i-fl}: t_f = t_i - \Delta t_{i-fl} \left( \frac{Q_{i-fl}}{q} \right) \text{ y } t_{fl} = t_i - \Delta t_{i-f} \left( \frac{q}{V_m \cdot S_{i-fl}} \right) \quad (3.31)$$

$$\text{Se } \Delta t_{i-fl} > \Delta t_{i-f}: t_f = t_i - \Delta t_{i-fl} \left( \frac{q}{V_m \cdot S_{i-f}} \right) \text{ y } t_{fl} = t_i - \Delta t_{i-f} \left( \frac{Q_{i-f}}{q} \right) \quad (3.32)$$

En los incrementos de la temperatura  $\Delta t_{i-f}$  y  $\Delta t_{i-fl}$  se deben considerar los caudales correspondientes. Si  $t_f$  o  $t_{fl} \leq t_m$ , donde  $t_m$  es la temperatura máxima permisible por los estándares (35 °C en Portugal), *será la mejor solución*.

La condición de mejora de  $t_f$  o  $t_{fl}$ , ocurre cuando la velocidad del aire en el trecho de menor aumento de la temperatura resulte  $< V_m$  (8 m/s en Portugal); por lo tanto, los caudales en estos ramales debe ser como máximo  $V \cdot S_{i-f}$  o  $V \cdot S_{i-fl}$  según el caso y que la velocidad del aire  $V$  ( $\text{m/s}$ )  $0,2 \text{ m/s} < V < 8 \text{ m/s}$  (según la norma portuguesa). Para el cálculo con estos flujos de aire para condiciones de mejora, se deben usar las mismas ecuaciones 3.31 y 3.32.

El parámetro térmico base considerado en el desarrollo del modelo matemático para la evaluación del impacto ambiental y para la búsqueda de medidas de corrección es la *temperatura seca*, sin embargo, la humedad relativa también constituye un parámetro importante en la obtención del confort ambiental, cuya determinación puede ser efectuada utilizando la ecuación (3.33), donde Hr es

la humedad relativa (%),  $P_b$  es la presión barométrica (kPa),  $t_s$ : la temperatura seca (°C) y  $t_h$  la temperatura húmeda (°C).

$$Hr = \frac{0.6105e^{\frac{17.27t_h}{t_h+273.3}} - 0.00036P_b(t_s - t_h)}{0.6105e^{\frac{17.27t_s}{t_s+273.3}}} \cdot 100 \quad (3.33)$$

### 3.1.5.3 Para grandes profundidades

Como ya se dijo, cuando aumenta la profundidad, aumenta también la temperatura del aire en la atmósfera subterránea, principalmente debido al grado geotérmico de la roca virgen, siendo que, hasta una temperatura del aire considerada como la máxima admisible (VMA) es posible atenuar con aire de ventilación, y, sobrepasado este valor máximo serán necesarios sistemas de enfriamiento (fig. 3.22).

En el presente estudio, se desarrolla la ingeniería ambiental relacionada a minas no profundas, donde aun sea posible resolver los problemas de impacto ambiental térmico mediante sistemas de ventilación, a pesar de que el siguiente tema se presenta de manera referencial.

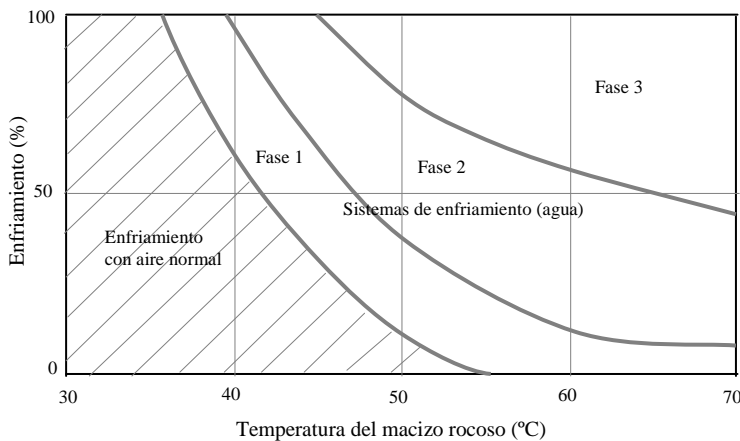


Figura 3.22 Acondicionamiento del aire en South African Gold Mines en función de la temperatura del macizo rocoso (Hartman, H.L. et al., 1982).

Existen varios procedimientos de enfriamiento de la atmósfera subterránea y uno de los métodos más utilizado es el proceso de enfriamiento (fig. 3.23), que consiste en cuatro procesos básicos: *evaporación* (estado de ebullición del refrigerante, cambio de estado predominantemente líquido del gas y absorción de calor), *compresión* (el refrigerante fluye en estado de vapor al compresor donde es comprimido), *condensación* (el refrigerante pasa otra vez al estado líquido liberando calor al exterior, existiendo cambio de temperatura) y *expansión* (la temperatura y la presión del líquido desciende durante la expansión y el refrigerante completa el ciclo).

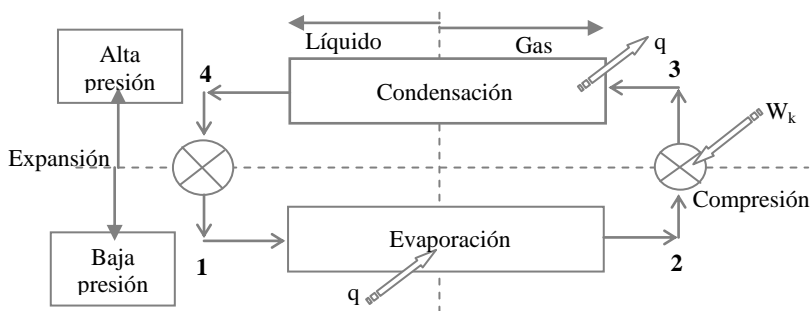


Figura 3.23 Proceso de enfriamiento en minas subterráneas profundas

La termodinámica del proceso de enfriamiento (fig. 3.24) puede ser expresada mediante las siguientes ecuaciones:

- Evaporación:*  $q_E = h_2 - h_1$ , BTU/lb (kJ/kg), temperatura y presión constante.
- Compresión:*  $W_k = h_3 - h_2$ , BTU/lb (kJ/kg), aproximadamente isotrópico, reversible, adiabático, entropía próxima a la constante.
- Condensación:*  $q_C = h_3 - h_4$ , BTU/lb (hJ/kg), presión y temperatura constantes.
- Expansión:*  $h_1 = h_4$ ,  $q_{EX} = 0$

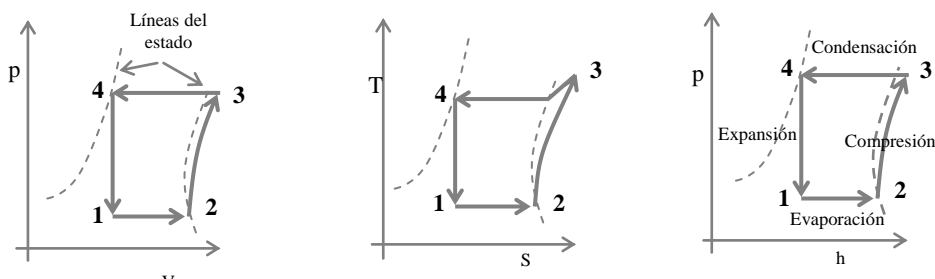


Figura 3.24 Procesos termodinámicos de enfriamiento (Hartman, H.L., et al. 1992)

### 3.1.6 Monitoreo y control

En todo trabajo de evaluación del ambiente subterráneo, son determinantes las mediciones de los parámetros ambientales, para lo cual existen varios tipos de aparatos (Cuadro 3.12).

Cuadro 3.12 Aparatos utilizados para mediciones de parámetros térmicos en el ambiente subterráneo (basado en Hartman, H.L. et al., 1992)

Aparato	Parámetro de medición	Parámetros consecuentes
Psicrómetro	Temperatura húmeda (°C) Temperatura seca (°C)	Humedad relativa (%) Temperatura efectiva (°C)
Barómetro (digital)	Presión barométrica (mbar)	Temperatura operativa (°C)
Anemómetro	Velocidad de aire (m/s)	
Kata termómetro	Temperatura húmeda (°C) Temperatura seca (°C) Tiempo de enfriamiento(s)	Energía de enfriamiento (mcal/cm <sup>2</sup> .s)

Un aspecto importante en las mediciones térmicas es la calibración de los aparatos y la realización de las mediciones en las condiciones indicadas por los fabricantes, de modo que permitan obtener informaciones realistas y confiables.

Estos aparatos son muy conocidos y usados en las mediciones de la temperatura en el ambiente subterráneo, por lo que mayores detalles es posible obtenerlos en la bibliografía o en el catálogo del fabricante.

La ingeniería térmica en el ambiente subterráneo es un sistema de gestión adecuado para conseguir una conservación del ambiente subterráneo dentro de la calidad exigida por los estándares existentes, como se ilustra en la fig. 3.25, que es una secuencia sistemática de la gestión de la temperatura en el ambiente subterráneo incluyendo el monitoreo y control.

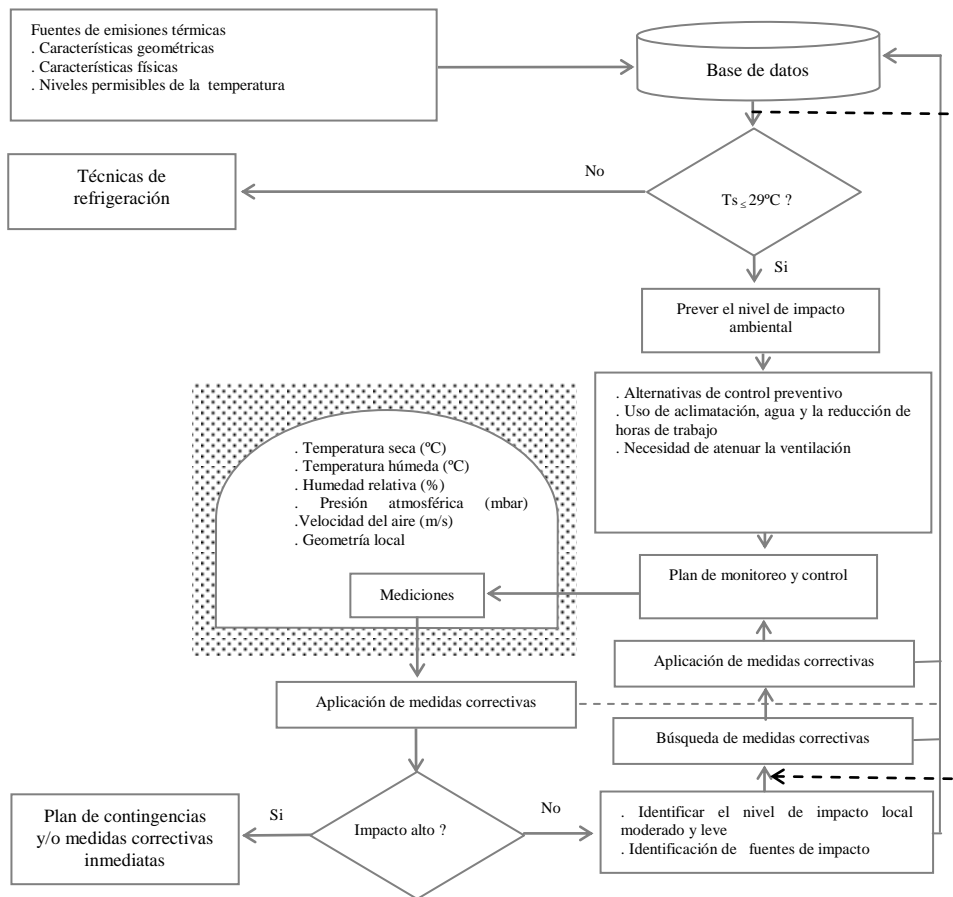


Figura 3.25 Sistema de gestión de la temperatura en el ambiente subterráneo

### 3.2 Gases tóxicos en el ambiente subterráneo

#### 3.2.1 Efectos de los gases en el ambiente subterráneo

La composición natural de los gases en el aire de la atmósfera exterior (Cuadro 3.13) es predominantemente nitrógeno (78,08%), seguido por oxígeno



(20,95%), por argón (0,93%), por dióxido de carbono (0,03%) y otros gases en porcentaje restante (0,01%).

Los gases más comunes en el aire del ambiente subterráneo son: O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (Cuadro 3.14), que en determinadas concentraciones constituyen contaminantes importantes.

Los gases presentes en el aire del ambiente subterráneo en ciertas concentraciones no son nocivo, sin embargo, a medida que aumentan o disminuyen o que ocurre una exposición prolongada (fig. 3.26), originan efectos negativos para la salud e incluso pueden provocar la muerte (Cuadro 3.15).

**Cuadro 3.13 Gases en el aire natural atmosférico exterior**

Gas natural	Composición en volumen	
	%	ppm
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78,08	780800
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20,95	2000
Argón (A)	0,93	300
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,03	300
Otros	0,01	100

**Cuadro 3.14 Gases presentes en el ambiente subterráneo**

Nombre de los gases	Símbolo	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Oxígeno	O <sub>2</sub>	1,1056
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,9673
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1,5291
Monóxido de carbono	CO	0,9672
Dióxido de azoto	NO <sub>2</sub>	1,5895
Oxido de azoto	NO	1,0400
Acido sulfídrico	H <sub>2</sub> S	1,1912
Anhídrido sulfuroso	SO <sub>2</sub>	2,2636
Metano	CH <sub>4</sub>	0,5545

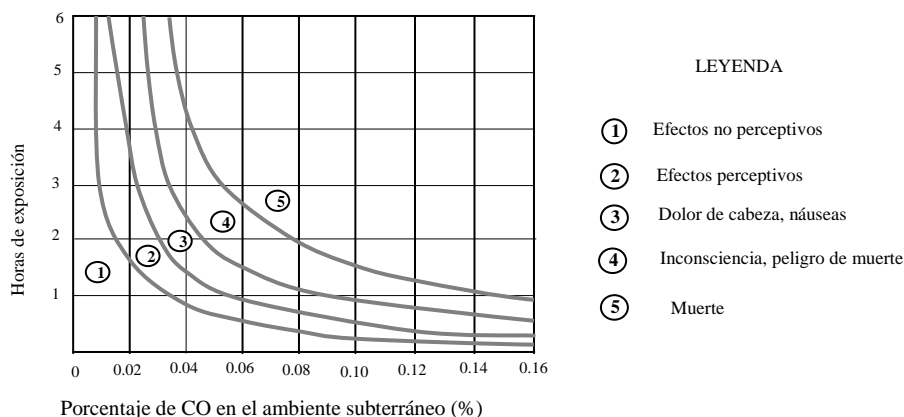


Figura 3.26 Efectos de la exposición de monóxido de carbono CO (Hartman, H. L., et al., 1982)

La composición gaseosa del aire de la atmósfera subterránea es alterada por factores operacionales y factores hidrogeológicos. El oxígeno puede disminuir hasta 18% (180.000 ppm), el CO<sub>2</sub> aumentar y agregarse otros gases y partículas sólidas.

Actualmente existe un creciente proceso de mecanización en el ambiente subterráneo con intensa utilización de equipos con motor a diesel.

Cuadro 3.15 Efectos provocados por la alteración de la composición gaseosa del aire en el ambiente subterráneo (Banerjee, S.C., 2000; Kiessel, F.N., 1996; Vutukuri, V.S., et al., 1986)

Gas	% en el Aire	Características físicas	Efectos
O <sub>2</sub>	17 15 9 7 6	Incoloro, inodoro e insípido	Náuseas, aumento de palpitations del corazón Mareos, zumbidos en los oídos, latidos rápidos del corazón Desmayos, pérdida del conocimiento Riesgo de muerte Convulsiones y la muerte
CO <sub>2</sub>	<0,5 3 5 10 20-25	Incoloro, inodoro, y con sabor ligeramente ácido	Inofensivo Aumento de la frecuencia de la respiración Intensificación (3 veces) de la respiración Coma Muerte en pocos segundos
CO	0,01 0,40 1	Incoloro, inodoro e insípido	Enfermedad crónica grave Peligro de muerte Muerte en pocos minutos
NO <sub>2</sub> NO	<5 ppm 60 ppm 100 ppm 100-150 ppm 200-700 ppm	NO <sub>2</sub> rojizo NO incoloro	Inofensivo para la salud Irritación de la garganta Tos severa Dolor de cabeza, vómitos y riesgo de muerte Muerte en pocos segundos
H <sub>2</sub> S	0,025 ppm 0,005- 0,010% 0,02 – 0,07% 0,07 – 0,10% 0,10%	Incoloro, olor a huevo podrido y sabor azucarado	Fuerte olor Irritación en los ojos y vías respiratorias después de 1 hora Aumento de la irritación ocular, dolor de cabeza, náuseas, vómitos, ardor nasal, dolor de garganta y el pecho Pérdida del conocimiento, pérdida de la respiración y muerte Muerte en pocos minutos
SO <sub>2</sub>	20 ppm 50 ppm 400 – 500 ppm	Incoloro, sofocante, olor fuerte a sulfuro, inflamable	Irritación en los ojos, la nariz y el pecho Aumento de irritación de los ojos, el pecho y los pulmones, problemas respiratorios después de varios minutos Muerte instantánea
CH <sub>4</sub>	> 5,3 %	Incoloro e inodoro	No es venenoso Inflamable e explosivo

Los productos finales de combustión de diesel en los cilindros del motor cuando son expulsados a la atmósfera subterránea, al alcanzar determinadas concentraciones, causan en el ser humano enfermedades como el cáncer y hasta la muerte misma (Cuadro 3.16).

Cuadro 3.16 Efectos en la salud humana por la emisión de motores a diesel en el ambiente subterráneo (basado en el Cuadro 3 y Vutukuri, V.S., et al., 1986)

Componente	Efectos	Componente	Efectos
CO <sub>2</sub>	Muerte (20 – 25%)	NO <sub>2</sub>	Muerte (200 – 700 ppm)
SO <sub>2</sub>	Muerte (400 – 500 ppm)	Hidrocarbonatos	Cancerígeno
CO	Muerte (1%)	Aldehídos	Riesgo leve
NO	Muerte con 200 – 700 ppm	Partículas	Cancerígeno

### 3.2.2 Fuentes de gases en el ambiente subterráneo

Los gases identificados en la atmósfera subterránea son generalmente O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, NO, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> cuyas fuentes de producción están relacionadas con factores operacionales e hidrogeológicos (Cuadro 3.17), explosiones e incendios, desmonte de rocas (explosivo), descomposición de sustancias orgánicas, operación de equipos con motor de gasolina, agua subterránea, carbón y minerales con azufre.

El Cuadro 3.17 muestra que el gas que tiene mayores fuentes es el CO, seguido por CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO y NO<sub>2</sub> y finalmente SO<sub>2</sub>.

Cuadro 3.17 Fuentes de generación de gases en el ambiente subterráneo

Gas	Carbón	Aire natural	Incendio	Explosión de grisú y polvo de carbón	Desmonte de rocas (explosivo)	Putrefacción de sustancias orgánicas	Equipos con Motor a diesel	Agua subterránea	Mineral con azufre
O <sub>2</sub>									
N <sub>2</sub>									
CO <sub>2</sub>									
CO									
NO <sub>2</sub>									
NO									
H <sub>2</sub> S									
SO <sub>2</sub>									
CH <sub>4</sub>									

La combinación de los gases entre ellos y/o con el aire (O<sub>2</sub>) crea las siguientes condiciones de riesgo ambiental:

CO + CO <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub> + O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	inflamable, explosivo, asfixiante
CH <sub>4</sub> + aire	explosivo
CO <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> + aire	asfixiante
CO + aire	asfixiante
CO <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub>	asfixiante, explosivo
H <sub>2</sub> S + aire	irritante, venenoso

Las fuentes de gases contaminantes de mayor importancia son las relacionadas con la operación de equipos *con motor diesel* (fig. 3.27) debido a la emanación continua y paralela a la presencia del hombre.

Los gases producidos por el *desmonte de rocas* son muy importantes cuando el sistema de ventilación es deficiente, más cuando existe un caudal de aire adecuado, estos gases son evacuados y diluidos, generalmente en el momento en que el hombre no está presente en el ambiente de trabajo (fin de turno).



Figura 3.27 Emisiones de gases de equipos a diesel en el ambiente subterráneo

En minas de carbón, el metano es la fuente de contaminación de gas de mayor importancia y puede provocar explosiones e incendios con la consecuente producción de gases tóxicos.

Las emisiones de gases por motores diesel incluyen los hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), gases de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas (PM), cuya cantidad o concentración depende de las características del motor, calidad del combustible y uso del sistema de control (Cuadro 3.18).

Cuadro 3.18 Emisiones de motores diesel ([http://www.nett.ca/faq\\_diesel.html#q1](http://www.nett.ca/faq_diesel.html#q1))

CO	HC	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
ppmv	ppmv	g/m <sup>3</sup>	Ppmv	ppmv
5-1500	20-400	0,1-0,5	50-2500	10-150

En el caso de los motores a diesel sucede que algunas características que consiguen disminuir la emisión de partículas (PM) ocasionan un aumento en la emisión de NO<sub>x</sub> (fig. 3.28 izquierda) porque es necesario una mejor y más completa combustión, lo que resulta en el calentamiento de los cilindros y la formación de gases NO<sub>x</sub>, ya que la formación de NO<sub>x</sub> está en función de la variación del oxígeno y de la temperatura.

La emisión de partículas expulsadas del tubo de escape del motor (fig. 3.28 derecha) es producto de la combustión de diesel y lubricantes en los cilindros del motor y las que se forman por el proceso de aglomeración, la condensación, la adsorción y el intercambio de viscosidad.

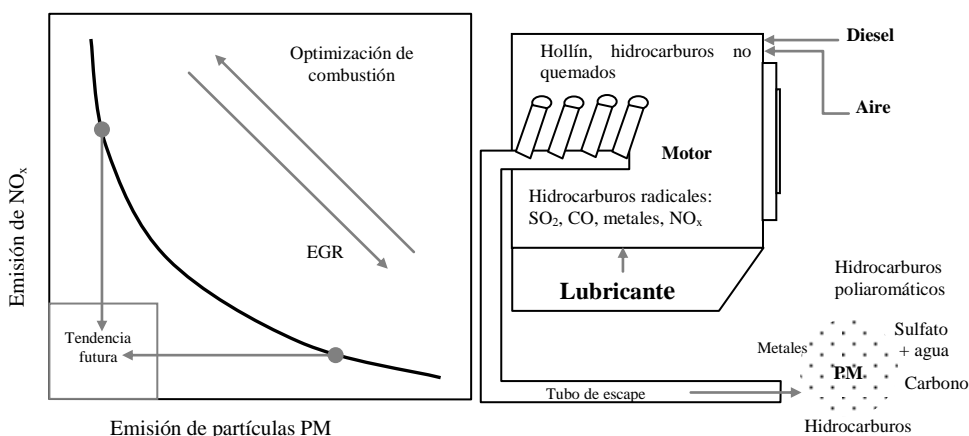


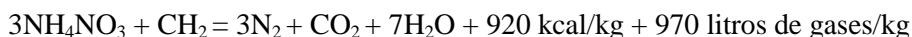
Figura 3.28 Emisiones de gases y partículas por los motores diesel (ESI International, 1999)

### 3.2.3 Caracterización de gases en el ambiente subterráneo

#### 3.2.3.1 Gases tóxicos producto del desmonte de rocas con explosivos

Los gases resultantes del desmonte de rocas con explosivo son principalmente el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  y humos, dependiendo del tipo de explosivo utilizado, la presencia de agua y el equilibrio en el sistema de la composición química.

La reacción de la descomposición del ANFO en un sistema equilibrado en oxígeno se expresa en la ecuación química a seguir:



Esta composición química corresponde a un porcentaje de 95,3% de nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) y 5,7% de diesel ( $\text{CH}_2$ ). Esta proporción en peso corresponde para 50 kg de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  3,7 litros de diesel ( $\text{CH}_2$ ) y en el proceso de la explosión se producen 970 litros de gases y 920 Kcal por cada kilogramo de ANFO.

Un aumento de diesel en la proporción de ANFO origina un desequilibrio de oxígeno y como consecuencia la producción del gas tóxico  $\text{CO}$ . Contrariamente, la disminución de diesel genera la producción de los gases  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  (fig. 3.29).

En caso de usar gas natural nitroglicerina NG (tipos de gelatinas), la reacción química de detonación es:



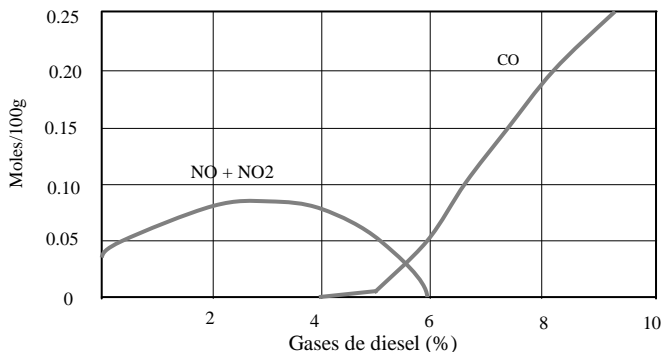


Figura 3.29 Producción de gases tóxicos para variar la composición de diesel en el ANFO (López Jimeno, C., 1997)

La explosión de 1 g-mol de NG genera  $29/4 = 7,25$  g/mol de productos gaseosos a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y a presión atmosférica, por lo que el volumen de gases en la explosión es igual a  $7,25\text{ g-mol} \times 22,4\text{ l/g-mol} = 162,4$  litros de gas.

La concentración de los gases  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$  producidos en el desmonte de rocas con uso de explosivos, para las condiciones de expulsión de los gases en el frente de avance con longitud de 50 m, en función de  $n$  que es el porcentaje (en forma decimal) de carbono en el explosivo y  $\rho_e$  que es la masa volumétrica del explosivo ( $\text{kg/m}^3$ ), se calcula mediante las ecuaciones (3.34) y (3.35) (López Jimeno, C., 1997).

$$C_{\text{CO}+\text{CO}_2} = 0.0373n \cdot \rho_e \quad (3.34) \quad C_{\text{CO}} = 0.0125n \cdot \rho_e \quad (3.35)$$

La concentración inicial de gases producto de los disparos con explosivo  $C_e$  (%) viene dada por la ecuación (3.36), que considera la cantidad total del explosivo usado en el disparo  $q_e$  (kg), la cantidad de gases formada por la detonación del explosivo  $g_e$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ), la sección del frente  $S$  ( $\text{m}^2$ ) y la distancia de expulsión de los gases en el disparo  $L$  (40 m para frentes de explotación), relacionándose por:

$$C_e = \frac{100q_e \cdot g_e}{L \cdot S} \quad (3.36)$$

### 3.2.3.2 Gases tóxicos producidos por los equipos con motor a diesel

La constante tendencia de la mecanización en los trabajos de excavación de túneles y explotaciones mineras subterráneas obliga a la intensa utilización de máquinas con motores a diesel, lo que crea condiciones de emisión de gases que, en determinadas concentraciones, se tornan peligrosos para el ambiente y la salud humana.

Las emisiones de los motores a diesel incluyen los hidrocarburos (HC), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y el material en forma de partículas (PM). Los compuestos tóxicos, como los hidrocarburos poliaromáticos (PAH), también se encuentran en el agotamiento de un motor diesel y pueden ser asociados con las emisiones del PM y del HC. Las emisiones típicas de un motor diesel usado en minería subterránea son las que se muestran en el Cuadro 3.19.

Cuadro 3.19 Emisiones de motores a diesel Deutz BF 4M 1012C (Deutz Corporation, 1997)

CO	HC	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
g/kw.h	g/kw.h	g/kw.h	g/kw.h	g/kw.h
1,25	0,38	0,171	7,50	-

El caudal total de la emisión de gas  $Q_{ge}$  (m<sup>3</sup>/s) se expresa por la ecuación (3.37) en función de la potencia del motor  $P_e$  (KW) y caudal de gas expulsado por un (1) KW de potencia de motor diesel  $q_g$  (m<sup>3</sup>/s.KW) que toma un valor aproximado de 0,0006 m<sup>3</sup>/s.KW, siendo:

$$Q_{ge} = q_g P_e \quad (3.37)$$

Los factores que afectan la emisión de gases en los equipos con motor a diesel usados en el ambiente subterráneo son: potencia del motor, características y factores operacionales, altitud, aditivos de combustible, mantenimiento, tipo de inyección (directa o indirecta). La alimentación forzada de aire (turbo) influye ligeramente en la emisión del NO y NO<sub>2</sub>.

El CO<sub>2</sub>, como ya se indicó anteriormente, en ciertas concentraciones se torna tóxico, por lo que en estas condiciones también es un contaminante.

El CANMET (Canadian Centre for Mineral and Energy Technology) propuso la utilización del índice AQI (Air Quality Index), que con modificación realizada por French and Associates está expresada por la ecuación (3.38), donde VLA representa el valor límite admisible para cada tipo de gas. Un AQI menor o igual a 3 indica la existencia de un exceso de concentración en alguno de los gases, por lo tanto un riesgo ambiental.

$$AQI_{gas} = \frac{CO}{VLA_{CO}} + \frac{NO}{VLA_{NO}} + \frac{NO_2}{VLA_{NO_2}} \quad (3.38)$$

Con base en la ecuación (3.38) y para todos los gases típicamente presentes en el ambiente subterráneo el índice de calidad del aire en relación a los gases contaminantes (IQA<sub>g</sub>), resulta la ecuación (3.39).

$$AQI_g = \frac{VLA_{O_2}}{O_2} + \frac{CO}{VLA_{CO}} + \frac{CO_2}{VLA_{CO_2}} + \frac{NO_x}{VLA_{NO_x}} + \frac{SO_2}{VLA_{SO_2}} + \frac{H_2S}{VLA_{H_2S}} \quad (3.39)$$

En esta ecuación cada término está referido a un gas, y en el caso que todos los gases estén por debajo del VMA el Índice de Calidad del Aire (AQI<sub>g</sub>) podrá tomar un valor menor o igual a 6 y en el caso de que exista contaminación ambiental por algún componente o AQI<sub>g</sub> toma valores mayores que 6 (para seis tipos de gases).

Por lo tanto, en el caso de obtenerse un índice superior a 6, se debe proceder a la identificación del gas o gases que posean un índice superior a 1, ya que este o estos son los responsables por la contaminación del ambiente.

La ecuación (3.39) constituye un indicador importante para identificar el riesgo ambiental provocado por la presencia de gases. Esta ecuación no incluye el gas metano, pues por sus características de explosividad e inflamabilidad están considerados en el ítem dedicado a explosiones e incendios.

### 3.2.4 Normas y estándares de calidad del aire de la atmósfera subterránea por causa de los gases

Los límites permisibles de la presencia de gases en trabajos subterráneos, están actualmente considerados dentro del campo de la salud y seguridad del trabajo, por lo que existen normas y reglamentaciones en diversos países del mundo.

En los E.U.A. los estándares de salud y de seguridad ocupacional, a nivel federal, están estandarizados por dos agencias que se encuentran dentro del Departamento de Trabajo: la OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) que es responsable por el ambiente ocupacional en general y la MSHA (*Mine Safety and Health Administration*) que es responsable por el ambiente ocupacional en minas.

Los valores límites admisibles TLV (*Threshold Limit Values*) de los componentes físico-químicos son publicados anualmente por la ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*).

Los valores límites admisibles de exposición del hombre a los contaminantes gaseosos están expresados en el Cuadro 3.20 y resumidos en el Cuadro 3.21.

Cuadro 3.20 Límites permisibles de exposición a gases en 8 horas TWA (*Time Weighted Averages*) y corto tiempo STEL (*Short Term Exposure Limit*) E.U.A.

Compo nente	OSHA (PEL)	MSHA (PEL)		NIOSH (PEL)
		Minas subterráneas de carbón	Minas metálicas y no metálicas	
(CO <sub>2</sub> )	5000 ppm (9000 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA <sup>†</sup>	5000 ppm (9000 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA 30000 ppm (54000 mg/m <sup>3</sup> ), STEL <sup>§</sup>	5000 ppm (9000 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 15000 ppm (27000 mg/m <sup>3</sup> ), STEL	10,00 ppm (18000 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 30000 ppm (54000 mg/m <sup>3</sup> ), 10-min max
(CO)	50 ppm (55 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA	50 ppm (55 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 400 ppm (440 mg/m <sup>3</sup> ), STEL	50 ppm (55 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 400 ppm (440 mg/m <sup>3</sup> ), STEL	35 ppm (40 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 200 ppm (230 mg/m <sup>3</sup> ), max
Formal dehidro	1 ppm, 8-hr TWA; 2 ppm, 15-minute STEL	1 ppm (1,5 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 2 ppm (3 mg/m <sup>3</sup> ), STEL	2 ppm (3 mg/m <sup>3</sup> ), max	0,016 ppm (0,020 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 0,1 ppm (0,12 mg/m <sup>3</sup> ), 15-min max
(NO <sub>2</sub> )	5 ppm (9 mg/m <sup>3</sup> ), max	3 ppm (6 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 5 ppm (10 mg/m <sup>3</sup> ), STEL	5 ppm (9mg/m <sup>3</sup> ) max	1 ppm (1,8 mg/m <sup>3</sup> ), 15-min max
(NO)	25 ppm (30 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA	25 ppm (30 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA	25 ppm (30 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 37,5 ppm (46 mg/m <sup>3</sup> ), STEL	25 ppm (30 mg/m <sup>3</sup> ), 10-hr TWA
(SO <sub>2</sub> )	5 ppm (13 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA	2 ppm (5 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 5 ppm (10 mg/m <sup>3</sup> ), STEL	5 ppm (13 mg/m <sup>3</sup> ), 8-hr TWA; 20 ppm (52 mg/m <sup>3</sup> ), STEL (5 min)	0,5 ppm (1,3 mg/m <sup>3</sup> ), 10-hr TWA

PEL: Límites Permisibles a la Exposición basados en los TLVs

TWA: *Time Weighted Averages*, STEL: *Short Term Exposure Limit*

† Peso medio

§ Término del límite de la exposición



Cuadro 3.21 Normas de OSHA para el gas y los EE.UU. MSHA, y expresada en ppmv para una exposición de 8 horas

Gas	Proceso no.	OSHA PEL	OSHA 88*	MSHA TLV	ACGIH TLV
CO	630-08-0	50	35	50	25
CO <sub>2</sub>	124-38-9	5000	5000	5000	5000
NO	10102-43-9	25	25	25	25
NO <sub>2</sub>	10102-44-0	(C) 5	1 <sup>d</sup>	5	3
HCHO	50-00-0	0,75			(C) 0,3 A2
SO <sub>2</sub>	7446-09-5	5	2	5 <sup>a</sup> / 2 <sup>b</sup>	2
* - PELs adoptados en 1988 y revisados después a - Para minas metálicas y no metálicas b - Para minas de carbón			d - 15 minutos de tiempo límite de exposición (STEL) (C) - Valor máximo A2 - Sospecha de cáncer humano		

Los resultados de los TLVs son desarrollados como recomendaciones o guías por la ACGIH para ser usados en la práctica de higiene industrial. Formalmente, no son estándares legales. Entre tanto, las autoridades que legislan siguen las recomendaciones de la ACGIH en sus actividades de elaboración de leyes.

Los PELs de la OSHA y los TLVs del MSHA son límites legalmente ejecutables y los TLVs indicados por la ACGIH son recomendaciones para la higiene industrial. Todos los valores límites admisibles son para una exposición media de 8 horas TWA (*time weighted averages*).

En los E.U.A. el aire del ambiente subterráneo donde trabajan personas debe contener por lo menos 19% de oxígeno, ya en Portugal, el Decreto-Ley n.º 162/90 prescribe un contenido mínimo de oxígeno en la atmósfera subterránea de 19%.

Estudios realizados por NIOSH (*National Institute of Occupational Safety and Health*) y el *Bureau of Mines Minneapolis* E.U.A. (1987) han facilitado la obtención de normas (estándares) (Cuadro 3.22) para gases emitidos por equipos diesel en minas subterráneas. Estos estándares están relacionados con los índices FSEL (*Full - Shift Exposure Limit*) que son para la exposición de trabajadores durante 8 horas/día o 40 horas/semana y el índice STEL (*Short Term Exposure Limit*) que es para una exposición máxima de 15 minutos por día de trabajo.

Cuadro 3.22 Estándares para emisiones de diesel para minas subterráneas de carbón, metálicas y no metálicas en ppm (NIOSH, ACGIH, *Bureau of Mines Minneapolis* E.U.A.)

Contaminante	Mina de carbón		Otras Minas (metálicas, etc.)	
	FSEL	STEL	FSEL	STEL
CO	50	400	50	400
CO <sub>2</sub>	5000	15000	5000	30000
NO	25	37.5	25	--
NO <sub>2</sub>	--	5	3	5
SO <sub>2</sub>	5	20	2	5

En Australia el estándar nacional relacionado con la exposición de trabajadores a contaminantes de gas en minas subterráneas está establecido por la NOHSC (National Occupational Health and Safety Commission), cuyos indicadores se presentan en el Cuadro 3.23.

En Nueva Zelanda el Health and Safety (Mining – Underground) Regulations el año 1999 definió como aire fresco cuando tiene las concentraciones a seguir: oxígeno no menor que 19%; aldehídos (como formaldehído) menor que 1 ppm; CO menor que 25 ppm; polvo respirable de cuarzo menor que 0,2 mg/m<sup>3</sup>; polvo respirable de carbón menor que 0,2 mg/m<sup>3</sup>; otros gases no mayor del indicado en el Cuadro 3.24.

Cuadro 3.23 Estándares de gases contaminantes en Australia (disponible en [www.asosh.org/WorldLinks/Sectors/mining.htm](http://www.asosh.org/WorldLinks/Sectors/mining.htm))

Contaminante	Estandar (ppmv)
Monóxido de carbono (CO)	30
Bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	3
Óxido de nitrógeno (NO)	25
Bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	2
Formaldehído	1
Acrolein	0,1
Bióxido de carbono (minas de carbón)	12.500
Bióxido de carbono en otras minas	5.000

Cuadro 3.24 Estándares de la presencia de gases en atmósfera subterránea adoptados en Nueva Zelanda ([www.minerals.co.nz/html/main\\_topics/codeprac/code\\_ug\\_15\\_new.html](http://www.minerals.co.nz/html/main_topics/codeprac/code_ug_15_new.html))

Contaminante	Estándares (ppmv)	
	Exposición de 8 horas	Corto tiempo de exposición
Monóxido de carbono (CO)	25	50 (60 min exposición)
Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	5.000	30.000
Óxido de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	3	5
Bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	2	5
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	10	15

Con relación al diesel, señala que el diesel usado para abastecer un motor debe producir en el punto de salida de gases una temperatura no mayor de 65 °C, además de tener un índice de azufre no mayor de 0,05% en peso y esté libre de suciedad, sedimento y agua.

En Perú, los valores límites admisibles están definidos por el D.S. N° 023-92-EM – *Reglamento de Seguridad e Higiene Minera*, que en términos resumidos son los siguientes: O<sub>2</sub> (19,5 % mínimo), CO<sub>2</sub> (0,5 %), CO (0,005 %) NO<sub>x</sub> (0,0005 %), H<sub>2</sub>S (0,0005 %), SO<sub>2</sub> (0,0002 %), CH<sub>4</sub> (0,5 %) y H<sub>2</sub> (0,5%).

### 3.2.5 Matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental debido a gases

Para identificar el nivel del impacto ambiental provocado por la presencia de gases en el aire de la atmósfera subterránea se elaboró una matriz base (Cuadro

3.25) considerando las normas y estándares indicados en el ítem anterior, incluyendo siete gases principales que típicamente están presentes en el ambiente subterráneo.

El *French and Associates*, basado en el índice AQI para caso de minas que utilizan equipos con motor diesel define los niveles de riesgo siguientes: cuando AQI es de 3 a 4 es moderado y cuando  $AQI > 4$  hay un exceso.

Cuadro 3.25 Matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental en la atmósfera subterránea debido a gases y polvo

Gas Contaminante	Niveles de impacto ambiental (ppm)		
	Leve	Moderado	Alto
O <sub>2</sub>	$18.500 \leq O_2 < 190.000$	$170.000 \leq O_2 < 18.500$	$O_2 < 170.000$
CO <sub>2</sub>	$5.000 < CO_2 \leq 6.000$	$6.000 < CO_2 \leq 7.000$	$CO_2 > 7.000$
CO	$50 < CO \leq 60$	$60 < CO \leq 70$	$CO > 70$
NO <sub>x</sub>	$5 < NO_2 \leq 5,5$	$5,5 < NO_2 \leq 6$	$NO_2 > 6$
NO	$25 < NO_2 \leq 25,5$	$25,5 < NO_2 \leq 26$	$NO_2 > 26$
H <sub>2</sub> S	$10 < H_2S \leq 11$	$11 < H_2S \leq 12$	$H_2S > 12$
SO <sub>2</sub>	$5 < SO_2 \leq 5,5$	$5,5 < SO_2 \leq 6$	$SO_2 > 6$

Con base en el índice de calidad del aire por la presencia de gases  $IQA_g$  (ecuación 3.39) y para  $N$  los gases más frecuentes en el ambiente subterráneo es posible preparar una matriz base (Cuadro 3.26) que permita identificar el nivel de riesgo ambiental.

Cuadro 3.26 Matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental subterráneo por gases tóxicos, basado en el índice de calidad para  $N$  gases

Niveles de impacto ambiental debido a gases sobre la base de $IQA_g$		
Leve	Moderado	Alto
$N < IQA_g \leq 1,25N$	$1,25N < IQA_g \leq 1,5N$	$1,5N < IQA_g$

En esta propuesta de evaluación del nivel de impacto ambiental significa que, por ejemplo, para 4 tipos de gases identificados un índice  $IQA_g > 4$  indica una condición de riesgo para la salud humana y se debe proceder con la identificación del índice de cada uno de los 4 contaminantes, de modo que el gas o los gases que reportan un índice  $IQA_g > 1$  son los que contaminan el aire subterráneo, por tanto, la búsqueda de las medidas de prevención y corrección se debe realizar teniendo como base estos gases.

### 3.2.6 Medidas correctivas del impacto ambiental subterráneo por gases

Las técnicas más usadas en el control de gases (Hartman H. L., et al., 1982), en minas subterráneas en orden de prioridad son: prevención, remoción, absorción, aislamiento y dilución.

3.2.6.1 Control de las emisiones de gases y partículas mediante técnicas de prevención

Las medidas correctivas de prevención para la atenuación de la emisión de los motores diesel son fundamentalmente de dos maneras: control en la fuente mediante la modificación del sistema del motor y/o a través de la instalación de sistemas de atenuación de la emisión de gases.

Las técnicas de sistemas de control de la emisión de gases mediante la instalación de dispositivos adicionales conocidas son: la oxidación catalítica DOC (*Diesel Oxidation Catalysis*), filtros para retención de partículas de aceite diesel DPF (*Diesel Particulate Filters*), reducción catalítica selectiva SCR (*Selective Catalysis Redution*), modificación del dimensionamiento del motor en combinación con técnicas de control de la emisión, entre otros (Cuadro 3.27).

Cuadro3.27 Técnicas para control de la emisión de gases y partículas por el motor diesel (*ESI International, 1999*)

Tecnología	Efectividad de Control (% de reducción)				Comentario
	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	
Oxidación Catalítica	>90	>90	-	>25	Tecnología probada, barata, mejor desempeño por combustible bajo en S, reduce emisiones tóxicas.
Filtros de partículas	-	-	-	>90	Aplicación en minas, tecnología más cara, puede ser usado para reducir emisiones gaseosas, técnica apropiada de regeneración requerida
Reducción catalítica selectiva	>50	>70	80	>30	Aplicación a fuentes móviles - requiere el reactivo de los motores electrónicamente controlados, necesita utilizar los algoritmos de la inyección
Lean-NO <sub>x</sub> Catálisis	>70	>70	15-20	>30	Aún poco desarrollado, requiere combustible con muy bajo contenido de azufre
Lean-NO <sub>x</sub> w/HC-inyec.	>70	>70	25-60	>30	
Lean-NO <sub>x</sub> Absorción	>70	>50	>70	>30	Aún poco desarrollado, requiere combustible muy bajo en azufre
Reducción catalítica con plasma	-	-	80	80	Incluso en el desarrollo temprano, probablemente muy buen reductor de CO y HC

El concepto de un catalizador de oxidación DOC es basado en reacciones químicas sin cambio ni consumo del catalizador. Un convertidor catalítico de oxidación consiste en una vasija de acero inoxidable que contiene una estructura llamada sustrato, que expone una gran superficie interior (panal de abeja). No hay ninguna pieza en movimiento, la superficie del sustrato se reviste con metales preciosos catalíticos, tales como platino o paladio.

Es llamado catalizador de oxidación, porque transforma contaminantes en gases poco perjudiciales por medio de la oxidación. En el uso de diesel el catalizador oxida el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos gaseosos (HCs), y los hidrocarburos líquidos por la absorción de las partículas de carbono.

Los hidrocarburos líquidos constituyen la fracción orgánica soluble (SOF) y están por encima de la parte de las partículas (fig. 3.30 izquierda).

La técnica de control a través de filtro DPF, consiste en un filtro (fig. 3.30 derecha) situado en la tubería de agotamiento y que colecta una fracción significativa de las emisiones de partículas al paso de los gases a través del sistema. La caja del filtro es generalmente metálica y los cartuchos pueden ser de cerámica e incluso fibra de vidrio resistentes a altas temperaturas.

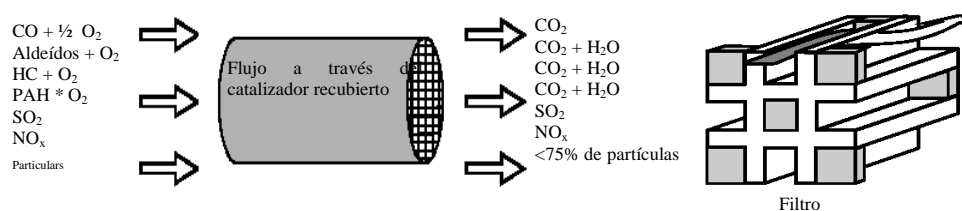


Figura 3.30 Control de emisiones de diesel por procesos de oxidación catalítica y filtros de partículas

### 3.2.6.2 Control de las emisiones de gases y partículas a través de la dilución

La técnica de dilución puede ser usada y combinada con otras técnicas, para reducir los costos de control de las emisiones diesel. Walli, R.A. (1982) recomienda la utilización de la ecuación logarítmica de Mateer (3.40), donde  $Q_{gp}$  es el caudal del aire con presencia de gas contaminante,  $Q_g$  es el caudal de aire fresco requerido para diluir el gas,  $y$  es el volumen del espacio de trabajo,  $t_o$  y  $t$  los tiempos (minutos),  $x$  es la concentración del contaminante en la mezcla,  $x_o$  es la concentración del contaminante en el aire de la entrada,  $B_g$  es la concentración del contaminante en condiciones normales de entrada del aire.

$$e^{\frac{(Q_{gp}+Q_g)(t-t_o)}{y}} = \frac{(Q_{gp} + B_g Q_g) - x(Q_{gp} + Q_g)}{(Q_{gp} + B_g Q_g) - x_o(Q_{gp} + Q_g)} \quad (3.40)$$

Sabiendo los valores de  $y$ ,  $Q_{gp}$ ,  $x_o$ ,  $x$  y  $Q_g$ , el tiempo  $t$  requerido para diluir la concentración de gas en un ambiente determinado se puede calcular con la ecuación (3.41).

$$t = \frac{y}{Q_g} \ln \frac{Q_{gp} - x_o Q_g}{Q_{gp} - x Q_g} \quad (3.41)$$

En la mayoría de las situaciones, el tiempo necesario para la dilución se torna muy largo (con tendencia al infinito) y por tanto, el caudal requerido para diluir un determinado gas puede ser calculado con la ecuación (3.42).

$$Q_g = \frac{1-x}{x-B_g} Q_{gp} \quad (3.42)$$

En concordancia con la caracterización de la presencia de gases en el ambiente, subterráneo se verifica que el gas con mayor concentración es el CO<sub>2</sub> seguido por CO; por tanto, en el caso que existieran otros contaminantes, bastará con CO<sub>2</sub> (en caso que esté por encima del límite) o, no siendo el caso, actuar sobre el CO.

Para calcular la cantidad de aire fresco Q<sub>go</sub> (m<sup>3</sup>/s) que permita diluir la concentración de gases de emisión por equipos con motor a diesel a niveles permisibles, se propone la ecuación (3.43) que está basada en el índice de calidad del aire debido a gases IQA<sub>g</sub>, en el caudal de gas emitido por el motor al ambiente subterráneo q<sub>g</sub> (m<sup>3</sup>/s.hp) y potencia P<sub>e</sub> en hp.

$$Q_{go} = IQA_g q_g P_e \quad (3.43)$$

El caudal necesario de aire fresco Q<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>/s) que permita ventilar un frente de trabajo después del disparo con explosivo, propuesto por López Jimeno, C. (1997) es la ecuación (3.44) expresada en función de tiempo t (~30 minutos), de la sección S del ambiente (m<sup>2</sup>) y la distancia total de la parte delantera de la boca del túnel L (m).

$$Q_e = \left( \frac{S}{t} \right) (L + 120) \quad (3.44)$$

Una ecuación propuesta por el autor para determinar el caudal de aire fresco adicional requerido ΔQ<sub>f</sub> (m<sup>3</sup>/s) y el caudal total de aire para la dilución de gas Q<sub>L</sub> (m<sup>3</sup>/s) son las ecuaciones (3.45) y (3.46), respectivamente, donde C<sub>e</sub> es la concentración inicial de gases tóxicos (ppm), C<sub>VLA</sub> el valor límite admisible de los gases (ppm), y Q<sub>C</sub> es el caudal inicial o caudal contaminado del aire (m<sup>3</sup>/s). En el caso estar presente varios tipos de gases, la medida correctiva constituirá el correspondiente al mayor caudal.

$$\Delta Q_f = Q_C \left( \frac{C_e - C_{VLA}}{C_{VLA}} \right) \quad (3.45), \quad Q_L = \frac{C_e}{C_{VLA}} Q_C \quad (3.46)$$

### 3.2.7 Monitoreo y control

El logro de un ambiente de aire subterráneo con buena calidad teniendo en cuenta la presencia de gases tóxicos, exige un trabajo sistemático y organizado, soportado por una fuerte base técnico/científica con criterio de viabilidad económica.

La ingeniería ambiental subterránea relacionada con gases tóxicos debe ser un proceso lógico y secuencial que permita mantener el aire de la atmósfera subterránea con concentraciones por debajo de los límites admisibles. Por tanto, el

modelo desarrollado, que incluye el monitoreo y control, está ilustrado en el diagrama de la fig. 3.31.

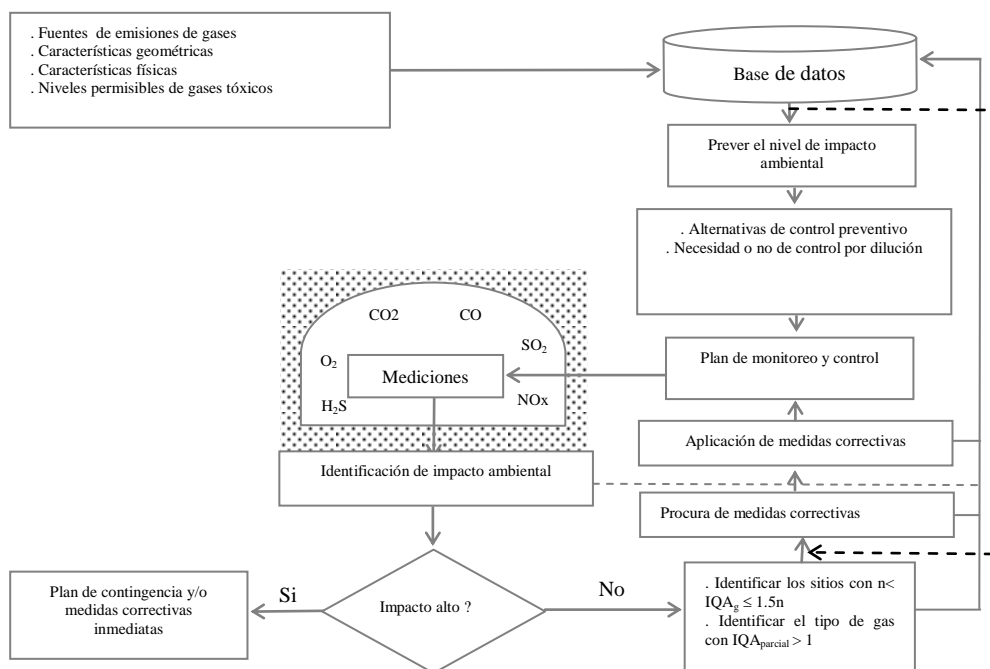
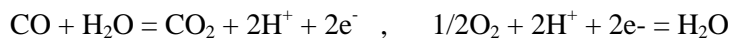


Figura 3.31 Sistema de gestión de gases tóxicos en el aire del ambiente subterráneo

Las mediciones de los contaminantes gaseosos se realizan con equipos específicos, en función del método utilizado (Williams, L. et al., 1987) y el tipo de gas a medir.

a) *Método electroquímico*: El aparato consiste en un electrolito constante celular y dos electrodos, que al entrar en uno de los cuales permite la difusión de la muestra de aire. Alimentado por una batería, el flujo de electrones liberados se altera cuando se inicia la difusión del aire, en una relación con la cantidad de gas contenida en la muestra. Un ejemplo es del CO:



En el mercado hay dispositivos electroquímicos para medir el CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> (Cuadro 3.28) por los diferentes sensores y detectores.

Cuadro 3.28 Emisión diesel, gas diluido e intervalo típico de medición electroquímica (Williams, L. *et al.*, 1987)

Contaminante	Emisión de gases en un motor a diesel (ppm)			Gas diluido en ambiente subterráneo (ppm)	Intervalo típico de medición electroquímica (ppm)
	Inyección indirecta (IID)		Inyección directa (ID)		
	Mínimo	Común			
CO	200	300	2500	10 -20	0 - 2000
CO <sub>2</sub>	8000	9900	10000	1000 - 5000	0 - 10000
NO	500	1000	740	0 - 10	0 - 1000
NO <sub>2</sub>	12	20	48	0.5 - 1	0 - 100
SO <sub>2</sub>	80	80	80	--	0 - 100

El método permite el monitoreo cada 2 minutos, debe calibrarse cada 30 días y la precisión es de 2 a 5 ppm.

El dispositivo tiene una vida útil de 1 a 2 años y el costo varía de 100 a 500 euros. El costo de la sustitución de los sensores es de 100 a 300 euros al año.

b) *Infrarrojos*: El dispositivo se basa en la espectrometría de absorción, y compara la muestra de aire con una muestra de gas puro bajo análisis. Las unidades de detección pueden ser unidades de análisis en los diferentes gases (CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>). La energía absorbida por los rayos infrarrojos produce un aumento en la vibración o rotación molecular que es detectada en las bandas por el proceso electrónico mediante la medición de las concentraciones.

Estos instrumentos, que cuentan con sistema de alarma se pueden utilizar en concentraciones 2 a 20 ppm de CO. El tiempo de medición varía de 50 a 10 segundos, tienen autonomía de 4 a 6 horas, vida útil de 1 año y costo alrededor de 3.000 euros.

c) *Tubos detectores*: son los tradicionalmente utilizados y consisten en tubos de vidrio que contiene una impregnación química granular, que al entrar en contacto con el gas cambia de color por difusión. El cambio de color es característico para cada tipo de gas. Estos tubos operan generalmente con una bomba manual aplicando una determinada cantidad de embolados para cada tipo de gas. El rango típico de uso varía según el tipo de gas (Cuadro 3.29).

Las lecturas obtenidas necesitan de corrección mediante la ecuación (3.47), donde  $L_c$  es la lectura corregida,  $L$  es la lectura en el tubo de gas,  $T$  es la temperatura en el momento de la medición (°K) y  $P$  es la presión barométrica (atmósferas).

$$L_c = \frac{LT}{298.P} \tag{3.47}$$



Cuadro 3.29 Rango típico de medición de tubos detectores de gas en ppm  
(Williams, L. et al., 1987)

Gas	Corto tiempo	Largo tiempo	Difusión
CO	5 - 15	2,5 - 25	6 - 75
CO <sub>2</sub>	100 -700	6,3 - 63	1200 - 40000
	1000 -12000	250 - 1500	
	5000 - 60000		
NO	0,5 -10	1,3 - 12,5	
NO <sub>2</sub>	0,5 -10	1,3 - 13	1,3 -25
SO <sub>2</sub>	0,5 - 5	1,3 - 13	0,6 - 20

Los tubos detectores tienen una vida útil de 2 años. Algunos, como el CO, necesitan refrigeración (<20 ° C) y su vida útil es más corta (un año). El costo de cada tubo es de 2 a 3 euros.

d) *Tubo de prueba pasivo tipo Palmes*: consiste en un tubo que, al abrirse, le permite introducir y difundir en sí a través de un absorbente alcalino, el análisis del aire, y se recogen los gases de NO<sub>2</sub>. La concentración se calcula por el número de moles de gas recogido.

El intervalo de la medición del NO<sub>x</sub> y NO<sub>2</sub> es hasta 20 ppm. Las pruebas se realizan cada ocho horas, pero si la concentración es alta debe ser cada hora. El costo es de aproximadamente 1 euro por cada tubo.

La Ingeniería Ambiental Subterránea (EAS) de los gases en la atmósfera subterránea está sistematizada considerando un proceso que se inicia con la identificación de las fuentes de emisión, caracterización del ambiente y los gases, identificación del nivel de riesgo ambiental, búsqueda de medidas de prevención y/o corrección de los impactos identificados, implementación o aplicación de la alternativa técnico/económica más viable, acompañado de un sistema de monitoreo y control para comprobar la eficacia y efectividad de la medida. La fig. 3.31 antes indicada ilustra el proceso descrito.

### 3.3 Polvos en el ambiente subterráneo

#### 3.3.1 Efectos ambientales

En el ambiente subterráneo el contenido de polvos en suspensión varía desde algunos miligramos hasta centenas de miligramos por m<sup>3</sup>, pudiendo alcanzar en algunos sitios, como frentes de disparo, frentes de corte, etc., algunos gramos (5 - 15) por m<sup>3</sup>.

El polvo en el sistema respiratorio humano se deposita en la nariz, tráquea, bronquios y en los alvéolos de los pulmones (fig. 3.32) en cantidad proporcional al tamaño de las partículas.

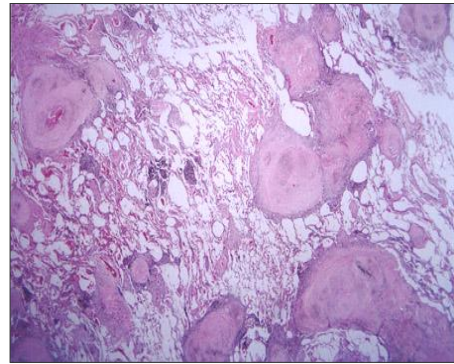
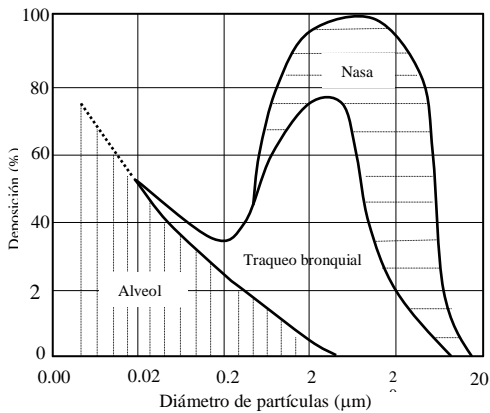


Figura 3.32 Depósito de polvos en el sistema respiratorio (Hartman, H.L. et al., 1982) y partículas sólidas en los pulmones (<http://pathology.class.kmu.edu.tw>)

El sistema respiratorio del hombre tiene numerosos mecanismos de defensa a través de sistemas de captación de cualquier polvo inhalado (Cuadro 3.30), pero tiene limitaciones de acción para ciertas dimensiones y para ciertas características del polvo, aspirando y expectorando en algunos casos, permitiendo pasar a los alvéolos, por la imposibilidad orgánica de retención y en otros, inhalando y exhalando.

Cuadro 3.30 Acción del sistema respiratorio frente al tamaño de las partículas (Basado en Hartman, H.L., 1982; Vutukuri, V.S., et al., 1986)

Diámetro de partículas (µm)	Acción del sistema respiratorio	Efecto
> 10	Alojamiento en el conducto nasal, traqueal y bronquial	Expectorado por la acción de las mucosas
10 - 1	Alojamiento en el conducto traqueal bronquial y <5µm pasa a los alvéolos	Riesgo por paso de algún polvo y reacción fibrosa en los pulmones
< 1	Inhalación y exhalación (polvo respirable)	En altas concentraciones y en largos períodos reacción fibrosa de los pulmones

Para fines ambientales el polvo se puede clasificar en tres tipos: polvo mineral, polvo de carbón y polvo procedente de los motores diesel.

El polvo mineral suspendido puede no ser nocivo, en este caso los pulmones actúan contra estas partículas extrañas mediante células denominadas devoradoras, cuya función es envolver las partículas y transportarlas por los caminos linfáticos; mas esto ocurre solamente con el polvo no peligroso y cuando la calidad del aire aspirado no sobrepasa la posibilidad de la defensa de las células referidas.

En presencia de polvo destructor (sílice) las células devoradoras no pueden resistir y mueren, consecuentemente el polvo cumple su función nociva al formar un tejido fibroso (fig. 3.33) contribuyendo con la enfermedad ocupacional conocida como *silicosis*.

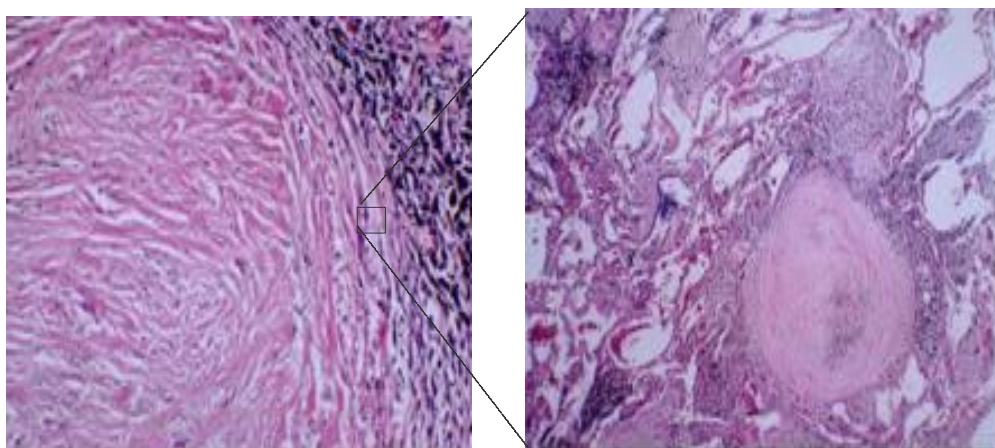


Figura 3.33 Nódulos concéntricos de sílice plana con periferia de partículas de emisiones de diesel en los pulmones (<http://pathology.class.kmu.edu.tw>)

El polvo de mineral produce efectos ambientales diversos contra el hombre (Cuadro 3.31), dependiendo de su composición, de su concentración y de su toxicidad.

La enfermedad más común en minas es la *silicosis*, que ocurre cuando el polvo entra en los pulmones (alvéolos) y por la lenta disolución en el líquido del tejido de los pulmones las partículas de sílice se transforman en ácido silícico ( $H_2SiO_3$ ) activo, que actúa químicamente sobre los tejidos pulmonares, transformándolos en tejidos fibrosos sin capilares sanguíneos. La silicosis tiene tres grados:

- *Primer grado*: con manifestación de malestar general, falta de aire en el trabajo, tos seca y leve;
- *Segundo grado*: dolor en el pecho, disminución de la capacidad respiratoria, tos seca y húmeda, disminución de la capacidad de trabajo;
- *Tercer grado*: falta de aire incluso en reposo, tos con expectoración, dolores en el tórax, pérdida total de la capacidad del trabajo, complicación con la tuberculosis y muerte.

Cuadro 3.31 Efectos ambientales del polvo mineral nociva (Basado en Walli, R.A., 1982)

Efecto	Polvo de minerales o metales	Detalle del efecto	
		Metal	Enfermedad
Sistema respiratorio (pulmones)	Sílice (cuarzo, pedernal), silicatos (asbesto, talco, mica), berilo, estaño, hierro	Sílice libre	Silicosis
		Silicatos	Silicatosis
		Hierro	Siderosis
		Asbesto	Asbestosis
Cancerígeno (pulmones)	Radón, uranio, asbesto, arsénico	Cáncer en los pulmones	
Tóxico	Berilio, radio, torio, arsénico, uranio, vanadio, mercurio, cadmio, antimonio, selenio, manganeso, tungsteno, níquel, plata (carbonatos)	No son comunes	

En minas subterráneas de carbón, las enfermedades debidas al polvo flotante son denominadas antracosis y antraco-silicosis (Cuadro 3.32).

Cuadro 3.32 Efecto ambiental del polvo de carbón  
(Basado en Walli, R.A., 1982)

Efecto	Minerales	Detalle del efecto	
		Mineral	Enfermedad
Sistema respiratorio (pulmones)	Carbón	Antracita	Antracosis
		Antracita+Sílice libre	Antraco - silicosis

En la actualidad, la tendencia de la mecanización de las minas subterránea conduce a una intensa utilización de equipos con motor a diesel, como son los jumbos para perforación, las excavadoras (LHDs) para remoción de mineral en los frentes de trabajo, camiones (*dumpers*) y otras máquinas como locomotoras.

Estos dispositivos, además de emitir gases tóxicos, también generan partículas (Cuadro 3.33) en forma de hollín que es respirado por los seres humanos expuestos a este medio. Estas partículas contienen sustancias cancerígenas que se acumulan en los pulmones (fig. 3.33 izquierda).

Los hidrocarburos (compuestos binarios de carbono e hidrógeno), los aldehidos (nombre genérico de los compuestos caracterizados por acción reductora, que son derivados de los alcoholes primarios por oxidación moderada con pérdida de hidrógeno) y el formaldehido (solución acuosa de aldehído fórmico y metanol), presentes en el hollín son peligrosos por cuanto son aspirados por los hombres en el ambiente donde trabajan los equipos a diesel.

Cuadro 3.33 Efecto ambiental de partículas (polvo) emitidas por equipos diesel  
(Garshick, E, 2003; Stewart, K.M., 2001)

Efecto	Hollín/componentes	Detalle de la enfermedad
Sistema respiratorio, ojos, piel y pulmones	Hidrocarbonatos (84 ppm), Aldehídos (25 ppm), formaldehido (14 ppm), sulfatos, nitratos, metales. 94%, partículas <2,5 micrón	Olor, irritación de los ojos, alergias y Cáncer en los pulmones

### 3.3.2 Fuentes de polvo

a) *Polvos de mineral y de carbón:* en el ambiente subterráneo tienen origen en la excavación del macizo rocoso, en la construcción de túneles para carreteras y ferrocarriles, centrales hidroeléctricas, cámaras de defensa civil, centrales de energía nuclear, de gas e instalaciones públicas y en la explotación de depósitos minerales metálicos y no metálicos (galerías, pozos, chimeneas, rampas y tajeos).

El polvo de carbón se genera principalmente en las operaciones de excavación o corte en la explotación de los depósitos de carbón (Cuadro 3.34).

Cuadro 3.34 Carga ambiental en minas de carbón subterráneas en relación a minas a cielo abierto ([http://wbln0018.worldbank.org/essd/pmext.nsf/670c98692c42a13c852565e2005a58d8/64a032af1579d5408525668800710098/\\$file/coal.doc](http://wbln0018.worldbank.org/essd/pmext.nsf/670c98692c42a13c852565e2005a58d8/64a032af1579d5408525668800710098/$file/coal.doc))

Carga ambiental	Técnicas de exploración			
	Cielo abierto (t/1000t)		Método subterráneo (t/1000t)	
	Contorno	Excavación	Convencional	Longwall
Efluentes líquidos	0,24	1,2	1	1,6
Estériles sólidos	10	10	3	5
Polvo	0,1	0,06	0,006	0,01

Fuente: Basado en Edgar, 1983

Las actividades operacionales que generan polvo de mineral o de carbón están relacionadas con la perforación, corte, disparos con explosivo, eliminación, transferencia a tolvas del mineral o desmote, carga, transporte, extracción y trituración en algunos casos (fig. 3.34).

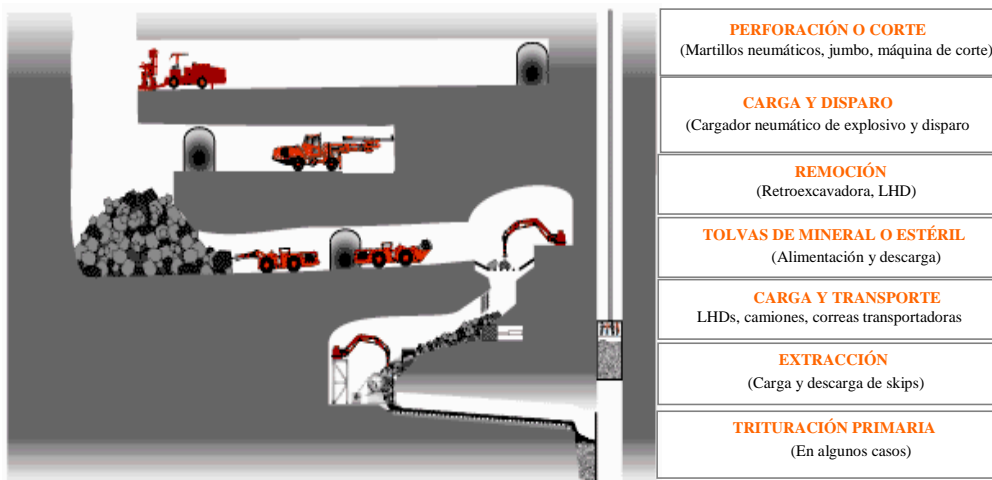


Figura 3.34 Actividades operacionales que producen polvo en excavación subterránea

b) *Partículas emitidas por los equipamientos con motor diesel:* tiene la forma de hollín y constituyen parte del polvo presente en el ambiente subterráneo y principalmente en los sitios de trabajo donde son utilizados (fig. 3.35). Estos equipamientos son las palas cargadoras (LHDs), camiones (dumper), jumbos automotores, locomotoras, vehículos para transporte de personas, entre otros.

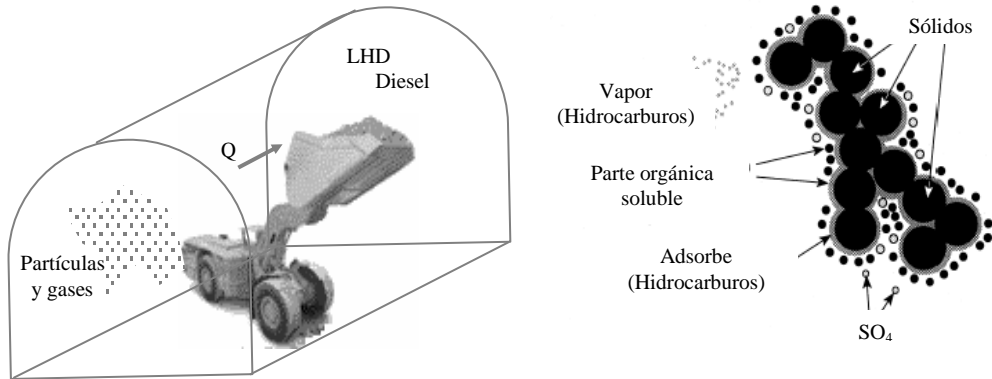


Figura 3.35 Emisión de partículas (polvo) por los equipos de motores a diesel

### 3.3.3 Caracterización del polvo en el ambiente subterráneo

El polvo es un conjunto de finas y finísimas partículas sólidas suspendidas en la atmósfera subterránea o asentadas sobre los pilares, piso y techo de las excavaciones.

La suspensión del polvo en el aire de la atmósfera subterránea en un determinado tiempo depende de su finura, forma, masa volumétrica, velocidad del aire, humedad y temperatura.

El tiempo de duración  $t$  (s) de la suspensión de una partícula de polvo en el aire tranquilo se determina con la ecuación (3.48) que está basada en la ley de Stokes, donde  $\nu$  es la viscosidad del aire tranquilo ( $1,81 \times 10^{-4}$  poises a  $21^\circ\text{C}$ ),  $h_x$  la altura de caída del polvo (cm),  $r$  el radio de la partícula (cm),  $\gamma_p$  la masa volumétrica de la partícula ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\gamma_a$  la masa volumétrica del aire ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) y  $g$  la aceleración de la gravedad ( $981 \text{ cm}/\text{s}^2$ ).

$$t = \frac{4.5\nu h_x}{r^2(\gamma_p - \gamma_a)g} \quad (3.48)$$

En un frente con altura de 3 m, una partícula con masa volumétrica de  $2,5 \text{ g}/\text{cm}^3$  y diámetro de  $100 \mu\text{m}$  demora en la caída unos 4 segundos, la de  $10 \mu\text{m}$  unos 7 minutos y la de  $1 \mu\text{m}$  9 horas.

Polvos con  $5 \mu\text{m}$  que pasan a los pulmones caen en el aire tranquilo a una velocidad próxima de  $1 \text{ mm}/\text{s}$  y partículas con diámetro  $< 0,10 \mu\text{m}$ , tal como las moléculas de aire en movimiento Browniano que se mantienen en suspensión. Las partículas planas permanecen en el aire un tiempo más prolongado que las esféricas.

En la atmósfera subterránea es posible identificar a simple vista, partículas cuyo diámetro es  $> 10 \mu\text{m}$  y que caen en forma acelerada, con ayuda del microscopio partículas de  $10$  a  $0,1 \mu\text{m}$  que caen a velocidad constante y al ultramicroscopio partículas  $< 0,1 \mu\text{m}$  que no se asientan.

Desde el punto de vista ambiental, interesa caracterizar la concentración y naturaleza de contenido del polvo respirable.

La producción de polvo  $P_p$  (g/h) por el proceso operacional de excavación subterránea puede ser determinada por la ecuación (3.49), en función de la carga ambiental de polvo en el proceso de excavación  $q_p$  (g/t) (próximo a 10 g/t) y producción o cantidad de material excavado  $P$  (t/h).

$$P_p = q_p \cdot P \quad (3.49)$$

Para la estimación de la tasa de emisión de partículas en el aire por el motor diesel  $E_p$  (g/min) se desarrolló la ecuación (3.50) que es una modificación de la ecuación de Haney, R. A. *et al* de MSHA E.U.A. (1994), en función de la concentración de partículas en el aire de retorno o salida de  $C_r$  (g/m<sup>3</sup>), de la concentración de partículas en la entrada del aire  $C_e$  (g/m<sup>3</sup>) y del caudal de retorno del aire  $Q_r$  (m<sup>3</sup>/min).

$$E_p = (C_r - C_e) Q_r \quad (3.50)$$

La tasa de generación de partículas por motores diesel varía de 1,40 a 1,59 mg/m<sup>3</sup>, pero con la instalación de filtros, se puede disminuir hasta 0,53 a 0,87 mg/m<sup>3</sup>, un 53% aproximadamente.

Haney, R. A. *et al.* (1997) desarrolló la ecuación (3.51) para calcular la concentración de partículas al aire por la emisión de motores diesel  $C_d$  (g/m<sup>3</sup>), en función de la  $E_r$ , eficiencia antes del tratamiento (50 a 95%) y el caudal del aire  $Q_a$  (m<sup>3</sup>/min).

$$C_d = \frac{E_p (1 - E_r)}{Q_a} \quad (3.51)$$

La emisión de los motores diesel está en el límite de 0,3 a 0,5 g/minuto para los equipos de remoción y de 1,0 a 3,0 g/minuto para los equipos de carga y transporte. Cálculos realizados por Haney, R.A. *et al.* (1997), indican que para 1,0 g/minuto de emisión sin tratamiento y caudal de aire de 14,2 m<sup>3</sup>/s, resulta una concentración de 1,18 g/m<sup>3</sup>, para el doble del caudal de aire se reduce la concentración a 0,59 mg/m<sup>3</sup> y aplicando una eficiencia de tratamiento de 80%, resulta una concentración de 0,12 mg/m<sup>3</sup>.

La concentración de polvo varía con la velocidad del aire, como se muestra en la fig. 3.36 para partículas de diferente diámetro ( $d < 2\mu\text{m}$ ,  $d = 2 - 5\mu\text{m}$  y  $d = 5 - 10\mu\text{m}$ ) donde se observa que en la velocidad entre 1,5 a 2 m/s existe una menor concentración y a velocidades menores y mayores existe aumento de la concentración.

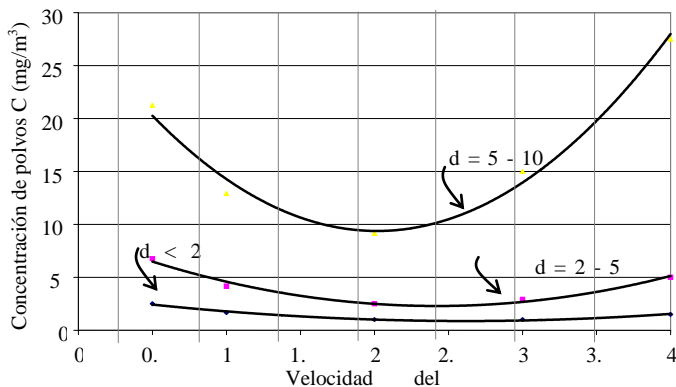


Figura 3.36 Tendencia de la concentración de polvo en relación con la velocidad del aire (basado en Anon, 1974).

Las curvas de tendencia de la fig. 3.36 permiten expresar la concentración del polvo C mediante una ecuación general (3.52) en función de la velocidad del aire V (m/s) y constantes a, b y c que toman valores en función del diámetro de las partículas (Cuadro 3.35).

$$C = aV^2 - bV + c \tag{3.52}$$

Cuadro 3.35 Coeficientes a, b y c de la ecuación (3.52) en función de la velocidad del aire (elaborado en base a Anon, 1974)

Diametro de partículas ( $\mu\text{m}$ )	a	b	c
<2	3.4509	18.066	32.394
2 - 5	11.339	54.927	89.453
5 - 10	47.333	190.990	286.400

Basado en el índice de calidad del aire AQI (Air Quality Index) propuesto por CANMET (Canadian Centre for Mineral and Energy Technology) y modificada por French and Associates, el índice de calidad del aire en relación a la emisión de partículas por motor a diesel de los equipamientos ( $IQA_p$ ) se muestra mediante la ecuación (3.53), donde  $C_s$  es la concentración de polvo con sílice libre ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ),  $VLA_s$  el valor límite admisible de la concentración de polvo con sílice libre ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ),  $C_{go}$  la concentración de partículas emitidas por equipamientos con motor diesel ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $VLA_{go}$  el valor límite admisible de la concentración de partículas emitidas por equipos con motor a diesel ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $C_o$  la concentración de cualquier otro contaminante en forma de partículas ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) y  $VLA_o$  el valor límite admisible de otro contaminante ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

$$IQA_p = \frac{C_s}{VLA_s} + \frac{C_{go}}{VLA_{go}} + \frac{C_o}{VLA_o} \tag{3.53}$$

En la generalidad de los casos, el mayor riesgo ambiental provocado por el polvo tiene relación con la presencia de sílice libre y de las partículas emitidas por los equipos con motor diesel, por lo tanto, el valor del índice de calidad  $IQA_p$  para



conservar el ambiente dentro de los estándares establecidos deberá ser  $\leq 2$  y en la hipótesis de que existan tres contaminantes sólidos deberá ser  $\leq 3$ .

### 3.3.4 Normas y estándares de calidad ambiental del polvo

El valor límite admisible de la concentración de polvo respirable adoptado por E.U.A. es de  $2 \text{ mg/m}^3$  de aire en donde el polvo de cuarzo es inferior al 5%. Investigaciones realizadas por MRE (*Mining Research Establishment of Great Britain*) determinaron un estándar de cuarzo presente de  $85$  a  $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  de aire (Tomb, T.F. *et al.*, 1995).

Tomb, T., *et al.* (2001) del MSHA (*Mine Safety and Health Administration* de E.U.A.), considera la condición de aire respirable con concentración de partículas emitidas por motores diesel de  $1 \text{ mg/m}^3$  calculado para una masa volumétrica de polvo con sílice de  $2,5 \text{ g/cm}^3$  y tamaño aproximado de  $1,5 \text{ } \mu\text{m}$ .

En los E.U.A. para algunos silicatos (con contenido de cuarzo  $<1\%$ ), el valor límite admisible es de  $3,5 \text{ g/cm}^3$  para la mica, de  $5,3 \text{ g/cm}^3$  para el cemento portland y de  $3,5 \text{ g/cm}^3$  para el talco.

Para el polvo metálico (Walli, R.A. 1982) los valores límite admisibles son: mercurio  $0,05 \text{ mg/m}^3$ , plomo  $0,15 \text{ mg/m}^3$ , arsénico  $0,20 \text{ mg/m}^3$ , antimonio y bario  $0,5 \text{ mg/m}^3$ , hierro, magnesio, zinc y molibdeno  $5 \text{ mg/m}^3$ , uranio y vanadio  $0,5 \text{ mg/m}^3$ .

Los estándares relacionados con polvos respirables en minas subterráneas en E.U.A. se presentan en el Cuadro 3.36, donde la NIOSH considera un límite de exposición recomendada (REL) para todas las formas de sílice cristalina en polvo respirable de  $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  para proteger a los trabajadores de la silicosis.

Cuadro 3.36 Estándares de polvo respirable en minas metálicas, no metálicas y de carbón en E.U.A. ([www.cdc.gov/niosh](http://www.cdc.gov/niosh), [www.osha.gov](http://www.osha.gov), [www.msha.gov](http://www.msha.gov), [www.acgih.org](http://www.acgih.org))

Referencia	Sustancia	Estándar límite ( $\text{mg/m}^3$ )
NIOSH (1974)	Sílice cristalina *: cuarzo, cristobalita, y tridimita como polvo respirable	REL. = 0,05 (até 10-hr de trabajo diario, durante 40-hr por semana).
OSHA (29 CFR 1910.1000.Table Z-3)	Sílice cristalina respirable, cuarzo	PEL = $10 \div \% \text{ de cuarzo} + 2$ (8-hr TWA)
	Sílice cristalina respirable, cuarzo, cristobalita	PEL = mitad del valor calculado con la fórmula para el cuarzo
	Sílice cristalina respirable, cuarzo, tridimita	PEL = mitad del valor calculado con la fórmula para el cuarzo
MSHA (30 CFR 56, 56, 70, 71)	Cuarzo respirable en minas metálicas y no metálicas	PEL = $10 \div \% \text{ de cuarzo} + 2$ (8-hr TWA)
	Sílice cristalina respirable presente en concentración $> 5\%$ en minas de carbón	RDS = $10 \div \% \text{ de cuarzo} + 2$ (8-hr TWA)
ACGIH (2001)	Sílice cristalina respirable, cuarzo	TLV = 0,05 (8-hr TWA)
	Sílice cristalina respirable, cuarzo, cristobalita	TLV = 0,05 (8-hr TWA)
	Sílice cristalina respirable, cuarzo, tridimita	TLV = 0,05 (8-hr TWA)

\*Identificado por NIOSH como un potencial riesgo ocupacional [2521 casos observados, 54 positivas, (1989)]  
 Abreviaturas: REL = límite de exposición recomendado; PEL = límite permisible de la exposición; RDS = estándar de polvo respirable; TLV = valor límite del umbral; TWA = tiempo medio de trabajo

La OSHA establece los límites permisibles de la exposición (PEL) para 8-hr por día de tiempo medio de trabajo (TWA) para el cuarzo cristalino < 0,1 mg/m<sup>3</sup> y para la cristobalita o dritymita cristalinos < 0,05 mg/m<sup>3</sup>. La MSHA considera límites permisibles de la exposición iguales a la OSHA. Finalmente la ACGIH, en el año 2001, considera un valor límite de 0,05 de mg/m<sup>3</sup> para todas las formas de sílice cristalina en polvo respirable.

Los estándares para polvos adoptados en Australia (Cuadro 3.37) mediante la NOHSC (*National Occupational Health and Safety Commission*) están relacionados con el polvo respirable, que se establece conforme la definición del Consejo de Búsqueda Médica Británica (BMRC) y por recomendación de la Conferencia de Neumoconiosis realizada en Johannesburgo en 1959 (fig. 3.37).

Cuadro 3.37 Estándares de polvo respirable de NOHSC (*National Occupational Health and Safety Commission*) de Australia (disponible en <http://www.nohsc.gov.au/ohsinformation>)

Substancia	Norma por TWA	Substancia	Norma por TWA
Mica	2,5 mg/m <sup>3</sup> (com < 1% cuarzo)	Grafito	3 mg/m <sup>3</sup>
Sílice cristalina	Cuarzo: 0,1 mg/m <sup>3</sup> Cristobalita: 0,05 mg/m <sup>3</sup> Tridymita: 0,05 mg/m <sup>3</sup> Tripoli: 0,1 mg/m <sup>3</sup>	Polvo de carbón (con cuarzo <5%)	3 mg/m <sup>3</sup>
Talco	2,5 mg/m <sup>3</sup>	Fibras cerámicas y fibra de vidrio	5 fibras/ml

Diámetro equivalente de partículas (μ)	Respirabilidad (%)
0	100
1	98
2	92
3	82
4	68
5	50
6	28
7	0

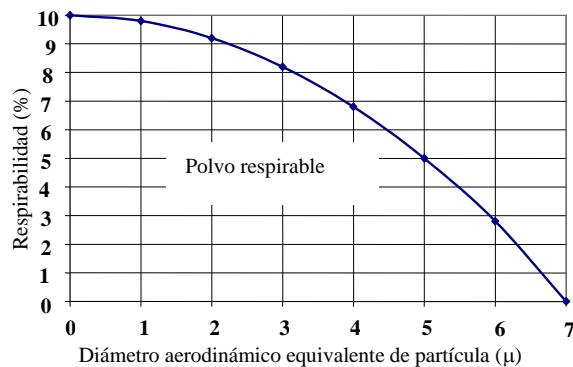


Figura 3.37 Fracción de polvo respirable (<http://www.nohsc.gov.au/ohsinformation>)

Los límites permisibles de la exposición (PELs) establecidos por la Administración Ocupacional de Seguridad y Salud (OSHA) y por la Administración de Seguridad y de Salud de las Minas (MSHA) de los E.U.A. para algunos gases típicamente encontrados en el agotamiento de motores diesel, se indican en el Cuadro 3.38 junto con los límites recomendados de exposición (RELs) establecidos por NIOSH.

Los estándares de emisión de motores diesel y límites permisibles de concentración de partículas en E.U.A., en la Unión Europea (E.U.), Alemania,

Canadá y entidades autorizadas se presentan en el Cuadro 3.38, considerando la concentración típica en minas subterráneas.

Cuadro 3.38 Estándares de emisiones de diesel (partículas) en diferentes países (disponible en [www.dieselnet.com/](http://www.dieselnet.com/))

E.U.A.	Unión Europea UE	(EPA de E.U.A.)
1994: 0,13 g/ kWh 2004: 3,35 g/ kWh (NO <sub>x</sub> + HC)	2005: 0,02/ 0,03 g/ kWh 2008: 2,0 g/ kWh NO <sub>x</sub>	0,67 g/ kWh NO <sub>x</sub> 0,013 g/ kWh después de tratamiento
<i>Alemania (túneles/minas de carbón)</i>	<i>Canadá (Ontario)</i>	<i>MSHA (TLV minas no metálicas y metálicas)</i>
0,3 mg/m <sup>3</sup> , Carbón elemental	1,5 mg/m <sup>3</sup> , RCD*	0,4 a 0,6 mg/m <sup>3</sup>
ACGIH TLV 1995 (E.U.A.)	ACGIH TLV 1998 (E.U.A.)	Concentración típica en minas
0,15 mg/m <sup>3</sup>	0,05 mg/m <sup>3</sup>	0,10 a 1,70 mg/m <sup>3</sup>

\* RCD respirable combustible dust (polvo respirable de combustible)

La EPA de E.U.A. considera que el combustible diesel debe contener azufre en <0,05% o <500 ppm. Para diluir las emisiones se necesita de 16,67 m<sup>3</sup>/s de aire para 0,0000631 m<sup>3</sup>/s de DPM (partículas emitidas) a 1.000 µg/m<sup>3</sup> (MSHA).

Los estándares aceptados y establecidos por el Banco Mundial (*World Bank - Environment, Health and Safety Guidelines Mining and Milling - Underground, INTERIM*), por la EPA de E.U.A. (*Environmental Protection Agency*) y por ADEC (*Alaska Department of Environmental Conservation*) se presentan en el Cuadro 3.39. Una prolongada exposición del personal a polvos de metal como el níquel, cadmio, cromo y arsénico, pueden causar cáncer.

Cuadro 3.39 Valores Límites Admisibles TLVs según el Banco Mundial (World Bank - Environment, Health and Safety Guidelines Mining and Milling - Underground, INTERIM, la EPA de E.U.A. y el ADEC de Alaska Department of Environmental Conservation)

Banco Mundial		EPA y ADEC		
Contaminante	TLVs (mg/m <sup>3</sup> )	Contaminante metálico	Valor límite permisible (TLVs) µg/m <sup>3</sup>	
			24 horas	Anual
Arsénico	0,2	Zinc	12,0	6,55
Asbesto	0,5 fibras/cm <sup>3</sup>	Níquel	0,002	0,002
Monóxido de Carbono CO	29	Arsénico	0,39	0,0002
Bióxido de Carbono	5%	Antimonio	8,0	1,19
Oxígeno O <sub>2</sub>	19,5%	Cromo	0,068	0,07
Cobre Cu	1	Cadmio	0,0056	0,000435
Cianato de Hidrógeno	11	Selenio	0,27	0,26
Sulfuro de Hidrógeno	14	Mercurio	0,08	0,01
Bióxido de Nitrógeno NO <sub>2</sub>	6	Bario	8,0	11,9
Polvo inerte o dañino	10	Manganeso	17	0,24
Sílice/Cuarzo cristalino	0,1			

La MSHA (*Mining Safety Health Administration* de E.U.A., 2001) en estudios realizados durante 45 años y en exposición de las personas a una media de 1.920 horas por año (Cuadro 3.40) consiguió relacionar la mortalidad por cáncer

con la concentración de partículas de la emisión de motor diesel, observándose que cuanto mayor es esta concentración, mayor es la mortalidad y viceversa.

Con la finalidad de muestreo ambiental, las partículas emitidas por motores diesel se expresan en DPM (*diesel particulate matter*) que se define como el carbono total (TC). Esta definición incluye (hidrocarburos derivados) el carbono elemental y orgánico, excluyendo la ceniza y los sulfatos inorgánicos del TLV.

Cuadro 3.40 Mortalidad por cáncer por la exposición a las partículas emitidas por motores a diesel (*Federal register/Vol. 66, No. 13/Friday, January 19, 2001/Rule and Regulations E.U.A.*)

Estudio y modelo estadístico	Mortalidad por cáncer pulmonar por exposición al polvo procedente de motores a diesel (x1000) *			
	200 µg/m <sup>3</sup>	500 µg/m <sup>3</sup>	644 µg/m <sup>3</sup>	808 µg/m <sup>3</sup>
Saveri <i>et al.</i> (1999)				
Poisson, full coorte	15	44	61	83
Cox, full coorte	70	280	422	577
Poisson, sob coorte	93	391	563	693
Cox, sob coorte	182	677	761	802
Steenland <i>et al.</i> (1998)				
5 años, exposición log. acumulada	67	89	95	101
5 años, exposición acumulada	159	620	721	771
Johnston <i>et al.</i> (1997)				
15 años, mina ajustada	313	724	770	800
15 años, mina no ajustada	513	783	811	830

\* Registros de 45 años de exposición ocupacional a 1920 horas por año desde 20 años hasta 60 años.

El Cuadro 3.41 muestra que para una reducción de la concentración de partículas de 808 µg/m<sup>3</sup> a 200 µg/m<sup>3</sup> la mortalidad disminuye cerca de 80%.

Cuadro 3.41 Valores límites permisibles de las concentraciones de partículas emitidas por motores diesel (*Federal register/Vol. 66, No. 13/Friday, January 19, 2001/Rule and Regulations y E.U.A.*)

Fecha	Concentración por 8 horas de exposición (µg/m <sup>3</sup> )
19 de Julio 2002 hasta 19 de Enero 2006	400
> 19 de Enero 2006	160

Basados en estos estudios en los E.U.A. definieron los valores límites admisibles de la concentración de la emisión de partículas para equipos con motor diesel en minas subterráneas. El 19 de enero de 2001 MSHA publicó los reglamentos finales de la emisión de motores diesel para minas subterráneas metálicas, no metálicas y de carbón.

Para minas metálicas y no metálicas fueron adoptados como norma legal los estándares presentados en el Cuadro 3.41 donde el límite final se realiza sobre periodos de cinco años, comenzando el 19 de julio de 2002 y hasta el 19 de enero de 2006.

En Portugal el estándar considera valores límites admisibles relacionados con partículas con contenido de sílice libre y la norma legal correspondiente expresada en forma general (Cuadro 3.42).

Cuadro 3.42 Valores límites admisibles de polvos en Portugal (Decreto-ley n.º 162/90, Decreto Legislativo n.º 708 – 709 del 06 de Noviembre de 1991 de Portugal) y Perú (Decreto Supremo n.º 023-92-EM ).

Portugal	Perú
1 mg/m <sup>3</sup> para > 25% de Sílice libre 2 mg/m <sup>3</sup> para 6% ≤ Sílice libre ≤ 25% 3 mg/m <sup>3</sup> para < 6% de Sílice libre	< 200 Millones de partículas/m <sup>3</sup>

### 3.3.5 Matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental

La matriz para la identificación del nivel de impacto ambiental por la presencia del polvo respirable en el ambiente subterráneo, y también para los dos contaminantes más comunes que son la *sílice libre* (cuarzo) y las *partículas de motor diesel*, se presentan en el Cuadro 3.43 y en el Cuadro 3.44.

Esta nueva forma de evaluación de impacto ambiental, para el caso de considerar dos contaminantes, implica que un índice  $IQA_p > 2$  indica un impacto ambiental negativo permitiendo la identificación del índice de cada contaminante en particular, pues es obvio que el contaminante o contaminantes que tiene o tienen un *índice > 1 necesita o necesitan corregir con la aplicación de alguna medida correctiva*.

Cuadro 3.43 Matriz base para la identificación del impacto ambiental subterráneo debido a la presencia de polvos

Concentración de polvo de sílice libre	Niveles de impacto debido a la presencia de polvo		
	Leve	Moderado	Alto
Para polvo con Sílice libre < 5% (p1) mg/m <sup>3</sup>	2 < p1 ≤ 3	3 < p1 ≤ 4	p1 > 4
Para polvo con Sílice libre > 5% (p2) mg/m <sup>3</sup>	0,05 < p2 ≤ 0,1	0,1 < p2 ≤ 0,15	p2 > 0,15
Partículas de motor diesel 8 horas (p3) µg/m <sup>3</sup>	400 < p3 ≤ 450	450 < p3 ≤ 500	p3 > 500

Cuadro 3.44 Matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental subterráneo debido a la presencia de polvos basado en el índice de calidad del aire  $IQA_p$

Niveles de impacto ambiental debido a partículas de roca y emisiones de motores diesel (polvo)		
Leve	Moderado	Alto
2 < $IQA_g$ ≤ 2,5	2,5 < $IQA_g$ ≤ 3	3 < $IQA_g$

### 3.3.6 Medidas correctivas para el impacto ambiental por la presencia del polvo

El hombre, a lo largo del tiempo que explota el medio subterráneo ha desarrollado una gran experiencia en la lucha contra el efecto nocivo del polvo, aunque no exista uniformidad de estándares o valores límite admisibles. Los procedimientos de control de la contaminación ambiental generada por el polvo, están basados fundamentalmente en:

- Mínima producción de polvo en las operaciones;
- Mínima producción de polvo con la prevención en la fuente de la contaminación;
- Dilución por el sistema de ventilación;

· El aislamiento de la zona contaminada

Recientes estudios realizados por MSHA de los E.U.A. indican que, para mantener la concentración del polvo en los niveles de estándares establecidos, las técnicas más efectivas son la aplicación de agua y los sistemas de ventilación.

3.3.6.1 Aplicación de agua

En la prevención de la formación de polvo en el ambiente subterráneo, la aplicación de agua es un procedimiento muy importante. Una técnica actualmente usada para minimizar la producción de polvo en las operaciones mineras consiste en la utilización directa del agua en caudal y presión adecuados.

En la operación de perforación, ya sea con equipos neumáticos o hidráulicos, se utiliza agua aplicada directamente en el fondo del agujero y en un ambiente prácticamente cerrado, permitiendo con este procedimiento convertir la roca triturada (denominada *detritos*) en lodo y ser expulsada de esta forma al exterior.

El caudal mínimo recomendado es de 2,2 l/s por taladro a una presión de 480 a 830 kPa, medida que consigue una eficiencia de 82 a 95% para partículas menores de 7  $\mu\text{m}$ .

En la operación de desmote de rocas, después de cada disparo la concentración del polvo puede alcanzar de 1 a 1,5  $\text{g}/\text{m}^3$ , por lo tanto, la técnica de aplicación de agua en cantidad y presión adecuados en un área localizada de 10 a 15 m de distancia del sitio de desmote, reduce el polvo respirable en el orden de 20 a 60% (Ondrey, R. S., *et al.*, 2001).

En esta operación de remoción y transporte de rocas (mineral) el procedimiento utilizado es la aplicación de un chorro de agua pulverizada (caudal y presión adecuados) al material a remover en el piso y pilares de los frentes de trabajo. Es recomendable aplicar el chorro de agua a presión de 1035 kPa con una dirección de 30° en relación al sentido del flujo del aire.

Se aplica un chorro de agua a alta presión, debido a que las gotitas de agua pulverizada son eficientes supresores del polvo, pues permiten un mayor contacto con las partículas de polvo; sin embargo, las de mayor tamaño (de agua) no permiten el mayor contacto con la superficie de las partículas sólidas de polvo (fig. 3.38).

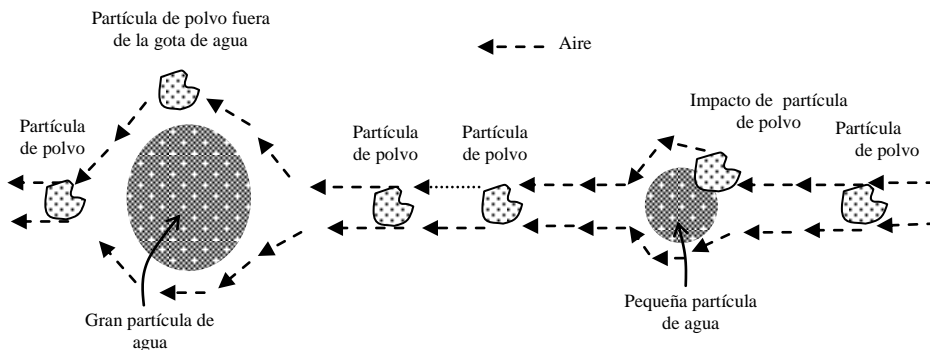


Figura 3.38 Flujo de aire en torno de gotas grandes y pequeñas de agua

Existen varios métodos de utilización de agua para reducir la concentración de las partículas en suspensión: el sistema de aplicación de agua con mangueras, pulverizadores de agua con tambor interno o externo, etc. Estos métodos se basan en la reducción de la salida del agua y el aprovechamiento de presión generado por la fuerza de gravedad.

### 3.3.6.2 Dilución mediante sistema de ventilación

En la atenuación de la contaminación ambiental debida a la emisión de partículas por los equipos con motor diesel, antes de adoptar la técnica de dilución por ventilación, es recomendable utilizar los sistemas de control mediante la instalación de los dispositivos adicionales siguientes: oxidación catalítica DOC (*Diesel Oxidation Catalysis*); filtros para emisión de partículas de diesel DPF (*Diesel Particulate Filters*); reducción catalítica selectiva SCR (*Selective Catalysis Redution*); modificación del dimensionamiento del motor en combinación con técnicas de control de la emisión; entre otros, que en términos de costos son bajos.

Como se mostró en el Cuadro 3.27, la efectividad de reducción de la emisión de partículas de motor diesel resulta: >25% para Oxidación Catalítica; >90% para filtros; >30% para reducción catalítica selectiva, Lean-NO<sub>x</sub> Catálisis, Lean-NO<sub>x</sub> w/HC-inyección y Lean-NO<sub>x</sub> Adsorción y de 80% para la reducción catalítica con plasma.

La *máscara de protección* individual contra el polvo debe ser siempre usada en sitios con concentraciones de polvo suspendido mayor que el valor máximo permisible. Esta máscara tiene dos partes principales: la estructura con ergonomía adecuada para la nariz (material flexible) y el filtro. Para una adecuada y efectiva utilización de los protectores individuales, la MSHA recomienda seguir los estándares ANSI Z88.21969 de *American National Sntandars Practice for Respiratory Protection*.

Estudios realizados por la MSHA de los E.U.A. (Ondrey, R.S., *et al.*, 2001) mostraron que para mantener la concentración de polvo por debajo de 2 mg/m<sup>3</sup> se necesita, aproximadamente de un caudal de aire de 0,14 a 0,57 m<sup>3</sup>/min por cada tonelada de material explotado por turno.

Para determinar el caudal de aire para diluir la concentración de polvo flotante hasta niveles permisibles  $Q_p$  (m<sup>3</sup>/s) existen varias ecuaciones y entre ellas la ecuación (3.54), donde  $Q_t$  es la relación del caudal de aire por tonelada de producción (m<sup>3</sup>/minuto.t<sup>-1</sup>) que según Ondrey, R. S. este valor varía de 0,14 a 0,57 m<sup>3</sup>/min,  $VLA_p$  el valor límite admisible de la concentración de polvo,  $P$  la producción (t) y  $C_p$  la actual concentración de polvo (mg/m<sup>3</sup>).

$$Q_p = \frac{Q_t \cdot VLA_p \cdot P}{60C_p} \quad (3.54)$$

Walli, R. A. (1982) propone la ecuación (3.55) para calcular  $Q_p$  (m<sup>3</sup>/s), en función de la generación de polvo  $E_p$  (mg/min), la concentración admisible de polvo  $VLA_p$  (mg/m<sup>3</sup>) y la concentración de polvo en el aire que entra  $C_{ep}$  (mg/m<sup>3</sup>).

$$Q_p = \frac{E_p}{60(VLA_p - C_{ep})} \quad (3.55)$$

Cuando hay la presencia de dos tipos de polvos (polvo metálico y polvo de motor diesel), el caudal de aire  $Q_p$  ( $m^3/s$ ) se puede calcular mediante la ecuación (3.56), donde  $Q_{ap}$  es el caudal de aire contaminado con polvo ( $m^3/s$ ) y  $IQA_p$  es el índice de calidad del aire relacionado a las partículas suspendidas (polvo).

$$Q_p = Q_{ap} IQA_p \quad (3.56)$$

El índice de calidad del aire  $IQA$  para partículas emitidas por motores diesel debe ser determinado, dependiendo de las condiciones en que se encuentre el gas:

- a) Cuando la evaluación se basa en el gas (emitido por el motor) antes de la suspensión en el aire, los valores del  $IQA$  deben estar relacionados con la emisión del motor;
- b) Cuando la evaluación se basa en las partículas en suspensión (emitidos por el motor) en el aire, los valores de  $IQA$  son los de las muestras analizadas de este medio.

Cuando se utiliza agua para la mitigación del polvo, el caudal de aire fresco requerido  $Q_{pa}$  ( $m^3/s$ ) se calcula con la ecuación (3.57) en función del factor de reducción  $f$  (0,40 a 0,80).

$$Q_{pa} = fQ_p \quad (3.57)$$

Haney, R.A., *et al.* (2000), refieren algunos estándares de caudal de aire para minas metálicas y no metálicas, que son de 0,05 a 0,13  $m^3/s/kW$ , que permiten obtener una concentración de polvo en el orden de 0,5 a 1  $mg/m^3$ .

Finalmente, el autor recomienda utilizar las ecuaciones 3.45 y 3.46 propuestas para la dilución de gases.

### 3.3.6.3 Otras técnicas

a) *Humidificadores*: pueden ser de jabón y/o nafta con concentración de 0,05% o una mezcla de sales de sodio con concentración de 0,15 a 0,2%.

En la perforación de rocas la acción del agua de limpieza actúa sobre las partículas de mayor diámetro, mas las partículas más finas, debido a la acción de la fuerte tensión superficial del agua, producen una humedad insuficiente, pasando polvo fino al ambiente constituyendo polvo respirable.

Para eliminar este inconveniente se adicionan al agua de limpieza los denominados humidificadores, que aumentan la capacidad de recolección del polvo por el agua, una vez que reduce la tensión superficial de la gota (Ondrey, R.S. *et al.*, 2001).

b) *Colecta gravimétrica del polvo*: técnica utilizada cuando no se utiliza agua en la perforación, poseyendo, los equipos un colector de polvo, que consiste en un receptor, manguera para conducción, aspirador y filtro de polvo. La colecta consiste en la aspiración, centrifugación y asentamiento.



c) *Aislamiento*: es aplicable en puntos de transferencia del material (estéril o mineral). La técnica consiste en aislar la zona de los puntos de transferencia con láminas metálicas y aspirar el polvo.

d) *Inyección del agua sobre el macizo*: utilizado en minas de carbón y consiste en inyectar agua a presión en los puntos de arranque o corte del macizo.

### **3.3.7 Monitoreo y control de polvos**

Es evidente que la aplicación de una medida correctiva para mitigar o atenuar el impacto ambiental debido a la concentración de polvos, necesita de un acompañamiento durante la operación, lo que garantiza su adecuada aplicación y, de esta forma, obtener la efectividad deseada, de modo que el aire del medio subterráneo se conserve con buena calidad.

El acompañamiento consistirá en el monitoreo y control adecuados y oportunos, para comparar la calidad del aire ambiente con la calidad establecida por las normativas y estándares, y en el caso de que fueran detectadas algunas deficiencias, realizar reajustes.

La IAS relacionado con polvos en la atmósfera subterránea está sistematizado, considerando un proceso que se inicia con la identificación de las fuentes de emisión, caracterización del ambiente y del gas, identificación de nivel de impacto ambiental, búsqueda de medidas de prevención o corrección del impacto identificado, implementación o aplicación de la alternativa más técnica y económicamente viable, acompañamiento con sistema de monitoreo y control para comprobar la eficacia y efectividad de la medida. La fig. 3.39 ilustra el proceso descrito.

En el monitoreo y control de polvos es muy importante realizar mediciones sistemáticas utilizando técnicas que exigen el uso de metodologías, equipos o aparatos adecuados (Cuadro 3.45) como los que se usan para los análisis cualitativos y cuantitativos correspondientes. El instrumental a utilizar depende del tipo de medición a realizar, sea selectivo o no selectivo. Los dispositivos que se utilizan deben ser calibrados de acuerdo a las normas existentes, por lo que los resultados expresan las condiciones reales del ambiente.

## **3.4 Velocidad y caudal del aire**

### **3.4.1 Efectos de la velocidad y caudal del aire en el ambiente subterráneo**

La velocidad y el flujo del aire en el ambiente subterráneo son parámetros ambientales que, de manera significativa, influyen las condiciones de la calidad ambiental del aire respirable

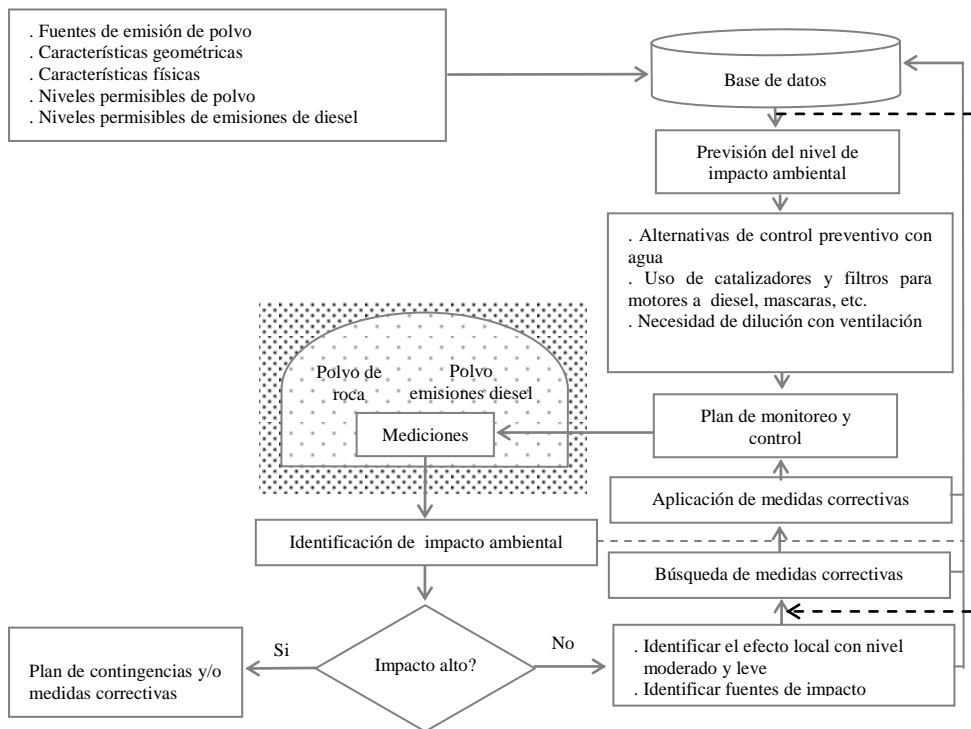


Figura 3.39 Sistema de gestión del polvo en el aire del ambiente subterráneo

Cuadro 3.45 Medición de polvos y partículas en el ambiente subterráneo (Walli, R.A., 1982)

Medición no selectiva	Medición selectiva del polvo respirable		
	Muestreo no selectivo Evaluación no selectiva	Muestreo selectivo Evaluación no selectiva	Muestreo selectivo Evaluación selectiva
Filtro abierto Filtro de alto volumen Precipitador electrostático Precipitador térmico	Impinger Conímetro Precipitador térmico "Tyndaloscope" Sedimentación	Elutriador con filtro Precipitador térmico Ciclón con filtro Difracción Bomba con filtro selectivo	Difracción de rayos X

La importancia ambiental de la velocidad y flujo del aire se debe al hecho de influenciar las condiciones térmicas y la concentración de gases y polvos. El esquema de la fig. 3.40 ilustra esta característica, con los parámetros de primer orden determinantes en los efectos negativos generados a través de los de segundo orden (temperatura, gases y polvos).

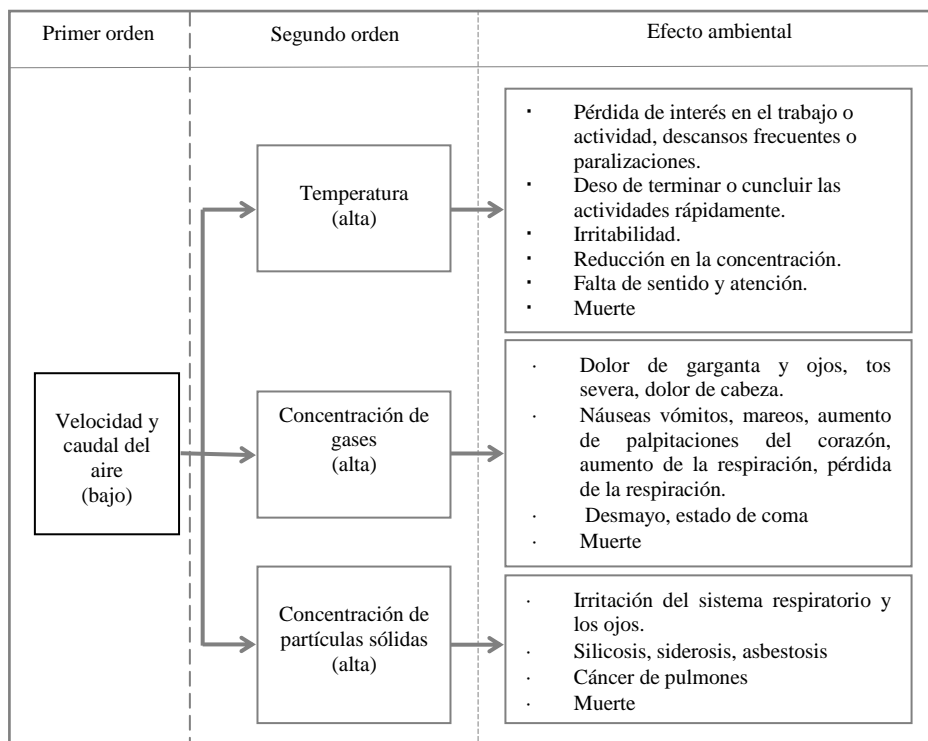


Figura 3.40 Velocidad y flujo del aire como un factor ambiental de primer orden en la contaminación del ambiente subterráneo

El esquema muestra que la velocidad y el caudal de aire son factores ambientales de primer orden, pues el flujo de aire con bajos valores de velocidad y caudal ocasiona consecuentemente una alta temperatura, una alta concentración de gases y una alta concentración de partículas sólidas (polvos) y viceversa, produciendo efectos ambientales negativos y llevando incluso la muerte.

Este factor es una razón fundamental para prestar la debida atención al análisis y definición de estos dos parámetros dinámicos del ambiente subterráneo.

### 3.4.2 Fuentes de la velocidad y caudal

La velocidad y caudal del aire en el ambiente subterráneo son parámetros que están directamente relacionados entre sí, dependiendo del tamaño de la excavación subterránea, expresada por la sección de abertura.

Las fuentes de velocidad y caudal del aire en las aberturas subterráneas están principalmente en función de la carga y la resistencia de la superficie de excavación o abertura, estas últimas por su vez están influenciadas por otros parámetros (fig. 3.41).

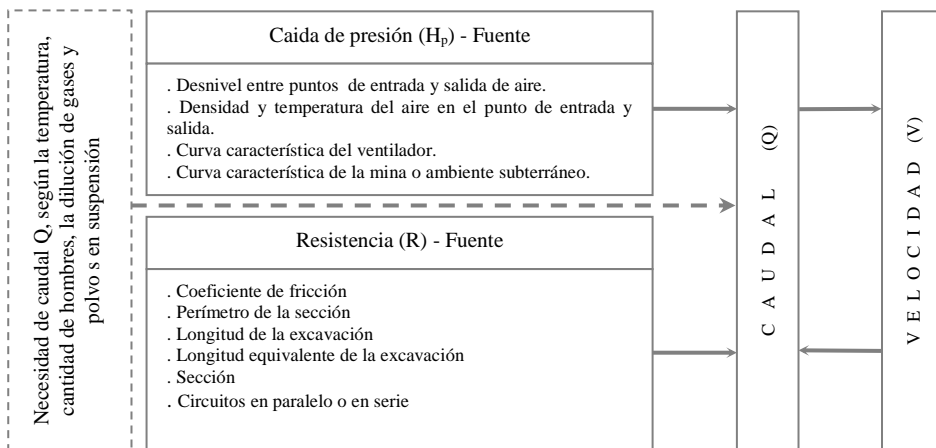


Figura 3.41 Fuentes de velocidad y caudal del aire en el ambiente subterráneo

La carga depende del siguiente conjunto de variables: el desnivel entre los puntos de entrada y salida del aire; la densidad o temperatura del aire en el punto de entrada y salida; la curva característica del ventilador y la curva característica de la mina o ambiente subterráneo.

La resistencia de la abertura subterránea es función de las siguientes variables: el coeficiente de fricción; el perímetro; la sección y la longitud de la abertura; la sinuosidad, las bifurcaciones y las bruscas variaciones de la sección; y el tipo de circuito de aire (paralelo o serie).

El esquema ilustra que el caudal total o el caudal en los frentes de trabajo están en función de la cantidad máxima de hombres presentes, de la necesidad de dilución de los gases y partículas suspendidas y también de la temperatura transmitida a la atmósfera subterránea.

Sin embargo, las fuentes que determinan el mayor o menor caudal y respectiva velocidad del aire son la *carga*, que está en función del tipo de ventilación (natural o artificial) y la *resistencia*, que está determinada por los parámetros físicos del ambiente.

### 3.4.3 Caracterización de la situación de la velocidad y caudal

#### 3.4.3.1 Caudal mínimo requerido para el ambiente subterráneo

El caudal mínimo total,  $Q_{mt}$  ( $m^3/s$ ), necesario para el ambiente subterráneo se calcula mediante la ecuación (3.58). Esta expresión traduce la suma parcial de los caudales mínimos relativos a la cantidad máxima de hombres presentes  $Q_h$  ( $m^3/s$ ); la situación de confort térmico  $Q_t$  ( $m^3/s$ ); la concentración de gases  $Q_g$  ( $m^3/s$ ); y los polvos o partículas sólidas  $Q_p$  ( $m^3/s$ ).

$$Q_{mt} = Q_h + Q_t + Q_g + Q_p \quad (3.58)$$

En el cálculo del caudal mínimo  $Q_h$  ( $m^3/s$ ) para una cantidad máxima de hombres  $N$  se recomienda la ecuación (3.59) que es función de la cantidad mínima de aire  $q$  ( $m^3/s.hombre$ ) contemplada por los estándares o normas legales.

$$Q_h = qN \quad (3.59)$$

El caudal de aire para el enfriamiento de altas temperaturas,  $Q_t$  ( $m^3/s$ ), se calcula para dos situaciones: aberturas subterráneas con altas temperaturas ( $>1,05T_{sm}$ , donde  $T_{sm}$  es la temperatura seca máxima admisible por la norma o estándares) influenciada por la temperatura de la roca virgen y otros factores ya estudiados y por la presencia de aguas termales. En estos cálculos se utilizan los modelos matemáticos desarrollados y expresados en las ecuaciones (3.24), (3.29) y (3.30).

El caudal mínimo requerido para la dilución de los gases,  $Q_g$  ( $m^3/s$ ), se calcula utilizando cualquiera de las ecuaciones: (3.40); (3.41); (3.42); (3.43); (3.44); (3.45); y (3.46).

En el caso de que existieran simultáneamente varias fuentes de gases, el cálculo se efectúa separadamente para cada fuente. En cuanto al caudal mínimo total requerido para la dilución de los gases puede estar determinado por la suma de los caudales parciales mínimos para todas las fuentes.

Normalmente en las operaciones mineras, el tiempo de dilución de estos gases se produce en momentos diferentes. Por ejemplo, la producción de gases debido a los diapos sucesivos con explosivos, sucede en un momento diferente de la producción de los gases generados por los equipos con motor diesel (de remoción y/o transporte). En este caso, es necesario calcular por separado cada caso y considerar el mayor caudal en las condiciones más adversas.

Por lo tanto, el caudal mínimo de aire necesario para diluir la concentración de polvos (partículas sólidas suspendidas en el aire) se determina con cualquiera de las ecuaciones: (3.54); (3.55); (3.56); y (3.57).

En general, el cálculo del caudal mínimo total de aire necesario en un ambiente subterráneo se obtiene mediante la ecuación (3.73) que considera los valores límites admisibles relativos a la cantidad máxima de hombres y a la potencia máxima total de los equipos con motor a diesel.

### 3.4.3.2 Caracterización de los parámetros que influyen en la velocidad y caudal del aire

La velocidad de aire  $V$  ( $m/s$ ) en el ambiente subterráneo es el resultado de una simple relación que está expresada en la ecuación (3.60) en función del caudal de aire  $Q$  ( $m^3/s$ ) y la sección de la excavación subterránea ( $m^2$ ).

$$V = \frac{Q}{S} \quad (3.60)$$

El caudal de aire es un parámetro aerodinámico que depende de la diferencia de presión o de la carga  $H_p$  (Pa) y de la resistencia ofrecida por la superficie de las excavaciones  $R$  ( $Ns^2/m^4$ ), cuya relación se define por la ecuación de Atkinson (3.61) (*Mine Ventilation Services Inc.*, 1999)

$$Q = \left( \frac{H_p}{R} \right)^{0.5} \tag{3.61}$$

La resistencia  $R$  ( $\text{Ns}^2/\text{m}^8$ ) es calculada con la ecuación (3.62) determinada por Atkinson, en función de las características físicas de la abertura subterránea: el coeficiente de fricción  $f$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); el perímetro de la sección  $P$  (m); la longitud de la excavación  $L$  (m); la longitud equivalente  $L_e$  (m); y la sección  $S$  ( $\text{m}^2$ ).

$$R = \frac{fP(L + L_e)}{S^3} \tag{3.62}$$

El coeficiente de fricción  $f$  se determina utilizando los conocidos valores experimentales indicados en el Cuadro 3.46 que son función del tipo de excavación, irregularidades en la superficie de la abertura, sinuosidad y obstrucción.

Cuadro 3.46 Coeficientes de fricción según la Oficina de Minas de E.U.A. (Hartman, H.L. *et al.*, 1982; Ramani, R.V., 1992 y *Mine Ventilation Services, Inc.*, 1999)

Tipo de excavación	Irregularidades en la superficie de la abertura	Valores de $f$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )											
		Sinuosidad (o grado de la desviación de la curva)											
		Ley			Suave			Moderado			Elevado		
		Sin obstrucción	Ligera obstrucción	Moderada obstrucción	Sin obstrucción	Ligera obstrucción	Moderada obstrucción	Sin obstrucción	Ligera obstrucción	Moderada obstrucción	Sin obstrucción	Ligera obstrucción	Moderada obstrucción
Suave y recubierta	Mínimo	0,0019	0,0028	0,0046	0,0037	0,0046	0,0065	0,0046	0,0056	0,0074	0,0065	0,0074	0,0093
	Medio	0,0028	0,0037	0,0056	0,0046	0,0056	0,0074	0,0056	0,0065	0,0083	0,0074	0,0083	0,0102
	Máximo	0,0037	0,0046	0,0065	0,0056	0,0065	0,0083	0,0065	0,0074	0,0093	0,0083	0,0093	0,0111
Sedimentaria (carbón)	Mínimo	0,0056	0,0065	0,0083	0,0074	0,0083	0,0102	0,0083	0,0093	0,0111	0,0102	0,0111	0,0130
	Medio	0,0102	0,0111	0,0130	0,0121	0,0130	0,0148	0,0130	0,0139	0,0158	0,0148	0,0158	0,0176
	Máximo	0,0130	0,0139	0,0158	0,0148	0,0158	0,0176	0,0158	0,0176	0,0186	0,0176	0,0186	0,0204
Madera (de 1.5m)	Mínimo	0,0148	0,0158	0,0176	0,0167	0,0176	0,0195	0,0176	0,0186	0,0204	0,0195	0,0204	0,0223
	Medio	0,0176	0,0186	0,0204	0,0195	0,0204	0,0223	0,0204	0,0213	0,0232	0,0223	0,0232	0,0250
	Máximo	0,0195	0,0204	0,0223	0,0213	0,0223	0,0241	0,0223	0,0232	0,0250	0,0241	0,0250	0,0269
Roca de tipo ígnea	Mínimo	0,0167	0,0176	0,0195	0,0186	0,0195	0,0213	0,0195	0,0204	0,0223	0,0213	0,0223	0,0241
	Medio	0,0269	0,0278	0,0297	0,0288	0,0297	0,0306	0,0297	0,0306	0,0325	0,0315	0,0325	0,0362
	Máximo	0,0362	0,0371	0,0390	0,0380	0,0390	0,0408	0,0390	0,0399	0,0417	0,0408	0,0417	0,0436

El perímetro de la excavación  $P$  también varía en función de la forma adoptada y del método de excavación usado, siendo calculado por las ecuaciones simples:

*Circular:*  $P = 3,1416d$ , donde  $P$ = perímetro (m),  $d$  = diámetro (m).

*Rectangular:*  $P = 2(B + A)$ , donde  $B$  = base (m) y  $A$  = altura (m).

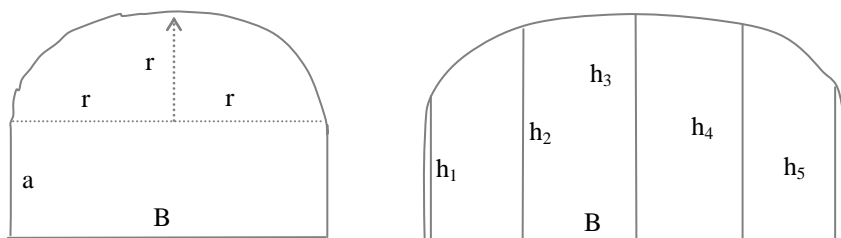
*Trapezoidal:*  $P = B + b + (4h^2 + B^2 - 2bB + b^2)^{0.5}$ , donde B = base mayor

b = base menor (m) y h = altura (m).

*Con semicírculo en el techo:*  $P = 5,1416r + 2a$ , (fig. 3.4.4.a)

*Con un arco en el techo:*  $P = 0,6398S - 0,0047S^2 + 6,9887$ , para  $S > 12m^2$   
 $P = 1,3886S - 0,0405S^2 + 2,97178$ , para  $S < 12m^2$

En estas ecuaciones *a* representa la altura de la estructura de la bóveda (m), *r* el radio del semicírculo del techo (m) y *h*<sub>1</sub>, *h*<sub>2</sub>, *h*<sub>3</sub>, *h*<sub>4</sub>, *h*<sub>5</sub> las alturas (m). El detalle de estas dimensiones se ilustra en la fig. 3.42.



a). Con semicírculo en el techo

b). Con un arco en el techo

Figura 3.42 Secciones típicas de aberturas subterráneas

La longitud *L* (m) se obtiene del proyecto o a través de la medición directa y los valores experimentales de la longitud equivalente *L<sub>e</sub>* (m) son determinados mediante el Cuadro 3.47 que está definido por las curvas, ángulos, intersecciones, entradas y salidas de aire, las contracciones, expansiones, obstrucciones, bifurcaciones y uniones.

Cuadro 3.47 Longitud equivalente *L<sub>e</sub>* (m) (Hartman, *et al.*, 1982; Ramani, R.V., 1992 y Mine Ventilation Services, Inc., 1999).

Singularidad que origina la pérdida de carga por choque	<i>L<sub>e</sub></i> (m)	Singularidad que origina la pérdida de carga por choque	<i>L<sub>e</sub></i> (m)
Curva aguda redondeada	0,9144	Contracción gradual	0,3048
Curva aguda con vértice	45,7200	Contracción abrupta	3,0480
Curva recta redondeada	0,3048	Expansión gradual	0,3048
Curva recta con vértice	21,3360	Expansión abrupta	6,0960
Curva obtusa redondeada	0,1524	Bifurcación (1 trecho derecho)	9,1440
Curva obtusa con vértice	4,5720	(tramo desviado a 90°)	60,9600
Puerta de ventilación	21,3360	Unión (1 trecho derecho)	18,2880
Cruce irregular	19,8120	(tramo desviado a 90°)	9,1440
Entrada de la mina (libre)	0,9144	Vehículo (20% de la cavidad)	30,4800
Descarga de la mina (libre)	19,8120	Vehículo (40% de la cavidad)	152,4000

La sección *S* se obtiene del proyecto y en el caso de la mina en operación mediante medición topográfica directa. Cuando sea necesario, las ecuaciones indicadas a seguir son útiles en la determinación de la sección de la excavación:

*Circular:*  $S = 0,7854d$ , donde *S*: sección (m<sup>2</sup>) y *d*: diámetro (m).

- Rectangular:  $S = B.A$ , donde  $B$ : base (m) e  $A$ : altura (m).
- Trapezoidal:  $S = A(B + b)/2$ , donde  $B$ : base mayor (m),  $b$  = base menor (m).
- Arco en el techo:  $S = 0,13125B(h_1 + 2 h_2 + 2 h_3 + 2 h_4 + h_5)$  (m<sup>2</sup>) (fig. 3.42.b)
- Semicircular en el techo:  $S = 2ar + 1.5708 r^2$  (m<sup>2</sup>) (fig. 3.42.a)

En el caso de los frentes denominados *fondo de saco* el flujo de aire es aplicando mediante sistema forzado (ventilador) y utilizando manga de ventilación (fig. 3.43), como en el caso de túneles, galerías, rampas, pozos, chimeneas, etc. y en algunos tajeos (*Rom & Pillar, Bench & Fill, Drift & Fill, Sub Level Stopping*, etc.).

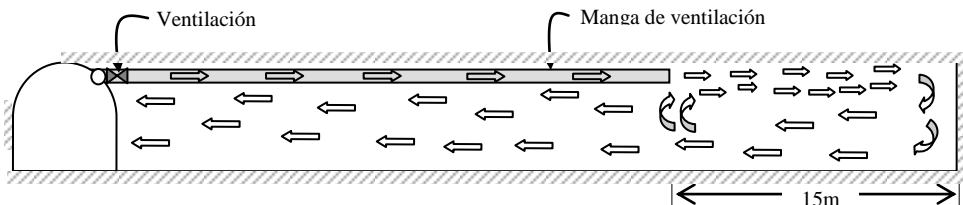


Figura 3.43 Ventilación ambiental denominada fondo de saco

Para calcular el caudal de aire  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) en estos casos, se desarrolló la ecuación (3.63) utilizando los fundamentos de la ventilación de minas y en función de  $\lambda$  que es el factor de la pérdida de carga en la manga (Cuadro 3.48) y del diámetro  $D$  de la manga de ventilación (m).

$$Q = \left( \frac{H_p}{L \left( \frac{0.98\lambda}{D^5} + \frac{fP}{S^3} \right) + \frac{fPLe}{S^3}} \right)^{0.5} \tag{3.63}$$

Cuadro 3.48 Valores del factor de pérdida de carga en la manga (López Jimeno, C., 1997)

Tipo de manga	Rígidas			Flexible	
	Plástico (polietileno)	Metálica (lisa)	Contraportada de madera	Bien suspensa	Mano suspensa
$\lambda$	0.0180	0.0205	0.0220	0.0210	0.0260

En esta situación la carga total  $H_p$  que interviene en la ecuación (3.63) es una variable que depende de la capacidad volumétrica del ventilador (caudal de aire) definida por la correspondiente *curva característica*. Por lo tanto, para un caudal mínimo admisible en el frente del fondo del saco  $Q_m$  (m<sup>3</sup>/s) y para una pérdida de carga  $H_v$  (Pa) el ventilador tiene una capacidad de abastecimiento de aire hasta una longitud máxima de manga  $L_{max}$  (m) cuya expresión matemática se muestra en la ecuación (3.64).



$$Q = \left( \frac{H_p}{L \left( \frac{0.98\lambda}{D^5} + \frac{fP}{S^3} \right) + \frac{fPLe}{S^3}} \right)^{0.5} \quad (3.64)$$

Cuando las condiciones del ambiente subterráneo permiten una ventilación natural, la carga  $H_p$  (Pa) se expresa por medio de la ecuación de Atkinson (3.65), donde  $H_n = H(\rho_1 - \rho_2) = P_1 - P_2$ ;  $H = z_2 - z_1$ , en la que  $H$  es la diferencia entre la cota del punto de entrada ( $z_2$ ) y de salida ( $z_1$ ) del aire (m);  $\rho_1$  y  $\rho_2$  representan la densidad media de aire en el punto de entrada y salida ( $\text{kg/m}^3$ ),  $P_1$  y  $P_2$  (Pa) son las presiones en el punto de entrada y salida del aire,  $R$  es la resistencia ( $\text{Ns}^2/\text{m}^4$ ) y  $Q$  es el caudal de flujo de aire ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$$H_n = RQ^2 \quad (3.65)$$

En el sistema de ventilación forzada, el caudal de aire  $q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) se determina a partir de las curvas características del ambiente subterráneo y del ventilador (fig. 3.44), definiéndose así el caudal por la pérdida de presión  $h$  (Pa).

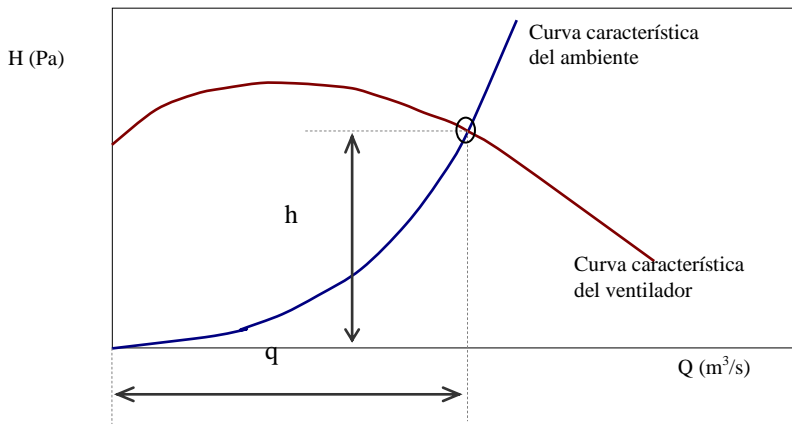


Figura 3.44 Caudal de aire de un ventilador para las condiciones del ambiente subterráneo

### 3.4.3.3 Caracterización aerodinámica de los circuitos del aire en el ambiente subterráneo

Para caracterizar los circuitos de aire en el ambiente subterráneo se aplican las leyes de Kirchhoff desarrolladas para circuitos en serie y paralelos.

En circuitos de aire en serie existen las siguientes ecuaciones:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n \quad (3.66)$$

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n = R_1Q_1^2 + R_2Q_2^2 + R_3Q_3^2 + \dots + R_nQ_n^2 \quad (3.67)$$

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (3.68)$$

De igual modo, en circuitos de aire en paralelo, existen las siguientes ecuaciones:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \tag{3.69}$$

$$H = h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_n \tag{3.70}$$

$$R_{eq} = \left\{ 1 / \left[ \frac{1}{R_1^{0.5}} + \frac{1}{R_2^{0.5}} + \frac{1}{R_3^{0.5}} + \dots + \frac{1}{R_n^{0.5}} \right] \right\}^2 \tag{3.71}$$

$$R_{eq} Q^2 = R_1 Q_1^2 = R_2 Q_2^2 = R_3 Q_3^2 = \dots = R_n Q_n^2 \tag{3.72}$$

En las ecuaciones (3.66) a (3.72)  $Q$ ,  $H$  y  $R_{eq}$  representan el caudal, la carga y la resistencia total o equivalente, respectivamente;  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_n$ ,  $h_1, h_2, h_3, h_n$ ,  $R_1, R_2, R_3, R_n$  representan los caudales, depresiones y resistencias en los ramos de los circuitos de aire.

### 3.4.4 Normas y estándares de calidad ambiental dinámico y volumétrico

Un hombre en reposo necesita de aproximadamente 7 litros por minuto de aire con 19 a 20% de oxígeno, en el caso de estar en actividad (trabajo) puede aumentar hasta 25 litros por minuto, pudiendo llegar hasta 40 litros por minuto cuando el esfuerzo es considerable (Cuadro 3.49).

Cuadro 3.49 Requisitos de aire en las actividades del hombre (Hartman, H. L. *et al.*, 1982)

Nivel de actividad	Ritmo de respiración (respiración/min)	Aire inhalado		Consumo O <sub>2</sub> 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s	Relación de respiración
		10 <sup>3</sup> (mm <sup>3</sup> /respiración)	10 <sup>-4</sup> (m <sup>3</sup> /s)		
Reposo	12 – 18	377 – 705	0,82 – 2,18	0,47	0,75
Moderado	30	1.476-1.968	7,64-9,83	3,30	0,90
Alto	40	2.460	16,40	4,70	1,00

En Portugal el Decreto-Ley n.º 162/90 de 22 de mayo en el Capítulo X (Ventilación) en su Artículo 76 indica que el caudal de aire introducido en la mina debe ser suficiente para que se pueda disponer, por lo menos, de 50 l/s de aire fresco por cada hombre presente en el turno más numeroso. En sectores donde se utilizan equipos diesel el caudal de entrada de aire debe ser, por lo menos, el indicado en el anterior, con aumento de 35 l/s/hp instalado. En el Artículo 77 se indica que la velocidad del aire en los trabajos subterráneos donde circulen trabajadores no debe sobrepasar 8 m/s ni ser inferior a 0,2 m/s (Cuadros 3.50 y 3.51).

Cuadro 3.50 Valores mínimos admisibles del caudal de aire en Portugal y Perú

Portugal		Perú	
D.L. n.º 162/90, Artículo 76		D.S. n.º 023/92/EM, Artículos 292 y 293	
Caudal mínimo Q por hombre l/s (m <sup>3</sup> /s)	Aumento por cada hp de motor diesel l/s (m <sup>3</sup> /s)	Caudal mínimo Q en función de altitud l/s (m <sup>3</sup> /s)	Aumento por cada hp de motor diesel l/s (m <sup>3</sup> /s)
50 (0,05)	35 (0,035)	<1.500m (50) (0,05) 1.500-3.000m (70) (0,07) 3.000-4.000m (80)(0,08) >4.000m (100) (0,10)	≥ 50 (≥0,05)

Cuadro 3.51 Velocidad de aire mínima admisible en Portugal y Perú

Portugal		Perú
DL n.º 162/90, Artículo 77		D.S. n.º 023/92/EM, Artículo 294
Velocidad V (m/s)	Casos especiales	Velocidad V (m/s)
0,20 <V <8,0	Velocidad para temperaturas $T_s \leq 35^\circ\text{C}$ $T_h \leq 30^\circ\text{C}$	0,25 <V <4,17

En Perú, los estándares de calidad dinámica del aire son definidos por el D.S. n.º 128-2001-EM-DGM, que en los artículos 204 y 205 indica que cuando las minas se encuentran localizadas en cotas de 0 hasta 1.500 metros por encima del nivel del mar, la cantidad mínima de aire en los sitios de trabajo por cada hombre debe ser de 3 m<sup>3</sup>/minuto (0,05 m<sup>3</sup>/s). En otras altitudes la cantidad de aire será concordante con la escala siguiente:

- 1500 – 3000 m, aumentará en 40% y será igual a 4m<sup>3</sup>/minuto (0,067 m<sup>3</sup>/s);
- 3000 – 4000 m, aumentará en 70% y será igual a 5 m<sup>3</sup>/minuto (0,083 m<sup>3</sup>/s);
- Por encima de los 4000 m, aumentará en 100% y será igual a 6 m<sup>3</sup>/minuto (0,10 m<sup>3</sup>/s).

La norma, además indica que en el caso de utilizarse equipos con motor diesel, la cantidad de aire circulante no debe ser menor de 3 m<sup>3</sup>/minuto (0,05 m<sup>3</sup>/s) por cada hp de potencia de motor.

La norma peruana contempla que en los frentes de explotación, desarrollo y en todo local con presencia de personal la velocidad no deberá ser menor que 20 m/minuto (0,33 m/s) ni superior a 250 m/minuto (4,17 m/s). En el caso de usar explosivo ANFO u otros agentes en el desmonte, la velocidad del aire no debe ser menor que 250 m/minuto (0,417 m/s) (Cuadros 3.50 y 3.51).

Para el uso de *equipos con motor diesel* el caudal de aire recomendado varía de 6,9 m<sup>3</sup>/s a 7,9 m<sup>3</sup>/s por cada 100 KW, para una altitud de 3000 metros por encima del nivel del mar (Calizaya, F. *et al.*, 1999).

### 3.4.5 Matriz base para la identificación del impacto ambiental dinámico y volumétrico

Basado en las normas de Portugal (Decreto-ley n.º 162/90), del Perú (D.S. n.º 128-2001-EM-DGM) y en los estándares de los E.U.A. determinados por MSHA se elaboró la matriz base para la identificación del impacto ambiental dinámico (velocidad) y volumétrico (caudal) en tres niveles: *leve*, *moderado* y *alto* (Cuadro 3.52).

Cuadro 3.52 Matriz base para la identificación del impacto ambiental dinámico y volumétrico (basado en normas de Portugal, Perú y E.U.A.)

Tipo de impacto	Niveles de impacto ambiental		
	Leve ▽	Moderado ⊗	Alto ◆
Dinámico (m/s) V	0,2 o 0,25 > V ≥ 0,15 4,17 o 8 < V ≤ 9	0,15 > V ≥ 0,10 9 < V ≤ 10	V < 0,10 V > 10
Volumétrico (m <sup>3</sup> /s) Q	q* > Q ≥ 0,9q*	0,9q* > Q ≥ 0,7q*	Q < 0,7q*

\* q : Caudal de aire mínimo permitido por el Decreto-ley n.º. 162/90 (Portugal) y el Decreto Supremo n.º 128-2011-EM-DGM (Perú)

El caudal mínimo q (m<sup>3</sup>/s) indicado en el Cuadro 3.52 es determinado mediante la ecuación (3.73) definido por el valor límite admisible del caudal  $VLA_h$  (m<sup>3</sup>/s.hombre), por la cantidad de hombres N (hombres), por el valor límite admisible para equipos con motor a diesel  $VLA_d$  (m<sup>3</sup>/s.hp) y por la potencia del motor de equipo a diesel  $P_m$  (hp).

$$q = VLA_h N + VLA_d P_m \tag{3.73}$$

### 3.4.6 Medidas correctivas para reducir el impacto ambiental aerodinámico

En la hipótesis de que el caudal total de aire fresco sea suministrado por ventilación natural es necesario hacer un monitoreo frecuente a lo largo del año, pues debido a las alteraciones de la temperatura exterior, puede ocurrir un cambio en el sentido, velocidad y caudal del aire de la atmósfera subterránea, fenómeno que causa un problema ambiental dinámico y volumétrico; en esta situación, o cuando la ventilación natural no proporcione el caudal mínimo requerido a todos los frentes de trabajo, la solución o medida correctiva es la aplicación de sistemas de ventilación forzada (ventiladores), pudiendo transformarse en ventilación mixta (fig. 3.45).

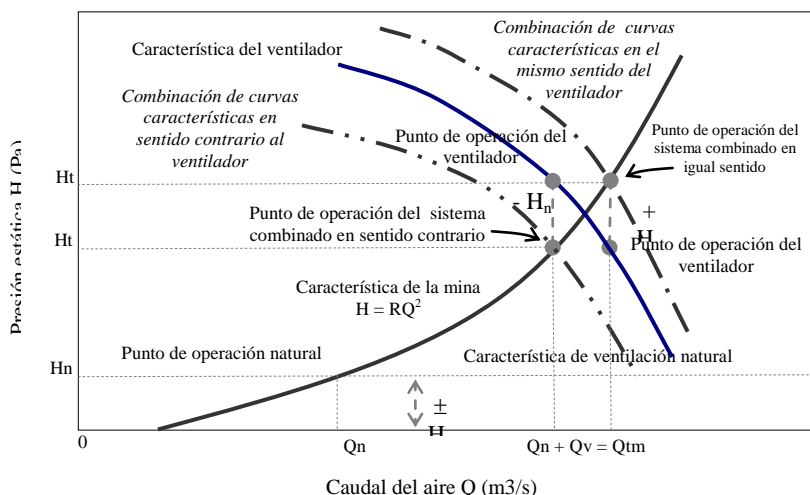


Figura 3.45 Operación de ventilador asociado con ventilación natural (basado en Turcic, P.M., et al., 1982)

En condiciones que no sea posible una ventilación natural es necesario utilizar la técnica de la ventilación forzada mediante ventiladores (centrífugos, axiales o radiales).

La selección del tamaño y del número de ventiladores se basa en la curva característica de la mina o ambiente subterráneo y la curva característica del ventilador (fig. 3.46). La curva característica de la mina o ambiente subterráneo se define por la ecuación (3.61) y la del ventilador es propia del dimensionamiento del equipamiento, por consiguiente es suministrada por el fabricante.

La capacidad volumétrica  $Q_v$  y de carga  $H_v$  del ventilador son función de las características del equipo y del aire, que están determinados mediante las ecuaciones (3.74) y (3.75), respectivamente. En estas ecuaciones  $n$  es la velocidad de rotación del ventilador,  $D$  es el diámetro del ventilador y  $\rho_a$  es la densidad del aire.

$$Q_v = nD^3 \tag{3.74}$$

$$H_v = n^2 D^2 \rho_a \tag{3.75}$$

La potencia del motor de ventilador  $P_v$  (KW) necesaria para una medida correctiva se calcula con la ecuación (3.76), que está dada en función del caudal  $Q$  ( $m^3/s$ ), de la carga  $H_t$  (Pa) y eficiencia  $\eta$  del ventilador.

$$P_v = \frac{H_t Q}{1000\eta} \tag{3.76}$$

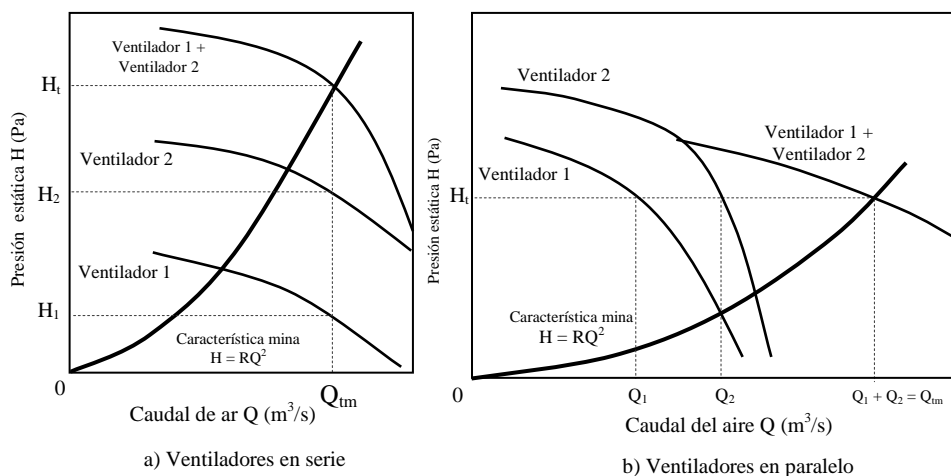


Figura 3.46 Curva característica de ventiladores en serie y paralelo en relación con la curva característica de la mina (basado en Turcic, P.M., et al., 1982)

En el proceso de análisis de alternativas en la búsqueda de medidas correctivas para atenuar el impacto ambiental dinámico y volumétrico, en redes de ventilación complejas, es recomendable usar programas de computación (VnetPC2000, Ventsim, Vuma, Mivena, etc.).

### 3.4.7 Monitoreo y control

El monitoreo y control del caudal y velocidad del aire en el ambiente subterráneo están relacionados con las mediciones a realizar en las redes de aire de la atmósfera subterránea, utilizando equipos debidamente calibrados y procedimientos (estándares) que garanticen la confiabilidad de los datos a obtener.

La base para el monitoreo de la velocidad y caudal de aire es la caracterización de la red o circuito de aire, formado por nudos, ramales, uniones y desuniones, en el sentido del flujo. Los nudos son representados con números y los ramales con flechas cuyo sentido indica la dirección del flujo del aire.

En el desarrollo de las redes de aire es importante distinguir entre las redes de aire fresco y el aire contaminado, localización de ventiladores, puertas de ventilación, cortinas, orificios equivalentes, etc.

Los *parámetros geométricos* que serán medidos en las aberturas subterráneas son: la sección, el perímetro y la longitud. Las *características físicas de las excavaciones* están relacionadas con el tipo de roca huésped, el revestimiento o tipo de soporte, nivel de obstrucción, grado de sinuosidad, curvatura, ángulo, contracción, expansión, ramificación, entrada, descarga y unión.

Los trabajos de monitoreo se deben planificar y realizar en tres etapas:

*1ª Etapa:* el trabajo es en gabinete y consiste en la elaboración de la red de aire preliminar identificando nodos (enumerados), tramos y sentido de flujo del aire, basado en los mapas topográficos existentes y en información del departamento de ventilación de minas. En esta etapa también es recomendable elaborar un plan y programa de monitoreo.

*2ª Etapa:* basada en la red preliminar y en el programa de monitoreo, se debe medir la velocidad del aire en todos los tramos identificados, usando un *anemómetro* debidamente calibrado, verificar el sentido del flujo, medir los parámetros geométricos y físicos de las aberturas subterráneas y registrar debidamente los datos.

*3ª Etapa:* los registros de las mediciones son consolidados para su procesamiento e interpretación de resultados. El análisis está relacionado con la identificación de los locales donde existe impacto ambiental dinámico y volumétrico, en la búsqueda de medidas correctivas para frentes con riesgo ambiental mediante el uso de programas de computación. La mejor alternativa técnico/económica será aplicada como medida correctiva en el caso de ser una acción inicial, o como medida de reajuste, en el caso de evaluar los resultados de una medida ya adoptada.

Para la parte de mediciones de los parámetros aerodinámicos del aire, existe una gama de equipos (Cuadro 3.53) desde el convencional hasta el más sofisticado y automatizado.

El sistema automático de adquisición de datos *Data Logger* es un equipo acompañado de sondas para mediciones de velocidad del aire, temperatura, presión atmosférica y humedad relativa, aplicable para mediciones en lugares donde no hay desplazamiento de equipos, dado que se pueden programar mediciones de largo tiempo (24, 48 o más horas) con intervalos de segundos o minutos. El aparato posee una memoria que le permite almacenar las mediciones previamente programadas, y

una vez concluido el monitoreo transmite los datos a un computador usando el programa DL.exe.

Conectando el equipo a un computador, este dispositivo permite observar en tiempo real, la tendencia de la presión barométrica, temperaturas y humedad relativa.

Cuadro 3.53 Instrumentos para medición de la velocidad y parámetros geométricos (Laboratorio de Ambiente Subterráneo del IST Lisboa)

Instrumento	Alcance de la velocidad (m/s)	Sensibilidad (m/s)	Precisión (%)	Característica
Anemómetros	Baja 0,1 – 0,6 Media 0,6 – 10 Alta 10 – 50	0,03 – 0,05 0,05 – 0,103 0,30 – 0,51	70 – 90 80 – 90	Digitales, necesitan calibración y mantenimiento. Uso general
Sondas Data Logger	0,1 - ?	Muy Buena	Muy buena	Posee sonda de velocidad, temperatura. Presión barométrica y humedad relativa. Posee software.
Tubo de Pitot	3,5 – 50	0,05 – 0,103	90 – 98	Para mangas de ventilación.
Distanciómetro, Cinta métrica, etc.	-	-	Muy buena	Para medición de parámetros geométricos.

La ingeniería ambiental subterránea orientada para la conservación de una adecuada calidad ambiental, según los estándares y normas relacionados a la velocidad y caudal, se basa en los conocimientos de la ventilación de minas, los que son aplicados en la caracterización de la situación aerodinámica de la atmósfera subterránea, identificación de niveles de impacto ambiental aerodinámico negativo y búsqueda de alternativas técnica y económicamente viables en el control y conservación de una calidad del aire aceptable. La fig. 3.47 ilustra el proceso sistémico, ordenado y secuencial de todas estas acciones que coadyuvan para una buena gestión ambiental.

### 3.5 Iluminación y radiación

#### 3.5.1 Efectos ambientales de la iluminación y radiación

La falta o deficiencia de la iluminación en el ambiente subterráneo produce riesgos de accidentes y detrimento en el rendimiento en las actividades laborales del hombre, afectando seriamente su seguridad.

Estudios realizados en una mina de carbón en Rusia indican que la introducción de lámparas fluorescentes, permitió aumentar la producción en un 3,5% y reducir los accidentes en un 40%.

De igual forma, la introducción de linternas con alimentación de energía mediante batería mostraron la influencia de la iluminación en el porcentaje de accidentes siguiente: 20 lux como referencia para 100%, 200 lux redujo un 68% y 250 lux un 58% (Austin, B.A., 1982).

La radiación en el ambiente subterráneo está asociada con la minería de uranio, en el cual la radioactividad de este elemento afecta el organismo humano, mediante la desintegración (ionización) radioactiva.

En el proceso del empobrecimiento del elemento primario de uranio  $^{238}\text{U}$  hasta plomo  $^{206}\text{Pb}$ , o radón  $^{222}\text{Rn}$  se descompone en un corto espacio de tiempo en el proceso de generación de otros elementos, comportamiento radioactivo este que es nocivo a la salud, produciendo cáncer en el organismo humano expuesto (generalmente los pulmones).

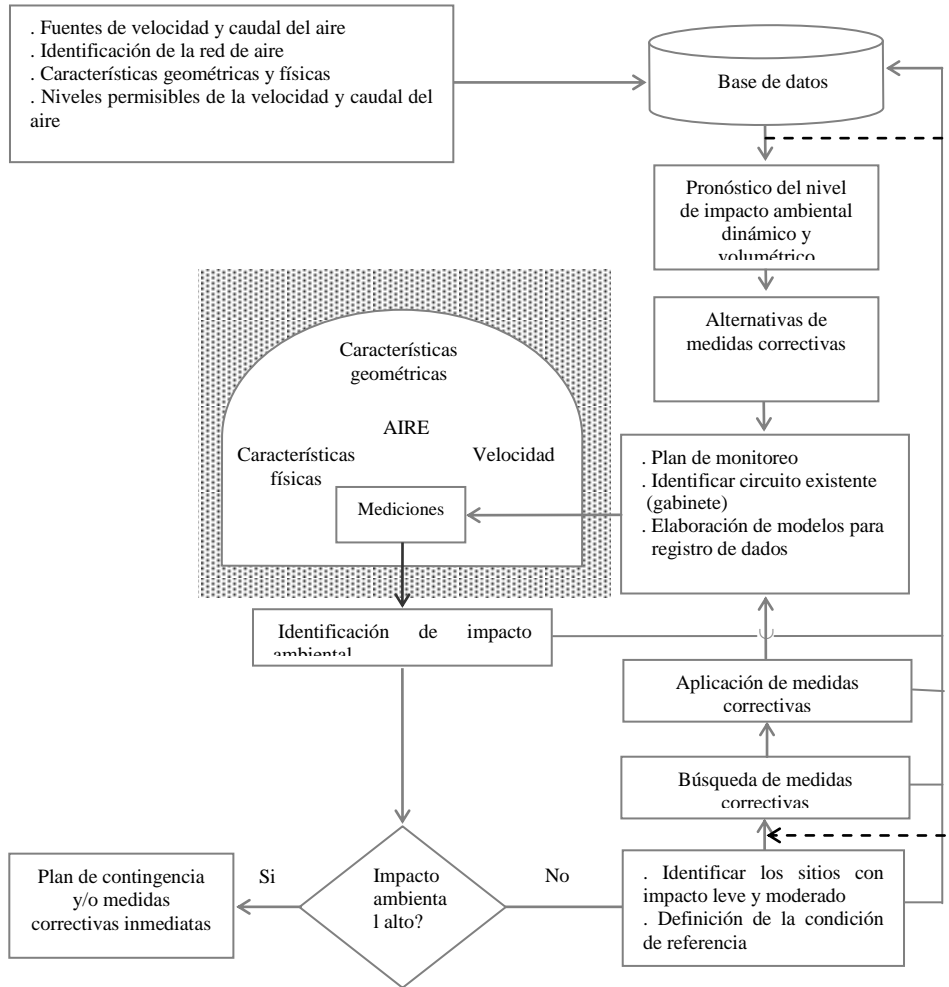


Figura 3.47 Sistema de gestión de la velocidad y caudal del aire en el ambiente subterráneo

### 3.5.2 Fuentes de iluminación y radiación

Las fuentes de iluminación utilizadas en el ambiente subterráneo son accionadas por energía eléctrica y entre las más usadas están: lámparas de filamento, lámparas fluorescentes, lámparas de vapor de sodio y lámparas de alta intensidad (Cuadro 3.54), que usan energía de 120 a 240 V.



Cuadro 3.54 Fuentes de iluminación en galerías subterráneas (elaborado basado en Vutukuri, V.S., *et al.*, 1986; Trotter, D.A., 1977)

Lámparas	Potencia	Luminosidad (cd/m <sup>2</sup> )	Vida útil (h)	Eficiencia (lm/W)	Costo (Base 1)
Filamento tungsteno	0,1W - 20W	10000-1000000	750 – 1000	10 - 15	7
Fluorescente	4W - 65W	50000-200000	500 – 30000	35 - 85	3
Vapor Hg	50W - 100W	100000-1000000	10000 – 24000	35 - 60	6
A alta presión	-	10000000	12000 - 24000	110 - 130	1
A baja presión	-	100000	10000-18000	-	5

La fuente de iluminación individual es la lámpara eléctrica de casco a batería. Estos acumuladores son de tipo ácido con autonomía máxima de 9 a 14 horas con 4 voltios de intensidad y usado en la parte frontal del protector o casco (fig. 3.48).



Figura 3.48 Lámparas individuales de casco ([http://www.msa.cl/fr\\_catalogo.html](http://www.msa.cl/fr_catalogo.html))

Como ejemplo se citan las linternas fabricadas por MAS (*Mine Safety Appliances Company*) que tienen una autonomía máxima de 14 horas (recomendable 9 horas), cable de 1,45 m (2,27 Ω/100 m) y batería de 4 volts (Cuadro 3.55).

Cuadro 3.55 Linternas personales a batería ([http://www.msa.cl/fr\\_catalogo.html](http://www.msa.cl/fr_catalogo.html))

Tipo de linterna	Lámpara		Peso de la batería
	Principal	Auxiliar	
MKIII	700 mA	450 mA	2,6 kg
Ultralight	1000 mA	1000 mA	1,5 kg
MLZ	1160 mA	1160 mA	1,5 kg

Las fuentes de radiación en minas de uranio están relacionadas con su propiedad de radioactividad o inestabilidad de la estructura atómica. El elemento primario uranio 238 (U<sup>238</sup>) cambia de número y masa atómica hasta alcanzar su estabilidad en plomo 206 (Pb<sup>206</sup>) (fig. 3.49).

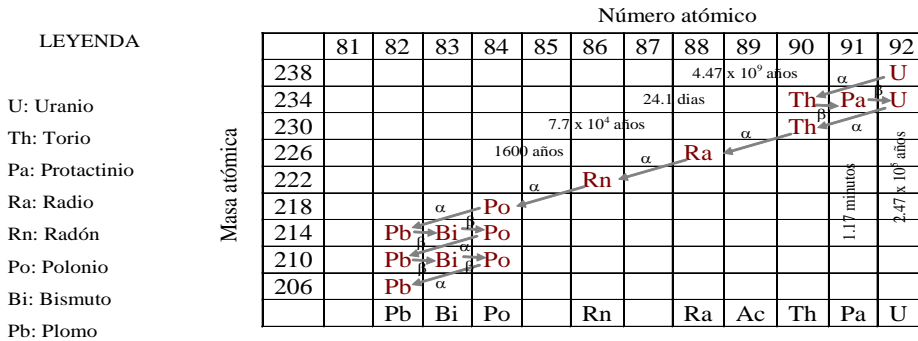


Figura 3.49 Serie de desintegración radioactiva del uranio

La fuente de radiación más peligrosa para la salud del hombre ocurre en el rápido proceso de la desintegración del gas radón Rn (Cuadro 3.56) cuya masa volumétrica es de 9,73 kg/m<sup>3</sup> a 0 °C y 100 kPa.

Cuadro 3.56 Ciclo de desintegración radioactiva del gas radón Rn (basado en Rose, H.J.M., 1982)

Elemento	Rn <sup>222</sup> <sub>2</sub>	Po <sup>218</sup>	Pb <sup>214</sup>	Bi <sup>214</sup>	Po <sup>214</sup>	Pb <sup>210</sup>	Bi <sup>210</sup>	Po <sup>210</sup>	Pb <sup>206</sup>
Desciende		RaA	RaB	RaC	RaC'	RaD	RaE	RaF	
Tiempo (minutos)	3,82 días	3,05 min	26,8 min	19,9 min.	164 μs	22,26 años	5,03 días	138,4 días	Estable
Emite		Alfa	Beta y Gama	Beta y Gama	Alfa				

Las *partículas alfa* (carga positiva) provocan daños en el sistema respiratorio cuando el aire es inhalado, mas no penetran a la superficie de la piel. Las *partículas beta* (carga negativa) penetran la superficie de la piel y generan daños en las células y órganos del cuerpo. La *radiación gamma* (electromagnética) produce una profunda penetración, mediante el proceso de ionización.

### 3.5.3 Caracterización ambiental de la iluminación y radiación

#### 3.5.3.1 Iluminación

Las formas de iluminación en el ambiente subterráneo son dos: iluminación fija y móvil.

La *iluminación fija* se realiza en las cámaras de los equipos o máquinas, en oficinas de mantenimiento y reparaciones, estaciones de bombeo, estaciones de winchas de extracción, estaciones de transporte de personal, estaciones de carga y descarga de mineral y estériles, puntos importantes de transferencia de mineral, sitios principales de transporte, estación de ventiladores, estación de trituración primaria, etc.

La *iluminación móvil* se utiliza en los frentes de trabajo, como en el caso de la excavación de pozos, chimeneas, rampas, galerías, tajeos, túneles, etc.

En el caso de la iluminación móvil, se necesitar tomar la debida precaución sobre los posibles daños que los disparos con explosivo pueden provocar a los reflectores que trabajan con 110 o 220 V, y generalmente son colocados a una distancia de 20 a 40 m.

Los equipos de uso subterráneo poseen lámparas alimentadas a 6, 12, 24 o 36 V y hasta potencia de 500 W.

Es recomendable que el personal que ingresa al ambiente subterráneo esté equipado con una lámpara alimentada por batería ácida (Cuadro 3.57) de 4V.

Cuadro 3.57 Características de las lámparas para iluminación personal  
(Austin, B.A., 1982)

Fuente de luz (A)	Tiempo de autonomía (h)	Tiempo de carga (h)
0,67	13,0	11,0
0,70	13,0	11,0
0,80	12,3	11,7
1,00	12,5	12,5

La velocidad de la luz  $V_l$  ( $3 \times 10^8$  m/s) está relacionada con la frecuencia  $f$  (Hz) y la longitud de onda  $C_o$  (m) que se expresa mediante la ecuación (3.77).

$$V_l = fC_o \quad (3.77)$$

La iluminación  $E$  ( $\text{lm/m}^2$  o lux) está determinada por la ecuación (3.78), basada en la intensidad luminosa de la fuente  $I$  (candela o cd) y la distancia entre la fuente luminosa y la superficie iluminada  $d$  (m).

$$E = \left( \frac{I}{d^2} \right) \quad (3.78)$$

La luminosidad  $L$  ( $\text{cd/m}^2$ ) se determina por la ecuación (3.79) que es función de la iluminación  $E$  y la reflectancia  $\varphi$  adimensional (Cuadro 3.58).

$$L = \frac{E\varphi}{\pi} \quad (3.79)$$

Cuadro 3.58 Valores de reflectancia  $\varphi$  de algunos minerales y rocas  
(basado en Trotter, D.A., 1977)

Mineral/roca	$\varphi$	Mineral/roca	$\varphi$
Esfalerita	0,05 – 0,22	Yeso	0,45 – 0,68
Talco gris	0,25 – 0,42	Carbón	0,02 – 0,20
Magnesita	0,85 – 0,95	Esquisto con clorito	0,05 – 0,42
Perotita oxidada	0,10 – 0,30	Esquisto con biotita	0,10 – 0,45
Perotita fresca	0,10 – 0,75	Caliza	0,35 – 0,55
Calcopirita fresca	0,32 – 0,70	Arcilla esquistosa	0,25 – 0,45
Calcopirita oxidada	0,10 – 0,27	Pizarra	0,28 – 0,45
Pirita	0,20 – 0,35	Cuarzo gris	0,35 – 0,50

El esquema de la fig. 3.50 muestra la forma como son emitidos los rayos de luz en la iluminación de la abertura subterránea. Las expresiones matemáticas

presentadas en las ecuaciones (3.80) a (3.85) sirven para determinar los parámetros de la iluminación.

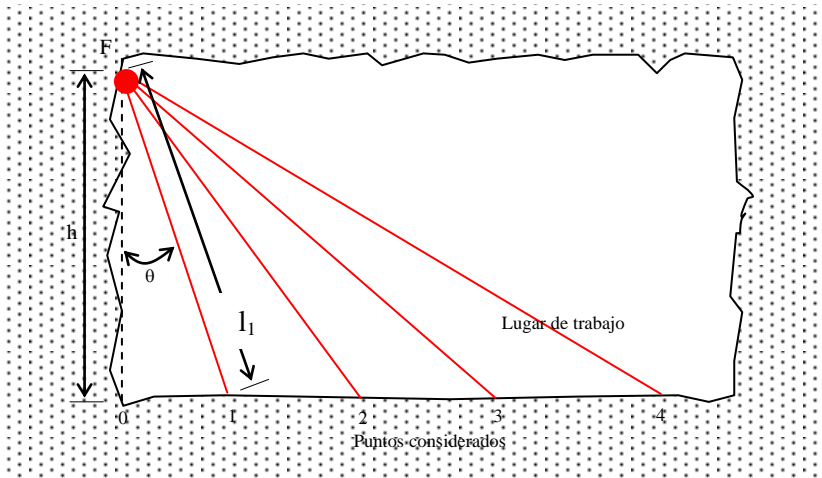


Figura 3.50 Esquema de abertura subterránea con fuente de iluminación F

$$E_o = \left( \frac{I_o}{h^2} \right) \tag{3.80}$$

$$E_1(\text{max}) = \left( \frac{I_o}{l_1^2} \right) \tag{3.81}$$

$$E_\theta(\text{planar}) = E_1(\text{max}) \text{Cos} \theta \tag{3.82}$$

$$l_1 = \frac{h}{\text{Cos} \theta} \tag{3.83}$$

$$E_\theta = \frac{I_o}{l_1^2} \text{Cos} \theta \tag{3.84}$$

$$E_\theta = E_o \text{Cos}^3 \theta \tag{3.85}$$

En estas expresiones:  $I_o$  es la intensidad de la fuente (cd),  $l_1$  es la distancia de la fuente al punto 1 (m),  $E_1$  (máx) es la máxima iluminación en el punto 1 ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ),  $E_\theta$  (planar) es la iluminación en el plano horizontal al punto 1 ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ) y  $\theta$  es el ángulo entre el lado vertical de la sección de la abertura y la línea de la luz de la fuente al punto 1 ( $^\circ$ ).

La luminosidad en la abertura subterránea (fig. 3.50), mediante procedimiento similar al anterior, se calcula mediante la ecuación (3.86).

$$L_\theta = \frac{I_o \text{Cos}^3 \theta \rho}{\pi h^2 (1 - \rho)} \tag{3.86}$$

### 3.5.3.2 Radiación

El uranio es usado como energía para reactores nucleares y principalmente para la generación de energía eléctrica. Comparativamente, la energía generada por un 1 kg de uranio equivale a la generada por 3000 t de carbón.

En el proceso de explotación mediante métodos subterráneos el hombre se expone a radiación, siendo la desintegración del radón el principal contaminante peligroso para el hombre.

La emanación de radón  $E_m$  (pCi/s), o sea en pico Curie por segundo, se determina mediante la ecuación (3.87) en función de la superficie expuesta  $S_e$  (m<sup>2</sup>) que es calculada por la ecuación (3.88) basada en la fig. 3.50 y la tasa de emanación  $R_e$  (pCi/m<sup>2</sup>s) que en muchos casos es próximo a 500 pCi/m<sup>2</sup>s.

$$E_m = S_e R_e \quad (3.87)$$

$$S_e = b(3a + c) \quad (3.88)$$

En ambiente subterráneo con presencia de uranio, cuando disminuye la velocidad del aire aumenta el tiempo de permanencia aumentando la concentración de los elementos radioactivos peligrosos (Rn), por lo tanto, es imprescindible mantener el ambiente con un caudal de aire adecuado.

El tiempo de permanencia  $T_p$  (s) e puede determinar con la ecuación (3.89) basada en el volumen de área de trabajo  $V$  (m<sup>3</sup>) y la emanación del radón ( $E_m$ ). El valor 1,85 es una característica constante del radón y radón hijos.

$$T_p = \left( \frac{86.4 \times 10^6 V}{E_m} \right)^{\frac{1}{1.85}} \quad (3.89)$$

El tiempo de permanencia  $T_p$  es el máximo tiempo en que la concentración del gas radón (desintegración) no sea excedida de 0,33 WL (*Working Level*) en un tramo determinado de la abertura subterránea (fig. 3.51 izquierda del punto A al punto B).

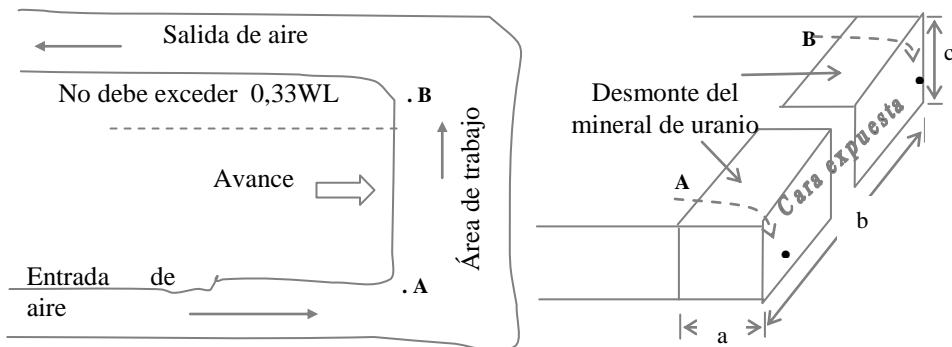


Figura 3.51 Dirección del flujo de aire y cara expuesta del mineral de uranio

WL indica el nivel de exposición del hombre a la radiación y se define como cualquier combinación que ocurre en el corto tiempo de vida de los productos radioactivos (Rn) en un volumen de 1 litro de aire, donde la energía para la desintegración de las partículas alfa hasta condición estable es de  $1,3 \times 10^5$  MeV (Mega electrón volts).

El caudal mínimo de aire  $Q_{\min}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) para mantener el ambiente con una concentración inferior a 0,33 WL se calcula mediante la ecuación (3.90) expresada en función del volumen de mineral de uranio desmontado  $V_d$  ( $\text{m}^3$ ) y el tiempo de permanencia  $T_p$  (s).

$$Q_{\min} = \frac{V_d}{T_p} \quad (3.90)$$

El nivel de exposición del hombre al ambiente con presencia de elementos radioactivos (Rn) es evaluado mediante la exposición mensual WLM (*Working Level Month*) y anual  $WLM_a$  (WLM/año) y se determina mediante la ecuación (3.91) o (3.92) en que están expresadas en función del tiempo de exposición del trabajador: semanas por año  $S_a$  (semanas/año); horas por mes  $t_m$  (h/mes); horas por semana  $t_s$  (h/semana), WL medio  $WL_m$  (mínimo aceptable 0,33 WL) y del tiempo máximo de exposición permisible por mes  $t_{pm}$  (h/mes).

$$WLM_a = \frac{S_a t_s WL_m}{t_{pm}} \quad (3.91)$$

$$WLM_a = \frac{t_m WL_m}{t_{pm}} \quad (3.92)$$

En circuitos de aire de los frentes de trabajo subterráneo después de la mezcla de aire de diversos sitios el  $WL_f$  (*Working Level* final) se puede calcular mediante la ecuación (3.93).

$$WL_f = \frac{(Q_1 WL_1) + (Q_2 WL_2) + \dots etc.}{Q_f} \quad (3.93)$$

En que:  $Q_1$  es el caudal en el ramal 1,  $WL_1$  es el Working Level en el ramal 1,  $Q_2$  es el caudal de aire en el ramal 2,  $WL_2$  es el Working Level en el ramal 2,  $Q_f$  es caudal total después de la mezcla.

### 3.5.4 Normas y estándares de iluminación y radiación

#### 3.5.4.1 Normas y estándares de iluminación

La iluminación típica medida en más de 19 minas de Suráfrica (Austin, B.A., 1982) muestra los siguientes resultados: subestación eléctrica 82 lux; correa transportadora 64 lux; estación de bombeo 56 lux; estación de pozos 48 lux; oficina de mantenimiento y reparaciones 44 lux; estación de guinchos 27 lux; transporte 8 lux; y tajeos 3 lux.

El estándar de iluminación varía de un país a otro (Cuadro 3.59) entre 15 a 70 lux para fondos de pozo, entre 20 a 80 lux para la estación de máquinas, bombeo, etc., entre 2 a 20 lux en áreas de transporte, entre 4 y 40 lux para puntos de descarga, entre 70 y 270 lux para las oficinas de la mina y entre 20 a 270 para las áreas de reparaciones y mantenimiento.

En Portugal los artículos 83 y 84 del Capítulo XI del Decreto-ley n.º 162/90 del 22 de mayo consideran que deben estar adecuadamente iluminados, de preferencia con energía eléctrica, los siguientes sitios: vías de gran movimiento, garajes y estaciones de carga de baterías o de abastecimiento de combustible, área de pozos, sitios de capacitación, intersecciones principales, comedores e instalaciones sanitarias y sitios con instalaciones fijas.

En relación a la iluminación individual la norma indica que el personal debe utilizar de preferencia lámparas eléctricas de casco y estar permanentemente acompañados con este equipo, con carga para período normal de trabajo.

Cuadro 3.59 Estándares de iluminación mínima en el ambiente subterráneo expresado en lux (lm/m<sup>2</sup>) (Vutukuri, V.S. *et al.*, 1986)

País	Fondo del pozo	Estación de máquinas bombas, etc.	Áreas de transporte	Puntos de descarga de material	Oficinas en mina	Áreas de reparación y mantenimiento
Australia	20	20		20	100	
Bélgica	20	25	10	20	270	270
Canadá	50	50	20			
Checoslovaquia	15	20	5	20		
Alemania	30	80	15	4		
Hungría	60	20	2	40		20
Polonia	50	50	2	15		50/100
UK	70	30		30	60	50/150
Superficie	100	100	100	100	400	400

En Perú los Artículos el *Reglamento de Seguridad e Higiene Minera*, considera que deben ser iluminados adecuadamente los siguientes sitios: galerías de transporte vertical y horizontal, estación de bombeo, sala de guinches de extracción, tolvas, almacenes, oficinas, intersecciones principales de galerías y otras instalaciones de carácter permanente o que sean causa potencial de accidentes.

La iluminación individual en la norma peruana indica que es obligatorio dotar de iluminación adecuada a los trabajadores, debiendo estar en perfecto estado de funcionamiento y protección, manteniendo en reserva una cantidad no inferior al 10% de las lámparas en servicio.

### 3.5.4.2 Normas y estándares de radiación

En la mayoría de los países productores de óxido de uranio la concentración máxima anual permisible es de 4 WLM y la máxima permisible por trimestre de 2 WLM.

La WNA (*World Nuclear Association*) mediante la *Seguridad Ocupacional en la minería del uranio* considera un límite de exposición ocupacional de 20

mSv/año calculado sobre cinco años consecutivos. Los límites de exposición al público de las actividades relacionadas con la radiación se fijan en 1 mSv/año, que es menor que el fondo (o “background”) medio de la radiación en el ambiente ([www.world-nuclear.org/index.htm](http://www.world-nuclear.org/index.htm)).

Según el ICRP (*International Committee on Radiological Protection*) el estándar recomendado para el público es de 1mSv (100 milirems) de exposición máxima anual ([www.anawa.org.au/health/standards.html](http://www.anawa.org.au/health/standards.html)).

La MSHA de E.U.A. ([www.msha.gov/](http://www.msha.gov/)) define que las personas no deben estar expuestas al aire que contenga concentraciones de los hijos del radón que excedan 1,0 WL (*Working Level*, 1 WL = 200 pCi/l en el aire, pCi/l = picocuries/litro) en funcionamiento activo y de 10 WL (10 mrem/año) de gas Rn.

En Australia ([www.antenna.nl/wise/uranium/ruxfw.html#std](http://www.antenna.nl/wise/uranium/ruxfw.html#std)) el estándar aplicable de la dosis de la radiación para trabajadores es 20 mSv/año (calculado sobre el promedio de unos 5 años), y el riesgo fatal de cáncer es 0,04 por Sv, de acuerdo con [ICRP60] Australia.

La EPA de E.U.A. ([www.epa.gov/radiation/yucca/regs.htm](http://www.epa.gov/radiation/yucca/regs.htm)) considera que las emisiones de radón-222 al aire ambiental de una mina subterránea de uranio no excederán aquellas cantidades que harían que el público recibiría cualquier año un equivalente a la dosis efectiva de 10 mrem/año.

En la práctica, el polvo es la principal fuente de exposición de radiación en una mina de uranio. El valor típico de exposición es de aproximadamente 2 mSv/año para uno o dos trabajadores. Realmente, los niveles de radiación de mineral y de los estériles son generalmente bajos por lo que sería difícil que un trabajador tenga una dosis próxima de la anual permisible. En una mina subterránea un sistema de buena ventilación puede diluir la radiación hasta una media inferior a 1 mSv/año.

Los estándares establecidos en Canadá consideran un estándar de 3 mSv/año para trabajadores en minas de óxido de uranio.

### 3.5.5 Matriz base para la evaluación ambiental debido a la iluminación y radiación

Para la identificación del nivel de impacto ambiental debido a la iluminación y la radiación en el ambiente subterráneo se propone la utilización de la matriz presentada en el Cuadro 3.60, donde  $I_s$  es la iluminación medida en el ambiente subterráneo (lux),  $I_{mp}$  es la iluminación mínima admisible por la norma o estándar (lux),  $R_s$  es la radiación identificada en el ambiente de trabajo subterráneo (WLW, WL o mSv/año) y  $R_{mp}$  corresponde a la exposición máxima de radiación definida por las normas o estándares (WLW, WL o mSv/año).

Cuadro 3.60 Matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental debido a la iluminación y radiación

Nivel de impacto	Iluminación	Radiación
Leve	$I_{mp} > I_s \geq 0,9 I_{mp}$	$R_{mp} < R_s \leq 1,1 R_{mp}$
Moderado	$0,9 I_{mp} > I_s \geq 0,8 I_{mp}$	$1,1 R_{mp} < R_s \leq 1,2 R_{mp}$
Alto	$0,8 I_{mp} > I_s$	$1,2 R_{mp} < R_s$



### 3.5.6 Medidas correctivas

#### 3.5.6.1 Para la iluminación

En el caso de la iluminación fija, la medida correctiva consiste en colocar las lámparas con la potencia o intensidad adecuada (admisible) para cada sitio destinado a un fin específico (estación de bombas, extracción, oficinas, talleres, punto de descarga de mineral, etc.) y en distancias o trechos que permitan conservar la iluminación mínima admisible en el local determinado.

Para determinar la cantidad de lámparas  $Q_l$  a instalar en una galería subterránea puede ser usada la ecuación (3.94) en función de la luminancia  $E$  (lux), sección a iluminar  $S$  ( $m^2$ ), factor de depreciación  $\delta$  (1,2), coeficiente de utilización  $\mu$  y flujo luminoso de la lámpara  $\varphi$  (lumen).

$$Q_l = \frac{ES\delta}{\varphi\mu} \quad (3.94)$$

#### 3.5.6.2 Para la radiación

Como medida de precaución el personal expuesto a la radiación debe utilizar máscaras de protección equipadas con filtro especial, que existen en el mercado.

Una medida correctiva para la atenuación del impacto ambiental por la radiación es mediante la ventilación aplicando un caudal adecuado de aire  $Q_2$  ( $m^3/s$ ) que puede ser calculado por la ecuación (3.95).

$$Q_2 = Q_1 \frac{Rn_1}{Rn_2} \quad (3.95)$$

En que:  $Q_1$  es el caudal de aire existente ( $m^3/s$ ),  $Rn_1$  es la concentración de radón existente y  $Rn_2$  es la concentración mínima de radón que se necesita obtener (estándar).

De forma similar, para diluir los elementos producto de la desintegración de radón (radón hijo) mediante sistema de ventilación es necesario proporcionar un caudal de aire  $Q_2$  ( $m^3/s$ ) que se puede calcular por la ecuación (3.96).

$$Q_2 = Q_1 \left( \frac{WL_1}{WL_2} \right)^{\frac{1}{1.85}} \quad (3.96)$$

En que:  $WL_1$  es la condición de concentración existente de radiación ( $WL = Working Level$ ) y  $WL_2$  es la concentración mínima que se desea obtener en este ambiente (estándar).

Como ejemplo se ilustra en la fig. 3.52 un circuito de aire en paralelo y en serie donde se pretende controlar la radiación en los ramales 1 y 2.

Aplicando la ecuación (3.96) el WL en el ramal 1 alcanza 10,62 y en el ramal 2 el WL es de 0,05. El resultado de la mezcla de aire en la unión de estos caudales de aire aplicando la ecuación (2.93) el WL resultante es de 1,11 que

excede al WL mínimo permisible que es de 0,33. Por lo tanto, para obtener la concentración máxima admisible es necesario recalculer el caudal de aire utilizando la ecuación (2.95) resultando finalmente  $67,27 \text{ m}^3/\text{s}$ .

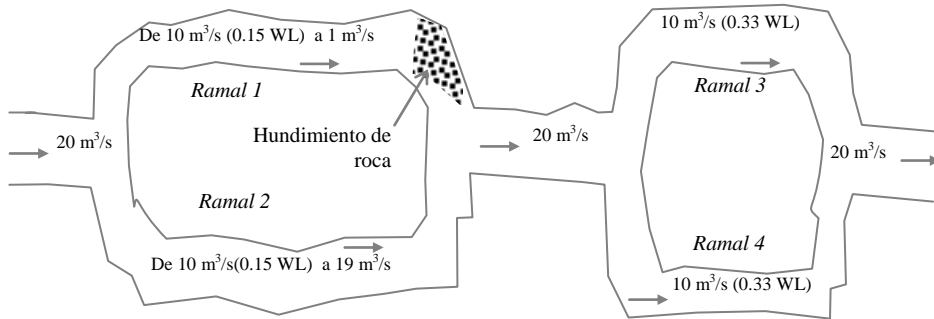


Figura 3.52 Esquema de control de radiación mediante caudal de aire

### 3.5.7 Monitoreo y control

#### 3.5.7.1 Monitoreo y control de la iluminación

Para la medición de la iluminación y de la luminosidad en las aberturas subterráneas se necesita de sensores de luz (fotómetros). Estos fotómetros producen una curva de sensibilidad espectral similar al ojo del hombre.

Los sensores de luz se basan en el principio de conversión de energía de luz en energía eléctrica, que permite medir la iluminación y la luminosidad de luz.

Entre los fotómetros más usados se indican los de célula de selenio fotovoltaica (*Evans Electro selenium Ltd of England*), de fotodiodos de sílice con amplificación (*Tectronix Inc. of E.U.A.*).

En el monitoreo o medición de la iluminación se usan las técnicas siguientes:

- Medición planar, que consiste en la determinación de una malla (1m) y medir en la intersección de las líneas de la malla;
- Medición de valor máximo que consiste en la medición puntual de la luz.

Los resultados de las mediciones posibilitan definir los contornos denominados isolux, determinar el flujo total de la luz, dimensionar una lámpara adecuada y calcular la eficiencia del sistema.

El proceso de medición de la luminosidad, consiste en orientar el instrumento en dirección de la superficie previamente dividida en rejillas con intervalos de 0,6 m. La superficie cubierta en cada medición no debe ser superior a  $325 \text{ cm}^2$  (MSHA E.U.A.).

#### 3.5.7.2 Monitoreo y control de la radiación

La concentración de radiación en la atmósfera subterránea se mide mediante una muestra con un determinado volumen de aire, que pasa a través de un filtro de membrana o fibra óptica, de modo que, contando la alfa actividad después de la muestra, se determina el WL.

Otro método es *el Kusnetz*, que consiste en el paso de una muestra de aire (100 a 200 litros) a través de un filtro, accionando una bomba y después de 40 a 90 minutos se realiza el conteo de las partículas alfa. Este método tiene un error próximo a  $\pm 25\%$ .

Los instrumentos digitales son los que ofrecen mayor precisión en el monitoreo de la radiación, y son los denominados dosímetros, y en el mercado existen en tres tipos:

1. *Dosímetro termoluminescence*, que colecta los gases *radón hijos* en un filtro de papel, registrándose la radioactividad de alfa partículas en un material luminiscente;
2. *Dosímetro de film*, que mide la radiación directamente en el aire de la atmósfera subterránea, cuyo principio es la reacción química provocada por la sensibilidad de la película a la energía de la radiación y no necesita de bomba;
3. *Dosímetros electrónicos*, que colectan los gases de *radón hijos* en un filtro de papel a través de una bomba y la desintegración de las partículas alfa se registra electrónicamente proporcionando una lectura directa.

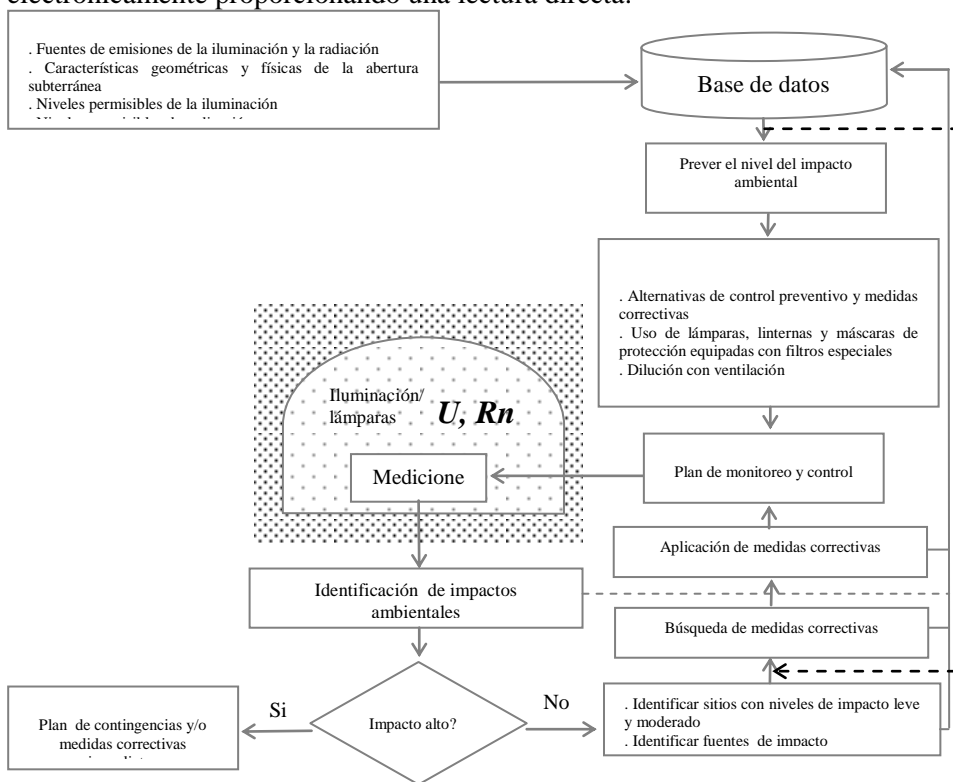


Figura 3.53 Sistema de gestión de la iluminación y radiación en el ambiente subterráneo

El monitoreo y control permite comprobar la efectividad de la medida correctiva y en caso necesario realizar las medidas de reajuste correspondientes.

La gestión de la iluminación y radiación en el ambiente subterráneo consiste en un proceso sistemático y secuencial (fig. 3.53) de las acciones que permitan obtener una calidad ambiental acorde con los estándares existentes.

Las acciones comprenden desde la caracterización de las fuentes de emisión de iluminación y radiación, de las dimensiones geométricas y condiciones físicas de la abertura subterránea; identificación de los sitios con impacto ambiental negativo debido a la iluminación y radiación (niveles de impacto); el estudio de las alternativas de prevención y de medidas correctivas, la aplicación de medidas de prevención y corrección y finalmente, realizar un monitoreo y control detallado y confiable para verificar la efectiva acción de atenuación o mitigación de la medida adoptada, de modo que se reduzcan los riesgos ambientales producto de la iluminación y radiación, según la calidad ambiental admisible.

### 3.6 Explosión e incendio

#### 3.6.6 Efectos ambientales de la explosión e incendio

La explosión está relacionada con la presencia de gases y polvo explosivos en el ambiente subterráneo que, en contacto con el oxígeno del aire y una fuente de ignición, generan ondas de choque primarias, como resultado de la explosión, siendo acompañadas por las ondas inversas (fig. 3.54) ocasionadas por la rápida disminución de la presión en el sitio. Las ondas inversas poseen una energía algo menor pero pueden tener efecto significativo y algunas veces hasta mayor que las primarias.

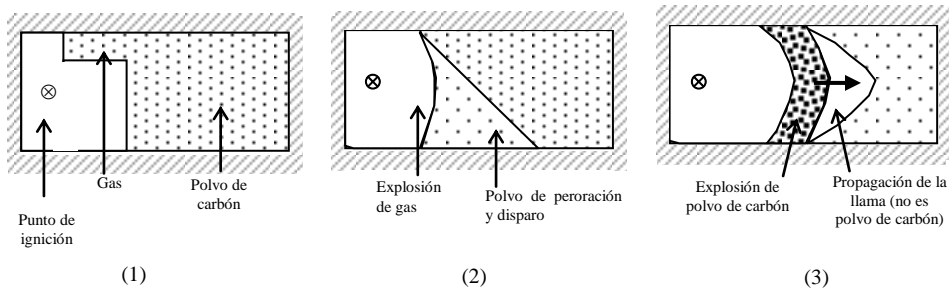


Figura 3.54 Proceso de desarrollo de la explosión (basado Vutukuri, V.S., et al., 1986)

Sustancias no combustibles o no inflamables en estado natural como el aluminio, el hierro, el azufre y el carbono, se pueden convertir en explosivos cuando están en el estado de polvo.

Los incendios están relacionados con la presencia de materiales combustibles (gases, líquidos o sólidos) que por la acción de una fuente de calor o ignición se inflaman, generando fuego a grandes temperaturas y emanando humos y gases tóxicos (CO) (fig. 3.55).

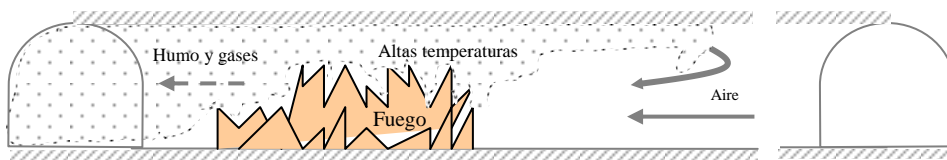


Figura 3.55 Fuego y emanación de humos y gases por incendios en el ambiente subterráneo

Las explosiones e incendios en las aberturas o minas subterráneas, generan efectos y consecuencias desastrosas en las operaciones y en la salud y vida del hombre, que se manifiestan en el aspecto dinámico, térmico e intoxicación por gas de monóxido de carbono (Cuadro 3.61).

Cuadro 3.61 Efectos y consecuencias de las explosiones e incendios en el ambiente subterráneo

Causas	Efectos y consecuencias ambientales
Dinámico	Dstrucción de los soportes de madera y puertas de ventilación, el giro del ferrocarril, daño a los equipos y caída de rocas.
Térmico	Incendio de los soportes de madera, correas transportadoras, puertas de ventilación. Alteraciones en la ventilación. <i>Quemaduras graves y mortales.</i>
Intoxicación por CO	<i>Muerte</i> de las personas que están en la proximidad de la explosión e incendio.

Las explosiones e incendios en el ambiente subterráneo están relacionados fundamentalmente con la existencia de gases y polvos explosivos que, por la presencia de oxígeno (aire) y a ciertas concentraciones, se tornan altamente explosivos e inflamables en ciertas concentraciones.

Los efectos y consecuencias fatales para la salud del hombre provocados por explosiones e incendios están relacionados con las quemaduras e intoxicación por el CO (Cuadro 2.62). De estos dos factores, la mayoría de las veces la muerte es provocada por la intoxicación (60 a 70% de víctimas).

A lo largo de la historia, ocurrieron muchas pérdidas de vidas humanas como consecuencia de las explosiones e incendios. Pozdnyakov, G.A. y Romachenco, S.B., (2001), basados en *Professional Mine Rescue Unit of the Russian Federation*, refieren que en Rusia de 1984 a 1998 entre todos los accidentes registrados, los provocados por explosiones representan de 5% a 7% (Cuadro 3.62). Por ejemplo, en 1997 ocurrieron 12 accidentes de explosión de polvo de carbón matando 105 mineros.

Cuadro 3.62 Accidentes por explosión de polvos de carbón en Rusia de 1994 a 1998 (Pozdnyakov, G.A; Romachenco, S.B., 2001)

Año	Total de accidentes	Accidentes por explosión de polvos de carbón
1994	220	11
1995	219	11
1996	199	8
1997	174	12
1998	157	7

En los E.U.A., los accidentes fatales en minas subterráneas por causa de explosiones e incendios llegan al 2,13% del total de los accidentes fatales registrados entre 1994 y 2000 (Cuadro 3.63).

Cuadro 3.63 Accidentes fatales en minas subterráneas y a cielo abierto entre 1994 a 2000 (disponible en <http://www.msha.gov/stats/review/2001/charts/chart2.pdf>)

Año	Subterráneas	Cielo abierto	Planta de procesamiento de minerales
1994	10	34	6
1995	8	41	4
1996	7	34	6
1997	10	42	9
1998	8	38	5
1999	13	35	7
2000	9	31	7

Drysdale, 1985 y Banerjee, S.C., 2000, revelan que en el Reino Unido y en los E.U.A. más del 60% de los accidentes fatales provocados por incendios, ocurren por la inhalación de humos y gases tóxicos y 40% por contacto directo con la llama.

A nivel mundial, las zonas de frecuentes accidentes fatales por explosiones e incendios ocurren en la India (*Basides, Ranigani y Signaren*), en los E.U.A. (*Kentucky, Pennsylvania and West Virginia, Colorado*), en Europa y Rusia (Inglaterra, Alemania, noreste de Francia, Polonia, República Checa, Ucrania), en África (*Suráfrica, Zimbabwe, Botswana, Mozambique y Zambia*), en Australia (*New South Wales y Queensland*) y en la China (*Kashi, Urumqi, Lanzhou, Sian, Bejín, Harbin*).

Registros de algunas catástrofes históricas de muertes de personas debido a la explosión de polvo de carbón muestran pérdidas de centenas y millares de vidas humanas y están descritos en el Cuadro 3.64.

Cuadro 3.64 Catástrofes históricas por explosión de polvo en minas

Año	Lugar	País o región	Cantidad
1906	Courières	Francia	1100
1942	Honkeiko	Manchuria	1500
1946	Monopolgrimberg	Alemania	400
1962	Luisenthal	Saar	299
1963	Miike	Japón	458
1972	Wankie, Zimbabwe	Suráfrica	426

Los efectos mortales en el hombre, por la acción de las explosiones e incendios son causados generalmente por la emisión de gases explosivos y principalmente el metano (CH<sub>4</sub>), por la concentración de polvo de carbón (C) o de pirita, estando el nivel de toxicidad siempre relacionado con la generación de monóxido de carbono (CO).

Adicionalmente a tales efectos, las explosiones y los incendios generan los gases CO<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas suspendidas que afectan la calidad del aire de la atmósfera subterránea y como consecuencia la vida de los hombres expuestos. Además estos efectos, pueden generar contaminación de las aguas y subsidencia de los macizos rocosos.

El metano en mezcla con el aire en la proporción de 5% a 15% se torna altamente explosivo (McPherson, M.J., 2001), en otras proporciones tiene una dificultad para la ignición y simplemente provoca una situación de molestia en el ambiente subterráneo.

Los mayores problemas de explosiones en minas subterráneas de carbón están relacionados con el polvo de carbón, que con 20% a 30% de volátiles son altamente peligrosos, pudiendo producir efectos dinámicos y térmicos mayores que los de grisú (metano).

### 3.6.2 Fuentes de la explosión e incendios

En la atmósfera subterránea, el polvo y gases explosivos (metano, polvo de carbón y polvo metálico) constituyen las principales fuentes de explosión que, en contacto con el oxígeno y una fuente de ignición provocan la explosión, pudiendo generar consecuentemente incendios.

Los informes de incendios en minas subterráneas indican que las principales causas de ignición están relacionadas con el uso de equipos eléctricos, la utilización de equipos de corte y soldadura con oxígeno y acetileno, los explosivos, la fricción, la acumulación de basura, el gas metano y las correas transportadoras (Cuadro 3.65).

Cuadro 3.65 Fuentes y causas que provocan explosiones e incendios

Fuentes que provocan la explosión e incendios	Causas
Trabajo de equipamientos	Producción de chispa por fricción y impacto con rocas como cuarzo, pirita, calcáreo, etc.
Desmante con explosivo	Defecto de explosor y mala práctica de uso de explosivos y accesorios
Electricidad	Corto-circuito, defectos del equipamiento y unión de cables eléctricos

Registros estadísticos de los E.U.A. (<http://www.msha.gov/>) entre los años 1989 y 1998 (fig. 3.56) muestran que la mayor fuente de ignición que ocasionaron explosiones e incendios en las minas subterráneas de carbón fue la electricidad.

Se observa también que 78% de los incendios tuvieron como fuente factores externos y solo 12% fue por combustión espontánea.

En Rusia aproximadamente 55 a 60% de los incendios en las minas de carbón fueron originados por alta inflamación y entre 40 a 45% debido a causas exteriores.

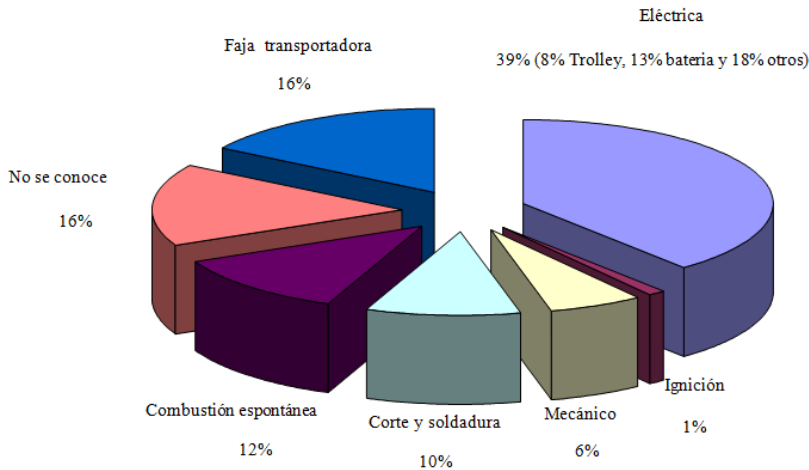


Figura 3.56 Fuentes o factores que provocaron incendios en minas subterráneas de carbón E.U.A. (disponible en <http://www.msha.gov/>).

### 3.6.3 Caracterización de las explosiones e incendios

#### 3.6.3.1 Explosiones

*Caracterización de polvos explosivos:* solo el polvo en forma aislada no explota sin la presencia de un agente oxidante (oxígeno) y una fuente de ignición.

Una condición principal para la explosión del polvo es que las partículas sean de tamaño pequeño (superficie) y permitan un fácil acceso de una suficiente cantidad de oxígeno para la combustión.

La explosividad de una partícula se caracteriza por la presión de explosión, por la sensibilidad a la ignición y por el coeficiente de explosividad.

El nivel de violencia de la explosión depende de la máxima presión generada en poquísimo tiempo (40 ms). La explosión de los polvos produce presiones próximas de 1 MPa a razón de 100 MPa/s.

El coeficiente de explosividad ( $K_{ex}$ ), se puede determinar con la tasa máxima del aumento de la presión ( $P_m$ ) y la tasa de aumento de la presión media ( $P_{mm}$ ) para un tiempo de un segundo y con la ecuación (3.97), determinados en ensayos de laboratorio (Holding, W., 1994).

$$K_{ex} = (P_m P_{mm})^{0.5} \quad \text{bar/s} \quad (3.97)$$

Polvos con  $K_{ex} < 70$  son considerados no explosivos, con valores de  $K_{ex}$  entre 70 y 95 presentan riesgo de explosividad y con  $K_{ex} > 95$  son explosivos, por consiguiente necesitan monitoreo constante.

El polvo de carbón explosivo tiene un tamaño menor a 240  $\mu\text{m}$ , que pasa por la malla de 60 mesh. La mínima concentración de propagación de polvo de carbón sin riesgo de explosión es de 50  $\text{g/m}^3$  y la máxima violencia de la explosión ocurre con concentraciones de 150 a 350  $\text{g/m}^3$ .



La velocidad de deflagración de las ondas de choque alcanza un valor de 1120 m/s a una presión de 1,36 MPa y la de detonación puede ser mayor que 2000 m/s con presiones de 5 MPa.

La concentración de polvo incombustible presente en el polvo de carbón ( $S$ ) se determina en función de su explosividad, que se expresa por el índice de explosividad ( $I_{ex}$ ) y mediante la ecuación (3.98). Este índice es utilizado como guía para el cálculo de polvo incombustible requerido.

$$I_{ex} = \frac{S}{100 - S} \quad (3.98)$$

Para el polvo de carbón el coeficiente de explosividad viene dado por la ecuación (3.99) en función del porcentaje de material volátil ( $vm$ ).

$$K_{ex} = 4.2vm + 3 \quad (3.99)$$

*Caracterización de gases explosivos:* Los gases explosivos presentes en la atmósfera subterránea de minas son principalmente el metano ( $CH_4$ ), hidrógeno ( $H$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ). De estos gases el que genera frecuentes catástrofes humanas es el metano presente en el gas grisú siendo la presencia del grisú prácticamente sinónimo de metano.

Los gases son usualmente clasificados en tres categorías: aire, gases combustibles (metano, hidrógeno, monóxido de carbono) y gases inertes (exceso de nitrógeno y exceso de bióxido de carbono).

La proporción de estas categorías de gases presentes en la atmósfera subterránea determina su nivel de explosividad caracterizada por el triángulo de Coward (fig. 3.57).

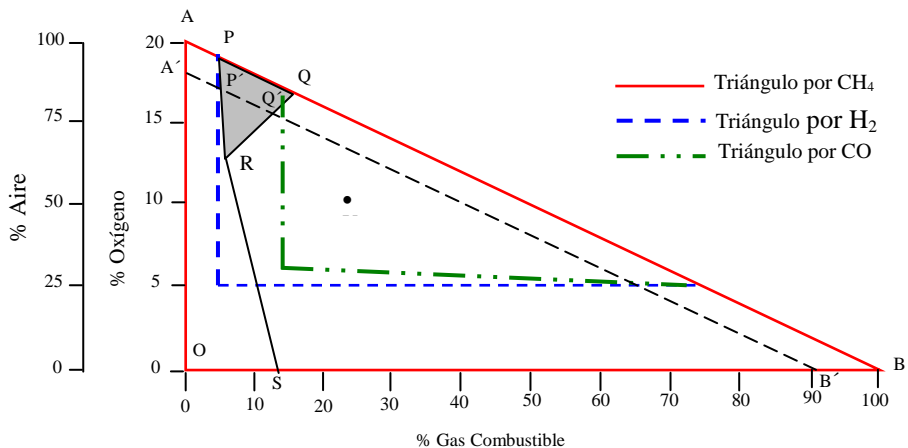
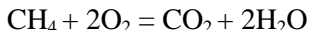


Figura 3.57 Triángulo de Coward para metano, hidrógeno y monóxido de carbono

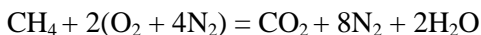
En el triángulo de Coward representado por la fig. 3.57, el punto P tiene 95% de aire y 5% de metano y constituye límite inferior de explosividad, en el punto Q existe 86% de aire y 14,5% de metano, siendo el límite superior de explosividad y en el punto R está presente 60% de aire y 6% de metano. Estos tres

puntos forman el triángulo PQR que representa gas explosivo resultante de la mezcla de aire con metano.



En condiciones normales el metano es inerte, la característica principal es su inflamabilidad y explosividad cuando se mezcla con el aire. Por combustión y explosión se transforma en agua y dióxido de carbono.

La combustión del metano sucede en mezclas con contenido de 5 a 6% de CH<sub>4</sub> (límite inferior) a 14 a 16% (límite superior), y en términos generales se puede referir entre 5% y 15% (McPherson, M.J. 2001). Con concentraciones menores que 5 a 6% el hecho de retirar la fuente inflamable paraliza la combustión, pero con concentraciones mayores que 14 a 16% de CH<sub>4</sub> la combustión sigue. El metano en mezcla con el oxígeno del aire al entrar en combustión y explosión genera la reacción química siguiente:



La explosión más débil ocurre con la mezcla de 9,5% de metano, o sea una relación de 1:11 en volumen (1 de CH<sub>4</sub> y 11 de aire, 2O<sub>2</sub> + 8N<sub>2</sub>). Con un contenido de CH<sub>4</sub> superior a 9,5% el oxígeno no es suficiente para quemar todo el CH<sub>4</sub> y la reacción conduce a la formación de CO y H<sub>2</sub>.



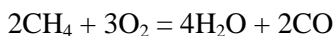
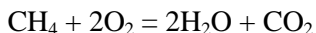
La temperatura de inflamabilidad del metano comparado con otros gases inflamables es alta (700 °C) y el límite de inflamabilidad varía entre 5 y 14,5% (Cuadro 3.66). La presencia de gases combustibles en la mezcla de aire y metano puede aumentar la explosividad.

Cuadro 3.66 Temperatura y límite de inflamabilidad de algunos gases comparados con el metano

Gas	Temperatura de inflamabilidad (°C)	Límite de inflamabilidad (%)
Metano	700	5 – 14,5
Etano	548	3,2 – 15,0
Propano	514	2,4 – 7,4
Hidrógeno	585	4,1 – 74,0
Óxido de carbono	685	12,4 – 75,0

### 3.6.3.2. Incendios

En los incendios ocurre un complejo proceso de oxidación de gases de material sólido, oxidación con emisión de calor y luz y finalmente combustión y generación de llama, que para el metano se puede representar mediante las ecuaciones a seguir:



El impacto ambiental de la atmósfera subterránea por causa de incendios está relacionado con el aspecto dinámico, térmico y de intoxicación provocado por el gas CO (fig. 3.58) que ya fue detallado en el Cuadro 3.61.



Figura 3.58 Gases y humo por la boca de la mina y chimenea, son el resultado de los daños provocados por los incendios en ambiente subterráneo

Los registros de incendios en minas subterráneas indican que las principales causas son el uso de energía eléctrica, de los equipos de corte y soldadura (acetileno y oxígeno), de los explosivos, de la fricción, de la acumulación de basura, de gas metano y de la correa transportadora.

*Equipos eléctricos:* los cables deteriorados pueden provocar la formación de cortocircuitos y como consecuencia el incendio, pudiendo producir combustión de madera y otros materiales y adicionalmente generar gases venenosos como el CO<sub>2</sub>, como por ejemplo, por la combustión de la cobertura de PVC de cable eléctrico.

También, la operación del sistema de transporte por locomotoras a batería o con trolley, puede generar incendio.

*Equipos de corte y soldadura:* el metal caliente y las escorias producidas en el proceso de la operación de corte causan incendios. Este aspecto es aún más peligroso cuando la operación de corte es hecha con material inflamable (acetileno y oxígeno) o en áreas próximas de explosivos, estaciones de aceite diesel (combustible) y tintas.

*Explosivos:* el almacenamiento de cajas de explosivos en ambientes donde se utiliza madera para soportes constituye también una fuente potencial para los incendios. Ciertos accesorios de detonación, en contacto con la madera pueden provocar incendios, como es el caso de cordón detonante, debido a su temperatura de combustión suficientemente elevada.

*Fricción:* La fricción provocada en el macizo rocoso o fragmentos de roca, resultado de la operación de acarreo, del movimiento de cables metálicos (acero), de la operación de corte, de la perforación o remoción de equipos, pueden ocasionar explosiones e incendios en el caso de existir gases explosivos e inflamables o material combustible (madera, etc.).

El calor generado por el sistema de embragues o frenos es suficiente para generar la ignición del petróleo y otros materiales (masa consistente). La fricción

causada por las telas transportadoras y sus sistemas de operación generan calor que puede ocasionar incendios.

*Acumulación de basura combustible:* alguna acumulación de residuos combustibles es fuente potencial de incendios, que puede ocurrir de forma espontánea.

*Metano:* la combustión o explosión de metano es una fuente potencial de incendio principalmente en minas de carbón. Los incendios causados por el gas metano provocaron grandes catástrofes en muchas minas de carbón en el mundo (Cuadro 3.67).

Las estadísticas de 22 años muestran que la mayor incidencia de incendios está relacionada con la combustión espontánea, seguida por el uso de equipos eléctricos, gas inflamable y otras fuentes, siendo por lo tanto importante la caracterización de estos aspectos.

Cuadro 3.67 Incidencias de incendios por 10 Mt de producción de carbón en minas subterráneas, con valores medios cada 3 años

(Con base en Holding, W., 1994)

Período	Incidentes por cada 10 Mt (Mega toneladas)				
	Combustión espontánea	Electricidad	Gas inflamable	Otros	Total
1970 – 1972	0,74	0,25	0,19	0,13	1,32
1973 – 1975	1,04	0,17	0,12	0,23	1,56
1976 – 1978	0,62	0,38	0,09	0,14	1,23
1979 – 1981	0,59	0,39	0,27	0,04	1,29
1982 – 1984	0,26	0,67	0,22	0,10	1,25
1985 – 1987	0,20	0,61	0,58	0,41	1,60
1988 – 1990	0,39	0,48	0,38	0,33	1,58
1991 – 1992	0,20	0,86	0,40	0,46	1,92
Total	0,505	0,476	0,281	0,230	1,492
%	33,85	31,90	18,83	15,42	100

El metano (CH<sub>4</sub>) es emanado durante la explotación de carbón, quedando retenido bajo presión entre la capa de carbón y la roca encajante. Este metano retenido es liberado en el proceso de explotación cuando el yacimiento de carbón es fracturado. El metano liberado de esta forma escapa del ambiente subterráneo de la mina y eventualmente a la atmósfera.

La mayor emisión global de metano (Cuadro 3.68) ocurre en los países con grande producción de carbón como es el caso de China, E.U.A e India.

Cuadro 3.68 Estimación global de la emisión de metano en minas de carbón (IPCC/OECD/IEA Programme on National Greenhouse Gas Inventories, E.U.A., 1996)

País	Producción de carbón (Mt)			Emisión de CH <sub>4</sub> (t)	
	Subterráneo	Superficial	Total	Menor	Mayor
China	1.024	43	1.066	9,5	16,6
E.U.A.	385	548	934	3,6	5,7
Rusia	393	309	701	4,8	6,0
Alemania	77	359	436	1,0	1,2
India	109	129	238	0,4	0,4
Polonia	154	58	212	0,6	1,5
Australia	52	154	206	0,5	0,8
Suráfrica	112	63	175	0,8	2,3
Checoslovaquia	22	85	107	0,3	0,5
UK	75	14	89	0,6	0,9
Total	2.042	1.762	4.164	22,1	35,9

La emisión de metano en minas subterráneas  $G_g$  (m<sup>3</sup>/hora) puede ser calculada utilizando la ecuación (3.100) recomendada por la IPCC (*International Panel on Climate Change*, 1996), basada en el factor de emisión  $E_f$  (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t) (Cuadro 3.69) y la cantidad de producción de la mina  $P_m$  (t/hora).

$$CH_4 = E_f P_m \quad (3.100)$$

Cuadro 3.69 IPCC factor de emisión  $E_f$  (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t) para minas subterráneas de carbón

Categoría	Baja	Alta
Explotación	10	25
Post-explotación	0,9	4

En las minas de carbón de los E.U.A., Australia, Alemania, Polonia y Checoslovaquia, para estimar la emisión de metano  $ECH_4$  (m<sup>3</sup>/t) se usa la ecuación empírica (3.101) obtenida con un coeficiente de correlación de  $r = 0,81$  que considera la profundidad media  $d$  (m) (Creedy, D.P. et al., 1996).

$$ECH_4 = 0,023d + 4.1 \quad (3.101)$$

La metodología para la previsión de los incendios en minas subterráneas puede basarse en los siguientes indicadores: *Graham Index* (GI), *Willet's Index* (WI), *Trickett Index* (TI), *Morris Index* (MI) y *Young's Index* (YI), calculados mediante las ecuaciones (3.102) al (3.107).

$$GI = \frac{100CO}{0.265N_2 - O_2} \% \quad (3.102)$$

$$WI = \frac{100CO_2}{(N_2 - 3.78O_2)(CH_4 + H_2 + CO) + CO_2} \% \quad (3.103)$$

$$TI = \frac{CO_2 + 0.75CO - 0.25H_2}{0.265N_2 - O_2} \% \quad (3.104)$$

$$TI = \frac{CO_2 + 0.75CO - 0.25H_2 + 0.5C_2H_4 + 0.25C_2H_6}{0.265N_2 - O_2} \% \quad (3.105)$$

$$MI = \frac{N_2}{CO + CO_2} \% \quad (3.106)$$

$$YI = \frac{CO_2}{O_2 \text{ deficiencia}} \% \quad (3.107)$$

Los índices GI y TI son los más usados cuyos valores típicos están indicados en el Cuadro 3.73.

La velocidad de combustión del carbón es posible calcular mediante el índice CCR (*Coal Combustion Rate*) expresado en las ecuaciones (3.108) y (3.109) (Giardino, D.A., 1999).

$$CCR = 0.021 \left[ \frac{M_{total}}{M_c} \right] \left[ \frac{\%CO_2 + 1.3\%CO}{100 - \%CH_4} \right] \left[ \frac{\left[ \frac{H}{C} \right]_s - \left[ \frac{H}{C} \right]_r}{\left[ \frac{H}{C} \right]_f - \left[ \frac{H}{C} \right]_r} \right] FR \quad (3.108)$$

Donde:

$$\left[ \frac{H}{C} \right]_s = \frac{1.073\%N_2 - 4\%O_2 - 4\%CO_2 - 2\%CO + 2\%H_2 + 2\%C_2H_2 + 4\%C_2H_4}{\%CO_2 - \%CO + C_2H_2 + 2\%C_2H_4} \quad (3.109)$$

En esta expresión, CCR es el índice de combustión del carbón (lb/minuto), FR es el flujo de aire en la zona de incendio (cfm),  $M_{total}/M_c$  es la relación de la masa total de carbón con la masa de carbono en el carbón obtenido del análisis final (1,13 – 1,28),  $(H/C)_s$  es la relación equivalente de hidrógeno como carbono resultante [calculado usando la ecuación (2.109)],  $(H/C)_f$  es la relación equivalente de hidrógeno con el carbono de carbón (0,50 – 0,68),  $(H/C)_r$  es la relación equivalente de hidrógeno y carbono de los productos de carbono/bituminoso (un valor 0,3 es usado en el cálculo), %  $CO_2$  es el porcentaje de bióxido de carbono, % CO es el porcentaje de monóxido de carbono, %  $N_2$  es el porcentaje de nitrógeno,  $O_2$  es el porcentaje de oxígeno,  $H_2$  es el porcentaje de hidrógeno, %  $CH_4$  es el porcentaje de metano, %  $C_2H_2$  es el porcentaje de acetileno, %  $C_2H_4$  es el porcentaje de etileno. Estas proporciones y porcentajes son el *resultado del análisis del gas*.

La aplicación de estas ecuaciones para un incendio en una mina de *Pittsburgh Coal Seam* resultó en 277 lb/minuto, mientras que una mina de carbón de Illinois dio un resultado de 60 lb/min (Giardino, D.A, 1999).

### 3.6.4 Estándares y normas

La explosividad de un polvo se expresa en términos de mínima temperatura o energía requerida para crear la ignición (Cuadro 3.70).

Comparativamente, el gas de metano necesita una energía mínima de ignición de 0,3 mJ y la mínima concentración explosiva es de 36 g/m<sup>3</sup>, mientras que el hidrógeno necesita de una energía mínima de ignición de 0,03 mJ y concentración mínima de 3,6 g/m<sup>3</sup> (Holding, W., 1994).

El límite de inflamabilidad del metano, monóxido de carbono y hidrógeno (Cuadro 3.71) se define por el triángulo de Coward (fig. 3.57).

Cuadro 3.70 Sensibilidad típica de ignición de polvos (Holding, W., 1994)

Polvo	Temperatura mínima de ignición (°C)		Concen-tración mínima (g/m <sup>3</sup> )	Energía mínima de ignición (mJ)	Máxima presión de explosión (kPa)	Máxima razón de explosión (kPa/s)
	Nube	Capa				
Carbón, 12% volátiles	670	240	-	-	-	-
Carbón, 25% volátiles	605	210	120	120	422	2799
Carbón, 43% volátiles	575	180	50	50	626	13600
Flúor	380	360	50	50	740	25200
Zirconio	20	220	45	5	510	74800

Cuadro 3.71 Límites de inflamabilidad de gases y vapores en el aire en condiciones normales de temperatura y presión (Triángulo de Coward y *Bureau of Mines Diagram* E.U.A., disponible en [www.multimedia.vt.edu](http://www.multimedia.vt.edu))

Gas	Límite de inflamabilidad (% volumen)		Límite de mezcla gas/oxígeno	
	Inferior	Superior	Gas	Oxígeno
Metano, CH <sub>4</sub>	5,0	14,0	5,9	12,2
Monóxido de carbono, CO	12,5	74,2	13,8	6,1
Hidrógeno, H <sub>2</sub>	4,0	74,2	4,3	5,1

Para otros gases que pueden estar presentes mezclados con el aire en minas subterráneas, los límites inferiores y superior están en el Cuadro 3.72 (Cook, A. P., *et al.*, 2000).

Cuadro 3.72 Límites de explosividad de gases comunes en minas subterráneas (Cook, A. P., *et al.*, 2000)

Gas	Símbolo	Límite inferior	Límite superior
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3,0	12,4
Propano	C <sub>2</sub> H <sub>8</sub>	2,1	9,5
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,8	8,4
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	4,0	44,0

Otros índices que pueden ser utilizados como estándar son los de Graham y Trickett (Cuadro 3.73) y las relaciones CO/CH<sub>4</sub> o CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> que son indicadores útiles. Valores mayores que 2% indican la posibilidad de inicio de incendio y entre 1 y 2% la ocurrencia de una combustión espontánea (Holding, W., 1994).

Cuadro 3.73 Valores típicos para los índices de *Graham* y *Trickett* (Holding, W., 1994)

<i>Graham Index</i> (GI)	<i>Trickett Index</i> (TI)	
	Incendio	Explosión
≤ 0,4 Normal	<0,4 Procesos sin combustión	0,50 Combustible de CH <sub>4</sub>
0,5 Anormal	0,4 – 0,54 Combustible solo CH <sub>4</sub>	0,87 Combustible de polvo de carbón
0 Probable calor	0,55 – 0,8 CH <sub>4</sub> y carbón	0,5 – 0,87 CH <sub>4</sub> y polvo de carbón
1 Calor serio	0,8 – 1,0 Combustible solo carbón	
2 Inicio de combustión	1,0- 1,6 Madera	
	> 1,6 Mezcla imposible	

### 3.6.5 Matriz base para la identificación del impacto ambiental debido a explosiones e incendios

Para identificar el nivel de impacto ambiental debido a explosiones e incendios en el ambiente subterráneo y para el caso particular de las minas de carbón, se propone la matriz presentada en el Cuadro 3.74, elaborada con base en los estándares indicados en los Cuadros 3.65 a 3.68.

Cuadro 3.74 Matriz para la identificación del impacto ambiental de explosiones e incendios en minas de carbón, P la concentración de polvo de carbón (g/m<sup>3</sup>) y G la concentración de gases (%)

Nivel de impacto	Polvo de carbón		Gases		
	25% volátiles	43% volátiles	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
Leve	120<P≤125	50<P≤55	5<G≤6	12,5<G≤13,5	4<G≤5
			14≥G>13	74,2≥G>73,2	74,2≥G>73,2
Moderado	125<P≤130	55<P≤60	6<G≤7	13,5<G≤14,5	5<G≤6
			13≥G>12	73,2≥G>72,2	73,2≥G>72,2
Alto	P>130	P>60	7<G≤12	14,5<G≤72,2	6<G≤72,2
			12≥G>7	72,2≥G>14,5	72,2≥G>6

Los valores de P y G deben ser resultado de la muestra y análisis de la concentración en un ambiente subterráneo determinado.

### 3.6.6 Medidas correctivas

#### 3.6.6.1 Para explosiones

Entre las técnicas utilizadas para controlar las explosiones en minas subterráneas están las barreras de polvo inerte y las barreras pasivas.

La *barrera de polvo inerte* es una técnica muy utilizada para mitigar o atenuar los problemas de explosión en minas de carbón. La técnica consiste en suspender en el techo de las aberturas subterráneas sacos de polvo inerte (fig. 3.59), de manera que con la acción de la onda expansiva inicial de choque se logren deteriorar los sacos de polvo inerte o entonces las llamas del incendio provoquen la combustión en estos sacos.



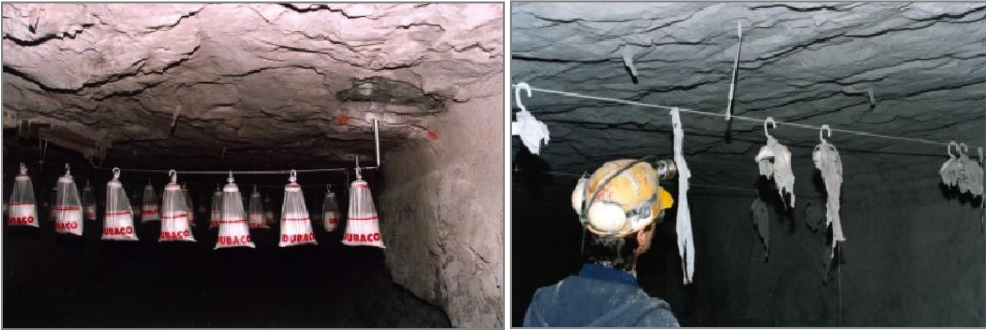


Figura 3.59 Barrera de polvo inerte en el techo de la abertura subterránea, antes y después de la explosión (Mina de carbón *Bulli Colliery*, *Illawarra Region*, *Australia*, 2002)

Una vez que el saco de polvo inerte se deteriora, el contenido se extiende y se unirá a la concentración del aire de la atmósfera subterránea conjuntamente con el polvo de carbón, diluyendo la concentración de este y de esta forma evitando la continuidad de las explosiones a otras áreas y consecuentemente el incendio.

La distribución de las barreras de polvo inerte, puede ser dimensionada de la forma definida por Du Plessis J.J.L. *et al.*, 1997. La cantidad de sacos de polvo inerte para cada barrera  $Q_{sb}$  (sacos/barrera) se calcula con la ecuación (3.110) con base en la longitud  $L$  (m) y la altura  $H$  (m) de la abertura, la distancia de protección  $D_p$  (100 m), la masa volumétrica del polvo inerte  $\rho_{pi}$  ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ), el peso de cada saco de polvo inerte  $P_{pi}$  (6 kg/saco) y el número de barreras  $N_b$ .

$$Q_{sb} = \frac{LHD_p \rho_{pi}}{P_{pi} N_b} \quad (3.110)$$

La distribución de los sacos se puede hacer con una distancia longitudinal y transversal de 2 m entre los sacos colgados (fig. 3.60).

La presión dinámica  $P_d$  (kPa) a que trabaja la barrera se determina con el sensor Kistler 9203 o similar (Du Plessis, J.J.L., *et al.*, 1997) y mediante la ecuación (3.111), en función de la presión total  $P_t$  (kPa) y la presión estática  $P_e$  (kPa).

$$P_d = P_t - P_e \quad (3.111)$$

La temperatura de explosión en la posición de la barrera  $T_e$  (°K) se puede estimar utilizando la Ley de *Stefan-Boltzmann* (Du Plessis, J.J.L., *et al.*, 2000) expresada por la ecuación (3.112), en función del flujo de calor  $Q_e$  ( $\text{W/cm}^2$ ) y la constante  $\varphi$  ( $5,67 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{K}^4$ ).

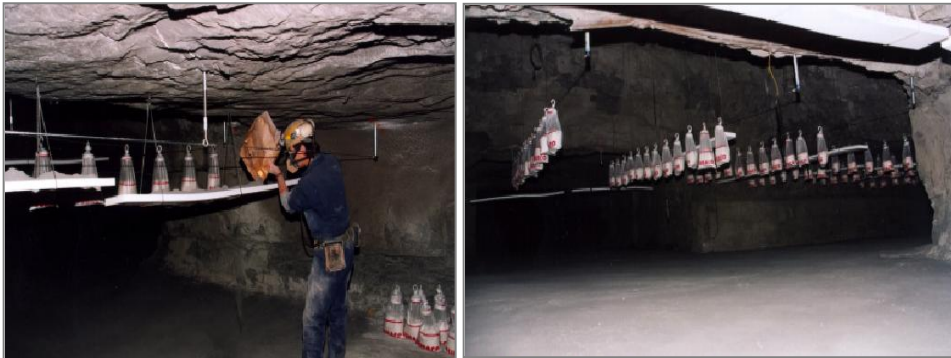


Figura 3.60 Distribución de los sacos de polvo inerte en el ambiente subterráneo (Mina de carbón *Bulli Colliery*, *Illawarra Region*, *Australia*, 2002)

$$Q_e = \varphi [T_e]^{\beta} \quad (3.112)$$

En algunos países también se utilizan barreras de agua, para explosiones con velocidad dinámica menor que 25 m/s.

Las barreras de polvo inerte o de agua tienen la desventaja de depender de la onda de choque para dispersar el polvo inerte o el agua, por lo que las *barreras de obstáculos* incorporan una fuente de energía interna.

Un proyecto típico de barreras con obstáculos consiste en un tanque de agua conectado a un dispositivo concentrado en la boca de la abertura subterránea y en zonas de corta longitud. Un diafragma del sistema impide el flujo del agua de tanque para sus bocas, en circunstancias normales de operación. Un frasco de bióxido de nitrógeno comprimido o de carbono se introduce dentro del tanque de agua.

Dentro del frasco de gas un calefactor hace que el gas se expanda y funcione el disco de ruptura. Esto causa la presurización muy rápida del agua, la rotura del diafragma del sistema y entrega de agua a alta presión en las bocas. Cerca de cien litros de agua se pueden dispersar en menos de un segundo. Algunos proyectos utilizan un combustible pulverizado en lugar del agua provista de un explosivo suave en vez del recipiente de gas.

La activación de una barrera de obstáculo se inicia por una señal eléctrica de un dispositivo detector situado cerca del área de funcionamiento, donde es más probable que una explosión empiece.

Los sensores infrarrojos y ultravioletas de la temperatura y de la presión son utilizados como dispositivos de detección. Además de la fuente de energía activa para dispersar el fuego, una ventaja de la barrera es que puede ser seleccionada a una distancia adecuada entre el sensor y la barrera. Esto asegura que la barrera esté activada en el momento correcto cuando la llama se aproxima.

### 3.6.6.2 Para incendios

Las medidas preventivas para los incendios, constituyen una buena práctica para evitar desastres de grandes dimensiones en minas subterráneas, sin embargo, cuando se detecta un nivel de impacto o riesgo de incendio las medidas de

mitigación o combate de incendios se pueden realizar mediante las siguientes técnicas:

a) Utilización de extintores químicos

*Espumas*, son una emulsión de un producto espumoso en agua, recomendable de aplicar a una distancia de 8 m y a una presión de 5 kg/cm<sup>2</sup>. Básicamente apaga por sofocación, al aislar el combustible del ambiente, ejerciendo también una cierta acción refrigerante debido al agua que contiene. Dependiendo de su uso, existen tres tipos de extintores de espumas:

- Extintor portátil, utilizado para pequeños incendios;
- Extintores con gran cantidad de espumas, aplicables a incendios mayores;
- Espumas con partículas sólidas, utilizadas para prevenir los incendios.

Generalmente las espumas son fabricadas con base en la reacción química siguiente:



*Polvo químico seco*, está constituido por sales químicas de diferente composición, capaces de combinarse con los productos descompuestos de combustible, paralizando la reacción en cadena.

Pueden ser de dos clases: *normal o polivalente*.

Los *polvos químicos secos normales* son sales de sodio o potasio, perfectamente secos, combinado con otros compuestos para dar fluidez y estabilidad. Son apropiados para fuegos de combustibles líquidos y de gases.

Los *polvos químicos secos polivalentes* tienen como base fosfatos de amonio, con aditivos similares a los anteriores. Además de ser apropiados para fuegos de líquidos y de gases, sirven también para sólidos, ya que cubren las llamas con una película que las sella, aislándolas del aire. No son tóxicos ni conducen electricidad a tensión normal, por lo que pueden ser usados en fuegos con presencia de tensión eléctrica.

b) Aplicación de agua

El agua es el medio más barato y más efectivo en la extinción de incendios, por su acción refrigerante debido a su alto calor latente (calor latente de vaporización del agua = 539 cal/g) y de evaporación.

El calor requerido para evaporar un kilogramo de agua a 20 °C es de 619 Kcal.

El agua debe ser aplicada a una distancia entre 3 m y 30 m con presión que no sea superior a 10 kg/cm<sup>2</sup>. Es recomendable usar aditivos como NaHCO<sub>3</sub>, KHCO<sub>3</sub>, NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>Cl, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, etc.

c) Emulsiones con agua

Son una mezcla de agua con arena/ceniza/barro/cemento y limo en proporción de 10:1, que actúa como barrera incombustible al ser aplicado en el yacimiento de carbón, utilizando barrenos o fracturas existentes.

d) Ventilación

La ventilación estratégica cumple un papel muy importante en la protección de la vida del personal y control de los incendios en aberturas subterráneas. Las

técnicas conocidas son diversas como el sistema de doble entrada de aire; la ventilación inversa y cortocircuito del incendio. Un incendio en una galería principal de la entrada es probablemente la mayor amenaza a la vida, debido a que habrá un mayor número de personas expuestas al humo y al fuego y, por consiguiente, un sistema de doble entrada de aire, puede reducir la pérdida de vidas.

La ventilación inversa reduce la exposición de personas al fuego y gases en el momento del incendio, a pesar de ser un poco complicada a su implementación práctica.

En algunas circunstancias puede haber algún mérito en el cierre de puertas para el paso del aire (fuego) para reducir la corriente de aire que alimenta el incendio. La concentración de los gases de incendio en una galería de retorno aumenta el cortocircuito, y que, dependiendo de la cantidad y del sentido del aire, podría revertir el flujo debilitado por el cortocircuito.

En minas mecanizadas de carbón explotadas por el método de cámaras y pilares es importante la utilización de ventiladores de chorro con manga suspendida en el techo de las cámaras, y para la generación de aire turbulento el uso de un regulador de la recirculación de aire y sistemas de control con ventiladores instalados en el CM (*continuous mining*).

Investigaciones realizadas sobre el uso de ventiladores de chorro muestran que son eficaces. Estos ventiladores pueden ser de dos tipos de flujo del aire: el modelo en "U" y el modelo denominado *figura 8* (Meyer, C. F., *et al.*, 1999) (fig. 3.61).

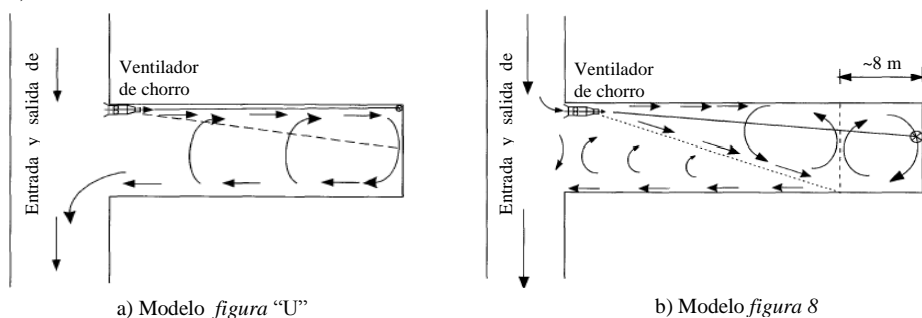


Figura 3.61 Modelos de flujo de aire usando ventiladores de chorro (Meyer, C. F., *et al.*, 1999)

El sistema de control mediante la recirculación de aire en los frentes de corte (desmote) está basado en el caudal de aire y localización de ventiladores (fig. 3.62 izquierda), pero tiene la desventaja de su alto costo. Para velocidades inferiores a 0,40 m/s el polvo no aumenta con la velocidad del aire, pero cuando la velocidad del aire excede los 4,0 m/s el polvo aumenta en proporción de la velocidad.

El sistema de control mediante ventiladores instalados en el CM se denomina también sistema de *cabeza húmeda* (fig.3.62 derecha) que se utiliza en la operación de corte de este equipo.

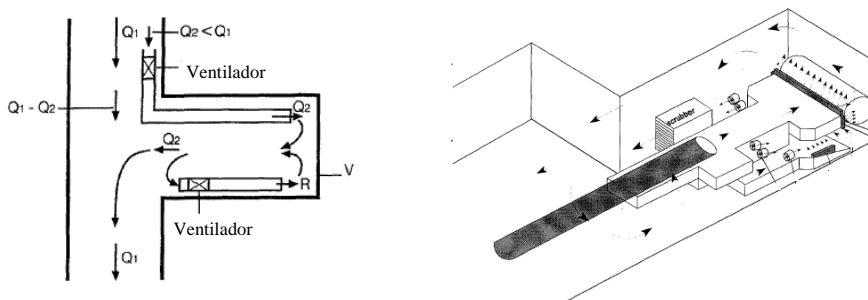


Figura 3.62 Sistema de control de la recirculación del aire y con ventiladores instalados en el CM (Meyer, C. F. et al., 1999)

Mediante el sistema de ventilador a chorro es posible controlar cámaras (que constituyen pasajes de aire) con anchura de 6 m a 10 m, y usando adicionalmente filtro (de aire) hasta más de 20 m. Es recomendable usar un chorro de agua instalado a 0,30 m con ángulo de 30° en el sitio y entre 10° a 20° en el tambor de corte (Meyer, C. F., et al., 1999).

Para la evaluación de la eficacia del sistema se utiliza el índice MSI (*Methane Safety Index*) que se determina mediante la ecuación (3.113) con base en la gradiente actual de metano (GAM) y la gradiente teórica admisible de este gas (GTAM).

$$MSI = \frac{GAM}{GTAM} \quad (3.113)$$

El índice *MSI* es un indicador de las condiciones de ventilación y niveles de riesgo ambiental en los frentes de corte (explotación) mediante equipo mecanizado como CM, cuyo ámbito de valores se indican en el Cuadro 3.75.

Cuadro 3.75 Situación de la ventilación y nivel de explosividad en la atmósfera de la zona de corte por MC en función del índice MSI (Meyer, C.F., et al., 1999)

Índice MSI	Situación ambiental
$MSI \leq 0$	La ventilación es buena en la zona de avance del MC
$0 < MSI \leq 1$	La ventilación aún conserva el metano dentro de límites admisibles
$1 < MSI \leq 3,5$	La ventilación no consigue diluir el metano a niveles permisibles. El valor 3,5 indica el límite inferior de explosividad del metano (5%).
$MSI > 3,5$	La operación de corte del MC debe parar, porque la atmósfera es explosiva en esta zona específica.

e) Cierre de aberturas

La técnica de cierre de las aberturas subterráneas tiene dos propósitos principales: evitar el ingreso de oxígeno a la zona del incendio y aislar el área para evitar la contaminación de otras áreas con gases y humos.

Dos aspectos muy importantes son frecuentemente usados en el cierre de áreas de incendio:

1. El flujo de aire se debe mantener hasta el último momento posible, a fin de tener control sobre los gases inflamables. La fluctuación del caudal y la presión no siempre afecta la dilución pero puede causar acumulación de gases.

2. Todos los ambientes con presencia de hombres necesitan el cierre de forma simultánea. Si no es así, el corte de la ventilación puede provocar explosión en las áreas que continúan el trabajo.

Cuando se cierra un área se filtra un poco de aire por la diferencia de presiones entre ambientes vecinos, esta corriente de aire puede retardar la extinción de fuego y en el caso de una combustión espontánea puede continuar el proceso de oxidación de forma indefinida. Los pasos para el equilibrio de presión se ilustran en la fig. 3.63.

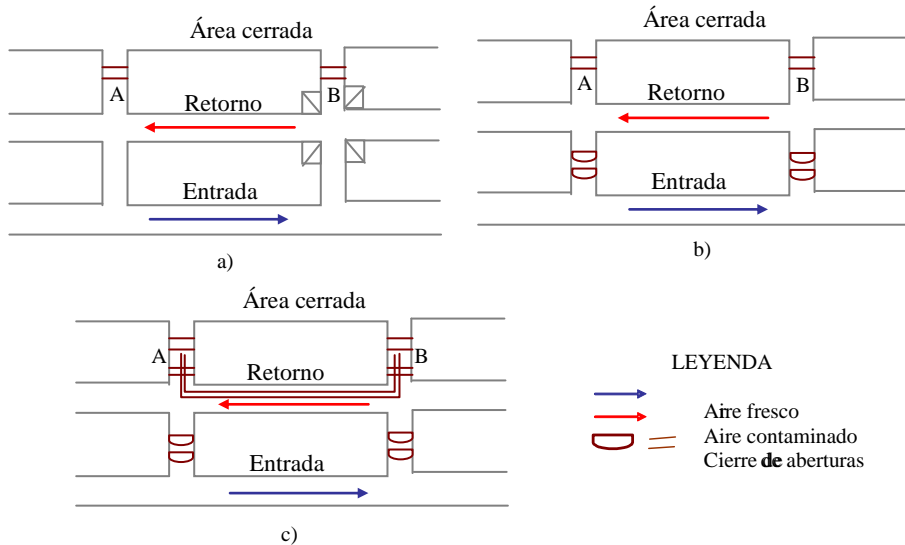


Figura 3.63 Equilibrio de presión mediante cierre de aberturas subterráneas para mitigar el incendio

En el caso a) la diferencia de presión entre A y B es entrada-retorno. En el caso b) la diferencia de presión es mucho menor, sin embargo la caída de presión es aproximadamente a lo largo del retorno de B a A. En el caso c) la diferencia de presión se reduce con el avance de dos frentes y la conexión de las cámaras.

### 3.6.7 Monitoreo y control

El monitoreo y control de las explosiones e incendios se realizan generalmente utilizando sensores o detectores de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, temperatura o mediante varios sensores. Los equipos pueden ser los mismos indicados en la sección 3.2 (gases).

En la actualidad existen dispositivos que pueden permitir detectar (monitorear) con precisión estos indicadores de explosiones e incendios.

El gas CO es detectado mediante un sensor de célula electrónica. La temperatura se detecta mediante un sensor que tiene una resistencia eléctrica y la

masa volumétrica de los humos se detecta mediante un detector de sistema de ionización.

Estudios realizados en E.U.A. por el Bureau of Mines (Conti, R. S., et al., 1995) permitieron determinar la ecuación (3.114) para determinar el caudal de aire  $Q_f$  ( $m^3/s$ ) que permite obtener una temperatura  $T_r$  próximo del techo de la abertura, a una distancia  $d$  de la parte central de la llama (m).

$$Q_f = \rho_o C_o v_o A_o \left[ \frac{T_r - T_o}{9} \right] d^{1.75} \frac{H}{W} \quad (3.114)$$

Donde:  $\rho_o$  es la masa volumétrica del aire ( $1,2 \times 10^3 \text{ g/m}^3$ ),  $C_o$  es la capacidad calorífica del aire ( $1,088 \times 10^{-3} \text{ kJ}^\circ\text{C/g}$ ),  $A_o$  es la sección de la abertura ( $m^2$ ),  $v_o$  es la velocidad del aire (m/s),  $T_o$  es la temperatura inicial del ambiente ( $^\circ\text{C}$ ),  $H$  es la altura de la abertura (m) y  $W$  el ancho (m).

Para estimar la generación de gas CO (ppm), Conti, R. S., et al., (1995) recomiendan utilizar la ecuación (3.115) en función de la constante de producción de monóxido de carbono  $K_{CO}$ , el caudal de aire  $Q_f$ , la velocidad del aire  $v_o$  y la sección de la abertura subterránea  $A_o$ .

$$CO(ppm) = \frac{K_{CO} Q_f}{V_o A_o} \quad (3.115)$$

La constante de generación del monóxido de carbono para el caso de incendios en las correas transportadoras  $K_{CO}$ , está expresada por la ecuación (3.116) en función de la velocidad del aire  $v_o$ .

$$K_{CO} = 4.8e^{-0.175v_o} \quad (3.116)$$

Cuando se detecta algún incendio o explosión en la atmósfera subterránea debe ser comunicado inmediatamente al responsable de la administración de los trabajos subterráneos, para tomar las medidas de evacuación del personal y medidas de control urgentes.

En el proceso de evacuación de personal es importante considerar los aspectos relacionados con los refugios en áreas seguras y rescate.

El objetivo de prever y atenuar los graves efectos de las explosiones e incendios en el ambiente subterráneo requiere de una gestión sistemática, secuencial y coordinada (fig. 3.64), desde la caracterización de las fuentes productoras de explosiones e incendios, identificación del nivel de impacto ambiental, búsqueda de medidas de prevención y correctivas viables técnica y económicamente, aplicación de la medida correctiva, y acompañamiento con monitoreo y control para evaluar el nivel de efectividad de la medida correctiva y cuando sea necesario reajustar.

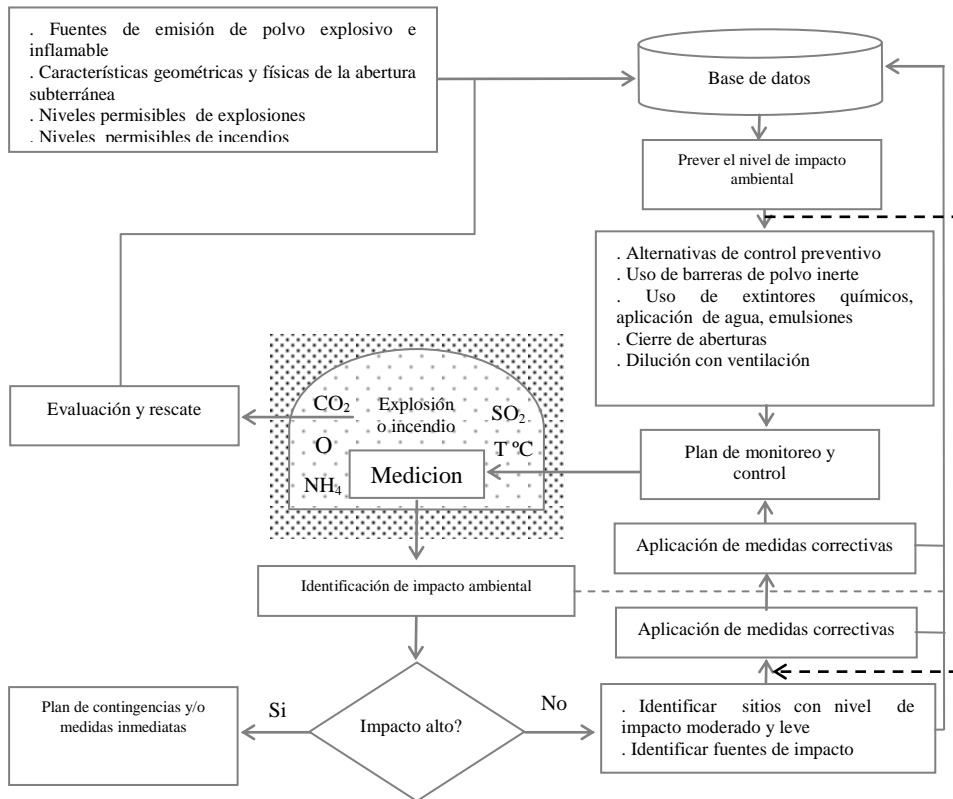


Figura 3.64 Sistema de gestión de explosiones e incendios en el ambiente subterráneo

### 3.7 El ruido en la atmósfera subterránea

#### 3.7.1 Efectos de la exposición al ruido

La contaminación sonora es una contaminación ambiental ocasionada por la energía mecánica o acústica, que tiene repercusión en todo el organismo humano y no solo en el aparato auditivo.

Los efectos provocados por las ondas sonoras en el organismo humano se pueden aclarar observando la fig. 3.65, donde la acción de las ondas sonoras al atravesar el oído se distribuyen por los lóbulos cerebrales hasta llegar al sistema nervioso central y de ahí a través de la médula se distribuyen por los órganos humanos. Los efectos nocivos se manifiestan en varias formas (fig. 3.65), dando origen a descargas hormonales y pérdida de la audición cuando la intensidad es demasiado elevada.



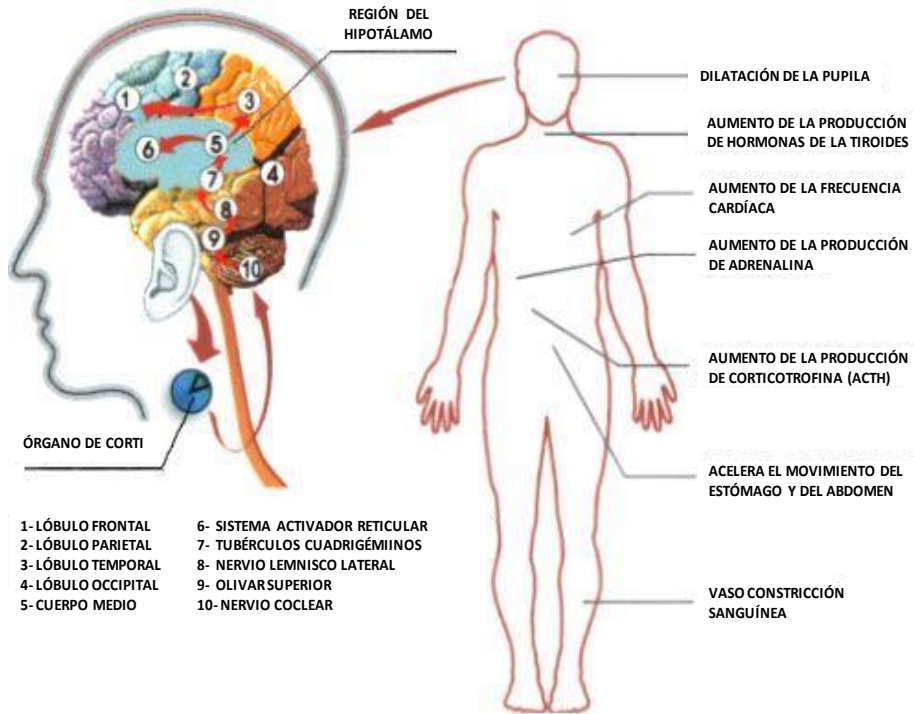


Figura 3.65 Acción de las ondas sonoras en los lóbulos cerebrales y en el sistema nervioso central

La acción combinada de la intensidad del ruido y el tiempo de exposición determinan el nivel de daño, de tal manera que el impacto puede ser provocado, bien sea por un nivel de ruido muy intenso durante poco tiempo o por un bajo nivel en tiempo prolongado, lo que se ilustra en la fig. 3.66.

Si  $L_{Aeq,8h}$  asume valores menores que 80 bB el riesgo es insignificante, por lo que también es insignificante para  $L_{Aeq,3h}$  igual a 86 dB y  $L_{Aeq,1h}$  igual a 89 dB. Aunque, es evidente que el aumento del riesgo existe cuando los niveles de ruido impulsivo llegan al nivel pico  $L_{pico}$  de 130 a 150 dB.

Los principales efectos producidos por el ruido en el hombre se expresan en el aspecto fisiológico (pérdida de la audición hasta la sordera, dolores de cabeza, fatiga, trastornos cardiovasculares, trastornos hormonales, gastritis, disfunción digestiva, alergias) y en lo psicológico (pérdida de la concentración, pérdida de los reflejos, irritación permanente, inseguridad en cuanto a eficiencia de los actos, pérdida de la inteligibilidad de las palabras), lo que se nota a partir de 50 a 55 dB ( $L_{Aeq}$ ) para ruidos estables y continuos.

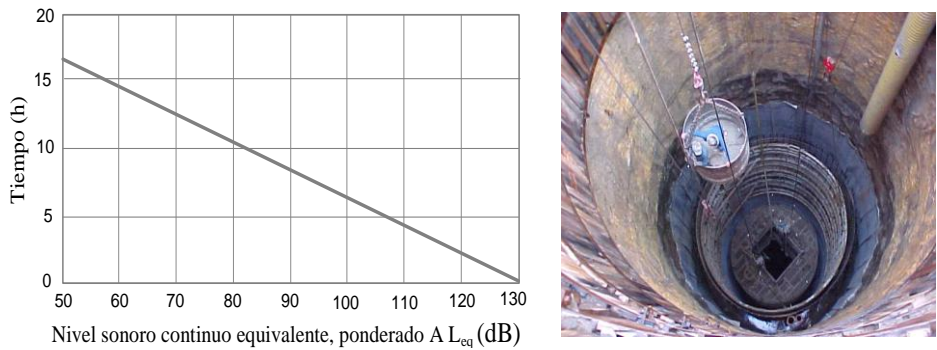


Figura 3.66 Relación entre nivel de ruido y tiempo de exposición (Gayubas, J.C.S., 1998) y exposición del personal al ruido en el ambiente subterráneo

El riesgo de sordera permanente varía de acuerdo con la intensidad y duración de la exposición como fue demostrado por el estudio realizado por la *International Standard Organization ISO 1999* (Cuadro 3.76) y contemplada por la Norma Portuguesa n.º 1733 (Cuadro 3.77).

La sordera debido al ruido industrial se inicia generalmente en una frecuencia todavía poco incapacitante – 4000 Hz – dando oportunidad, en caso que sean realizadas audiometrías periódicas, detectar los que van a desarrollar la sordera y tomar las debidas providencias aún en una fase no incapacitante.

No todos ensordecen estando sujetos a la misma dosis de ruido. La susceptibilidad al ruido es efectivamente muy diferente de persona a persona. Actualmente, aún no existe forma de diferenciar con precisión los que son de los que no son susceptibles. Esto, aunado al hecho de que la sordera tiene inicio en las frecuencias de los 4000 Hz y no ser percibido por el propio, hace que las audiometrías periódicas sean extremadamente importantes para detectar la sordera, aún en su fase inicial.

Cuadro 3.76 Riesgo de pérdida de la audición en valores porcentuales (ISO 1999)

L <sub>Aeq,8h</sub> (dB)	Tiempo de exposición al ruido (años)						
	2	5	10	20	30	40	45
“Normal”	1	2	3	7	14	32	50
85	1	3	6	13	22	42	57
90	3	7	12	23	32	54	65
95	4	10	20	35	45	61	72
100	5	14	31	49	58	74	82
105	8	20	45	65	77	87	91
110	10	28	58	85	91	95	95

Cuadro 3.77 Riesgo de sordera debido al ruido en porcentajes, por años de exposición (definido por el porcentajes de individuos que adquieren sordera superior o igual a 25 dB) (<http://www.saudepublica.web.pt>)

Nivel dB(A)	Años de exposición									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
≤80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
85	0	1	3	5	6	7	8	9	10	7
90	0	4	10	14	16	16	18	20	21	15
95	0	7	17	24	28	29	31	32	29	23
100	0	12	29	37	42	43	44	44	41	33
105	0	18	42	53	58	60	62	61	54	41
110	0	26	55	71	78	78	77	72	62	45
115	0	36	71	83	87	84	81	75	64	47

Nota: El hecho de que después de muchos años de exposición, el riesgo aparentemente disminuye, tiene que ver con el ajuste que se hace a la edad.

Fuente: Norma Portuguesa NP-1733

Si la sordera se extiende a los 3000, 2000, y sobre todo a los 1000 y 500 Hz, dificulta la comunicación oral normal. Es por eso que la evaluación de la incapacidad de una hipoacusia considera la sordera media a los 500, 1000, 2.000 y 4000 Hz con ponderación superior para los 1000 Hz.

### 3.7.2 Fuentes de ruido en la atmósfera subterránea

Las causas del ruido en el ambiente subterráneo están fundamentalmente relacionadas al choque de la roca con el material metálico, en el proceso de perforación (jumbos y martillos neumáticos), al funcionamiento de equipos con motores neumáticos, eléctricos o diesel (ventiladores, bombas, sondas, camiones, LHDs) y a la fricción de las llantas con la superficie de tracción o fricción, entre materiales metálicos (vías de ferrocarril y ruedas de locomotoras y vagones).

El ruido en las minas subterráneas tiene relación con las actividades operacionales (fig. 3.67) que generalmente son las de perforación o corte, disparo o desmonte, soporte, carga, transporte, extracción, ventilación, bombeo, trituración, etc. que registran altas presiones acústicas (Cuadro 3.78).

Existen fuentes de ruido en las instalaciones fijas como las bombas, ventiladores, sistemas de extracción, trituradores primarios, entre otros y fuentes móviles de ruido que se manifiestan en las operaciones de perforación, cargamento, carga y transporte y otros servicios.

Las fuentes de ruido son generalmente muy complejas y de diferentes frecuencias por el hecho de tener diferentes niveles de presión acústica (Cuadro 3.79). La frecuencia normalmente utilizada varía de 31,5 Hz a 8.000 Hz.

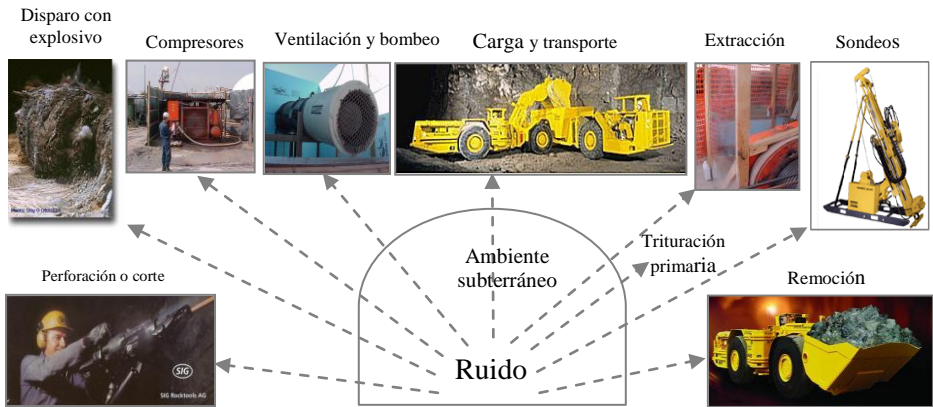


Figura 3.67 Fuentes de ruido en el ambiente subterráneo

Cuadro 3.78 Niveles de ruido en minas subterráneas (Vutukuri V.S., et al., 1986, Navarro Torres V.F., 2001)

Tipo de actividad	$L_{eq}$ dB (A)	Tipo de actividad	$L_{eq}$ dB (A)
Máquina perforadora neumática	108-130	LHD a diesel	88-101
Jumbo electro hidráulico	100-120	Ventilador	90-110
Compresores de aire	90-100	Sondaje	96-100
Viradores de mineral o estéril	98-100	Bombas de agua	90-100
Sistema de extracción (guinche)	80-91	Trituración primaria	85-105

Cuadro 3.79 Bandas de frecuencias normalmente utilizadas en la evaluación de ruido subterráneo

Bandas de octava y frecuencia media de bandas											
Límites de banda Hz	22	44	88	176	353	707	1414	2829	5650	11300	2250
Frecuencia de banda medio Hz	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	

### 3.7.3 Caracterización de la situación sonora

#### 3.7.3.1 Índices o niveles de ruido

Para la caracterización del nivel de ruido en la atmósfera subterránea se utilizan los índices que se detallan a seguir. Si el ruido es del tipo *continuo*, para la caracterización es suficiente el *nivel de presión acústica*; si el ruido es del tipo *variable*, el nivel de presión acústica depende del *tiempo de medición*. Para fines ambientales se utiliza la escala de compensación A (fig. 3.68 izquierda).

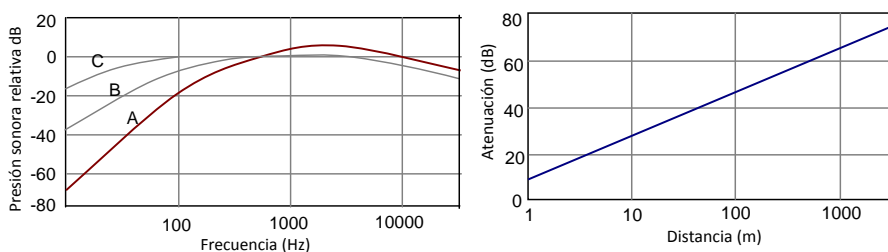


Figura 3.68 Curvas de compensación A, B y C (Howes, M. J., 1982) y atenuación con la distancia (Gayubas, J.C.S., 1998)

Toda fuente de sonido crea un campo en el ambiente alrededor de él, y a partir de él, la energía sonora se propaga por el espacio en todas las direcciones. A medida que las ondas sonoras se propagan en el espacio, ocurre una reducción de la energía por dispersión y por absorción molecular en el aire y superficie rocosa en el caso de las aberturas subterráneas (fig. 3.68 derecha). La absorción molecular del aire aparece a altas-frecuencias (a 4000 Hz hay una atenuación de 1 dB cada 65 m y a bajas frecuencias es insignificante) debido al efecto de la conductividad térmica. La absorción de la energía de las moléculas también depende de la humedad.

Los estándares existentes sirven para evaluar el ruido utilizando varios índices o niveles como son: el nivel de presión acústica, el nivel percentil, el nivel sonoro continuo equivalente, el nivel de exposición al ruido, el nivel pico o máximo, etc. los que son determinados considerando el tiempo de exposición e intensidad sonora, siendo el más utilizado el *nivel sonoro continuo equivalente*.

En términos generales, los niveles de percepción del ruido por el oído humano pueden establecerse como se muestran en el Cuadro 3.80.

Cuadro 3.80 Niveles de percepción del ruido en función de la presión sonora

dB (A)	Percepción	dB (A)	Percepción
0 a 20	Silencio	50 a 100	Muy ruidoso
20 a 50	Poco ruidoso	100 a 140	Nocivo

a) *Nivel de presión sonora* ( $L_p$ ), se calcula con la ecuación (3.117) en función del valor eficaz de la presión sonora  $P$  (Pa) a que está expuesta la persona, estando o no en movimiento, sin considerar el efecto de cualquier equipo de protección. La presión de referencia  $P_o$  toma el valor  $2 \times 10^{-5}$  Pa ( $20 \mu$  Pa).

$$L_p = 20 \text{Log} \frac{P}{P_o} \quad (3.117)$$

Cuando se considera el valor extremo del límite de variación de la presión audible, los niveles de presión sonora extremos varían de 0 dB a 140 dB, como se calcula de seguidas:

$$L_p (\text{min}) = 20 \log (2 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-5}) = 0 \text{ dB} \quad \text{y}$$

$$L_p (\text{máx}) = 20 \log (100 / 2 \times 10^{-5}) = 140 \text{ dB}$$

El aumento de la presión sonora para el doble de su valor significa que el nivel de presión sonora tiene un incremento de 6 dB:

$$L_{P1} = 20 \log (P/P_o) \text{ e } L_{P2} = 20 \log (2P/P_o),$$

$$L_p = L_{P1} - L_{P2} = 20 \log (1/2), \text{ por lo tanto: } L_{P2} = L_{P1} + 6 \text{ dB}$$

b) *Nivel percentil* ( $L_{NA, T}$ ), es el nivel de presión sonora en ponderación A que es superado en  $N$  % del tiempo medido  $T$  (ISO 1996). Ejemplo,  $L_{A95,1h}$  es aquel nivel en dB (A) superado en 95% durante 1 hora. Estos valores permiten saber no solo el nivel en un tiempo determinado, sino también la distribución estadística de los niveles de la presión sonora.

c) *Nivel sonoro continuo equivalente*  $L_{Aeq,T}$ , es el promedio de energía del sonido en un intervalo de tiempo y se define como el valor del nivel de presión sonora en dB (A) del sonido continuo y estable, que dentro de un intervalo de tiempo  $T$ , posee la misma presión sonora cuadrática media que el ruido medido y cuyo valor varía con el tiempo (ISO 1996). La ecuación (3.118) permite calcular este indicador en función de la presión sonora instantánea  $P_{A(t)}$  (Pa), del intervalo de tiempo  $T = (t_2 - t_1) = \Delta t$  de duración (s), de la presión de referencia  $P_o = (2 \times 10^{-5} \text{ Pa o } 20 \mu \text{ Pa})$  y del nivel de presión sonora ponderada  $A$  para la muestra  $i$   $L_{pAi}$  (dB).

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_A^2(t)}{P_o^2} dt = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T 10^{0.1 L_{pAi}} \right] \quad (3.118)$$

d) *Nivel de exposición sonora SEL* o  $L_{AE}$ , se define como el nivel constante, que mantenido durante 1 segundo, proporciona la misma energía sonora (en ponderación A) que el ruido medido. Se aplica para comparar la presencia de ruidos con diferente duración (ISO 1996). Se puede calcular con la ecuación (3.119), donde  $P_{A(t)}$  es la presión sonora instantánea (Pa),  $t_2 - t_1$  representa el intervalo de tiempo (s) y  $P_o$  es la presión de referencia ( $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ).

$$L_{AE} = 10 \log \frac{1}{T_o} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_A^2(t)}{P_o^2} dt \quad (3.119)$$

e) *Nivel pico o máximo* ( $L_{max}$ ), es el nivel en dB (A) que corresponde al valor máximo de la presión acústica instantánea, para un valor máximo de la presión acústica instantánea  $P_{max}$  (Pa) y para una presión de referencia  $P_o$  (Pa), calculado con la ecuación (3.120).

$$L_{max} = 20 \log \frac{P_{max}}{P_o} \quad (3.120)$$

### 3.7.3.2 Particularidades del ruido en aberturas subterráneas

La propagación de las ondas del ruido en aberturas subterráneas son de dos tipos: ondas directas y ondas reflejadas (fig. 3.69). En el proceso de reflexión parte de las ondas son absorbidas por la superficie de las excavaciones (roca o revestimiento o soporte).



Figura 3.69 Fases de la transmisión del sonido en ambiente subterráneo (Howes, M. J., 1982)

En la atmósfera subterránea la atenuación del ruido por la distancia  $L_x$  (m) se puede calcular por la ecuación (3.121) propuesta por Howes, M.J, (1982), donde  $L_{ds}$  es la presión sonora a una distancia  $d$  de la fuente en dB (A),  $P$  es el perímetro de la excavación (m),  $A$  es la sección de la abertura subterránea ( $m^2$ ),  $d$  es la distancia de la fuente del sonido (m) y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción (Cuadro 3.81).

$$L_{ds} = 12.6 \frac{P}{A} d^{0.8} \alpha^{1.4} \quad (3.121)$$

Cuadro 3.81 Coeficiente de absorción del sonido  $\alpha$  en excavaciones subterráneas(Howes, M. J., 1982)

Frecuencia de banda media (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coeficiente de absorción ( $\alpha$ )	0,05	0,10	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16

En el ambiente confinado el reflejo de las ondas se suma al nivel de presión del sonido (Vutukuri V.S., *et al.*, 1986) y en distancias próximas al frente, la presión del sonido disminuye similarmente a lo que ocurre en el ambiente abierto, pero para largas distancias la reflexión de las ondas se suma a los niveles del ruido, siendo los niveles restantes constantes.

Se denomina *distancia crítica* cuando hay un equilibrio entre la transmisión del sonido directo y lo reflejado (fig. 3.70) determinándose por las ecuaciones (3.122) y (3.123).

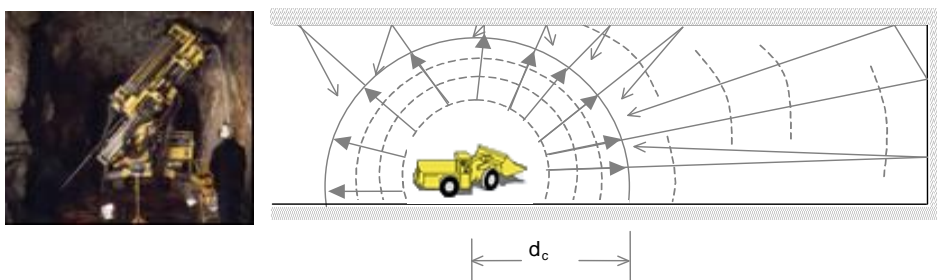


Figura 3.70 Ruido producido en la operación de perforado (Simba H1350 Atlas Copco) y concepto de distancia crítica (LHD)

$$d_c = 0.14 \left[ \frac{S_c \alpha}{1 - \alpha} \right]^{0.5} = 0.14(A)^{0.5} \quad (3.122)$$

$$d_{cse} = 0.2 \left[ \frac{S_c \alpha}{1 - \alpha} \right]^{0.5} = 0.2(A)^{0.5} \quad (3.123)$$

En que,  $d_c$  es la distancia crítica para la fuente de sonido esférica (m),  $d_{cse}$  la distancia crítica para la fuente de sonido semiesférico (m),  $S_c$  es la suma total de la superficie ( $m^2$ ),  $\alpha$  el coeficiente de absorción de la superficie (piso, techo, equipos, etc.).

En el caso de producirse ruido por la acción de una sola fuente, la presión del ruido emitido debe ser calculado para cada caso, para lo cual Howes, M.J, (1982) propone las expresiones referidas en las ecuaciones (3.124) a (3.129).

El nivel de presión sonora para *martillos neumáticos*  $L_m$  (dB) se calcula en función del consumo de aire comprimido  $Q$  ( $m^3/s$ ) (ecuación 3.124) y para estimar el nivel de potencia sonora para la *banda octava* se corrigen usando los valores del Cuadro 3.82.

$$L_m = 140 + 10 \log Q \quad (3.124)$$

Cuadro 3.82 Factor de corrección del espectro de la *banda octava* para martillos neumáticos

Frecuencia de banda media (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Corrección (dB)	-20	-12	-5	-5	-10	-12	-13	-15

Para *equipos* con motor *diesel*, el nivel de presión sonora del sistema de escape del motor  $L_{de}$  (dB) se calcula con la ecuación (3.125) y considerando el sistema motor  $L_{dm}$  (dB) a través de la ecuación (3.126), en ambos casos mediante la variable potencia del motor  $P_m$  (KW).

$$L_{de} = 110 + 10 \log P_m \quad (3.125)$$

$$L_{dm} = 110 + 8 \log P_m \quad (3.126)$$

Para *ventiladores principales* el nivel de la presión sonora  $L_v$  (dB) se determina en función de la potencia del motor  $P_{mv}$  (KW), de la presión estática  $H_v$  (Kpa) y del caudal de aire  $Q_v$  ( $m^3/s$ ) utilizando cualquiera de las ecuaciones (3.127), (3.128) o (3.129). Para estimar el nivel de potencia sonora en banda octava se corrige usando los valores del Cuadro 3.83.

$$L_v = 97 + 10 \log P_{mv} + 10 \log H_v \quad (3.127)$$

$$L_v = 100 + 10 \log Q_v + 20 \log H_v \quad (3.128)$$

$$L_v = 95 + 20 \log P_{mv} + 10 \log Q_v \quad (3.129)$$



Cuadro 3.83 Factor de corrección del espectro de la *banda octava* para ventiladores

Frecuencia de banda media (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Flujo axial	-7	-9	-7	-7	-8	-11	-16	-18
Centrífuga: - Paleta al frente	-4	-6	-6	-11	-13	-16	-19	-22
- Paleta atrás	-2	-6	-13	-18	-19	-22	-25	-30
- Paleta radial	-3	-5	-11	-12	-15	-20	-23	-26

### 3.7.4 Normas y estándares de calidad ambiental sonora

Son reconocidos dos tipos de contaminación por ruido y corresponden normalmente a dos diferentes estándares.

El *ruido ocupacional* (Cuadro 3.84) afecta a los trabajadores durante el tiempo de exposición, estando relacionado con el ruido producido en el proceso operacional y con el uso de los equipos con que tienen que trabajar.

Cuadro 3.84 Estándares de ruido ocupacional en exposición de 8 horas por día (disponible en [www.nrca.org/standards/noise/review\\_noise\\_standards.htm](http://www.nrca.org/standards/noise/review_noise_standards.htm))

País	Fuente	$L_{eq}$ máx. dB (A)	Pico dB (A)
Australia	<i>Australia National Occupational Health and Safety Commission</i>	85	140
Canadá	<i>Canadian Centre for Occupational Health and Safety</i>	85 - 90	135 - 140
India	Rules of the Factories Act	90	140
Singapur	Department of Industrial Health	85	
Tailandia	Ministry of Interior	90	
U. K.	Noise at Work Regulations	90	140
E.U. A.	<i>Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor</i>	90	140
U. E.	European Union Occupational Safety and health	85	140

En las actividades operacionales que realiza en el medio subterráneo, el trabajador está expuesto a dos condiciones de ruido: la condición estacionaria y la móvil. La condición de referencia de las normas y estándares es la condición estacionaria, pero es aplicable para fuentes móviles, considerando la distancia de esta fuente móvil.

Además de eso, en el ambiente subterráneo ciertos trabajadores están expuestos a ruido de tipo ambiental, por tanto se debe evaluar este con los estándares existentes.

El *ruido ambiental* (Cuadro 3.85) es el producido, por ejemplo, por el tráfico u otras actividades que no son directamente relacionadas con las actividades del trabajo y en este caso, se considera un radio de acción en torno a la fuente.

En relación al ruido ambiental aunque existen estándares específicos, como para el caso del tráfico o transporte (Cuadro 3.86), siendo el tipo de prueba *S* para vehículos en estado estacionario y *M* en movimiento.

Muchos países utilizan como referencia la ISO1996 (*International Standard Organization*) para establecer los límites admisibles. Esta norma tiene tres partes: ISO 1996 – 1 (Cantidades básicas y procedimientos), ISO 1996-2 (Medición y concentración del ruido) y ISO 1996-3 (Aplicación para los límites del ruido). Los

principios fundamentales para la especificación del límite establecido por la ISO 1996 están en la ecuación:

$$L_{Ar,T} = L_{Aeq,T} + K_1 + K_2$$

Cuadro 3.85 Estándares de ruido ambiental según la zona y período día/noche. Disponible en [www.nrca.org/standards/noise/review\\_noise\\_standards.htm](http://www.nrca.org/standards/noise/review_noise_standards.htm)

País	Zona Industrial	Zona Comercial	Zona Residencial	Zona de silencio
	Día/Noche	Día/Noche	Día/Noche	Día/Noche
Australia (1)	65 / 55	55 / 45	45 / 35	45 / 35
Australia (2)	65 / 65	60 / 60	50 / 40	45 / 35
Canadá (1)	60 / 55	60 / 55	55 / 45	-
Canadá (2)	65 / 60	65 / 60	55 / 45	-
India	75 / 70	65 / 55	55 / 45	50 / 40
Israel	70	55	50	45
Japón	60 / 50	60 / 50	50 / 40	45 / 35
E.U.A (1)	75 / 75	65 / 65	60 / 60	-
E.U.A (2)	65 / 65	65 / 65	65 / 55	-
E.U.A (3)	70	62	55 / 50	-
E.U.A (4)	80 / 75	65 / 60	55 / 50	-
E.U.A (5)	60 / 55	60 / 55	55 / 50	-
E.U.A (6)	70	60	55	45
UE e OMS*	65	55	55 / 45	45 / 35
Australia (1): Capital Australia (2): Norte Canadá (1): Distrito norte de Vancouver Canadá (2): Vuelta del distrito E.U.A (1): Estado de Minnesota		E.U.A. (2): Estado de Delaware E.U.A. (3): Huntsville, Huntsville E.U.A. (4): Denver, Colorado E.U.A. (5): California, Davis E.U.A. (6): EPA		

\* OMS: Organización Mundial de la Salud (*World Health Organization*)

Donde,  $L_{Ar,T}$  es el nivel de evaluación del ruido,  $L_{Aeq,T}$  es el nivel sonoro continuo equivalente ponderado A en período de tiempo T (dB),  $k_1$  el factor de corrección por tono (0 a 6 dB), y  $K_2$  es el factor de corrección por componentes impulsivos (0 a 7 dB). El valor usual es de 5 dB sea para  $K_1$  sea para  $k_2$ .

Cuadro 3.86 Estándares de ruido ambiental para el tráfico o el transporte (disponible en [www.nrca.org/standards/noise/review\\_noise\\_standards.htm](http://www.nrca.org/standards/noise/review_noise_standards.htm))

País/Estado	Distancia	Tipo de prueba	Pequeño/ Grande Motocicleta	Automóvil	Autobús, camión (pequeño)	Autobús, camión (medio)	Autobús, camión (grande)
UE	-	S	75 / 80	74	78	78	80
India	-	-	80	82	85	89	91
New York	15,2 m	M	82	79	79	90	90
New York	7,6 m	M	88	85	85	96	96
Huntsville	15,2 m	M	84	84	84	90	90
Albuquerque	15,2 m	M	82	76	76	86	86
Albuquerque	-	S	88	95	95	93	93
Larimer Co.	7,6 m	M	80	80	80	86	86
Denver	7,6 m	M	80	80	80	88	88
Tailandia	7,5 m	S	85	85	85	85	85
Canadá	-	M	77 / 82	82	82	85	85

La legislación de la Unión Europea en el dominio del ambiente – volumen 5 – ruido (86/188/CEE) contempla la protección de los trabajadores contra los riesgos de exposición al ruido en el trabajo, considerando dos niveles:

- Exposición diaria ( $L_{EP,d}$ ) determinada por la ecuación

$$L_{EP,d} = L_{Aeq,T} + 10 \log \left( \frac{T}{T_o} \right)$$

Donde, T es la duración de la exposición del trabajador al ruido (días) y  $T_o$  es igual a 8 horas.

- Media semanal de los valores diarios ( $L_{EP,s}$ ) calculada mediante

$$L_{EP,s} = 10 \log \left[ \frac{1}{5} \sum_{k=1}^m 10^{0.1(L_{EP,d})K} \right]$$

Donde,  $(L_{EP,d})k$  son los valores de  $L_{EP,d}$  para cada uno de los  $m$  días laborables de la semana considerada.

La norma de la Unión Europea especifica que cuando el nivel de exposición diaria sobrepase los 85 dB (A), el trabajador debe ser advertido de los riesgos y mientras tanto utilizar protectores de ruido. Si el nivel de exposición diaria sobrepasa los 95 dB (A) se debe poner en marcha un programa de reducción.

El Departamento de Trabajo de los E.U.A. (1971 – 1979) determinó la duración permisible de exposición al ruido de la forma como se indica en el Cuadro 3.87.

Cuadro 3.87 Niveles de ruido permisibles por el Departamento de Trabajo de los E.U.A.

Niveles de ruido dB (A)	Exposición (h/día)	Niveles de ruido dB (A)	Exposición (h/día)
90	8	102	1.5
92	6	105	1
95	4	110	0,5
97	3	115	<0,25
100	2		

En Portugal, el Decreto-Ley n.º 251/87 del 24 de junio enmendado por los diplomas DL 292/89 del 2 de septiembre y DL 72/92 del 28 de abril, y relacionado con la protección de los trabajadores contra el ruido Decreto Reglamentario n.º 09/92 del 28 de Abril, en su Artículo 1 indica:

- El nivel de acción de la exposición personal diaria de un trabajador al ruido durante el trabajo es igual a 85 dB (A).
- El valor límite de la exposición personal diaria de un trabajador al ruido durante el trabajo es de 90 dB (A).

Cuando se demuestre la existencia de hombres expuestos a un valor igual o superior a los niveles indicados, se recomienda tomar las medidas correspondientes (Cuadro 3.88).

Cuadro 3.88 Medidas de protección de la acción del ruido a los trabajadores en Portugal (DR n.º 09/92 del 28 de abril)

Quando los hombres son expuestos a 85 dB (A)	Quando los hombres son expuestos de 90 - 140 dB (A)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación periódica del valor máximo de la presión sonora.</li> <li>- Asegurar la vigilancia médica de la función auditiva de los trabajadores con periodicidad trianual.</li> <li>- Disponer gratuitamente protectores de oído para el personal.</li> </ul>	<p>Debe ser puesto un programa de medidas técnicas destinadas a disminuir la producción o propagación del ruido</p>

El Decreto-ley n.º 232/2000 del 14 de noviembre, denominado Reglamento General del Ruido modifica las normativas antes indicadas en relación al ruido ambiental.

En el Decreto-ley n.º 162/90 del 22 de mayo que instituye el Reglamento General de Seguridad e Higiene en el Trabajo en las Minas y Canteras, en su Artículo 149 indica:

- . En los sitios de trabajo se deben adoptar las medidas adecuadas para la eliminación o reducción de la propagación del ruido, no debiendo sobrepasar los valores de 85 dB (A) para el ruido y de 200 Pa para la presión acústica instantánea no compensada;

- . Cuando las medidas técnicas de protección aplicables no fueran suficientes, los trabajadores deben usar protectores auriculares adecuados, o si fuera necesario, limitar el tiempo de exposición al ruido

En el caso de Perú en el D.S. n.º 023-92-EM *Reglamento de Seguridad e Higiene Minera* del 13 de octubre, en el capítulo XII y Artículo 278 se indica que es necesario proporcionar protección auditiva cuando el nivel de ruido para el tiempo de exposición indicada sea superior a los valores del Cuadro 3.89.

### 3.7.5 Matriz base para la identificación del impacto ambiental acústico

Con base en los estándares internacionales, y específicamente de Portugal y Perú, se propone la matriz base (Cuadro 3.90) para la identificación del nivel de impacto ambiental acústico.

Cuadro 3.89 Valores límites permisibles de ruido por la legislación peruana (D.S. n.º 023-92-EM *Reglamento de Seguridad e Higiene Minera* de 13 de octubre)

Niveles de ruido dB(A)	Exposición(h/día)	Niveles de ruido dB(A)	Exposición (h/día)
90	8	102	1,5
92	6	105	1
95	4	107	0,75
97	3	110	0,5
100	2	115	<0,25

Cuadro 3.90 Matriz base para la identificación de niveles de impacto ambiental acústico

Nivel de impacto ambiental acústico	$L_{eq A, 8h}$ dB (A)
Leve	$85 \leq \text{Ruido} < 90$
Moderado	$90 \leq \text{Ruido} < 95$
Alto	Ruido $> 95$

### 3.7.6 Medidas correctivas para reducir el impacto ambiental acústico

Cuando el nivel de ruido identificado es de moderado a alto las medidas tecnológicas correctivas están orientadas a tres aspectos: la fuente, la trayectoria de propagación o el receptor.

a) En la *fuentes*, la reducción del nivel de emisión del ruido se consigue utilizando la atenuación por distancia, instalación de tubos para ventiladores (Cuadro 3.91) o con sistemas de atenuación en los equipos, como silenciadores para los gases de escape del motor, uso de silenciadores en serie, recubrir con material acústico o el tratamiento interno de los conductos, uso de equipo eléctrico en vez de diesel.

Cuadro 3.91 Atenuación del ruido en tubos de acero y flexibles (dB/m)

Frecuencia de banda media (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Tubos de acero 760 mm diámetro	0,08	0,13	0,17	0,21	0,25	0,28	0,30	0,31
Tubos flexibles de 760 mm de diámetro	0,15	0,25	0,55	0,75	0,95	1,05	1,15	1,25

Una medida importante también es el mantenimiento preventivo de los equipos, que permite eliminar o atenuar el ruido generado por los elementos con mucho desgaste.

b) El aislamiento permite encapsular las operaciones, equipamientos o parte de estos con una estructura hermética para impedir la salida o dificultar su recepción, como son las cabinas insonorizadas de los equipos. En el aislamiento acústico una parte de la onda acústica se refleja y otra parte pasa a través del tabique del material utilizado.

El aislamiento  $I$  (dB) producido por un tabique se calcula con la ecuación (3.130) a partir de la ley de masas, donde  $m$  es la masa por unidad de superficie del tabique ( $\text{kg/m}^2$ ),  $\omega$  es la frecuencia angular ( $\text{rad /s}$ ) donde  $\omega = 2\pi f/T$ ,  $f$  es la frecuencia,  $T$  es el período (s), y  $\rho c$  es la impedancia acústica del aire ( $\sim 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ).

$$I = 20 \log \frac{m \omega}{2 \rho c} \quad (3.130)$$

La utilización de tabiques simples es ineficaz cuando ocurre el fenómeno de la *coincidencia*, pues este tiene lugar a partir de la frecuencia denominada crítica donde la longitud de onda reflejada es igual al de la onda proyectada, generando la transmisión de ondas para otro lado del tabique. Por lo tanto, toda la energía incidente atraviesa el tabique y el aislamiento es nulo.

Debido a este fenómeno es recomendable construir el aislamiento con doble tabique, de distinto material y de diferente espesor. La frecuencia de la resonancia  $f_o$  del tabique doble se puede obtener a partir de la ecuación (3.131), donde  $d$  es la distancia entre los tabiques (m),  $m_1$  y  $m_2$  son las masas unitarias de estos tabiques ( $\text{kg/m}^2$ ).

$$f_o = \frac{65}{d^{0.5}} \left( \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^{0.5} \quad (3.131)$$

Es recomendable conseguir un valor de  $f_o$  menor que 100 Hz aumentando el espesor de los tabiques y la distancia entre ellos. En el Cuadro 3.92 se presentan algunos resultados de la técnica de aislamiento.

c) Uso de materiales *elásticos*, como caucho o fibra de vidrio, colocados en las partes de mayor impacto entre el material sólido y la estructura metálica reduce el ruido del impacto. Como ejemplo se pueden referir los puntos de transferencia del material en las correas transportadoras (fig. 3.71) o en la descarga del material sobre los camiones. Existen además otras técnicas como la cortina de aire, control activo de ruido etc.

Cuadro 3.92 Aislamiento del ruido (dB) para algunos materiales (Falch, E., 1998)

Tipo de material	Frecuencia de la resonancia (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Lámina de acero (1 mm)	14	21	24	32	36	39
Lámina de acero (2.6 mm)	23	25	33	34	40	43
Plancha de madera (20 mm)	24	22	27	28	25	27
Vidrio (6 mm)	17	23	25	27	28	29
Concreto (100 mm)	29	35	37	43	44	50

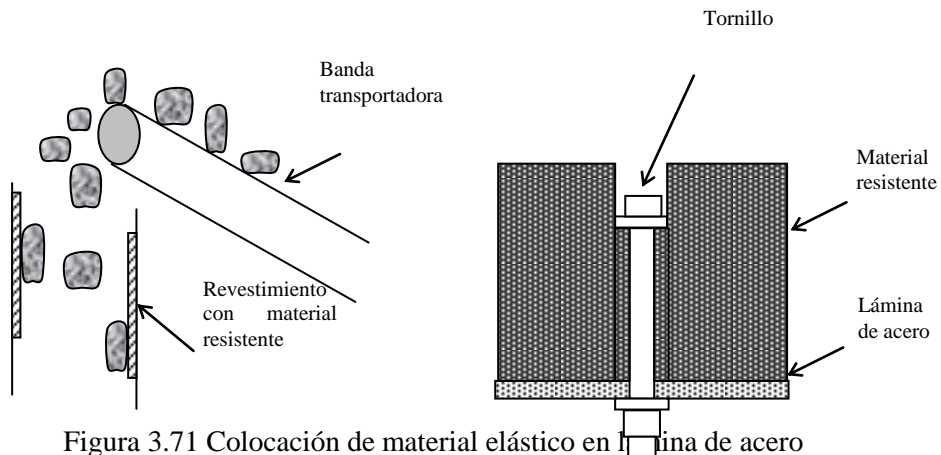


Figura 3.71 Colocación de material elástico en lámina de acero

d) *Protección del oído*, es la última medida de aislamiento del hombre para atenuar la acción del ruido. Las principales medidas son: protección auricular de distintos tipos y tapones (plástico, algodón, etc.).

Los protectores de oído reducen el nivel de ruido en el oído de 10 a 45 dB dependiendo del modo de operación y frecuencia del ruido (fig. 3.72) y existen cuatro tipos (Cuadro 3.93).

Cuadro 3.93 Tipos de protectores de oído

Tipo de protector	Uso
Tapón de oído	Inserción en el canal del oído
Semi-insertado	Cierre de la entrada del canal del oído
Orejas	Cubre totalmente la oreja
Casco con oreja	Cubre totalmente la oreja

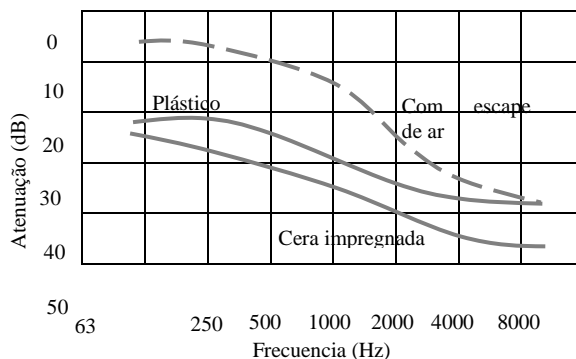


Figura 3.72 Atenuación de los tapones de oídos

### 3.7.7 Monitoreo y control

Los estándares de medición considerados por las normas ISO son la ISO 3740, la ISO 8297, la ISO 11201 y la ISO 11204. A nivel de Portugal están reglamentados mediante los Decretos-Leyes ya referidos y la Norma Portuguesa NP-1730.

a) El *instrumento* principal para la medición del ruido es el sonómetro, cuyas partes se ilustran en la fig. 3.73. El micrófono recibe las vibraciones de la presión del ruido y las transforma en señal eléctrica, el pre-amplificador nivela la impedancia de la señal del micrófono, después es ponderado a A (más usado) o C, el amplificador controla el nivel de ruido entre la distorsión y la señal de ruido de fondo, los filtros externos permiten analizar la frecuencia de la señal, el detector sirve para caracterizar la señal de entrada (detectores de media cuadrática RMS, de integración y de pico), el indicador o visor muestra las señales detectadas en dB basado en estándares internacionales  $2 \times 10^{-5}$  Pa. Los sonómetros también tienen un registrador en cinta magnética o memoria, que permite acumular las mediciones, para desde ahí transmitir al computador y también a un analizador estadístico de niveles.

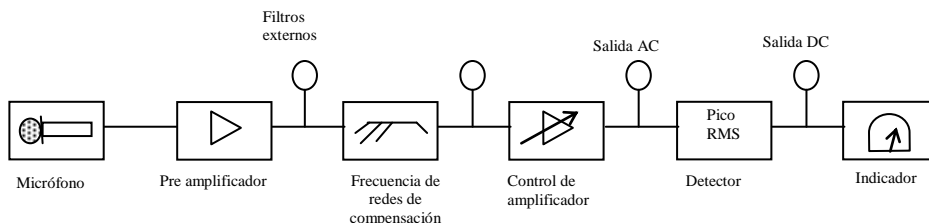


Figura 3.73 Componentes principales de un medidor de ruido (Bell, L.H. et al ; 1994)

El detector de ruido se debe calibrar antes de las mediciones siendo el método más común de utilizar el calibrador portátil para aplicar en la cápsula del micrófono. Este calibrador proporciona un nivel de presión del ruido para frecuencias de 94 dB a 1000 Hz. El medidor del nivel sonoro se calibra hasta que el lector del medidor sea igual al nivel nominal del calibrador.

b) Las mediciones de ruido están afectadas por la *temperatura* (corrección de 1 dB), *humedad*, *velocidad del aire* (~ 3 m/s) y *ruido de fondo* (cuando la diferencia entre el ruido de fondo y la señal del ruido es mayor de 10 dB el ruido de fondo es insignificante).

c) En el ambiente subterráneo, el monitoreo se debe realizar en tres (3) a cinco (5) puntos de medición para cada fuente de ruido (fig. 3.74), localizadas a una distancia  $d > 1$  m ( $d > d_{cse}$  distancia crítica) de la parte central de la geometría de los equipos que constituyen la fuente de ruido. Además de eso, deberá estar localizado a 1 m de las paredes estructurales, techo y piso, a 2 m de las esquinas de la excavación y a 1,5 m de cualquier abertura para el exterior.

El nivel acústico se calcula con las ecuaciones (3.132) y (3.133), donde  $L_e$  es el nivel de presión acústico (dB),  $L_m$  es el valor medio de la presión del ruido medido en 5 estaciones (dB),  $A = \infty S_s$ , es la superficie de absorción acústica ( $m^2$ ),  $A_d$  es la superficie de absorción acústica de referencia (~1 a  $m^2$ ),  $r$  es la distancia radial de la fuente de ruido al punto de medición (1 m o 3 m),  $r_p$  es la distancia ponderada del espacio circundante del equipamiento que es la fuente de ruido (m) y  $r_p = (ab + ac)^{0.5}$  con  $a$ ,  $b$  y  $c$  indicadas en la fig. 3.74 y fig. 3.75.

$$\text{Para minas subterráneas: } L_e = L_m + 10 \log \frac{A}{A_d} + 6 \tag{3.132}$$

$$\text{Para túneles de gran sección: } L_e = L_m + 20 \log \frac{r}{r_p} + 10 \log 2\pi \tag{3.133}$$

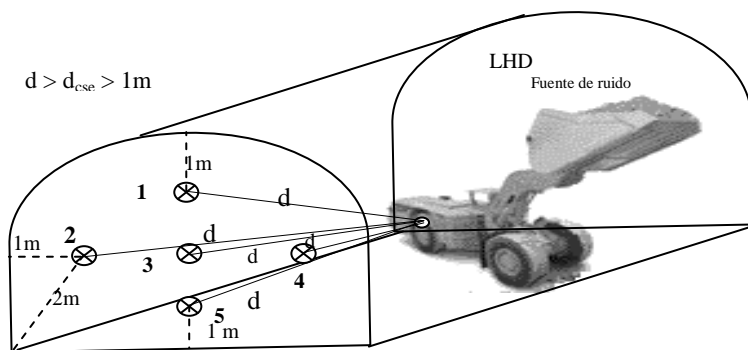


Figura 3.74 Estaciones de medición del ruido en aberturas subterráneas de menor sección



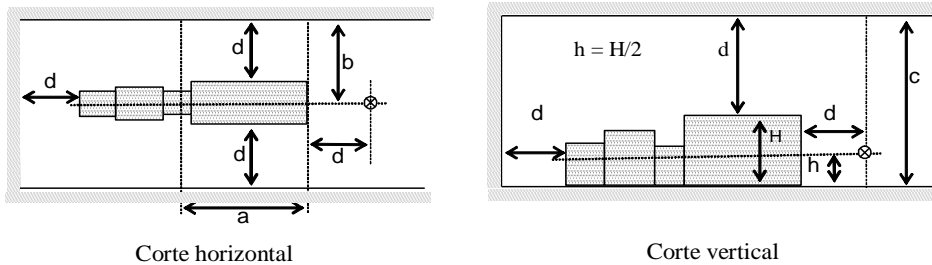


Figura 3.75 Estaciones de medición del ruido para aberturas subterráneas de mayor sección

Los registros de datos deben comprender la descripción de la fuente sonora (características y condiciones de operación y fuente de ruido), el ambiente (localización de la fuente y descripción de paredes, techo, piso, etc.), el instrumento (detalle técnico), los datos de mediciones (fecha, nivel y método de calibración, tiempo de prueba, localización y orientación del micrófono, constantes de tiempo del instrumento *fast* y *low*, nivel de ruido de fondo, procesos de medición) y observaciones.

La ingeniería del ruido en el ambiente subterráneo sistematiza el tratamiento de este problema mediante un procedimiento ordenado (fig. 3.76) que considera la determinación de las fuentes, caracterización del ambiente, identificación del nivel de impacto ambiental acústico, estudios para búsqueda de medidas correctivas que atenúen hasta niveles permisibles, aplicación de la alternativa más viable, monitoreo y control para determinar la efectividad y eficacia de la alternativa aplicada y de esta forma conseguir una calidad ambiental dentro de los estándares existentes

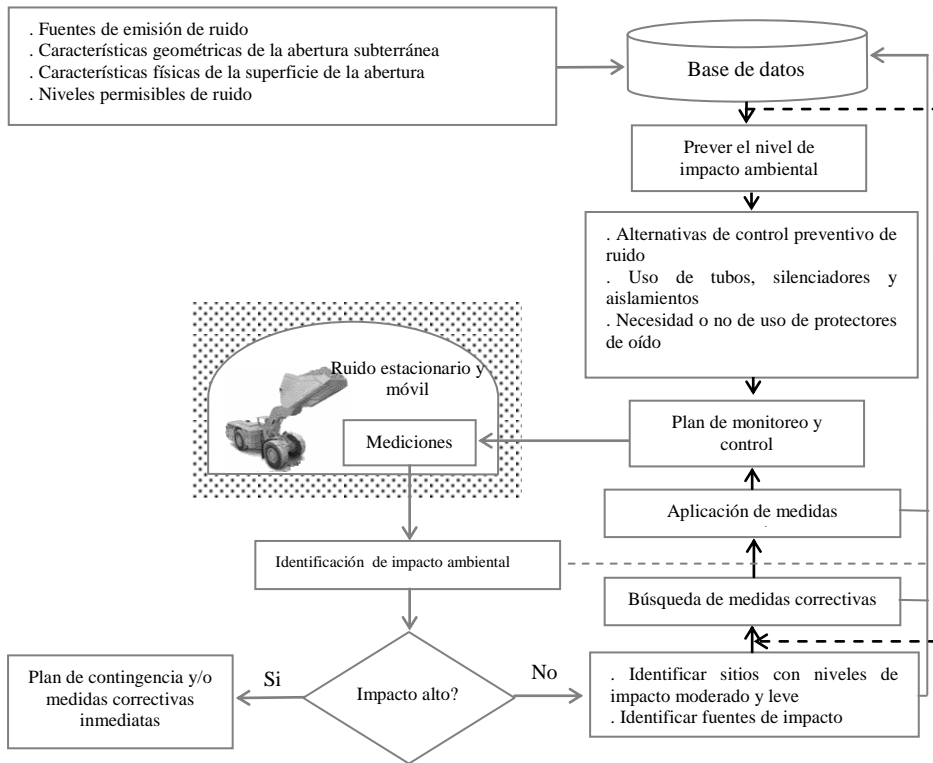


Figura 3.76 Sistema de gestión del ruido en el ambiente subterráneo

## Capítulo 4

### AGUA SUBTERRÁNEA Y DRENAJE ÁCIDO

---

#### 4.1. Efectos ambientales por la alteración de las condiciones naturales de las aguas subterráneas

Como ya se indicó, el ambiente, además del espacio físico que lo compone, incluye cuatro importantes dominios: litósfera, hidrósfera, atmósfera y biósfera. En el ámbito subterráneo, la hidrósfera está representada por las aguas subterráneas.

El hombre, en la búsqueda de la satisfacción de sus necesidades y el logro de sus más nobles aspiraciones y su constante desarrollo, requiere de los recursos naturales, como los minerales, que a menudo se encuentran en zonas cuyas profundidades y condiciones geológicas y geotécnicas, exigen la aplicación de métodos de explotación subterráneos.

Las explotaciones subterráneas requieren la realización de aberturas subterráneas de varios tamaños (sección y longitud), diferentes posiciones (horizontales, inclinadas y verticales) y diversas profundidades. Estas acciones humanas producen cambios en las condiciones naturales del medio rocoso y de las aguas subterráneas. El desequilibrio de las condiciones naturales de las aguas subterráneas altera el ecosistema, pudiendo comprometer la salud y la vida del propio hombre, así como también la sobrevivencia y seguridad del elemento biológico en el marco de la explotación.

Los efectos ambientales ocasionados por la alteración de las condiciones naturales de las aguas subterráneas se manifiestan no solo en el espacio subterráneo sino también en el espacio exterior, cuando las mismas alcanzan la superficie, ya sea por causas naturales o por el bombeo de pozos de muestreo y/o captaciones.

Los impactos ambientales negativos en el medio subterráneo se manifiestan por el riesgo de inundación de las aberturas existentes, por la influencia en el comportamiento geotécnico del macizo rocoso circundante y, por la formación de drenaje ácido, al entrar en contacto con masas de mineral y roca expuesta, en consecuencia, estas manifestaciones ambientales comprometen la salud y la vida humana y arriesgan también el normal desarrollo de las operaciones.

Los riesgos ambientales en el ámbito de acción del medio externo del proyecto, se expresan por el hecho de que afectan la supervivencia y la fecundidad de la diversidad biológica y del propio hombre, en virtud de las alteraciones de las propiedades físico-químicas del agua superficial, ocasionadas por el vertido de aguas ácidas y/o contaminadas.

Las inesperadas inundaciones en el ambiente subterráneo pueden ocasionar pérdidas en las instalaciones y equipos, paralizando el proceso productivo e, incluso, atentar contra la vida humana (ahogamiento).

Los efectos negativos de la contaminación de las aguas naturales, debido a las actividades de l hombre se manifiestan en la afectación de los seres vivos existentes en estas aguas (Cuadro 4.1), en la agricultura (riego) y la salud humana.

Cuadro 4.1 Efectos de los contaminantes de las aguas naturales en los organismos vivos

Fuentes de contaminación	Efectos de los contaminantes
Efluentes mineros, aguas residuales sedimentadas y poco tratadas	Muerte directa de organismos vivos
Efluentes industriales, alta concentración de metales pesados	Muy tóxicos y muerte de otros organismos vivos
Reducción del oxígeno, adición de fertilizantes y afectación al crecimiento y reproducción	Afectación indirecta de los organismos vivos

En el caso específico de las aguas subterráneas en los ambientes de explotación minera la contaminación se manifiesta por el drenaje ácido, que consiste en una alteración del nivel de acidez (pH), la contaminación con partículas inertes (arcilla, sedimentos, residuos) y con metales pesados (Cr, Cu, Pb, Hg, As, etc.), que en ciertas concentraciones provocan la muerte de los organismos vivos.

Estudios realizados demuestran que las aguas con un pH <5,5 en combinación con aluminio disuelto mayor de 0,2 mg/l y dureza menor de 12 mgCaCO<sub>3</sub>/l, ocasionan considerables daños ecológicos (Kiely G., 1999).

El nivel de acidez del agua puede afectar los organismos vivos de manera directa, mediante la tensión fisiológica, o indirecta, mediante cambios en el suministro de alimentos, agresión del hábitat y depredación.

En aguas extremadamente ácidas (pH ≤5) existen muy pocas especies (por ejemplo, peces) en comparación con aguas menos ácidas (pH ≥6,5). La acidez afecta los peces en muchos aspectos, como por ejemplo en la fisiología de las branquias, del aparato reproductor, la sangre, etc.

El mercurio parece que no genera riesgos considerables para muchos animales acuáticos como los moluscos, atún, pez espada; así como para las aves y mamíferos acuáticos que en su organismo concentran considerables concentraciones de mercurio (0,2 a 1,3 ppm) y parece que el selenio contrasta el efecto tóxico del mercurio. El consumo humano de estos productos animales constituye un riesgo potencial, por lo que la Unión Europea estableció un límite máximo permisible de 0,3 µg/g y los E.U.A de 1 µg/g (Clark, R.B., 1992).

El cadmio puede provocar daños irreversibles en los riñones y la aparición de *nephrii proteinum* caracterizada por la pérdida de proteínas en la orina. El plomo no parece ser especialmente tóxico para los organismos acuáticos.

Para el hombre la alcalinidad o dureza del agua fundamentalmente produce un sabor inaceptable, pero los excesos de sus parámetros físico-químicos pueden provocar una serie de afectaciones a la salud (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2 Efectos en la salud del hombre por el agua contaminada con metales pesados (Kiely, G., 1999)

Contaminante	Efectos para la salud
Arsénico, As	Tóxico, dermatológico y afecta el sistema nervioso
Bario, Ba	Tumores benignos
Cadmio, Cd	Problemas en los riñones
Cromo, Cr	Hígado, riñones, piel y sistema digestivo
Cobre, Cu	Molestias en el estómago e intestinos, enfermedad de Wilson
Flúor, F	Daños a los huesos
Plomo, Pb	Daños al sistema nervioso central y periférico, riñones, muy tóxico para niños y mujeres embarazadas
Mercurio, Hg	Daños a los riñones y sistema nervioso.
Nitrato	Síndrome del “bebé azul”
Sodio, Na	Posible aumento de la tensión sanguínea

## 4.2. Fuentes de riesgos ambientales relacionadas con aguas subterráneas

### 4.2.1. Cantidad o caudal

Debido a las diferentes y particulares condiciones climáticas del planeta, el agua se encuentra en varios estados: sólida, líquida y gaseosa; como es evidente en el ciclo hidrológico o ciclo del agua (fig. 4.1) cuyo gran motor es el calor irradiado por el sol.

En términos generales, de cada 100 unidades de agua de lluvia, 1 unidad representa agua de infiltración subterránea, 38 unidades el agua de escurrimiento superficial y 61 unidades corresponden a la evapotranspiración.

Se evapora el agua de los océanos, de la tierra (superficie) y de otros cuerpos de agua y en menor proporción de la superficie terrestre. Los océanos contienen el 96,5% de toda el agua mientras que los ríos solo un 0,0002%. De toda el agua existente en el planeta Tierra solo 2,7% es agua dulce y, de toda el agua dulce disponible para uso de la humanidad, aproximadamente el 98% está en forma de agua subterránea.

El agua subterránea puede ocurrir tanto en rocas duras compactas (rocas ígneas y metamórficas), como en rocas sedimentarias no consolidadas (arenas y gravas, por ejemplo) y también en las de mayor consistencia (calizas).

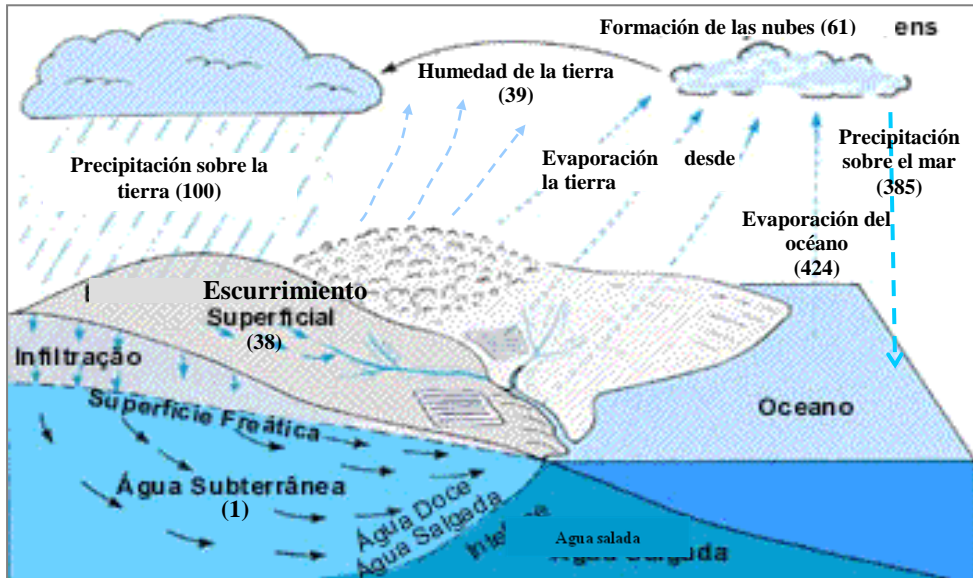


Figura 4.1 Ciclo y balance hidrológico medio anual global en unidades relativas a un valor de 100 para la precipitación sobre la tierra (adaptado de Chow, *et al.*, 1988)

El camino de las aguas subterráneas es el más lento de todos, debido a que recorren zonas del suelo, la zona intermedia y la franja capilar y, finalmente, se depositan en zonas saturadas (fig. 4.2).

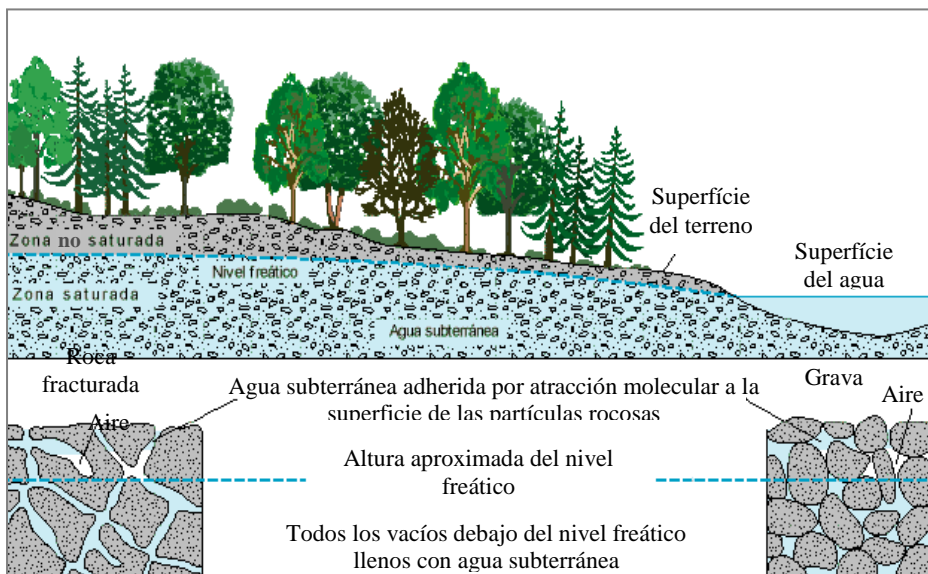


Figura 4.2 Ocurrencia del agua subterránea y referencia del nivel freático

Las rocas sedimentarias representan apenas un 5% de todas las rocas de la corteza terrestre, siendo responsables por el almacenamiento de cerca del 95% del

agua subterránea existente en el planeta, debido a su característica de material más poroso.

Los acuíferos, de modo general, se pueden clasificar en relación al tipo de roca almacenadora, en *acuíferos continuos* (porosidad primaria) y *discontinuos* (porosidad secundaria). Los primeros están asociados a rocas sedimentarias, y los segundos, principalmente a rocas ígneas y metamórficas (la caliza a pesar de su origen sedimentario presenta una porosidad secundaria).

Los *acuíferos continuos*, son un tipo de acuíferos que se caracterizan por una fase sólida, compuesta por granos de naturaleza petrográfica, de variadas formas y tamaños y que presentan espacios vacíos de pequeñas dimensiones definidos como poros o intersticios que son ocupados por líquidos o gases: agua, aire o vapor de agua.

La mayor o menor potencialidad de este tipo de acuífero depende, principalmente, del porcentaje de vacíos en la matriz de la roca (porosidad total) y de la conectividad entre ellos (permeabilidad). Muchas veces esos poros pueden ser llenados por material (cementación) tal como se observa en la fig. 4.3, que reduce el volumen de vacíos, y a veces por material fino que puede tornar la roca totalmente impermeable.

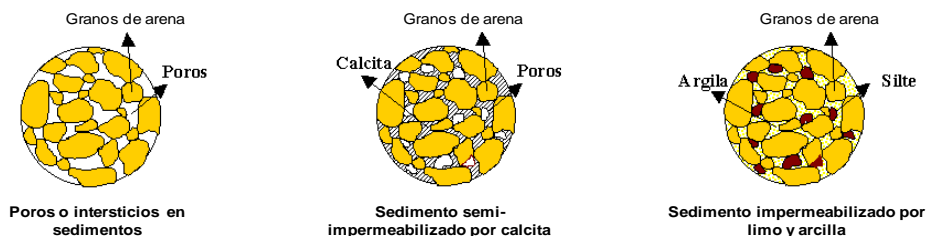


Figura 4.3 Potencialidad del tipo de acuífero en función de los poros

Los acuíferos continuos también se le pueden clasificar en función de la presión a que está sometida el agua en *libres* y *confinados*.

*Acuíferos libres:* la forma de la superficie superior del acuífero (nivel freático) depende en parte de la topografía del terreno, tendiendo en general a la conformación de la superficie del suelo. El límite superior del acuífero está definido por la propia superficie del agua.

En la superficie del agua, el agua en los poros del acuífero está bajo presión atmosférica como si estuviese en un reservorio al aire libre (fig. 4.4.a). La presión hidráulica en un determinado punto del acuífero es igual a su profundidad multiplicada por el peso del volumen de agua, medido en la superficie libre hasta el punto en cuestión, pudiendo ser expresada por la columna de agua o presión hidrostática en metros.

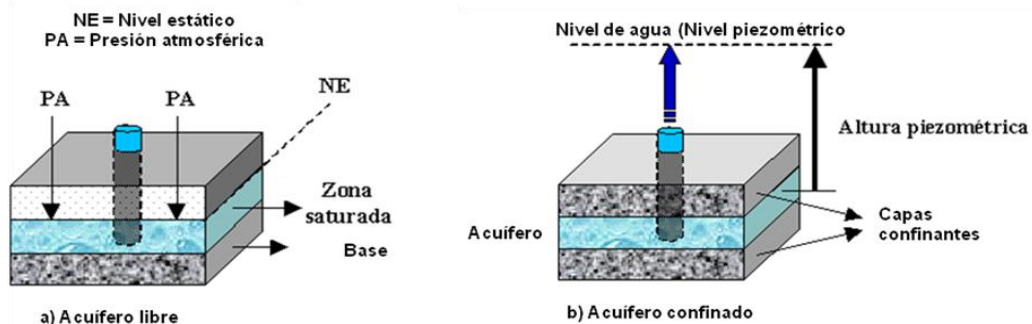


Figura 4.4 Esquema del acuífero libre y confinado

Cuando se perfora un acuífero el nivel estático del agua en el pozo es el mismo que en la superficie libre del acuífero. La superficie libre del acuífero no es estacionaria, moviéndose periódicamente para arriba cuando la zona de saturación recibe más infiltraciones de agua verticales y para abajo en temporada de sequía y/o cuando el agua almacenada previamente fluye para las nacientes, cursos de agua, pozos y otros puntos de descarga del agua subterránea.

Los *acuíferos confinados*, cuando un acuífero se encuentra entre dos capas impermeables este se encuentra confinado (fig. 4.4.b). Por el hecho de que la capa superior confinante sea impermeable, el agua está a una mayor presión que la presión atmosférica.

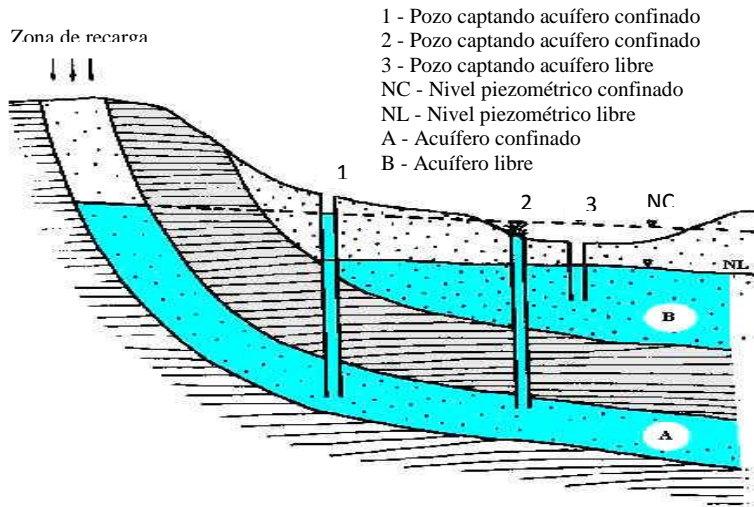


Figura 4.5 Esquema de acuíferos continuos (libres y confinados)

Cuando se perfora un pozo a través de una capa superior confinante llegando al acuífero, la altura del agua en el pozo presenta la misma presión a que está sometida el agua en el acuífero (fig. 4.5). La presión hidrostática en un determinado punto del acuífero se expresa en metros de agua y es igual a la



distancia vertical desde el punto en ese nivel multiplicado por el peso del volumen de agua.

La superficie imaginaria que representa la presión en todos los puntos o parte de un acuífero confinado es la *superficie piezométrica*. Esta es análoga a la superficie efectiva de la capa freática de los acuíferos libres.

Los *acuíferos discontinuos*, están compuestos por rocas duras cuyos principales vacíos están esencialmente constituidos por fracturas abiertas (fig. 4.6.a). Las aguas en este tipo de rocas se encuentran llenando estas fracturas y presentan características bien diferentes de las de los acuíferos continuos. Los acuíferos constituidos por zonas abiertas por disolución como en las calizas se denominan acuíferos cársticos (fig. 4.6.b).

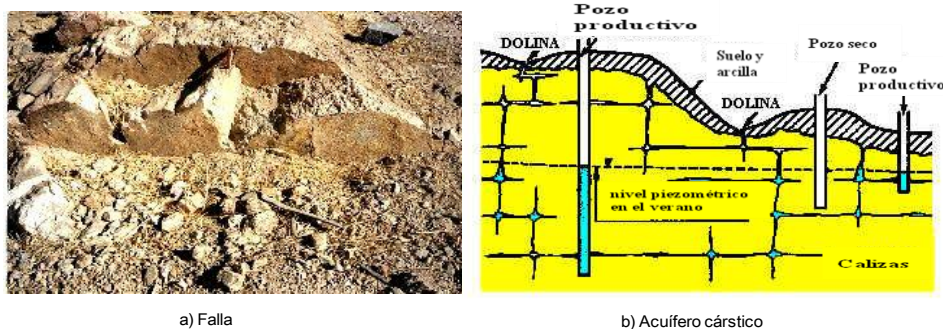


Figura 4.6 Falla en el macizo rocoso (acuífero discontinuo) y acuífero cárstico

Con relación al potencial hidrogeológico entre los diferentes tipos de fallas, las normales son las que presentan las mejores características en función de su origen a partir de esfuerzos de tracción, tendiendo a presentar mayores aberturas. Las del tipo inverso y transcurrentes son el producto de esfuerzos compresivos, generando planos de falla muy cerrados, siendo las del tipo transcurrente de menor potencialidad una vez que están asociadas a procesos de milonitización. Con respecto a las fracturas, siempre deben ser consideradas aquellas resultantes de esfuerzos de tracción por estar más abiertas; sin embargo, las resultantes de cizallamientos son cerradas.

El flujo del agua subterránea en acuíferos fracturados depende esencialmente de las características de las fracturas presentes, cuyos principales elementos son su abertura, rugosidad de las paredes y material de relleno.

#### 4.2.2. Alteración de la calidad natural del agua por drenaje ácido de las rocas

El drenaje ácido de rocas resulta de la oxidación de minerales sulfurados y la lixiviación de metales asociados, que provienen de rocas sulfurosas cuando están expuestas al aire y el agua. Este proceso está en función del tiempo y comprende el proceso de oxidación ya sea químico o biológico, tales como la precipitación y el encapsulamiento.

La fig. 4.7 ilustra el proceso de drenaje ácido de rocas en función del pH y el tiempo, comprendiendo tres etapas.

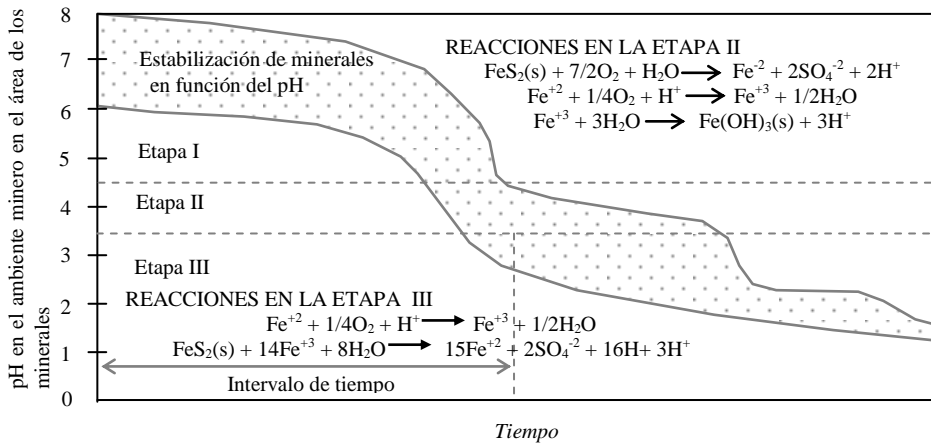


Figura 4.7 Esquema de las etapas en el drenaje ácido de rocas (Summers, L., *et al.*, 1999)

Este proceso generalmente se caracteriza por valores de pH debajo de 7 y hasta 1,5, alcalinidad decreciente y acidez creciente, altas concentraciones de sulfato, metales y sólidos disueltos totales (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3 Etapas en el proceso de drenaje ácido de rocas (Summers, L., *et al.*, 1999)

Etapas	Descripción
I	Al producirse la oxidación química de los minerales sulfurosos se genera acidez, existe una alcalinidad suficiente ( $\text{CaCO}_3$ ) para neutralizar la acidez y precipitar el hierro en forma de hidróxido y por lo tanto se retiene el agua que fluye sobre la roca neutral a alcalina ( $\text{pH} > 7$ ).
II	Al disminuir la fuente alcalina (agotamiento o inaccesibilidad a los minerales carbonatados, $\text{CaCO}_3$ ) el pH del agua decrece hasta 4,5 y 3,5 (acidez algo alta) y ocurren reacción de oxidación química y biológica, el agua drena con altas concentraciones de $\text{Fe}^{2+}$ e $\text{SO}_4^{2-}$ .
III	Al descender el pH la acidez aumenta, las reacciones de oxidación química se transforman a biológicamente catalizadas y el $\text{Fe}^{2+}$ se transforma en $\text{Fe}^{3+}$ . El agua que drena es ácida ( $\text{pH} < 3,5$ ) con $\text{SO}_4^{2-}$ y metales disueltos de alta concentración.

En las explotaciones mineras las principales fuentes primarias de drenaje ácido son las pilas de escombros, las pilas de lixiviación, las presas de relaves, los frentes de explotación subterráneas y/o a cielo abierto o los cortes en canteras y otras actividades como la construcción de vías de acceso.

Los minerales sulfurosos están generalmente debajo de la capa de suelo y del nivel freático, que dentro de ciertas condiciones naturales existe algún contacto mínimo con el oxígeno, permitiendo la generación de agua ácida a una velocidad muy baja con insignificante efecto sobre la calidad del agua. Sin embargo, cuando la roca sulfurosa está expuesta reacciona con el aire y el agua acelerando la velocidad de generación ácida y en consecuencia, ocasionando un potencial riesgo ambiental. En la explotación minera y particularmente en la subterránea (fig. 4.8),

las superficies expuestas usualmente son las zonas de los yacimientos minerales porque tienen un contenido de metales más alto que la zona de estériles.

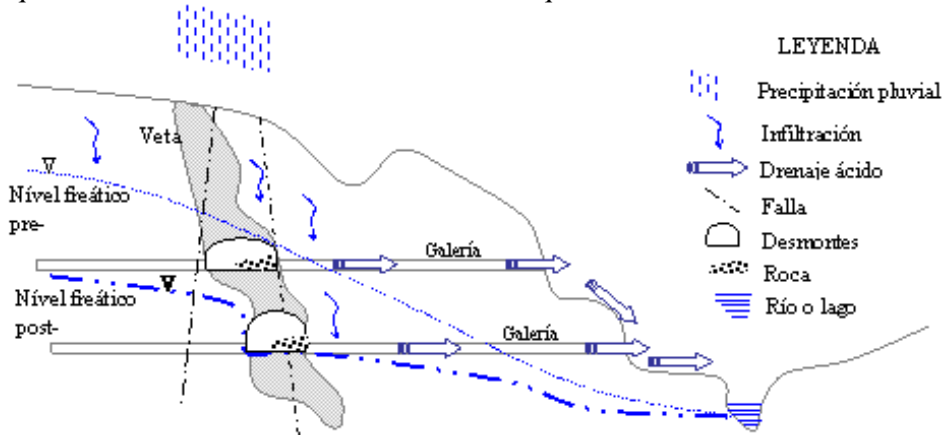


Figura 4.8 Agua subterránea y drenaje ácido de rocas

Además, las técnicas de explotación permiten generar una gran área de roca fragmentada, que en contacto con el aire y el agua producen aguas ácidas. Otro aspecto que influye en la alteración ambiental de las aguas subterráneas son los deslizamientos que pueden provocar las aberturas de la explotación y la utilización del relleno hidráulico.

Los minerales mas comunes en minas metálicas que pueden ser activados por la oxidación y lixiviación y generar drenaje ácido se presentan en el Cuadro 4.4.

Los minerales de cobre pueden estar asociados con zinc, arsénico y níquel y con menor frecuencia con cadmio y plomo. En los yacimientos estos metales se presentan como sulfuros que incluyen calcopirita, piritita, arsenopirita, sulfuro de plomo y esfalerita. Los metales asociados con minerales de cobre y oro en forma de sulfatos tienen la tendencia a presentar un mayor estado de oxidación.

Cuadro 4.4 Minerales y productos acuosos de oxidación completa (Lawrence, R.W., et al., 2000)

Metal	Mineral	Productos de la oxidación iónica
Hierro	Pirita, FeS <sub>2</sub> Pirrotita, Fe <sub>1-x</sub> S Marcasita FeS <sub>2</sub>	Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup> Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup> Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>
Cobre	Calcopirita, CuFeS <sub>2</sub> Covelita, CuS Calcosina, Cu <sub>2</sub> S Bornita, Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Cu <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>
Zinc	Esfalerita, ZnS Marmatita, (Zn,Fe)S	Zn <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup> Zn <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>
Plomo	Galena, PbS	Pb <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>
Níquel	Milerita, NiS Pentlandita, (Fe, Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>	Ni <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Ni <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>
Manganeso	Rodocrosita, MnCO <sub>3</sub> Alabandita, MnS	Mn <sup>2+</sup> , Mn <sup>3+</sup> , Mn <sup>4+</sup> Mn <sup>2+</sup> , Mn <sup>3+</sup> , Mn <sup>4+</sup>
Molibdeno	Molibdenita, MoS <sub>2</sub>	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>
Arsénico	Arsenopirita, FeAsS Realgar, AsS Oropimenta, As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Tetraedrita, Cu <sub>12</sub> (Sb,As) <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup> AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup> AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Cu <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> , SbO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , AsO <sub>2</sub> <sup>3-</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>
Mercurio	Cinabrio, HgS	Hg <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + H <sup>+</sup>
Cobalto	Cobaltita, CoAsS	Co <sup>2+</sup> , AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup>

### 4.3. Caracterización de las aguas subterráneas

#### 4.3.1. Balance hidrológico y caudal de agua subterránea

La ecuación del balance hidrológico se basa en la conservación de la masa de agua en un sistema, sea a escala regional o de la cuenca está dada por la ecuación (4.1), donde  $P$  representa la precipitación (mm/día),  $ES$  el escurrimiento superficial,  $EV$  la evaporación,  $\Delta H$  es el cambio en el nivel del agua subterránea y  $\Delta S$  es el cambio en el nivel de humedad del suelo. Esta ecuación puede variar en caso de existir escurrimientos de agua entre cuencas vecinas.

$$P = ES + EV \pm \Delta H \pm \Delta S \tag{4.1}$$

La intensidad de la precipitación pluvial  $P$  (mm/h) se puede calcular por la ecuación de Dillon, 1954 (4.2), donde  $T$  es el período de retorno (años) y  $t$  es la duración de la lluvia (minutos) y mediante la ecuación de Holland, 1967 (4.3) que incluye el parámetro  $N$  que es el número de sucesos en 10 años.

$$P = 152.T^{0.2}t^{0.6} \tag{4.2}$$

$$P = 25.4 \left( \frac{t}{60N} \right)^{0.318} \quad (4.3)$$

Los valores típicos del escurrimiento superficial y la precipitación pluvial varían según los continentes y regiones (Cuadro 4.5 y Cuadro 4.6). El continente con mayor precipitación pluvial, evapotranspiración y escurrimiento superficial es América del Sur y el que registra los valores más bajos es Australia, siendo el continente europeo ligeramente bajo.

Cuadro 4.5 Balance hidrológico de continentes (Baumgartner y Reichel, 1975)

Continente	Área (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	Precipitación (mm/año)	Evapotranspiración (mm/año)	Escurrim. Superf. (mm/año)
Europa	10,0	657	375	282
Sur América	17,9	1.564	946	618
Norte América	24,1	645	403	242
Asia	44,1	696	420	276
África	29,8	695	582	114
Australia	7,6	447	420	27
Antártida	14,1	169	28	141
Total tierra	148,9	746	480	266

Cuadro 4.6 Balance hidrológico para diferentes usos del terreno (Kiely, G., 1999)

Autor	Local	Uso de la tierra	P (mm/año)	ES (mm/año)	EV (mm/año)	Pérdidas (%)
Law 1956	UK	100% bosques	984	273	711	72
Inst.Hidrology 1970	UK	22% bosques	1496	555	953	64
	UK	70% bosques	1544	1049	495	32
Inst.Hidrology 1970	UK	Pastos	1135	717	421	37
	Escocia	Pastos	2200	1740	460	21
Law 1956	Amazonas	100% bosques	2593	-	1393	53
Bishop 1991	Australia	68% bosques	2620	1820	770	30
Shuttleworth 1988	Nueva Zelanda	Pastos	1150	500	650	57
Kirby et al. 1991						
Fahey, Watson						

El *Hydraulic Research, de Wallingford* (1983) propone la ecuación (4.4) para el cálculo del escurrimiento superficial  $Q_e$  (m<sup>3</sup>/s), basado en el coeficiente volumétrico de escurrimiento superficial  $C_e$  (Cuadro 4.7), intensidad de lluvia  $P$  (mm/h) y área de la cuenca  $A$  (km<sup>2</sup>).

$$Q_e = 0.3614 C_e P A \quad (4.4)$$

Cuadro 4.7 Coeficiente de escurrimiento para diferentes superficies (Kiely, G., 1999)

Descripción del área	C <sub>e</sub>	Descripción del área	C <sub>e</sub>
Calles	0,7 – 0,9	Carreteras	0,75 – 0,85
Zonas arenosas con pasto con pendiente: <2%	0,05 – 0,1	Zonas arcillosas con pasto con pendiente: <2%	0,13 – 0,17
2-7%	0,1 – 0,15	2-7%	0,18 – 0,22
>7%	0,15 – 0,2	>7%	0,23 – 0,35
Zona industrial ligera	0,78 – 0,95	Zona industrial pesada	0,50 – 0,80
Zona de viviendas	0,50 – 0,70	Zona viviendas unifamiliares	0,25 – 0,40

Basado en el ciclo hidrológico de Chow, *et al.*, (1988) (fig. 4.1), la cantidad de agua subterránea  $Q_s$  ( $m^3/s$ ) se calcula con la ecuación (4.5) considerando como variable el caudal de las aguas de escurrimiento superficial ( $Q_e$ ) y mediante la ecuación (4.6) para  $Q_s$  en equivalente a mm/h y en función de la precipitación pluvial ( $P$ ).

$$Q_s = 0.02632Q_e = 0.00951C_e PA \tag{4.5}$$

$$Q_s = 0.01P \tag{4.6}$$

La capacidad de producción del agua subterránea depende de varios parámetros que son:

- *Producción específica (PE)*, es la cantidad de agua del acuífero, expresada en porcentaje, que drena libremente por la influencia de la gravedad. Es menor en relación a la porosidad, ya que parte del agua no está libre debido a las fuerzas de enlace como la tensión superficial (Cuadro 4.8);
- *Coefficiente de almacenamiento (CA)*, expresa el volumen de agua que acumula un acuífero por unidad de superficie y por unidad de variación de la altura piezométrica. Según Davis y Cronwell (1991), este valor varía de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  para acuíferos confinados y de  $10^{-2}$  a 0,35 para acuíferos libres, expresado en  $m^3$  de agua/ $m^3$  de acuífero.
- *Gradiente hidráulico ( $dh/dx$ )*, es la pendiente de la línea de la superficie piezométrica en m/m;
- *Conductividad hidráulica (K)*, es la medida de la capacidad del medio rocoso o suelo para permitir el paso del agua expresado en m/s (Cuadro 4.8);
- *Transmisibilidad (T)*, es la velocidad de escurrimiento por unidad de anchura del acuífero expresado en  $m^2/s$ , cuya expresión matemática es  $T = Kb$ , donde b es el espesor (altura) el acuífero y K es la conductividad hidráulica (m/s).

Cuadro 4.8 Producción específica y porosidad de algunos materiales

(adaptado de Jhonson, A. I., 1967)

Material	Porosidad (%)	Producción específica PE (%)	Conductividad hidráulica K (m/s)
Arcilla	36 – 60	3	$10^{-11} - 10^{-9}$
Arenisca	5 – 30	5	$10^{-10} - 10^{-6}$
Caliza	5 – 50	2	$10^{-6} - 10^{-2}$
Esquisto	0 – 10	3	$10^{-13} - 10^{-9}$
Basalto	3 – 35	-	$10^{-10} - 10^{-5}$
Depósito glaciario	32	16	$10^{-12} - 10^{-6}$

#### 4.3.2. Escurrimiento del agua subterránea

El escurrimiento en acuíferos es tridimensional, pero cuando el gradiente hidráulico es predominantemente unidimensional el escurrimiento tiende a ser unidimensional. La ley de Darcy para el escurrimiento de aguas subterráneas se expresa por la ecuación (4.7), donde  $Q_s$  es el caudal de agua ( $m^3/s$ ),  $K$  es la conductividad hidráulica (m/s),  $A$  es el área de la sección transversal del acuífero ( $m^2$ ),  $h_2 - h_1$  es la caída de presión (m),  $l_2 - l_1$  la distancia horizontal entre  $h_2$  y  $h_1$  (m) (fig. 4.9).

$$Q_s = -KA \left( \frac{dh}{dx} \right) = KA \left( \frac{h_2 - h_1}{l_2 - l_1} \right) \quad (4.7)$$

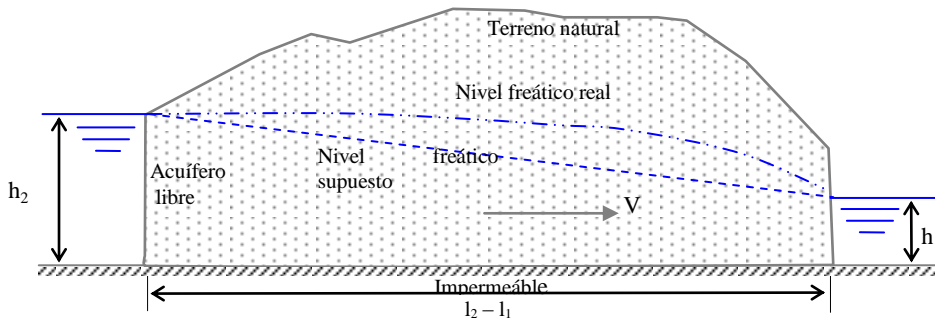


Figura 4.9 Esquema del escurrimiento del agua subterránea

El caudal de agua por bombeo en el acuífero confinado fig. 4.10.a y el acuífero libre fig. 4.10.b está determinado mediante la ecuación (4.8) y (4.9), respectivamente.

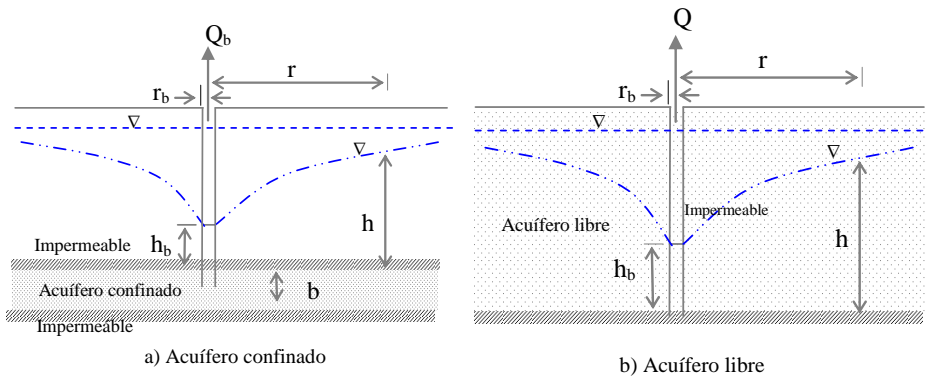


Figura 4.10 Escurrimiento del agua en acuíferos en régimen estacionario

$$Q_b = 2\pi k b \left( \frac{h - h_b}{Ln(r/r_b)} \right) \quad (4.8)$$

$$Q_b = \pi k \left( \frac{h^2 - h_b^2}{Ln(r/r_b)} \right) \quad (4.9)$$

En aberturas subterráneas existentes es recomendable realizar mediciones del caudal en los sitios respectivos utilizando cualquiera de los métodos indicados a continuación:

- Instalación de vertederos (o canales Parshall) para alcantarillas o canales abiertos o parcialmente llenos;
- Método de llenado de un recipiente con volumen conocido, controlando el tiempo, recomendable para caudales pequeños o intermitentes;

- Caudal estimado a partir de las características del sistema de bombeo;
- Cronometraje de la ruta de un objeto fluctuante entre dos puntos fijos para determinar la velocidad superficial, ya que la velocidad real para el escurrimiento laminar es aproximadamente a 0,8 de la velocidad superficial. En este método es necesario conocer la sección húmeda en el canal de drenaje.

El proceso de medición del caudal del agua subterránea en las aberturas existentes debe tener por lo menos una estación por cada afluente (galería o rampa secundaria) a la galería o rampa de drenaje principal y, necesariamente, una salida a la superficie del nivel de drenaje (túnel o galería), tal como se ilustra en la fig. 4.11. Estas estaciones pueden ser utilizadas también para la recolección con fines de caracterización de la calidad del agua

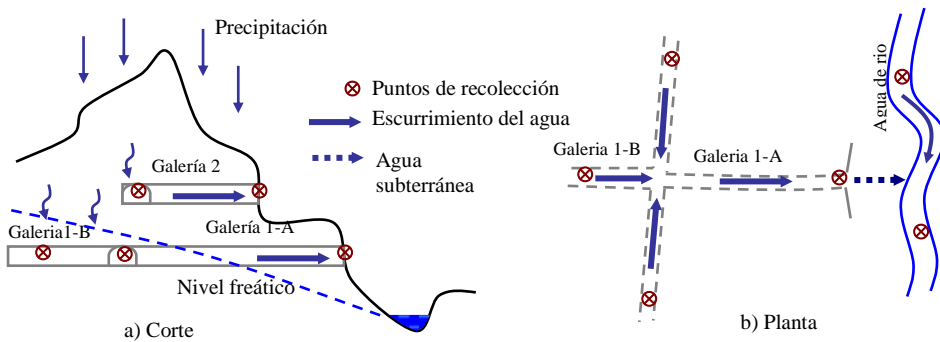


Figura 4.11 Esquema de las estaciones de medición y recolección de agua subterránea en la etapa de caracterización

Este procedimiento permite caracterizar los frentes y áreas de los trabajos subterráneos con un determinado caudal de agua subterránea y correlacionarlo con la litología y fracturas o fallas existentes en el macizo rocoso.

#### 4.3.3. Drenaje ácido de agua

Con el fin de buscar las medidas correctivas del impacto ambiental por drenaje ácido de agua es importante evaluar los factores que controlan la velocidad y magnitud de la generación de acidez, los procesos químicos y reactivos intervinientes (fig. 4.12).



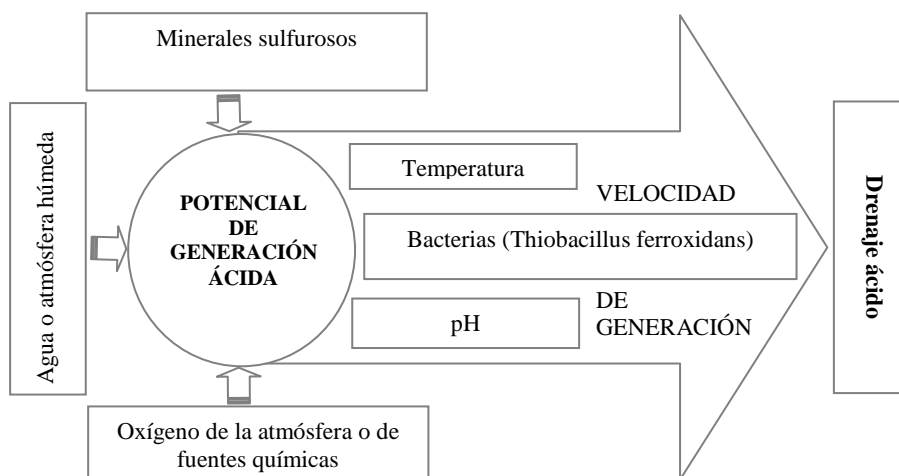


Figura 4.12 Componentes potenciales para la generación de ácidos y factores que controlan la velocidad

Las reacciones en la producción del ácido se expresa de manera general como la oxidación de la pirita en secuencia (fig. 4.13), aunque la perotita y la marcasita también deben ser consideradas como fuentes de drenaje ácido.

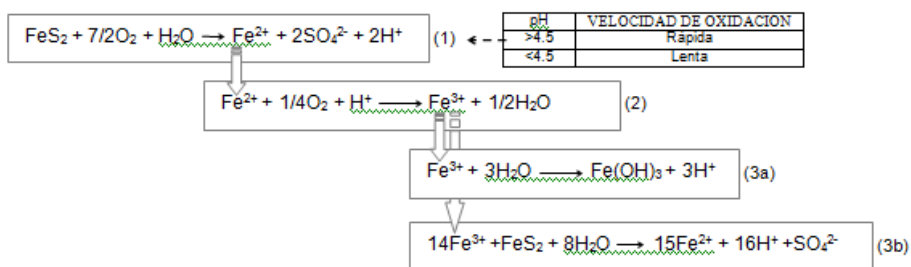


Figura 4.13 Secuencia de la reacción de oxidación de la pirita en el drenaje ácido

Todos los minerales sulfurosos tienen potencial de oxidación y lixiviación de metales. Por lo tanto, algunos minerales con asociaciones de hierro (calcopirita, enargita, galena, esfalerita y arsenopirita), pueden generar acidez y metales disueltos en el agua, por la acción del sulfuro de hierro.

En la secuencia (2) de la reacción de la pirita, la velocidad de producción de hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) controla el proceso total de oxidación, pero por la catálisis biológica esta reacción es algo rápida (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus*).

La velocidad de oxidación bacteriana es función de la temperatura, del pH (fig. 4.14), de la disponibilidad de oxígeno, del dióxido de carbono y de los nutrientes ( $\text{N}_2$ , P) y del área superficial del mineral sulfuroso expuesto.

En términos generales la velocidad de oxidación, bien sea química o biológica, aumenta con el incremento de la temperatura, por lo tanto una oxidación

continua puede crear condiciones favorables para el incremento de las bacterias oxidantes. La producción de  $H^+$  y la consecuente disminución del pH hasta un nivel adecuado para las bacterias que oxidan el sulfato y el hierro, la producción de  $Fe^{3+}$  y el aumento de la temperatura debido al proceso exotérmico, ofrecen condiciones ideales para la acción de las bacterias.

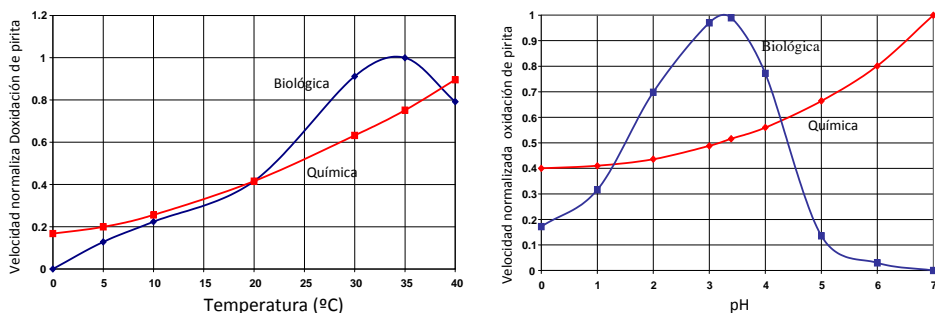
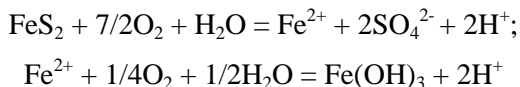


Figura 4.14 Efecto de la temperatura y pH sobre la velocidad de oxidación química y biológica de la pirita (Summers, L., *et al*, 1999)

La cantidad de acidez que se puede liberar de la oxidación del mineral sulfuroso se determina a partir de las ecuaciones mostradas en la fig. 4.13. Por ejemplo, la oxidación de 1 mol de pirita produce 4 moles de acidez ( $4H^+$ ) que se expresa en las ecuaciones siguientes:



En el proceso de lixiviación, la solubilidad de muchos metales aumenta en la medida que el pH disminuye por debajo de 7, y cuando el pH aumenta algunos de los metales en solución pueden precipitar. En algunos casos el drenaje contaminado también sirve como lixiviante, promoviendo la disolución de los minerales oxidados que pueden ser inertes o de baja solubilidad.

En aberturas subterráneas ya existentes, como en el caso de las minas en operación, en la etapa de caracterización de la calidad del agua es recomendable realizar ensayos *in situ* y la recolección sistemática en las aberturas subterráneas y también aguas arriba y aguas abajo del agua superficial de la cuenca para donde drena el agua de mina (riberas, río, lago o mar) (Figura 4.11).

Los principales contaminantes relacionados con el drenaje de agua subterránea son los sólidos en suspensión, el nivel de acidez, la concentración de partículas y metales. También pueden ser contaminantes los lubricantes y diesel utilizados por los equipos.

Para el proceso de recolección es conveniente tomar medidas de precaución contra la contaminación de las muestras, seleccionando los recipientes adecuados, lavándolos y manipulándolos adecuadamente, de conformidad con los estándares recomendados, como por ejemplo el de la EPA de los E.U.A (Cuadro 4.9).

Cuadro 4.9 Volumen, condición, objetivos del análisis y tiempo de almacenamiento de las muestras de agua (basado en EPA E.U.A., 1993)

Recipiente (litros)	Condición de la muestra	Objetivo del análisis	Tiempo de almacenamiento máximo
1	No filtrada, no preservada	Parámetros físicos e íos principales	24 horas
½	No filtrada, no preservada	Metales totales y sólidos totales disueltos	6 meses
½	Filtrada y preservada	Metales disueltos	6 meses

El volumen de la muestra para el análisis de diferentes parámetros puede variar según el laboratorio, sin embargo, en términos generales, de cada estación de recolección serán suficientes tres recipientes (Cuadro 4.9), que deben haber sido lavados con ácido.

Las muestras pueden ser simples o compuestas. Las *muestras simples* se utilizan cuando el caudal de agua es algo constante o intermitente y cuando la muestra compuesta puede ocultar alguna de las condiciones extremas (pH, temperatura). Las *muestras compuestas* son aquellas formadas por muestras individuales tomadas en diferentes momentos, en este caso el volumen de cada muestra individual ( $V_i$ ) por unidad de caudal instantáneo en el momento en que la muestra  $i$  es tomada ( $Q_i$ ) se expresa por la ecuación (4.10), donde  $V$  es el volumen total de la muestra compuesta,  $n$  es el número de muestras a mezclar y  $Q_m$  es el caudal medio.

$$\frac{V_i}{Q_i} = \frac{V}{nQ_m} \quad (4.10)$$

Para las mediciones *in situ* existen sondas, manuales o portátiles, que determinan el pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, el nivel de claridad y el sulfato.

#### 4.4. Normas y estándares sobre la calidad del agua

##### 4.4.1. Capacidad del sistema de bombeo como patrón de referencia

Para identificar el riesgo ambiental subterráneo debido a la cantidad de agua, se puede tomar como referencia el caudal potencial de agua que puede generar una inundación, a falta de una medida de control adecuado y oportuno. Por lo tanto, el caudal de referencia para determinar los niveles de riesgo ambiental tiene relación con la capacidad máxima de la estación de bombeo en un sitio determinado  $Q_{m\acute{a}x}$  ( $m^3/s$  o  $l/s$ ) y el caudal potencial de agua presente en el sitio indicado  $Q$  ( $m^3/s$  o  $l/s$ ), que, con su variación por causas operacionales o derrumbes del macizo rocoso provocado por las excavaciones puede generar riesgo de inundación.

#### **4.4.2. Normas y estándares de calidad de las aguas subterráneas**

Los estándares de calidad de las aguas subterráneas están referidos a los efectos que podrían producir como efluente ambiental o cuando su descarga se realiza en aguas superficiales, por lo tanto, los estándares están relacionados con el uso a que serán destinadas estas aguas.

En la Unión Europea se han establecido los niveles máximos permisibles para el consumo humano mediante la Directiva del Consejo n.º 75/440/CEE del 16-06-1975 (Cuadro 4.10). Esta directiva es la relativa en cuanto a los requisitos que deben cumplir después de la aplicación de los tratamientos apropiados, la calidad de las aguas dulces superficiales utilizadas o destinadas a la producción de agua potable. Las aguas subterráneas, las aguas salobres y las aguas destinadas a la recarga de las napas subterráneas no están obligadas por la referida directiva.

Las normas de calidad aplicables a las aguas piscícolas (Decreto Ley 236/98 de Portugal) son fijadas con base en parámetros físico-químicos y biológicos que, a fin de permitir la vida y el crecimiento de los peces (salmónidos, ciprínidos), contribuyen a la buena calidad de los posibles productos de consumo por el hombre (Cuadro 4.11).

La Unión Europea definió mediante la Directiva del Consejo n.º 79/923/CEE del 30-10-79 con respecto a la calidad de las aguas para mariscos/crustáceos y que es aplicable a las aguas del litoral y aguas salobres que han sido consideradas por los Estados miembros como aguas que necesitan ser protegidas o mejoradas a fin de permitir la vida y el crecimiento de moluscos (moluscos bivalvos y gasterópodos) y contribuir así a la buena calidad de los mariscos/crustáceos que pueden ser directamente consumidos por el hombre.

Mediante la Directiva del Consejo n.º 80/778/CEE del 15-07-1980 la UE define los valores máximos admisibles (calidad del agua) destinados al consumo humano.

Estas directivas establecen que los estados miembros de la UE adopten estas normas de calidad dentro de su respectiva norma.

El objetivo de la norma de calidad de las aguas de riego (Decreto Ley 236/98 de Portugal) es proteger la salud pública, la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, los cultivos que pueden ser afectados por la mala calidad de las aguas de riego y los suelos cuya aptitud para la agricultura puede ser degradada por el sistemático uso de las aguas de riego de mala calidad (Cuadro 4.12).

Cuadro 4.10 Estándares de aguas dulces superficiales destinadas a la producción de agua para consumo humano  
(Directiva del Consejo n.º 75/440/CEE del 16-06-1975)

No	Parámetros	A1 G	A1 I	A2 G	A2 I	A3 G	A3 I
1	PH	6,5-8,5		5,5-9		5,5-9	
2	Color (después de la filtración simple) mg/l escala Pt	10	20(O)	50	100(O)	50	200(O)
3	Materias totales en suspensión mg/l	25					
4	Temperatura °C	22	25(O)	22	25(O)	22	25(O)
5	Conductividad µs/cm-1 a 20 °C	1000		1000		1000	
6	Olor (factor de dilución a 25 °C)	3		10		20	
7	Nitratos mg/l NO <sub>3</sub>	25	50(O)		50(O)		50(O)
8 <sup>1</sup>	Fluoruros mg/l F	0,1/1	1,5	0,7/1,5		0,7/1.7	
9	Hierro disuelto mg/l Fe	0,1	0,3	1	2	1	
10	Manganeso mg/l Mn	0,05		0,1		1	
11	Cobre mg/l Cu	0,02	0,05(O)	0,05		1	
12	Zinc mg/l Zn	0,5	3	1	5	1	5
13	Boro mg/l B	1		1		1	
14	Arsénico mg/l As	0,01		0,05	0,05	0,05	0,1
15	Cadmio mg/l Cd	0,001	0,005	0,001	0,005	0,001	0,005
16	Cromo total mg/l Cr		0,05		0,05		0,05
17	Plomo mg/l Pb		0,05		0,05		0,05
18	Selenio mg/l Se		0,01		0,01		0,01
19	Mercurio mg/l Hg	0,0005	0,001	0,0005	0,001	0,0005	0,001
20	Bario mg/l Ba		0,01		1		1
21	Cianuro mg/l Cn		0,05		0,05		0,05
22	Agentes de superficie (que reaccionan al azul de metileno) mg/l (lauril-sulfato)	0,2		0,2		0,5	
23	Fosfatos mg/l P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4		0,7		0,7	
24 <sup>2</sup>	Fenoles (índice de fenoles) para-nitro- nilina 4-aminoantipirina mg/l C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH		0,001	0,001	0,005	0,01	0,1
25	Hidrocarburos disueltos o emulsionados (después de la extracción por éter de petróleo) mg/l		0,05		0,2	0,5	1
	Hidrocarburos aromáticos policíclicos mg/l		0,0002		0,0002		0,001
26	Pesticidas totales (paratión, HSH, dieldrín) mg/l		0,001		0,0025		0,005
27	Tasa de saturación de oxígeno disuelto %O <sub>2</sub>	>70		>50		>30	
28	Oxidabilidad bioquímica (OBQ) a 20 °C sin nitrificación mg/l O <sub>2</sub>	<3		<5		<7	
29	Nitrógeno Kjeldahl (NO <sub>3</sub> excluido) mg/l N	1		2		3	
30	Amoníaco mg/l NH <sub>4</sub>	0,05		1	1,5	2	4(O)
31	Coliformes totales 37 °C / 100 ml	50		5000		50000	
32	Coliformes fecales / 100 ml	20		2000		20000	
33	Estreptococos fecales salmonelas / 100 ml	20		1000		10000	
<p>I = Imperativo G = Guía (O) = Condiciones climáticas, o geográficas excepcionales</p>		<p>1 = Los valores indicados constituyen los límites superiores determinados en función de la temperatura media anual (temperatura alta y baja) 2 = Este parámetro está incluido para satisfacer las exigencias ecológicas de ciertos medios</p>					
<p>Categoría A1 = Tratamiento físico simple y desinfección, por ejemplo, filtración rápida y desinfección. Categoría A2 = Tratamiento normal físico, químico y desinfección, por ejemplo, pre-cloración, coagulación, floculación, decantación, filtración, desinfección (cloración final). Categoría A3 = Tratamiento físico, químico reforzado, refinación y desinfección, por ejemplo cloración al break point coagulación, floculación, decantación, filtración, adsorción (carbono activado), desinfección (ozono, cloración final).</p>							

Cuadro 4.11 Estándares de valor máximo admisible (VMA) de aguas piscícolas (Decreto-ley n.º 236/98)

Parámetros	Agua de salmónidos (VMA)	Agua de Ciprínidos (VMA)
Fuente térmica (aguas abajo) (°C)	$\nabla T < 1,5$ de la temperatura natural	$\nabla T < 3$ de la temperatura natural
Oxígeno disuelto (mg/l O <sub>2</sub> )	-	-
pH	50% $\geq 9$ , 100% $> 7$	50% $\geq 7$
Sólidos suspendidos (mg/l)	6 – 9	6 – 9
Nitrito (mg/NO <sub>2</sub> )	25	25
Amoníaco no ionizado (mg/l)	0,01	0,03
NH <sub>3</sub>	0,025	0,025
Nitrógeno amoniacal (mg/l NH <sub>4</sub> )	1	1
Cl resid. Disp. total (mg/l HOCl)	0,005	0,005
Zinc total (mg/l Zn)	0,3	1,0
Cobre soluble (mg/l Cu)	0,4	0,04

Cuadro 4.12 Estándares de valor máximo admisible (VMA) de las aguas destinadas a riego expresado en mg/l (Decreto-ley n.º 236/98)

Parámetros	VMA	Parámetros	VMA
Aluminio (Al)	20	Arsénico (As)	10
Berilio (Be)	1,0	Boro (B)	3,75
Cadmio (Cd)	0,05	Plomo (Pb)	20
Cobalto (Co)	10	Cobre (Cu)	5,0
Cromo (Cr)	20	Flúor (F)	15
Litio (Li)	5,8	Manganeso (Mn)	10
Molibdeno (Mo)	0,05	Níquel (Ni)	2,0
Selenio (Se)	0,05	Vanadio (V)	1,0
Zinc (Zn)	10	pH	4,5-9,0

En el caso de Portugal, el Decreto-Ley n.º 236 del 1 de agosto, contempla valores límite admisibles (VLA) de aguas dulces para fines acuícolas, aguas piscícolas (aguas de salmónidos y aguas de ciprínidos), para un pH de 6,9 con variación de  $\pm 0,5$  en la escala de Sorensen, amoníaco no ionizado de 0,025 mg/l NH<sub>3</sub>, cloro residual disponible total 0,005 mg/l HOCl. Para salmónidos y ciprínidos respectivamente, los valores de oxígeno disuelto son 50%  $\geq 9$  y 50%  $\geq 7$ , y de zinc total 3,0 y 1,0 mg/l.

La *Association for Environmental Health and Sciences* de los E.U.A presenta un resumen de los estándares de los niveles máximos permisibles considerados por la EPA para la contaminación mediante productos de hidrocarburos (Cuadro 4.13) para las acciones de medidas correctivas.

Cuadro 4.13 Niveles máximos permisibles para hidrocarburos contaminantes del agua subterránea en Pensilvania E.U.A.

Producto	Componente	Laboratorio, Prueba, Protocolo y Número	Estándar
Gasolina sin plomo	<i>Benceno</i>	EPA 5030B/8260B o 524.2	5 µg/l
	<i>Tolueno</i>	EPA 5030B/8260B o 524.2	1000 µg/l
	<i>Etil benceno</i>	EPA 5030B/8260B o 524.2	700 µg/l
	<i>Xyleno</i>	EPA 5030B/8260B o 524.2	10000 µg/l
	<i>Cumeno</i>	EPA 5030B/8260B o 524.2	1100 µg/l
	<i>MTBE</i>	EPA 5030B/8260B o 524.2	20 µg/l
	<i>Naftaleno</i>	EPA 5030B/8260B o 524.2	100 µg/l
Querosén, aceite diesel no. 1	<i>Benceno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	5 µg/l
	<i>Tolueno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B or 524.2	1000 µg/l
	<i>Ethylbenceno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	700 µg/l
	<i>Cumeno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	1100 µg/l
	<i>Naftaleno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	20 µg/l
Querosén, aceite diesel no. 2	<i>Fluoreno</i>	EPA 8270C, 8310 o 525.2	1500 µg/l
	<i>Benceno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	5 µg/l
	<i>Tolueno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	1000 µg/l
	<i>Ethylbenceno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	700 µg/l
	<i>Cumeno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	1100 µg/l
	<i>Naftaleno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	100 µg/l
	<i>Fluoreno</i>	EPA 8270C, 8310 o 525.2	1500 µg/l
Aceite diesel nº 4,5,6, Lubricantes aceites & fluidos	<i>Phenanthreno</i>	EPA 8270C, 8310 o 525.2	1100 µg/l
	<i>Benzeno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	5 µg/l
	<i>Naftaleno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	100 µg/l
	<i>Phenanthreno</i>	EPA 8270C, 8310 o 525.2	1100 µg/l
	<i>Pyreno</i>	EPA 8270C, 8310 o 525.2	130 µg/l
Aceite usado por los motores	<i>Chryseno</i>	EPA 8270C, 8310 o 525.2	1.9 µg/l
	<i>Benceno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	5 µg/l
	<i>Tolueno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	1000 µg/l
	<i>Ethylbenceno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	700 µg/l
	<i>Cumeno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	1100 µg/l
	<i>Naftaleno</i>	EPA 5030B/8021B, 5030B/8260B o 524.2	100 µg/l
	<i>Pyreno</i>	EPA 525.2	13 µg/l
	<i>Benzo (a) antraceno</i>	EPA 525.2	0.9 µg/l
	<i>Chryseno</i>	EPA 525.2	1.9 µg/l
	<i>Benzo (b) fluorantheno</i>	EPA 525.2	0.9 µg/l
	<i>Benzo (a) pyreno</i>	EPA 525.2	0.2 µg/l
	<i>Indeno(1,2,3-cd)pyreno</i>	EPA 525.2	0.9 µg/l
	<i>Benzo (g,h,i)peryleneo</i>	EPA 525.2	0.26 µg/l
<i>Plomo(disuelto)</i>	EPA 6020 o 7421	5 µg/l	

La *National Primary Drinking Water Regulations* de los E.U.A. considera los niveles máximos admisibles (Cuadro 4.14) para componentes inorgánicos.

Cuadro 4.14 Niveles máximos permisibles para el agua de consumo humano en los E.U.A. (*Maximum Contaminant Level, MCL*, <http://www.epa.gov/safewater/mcl.html>)

Componente inorgánico	MCL (mg/l)	Componente inorgánico	MCL (mg/l)	Componente inorgánico	MCL (mg/l)
Antimonio	0,006	Mercurio (inorgánico)	0,002	Cadmio	0,005
Arsénico	0	Nitrato (medido como Nitrogéno)	10	Cromo (total)	0,1
Asbesto (fibras > 10 µm)	7 millones de fibras por litro	Nitrito (medido como Nitrogéno)	1	Cobre Plomo	1,3 0,0
Bario	2	Selenio	0,05	Cianuro	0,2
Berilio	0,004	Talio	0,0005	Fluoruro	4,0

Cuadro 4.15 Estándares de calidad de efluentes líquidos de drenaje de minas según el Banco Mundial (disponible en [www.ifc.org/enviro/enviro/pollution/min\\_pit.pdf](http://www.ifc.org/enviro/enviro/pollution/min_pit.pdf))

Contaminante	VMA (mg/l)	Contaminante	VMA (mg/l)
pH	6 a 9	Hierro, total	2
BODs*	50	Plomo	0,6
Aceites y grasas	20	Mercurio	0,002
Sólidos totales	50	Níquel	0,5
Arsénico	1	Zinc	1
Cadmio	0,1	Cianuro libre	0,1
Cromo exavalente	0,05	Cianuro, total	1
Cromo, total	1	Cobre	0,3
Temperatura en el punto de mezcla del efluente con el agua receptora Máximo 3 °C por encima de la temperatura del agua receptora. Máximo 3 °C si la Temperatura del agua receptora > 28 °C			
BODs : Demanda Bioquímica de Oxígeno			

El Banco Mundial mediante la INTERIM (*Environment, Health and Safety Guidelines Mining and Milling - Underground*) establece la norma de calidad para los efluentes líquidos descargados en las aguas superficiales procedentes de los desechos, del drenaje de minas, de los depósitos de sedimentación, de los sistemas de alcantarillado y del drenaje de inundaciones (Cuadro 4.15). No aplica para reglamentar la descarga de los desechos al ambiente marino.

#### 4.5. Matriz base para la identificación del riesgo ambiental debido a la alteración del agua subterránea

Basado en el caudal referencial definido por la capacidad máxima de bombeo para un sitio determinado  $Q_{max}$  (m<sup>3</sup>/s o l/s) y el caudal potencial de agua presente en el sitio indicado Q (m<sup>3</sup>/s o l/s) que puede generar riesgo de inundación, se elaboró una matriz (Cuadro 4.16) que permite identificar el nivel de impacto ambiental ocasionado por el caudal de agua subterránea.



Cuadro 4.16 Matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental subterráneo debido al caudal del agua

Nivel de impacto ambiental	Caudal de agua en el ambiente subterráneo
Leve	$Q_{m\acute{a}x} \leq Q \leq 1,05Q_{m\acute{a}x}$
Moderado	$1,05Q_{m\acute{a}x} < Q \leq 1,1Q_{m\acute{a}x}$
Alto	$Q > 1,1Q_{m\acute{a}x}$

Con base en los estándares de calidad de aguas indicados en los Cuadros 4.10 a 4.15 para fines de consumo humano, riego y piscícola, se elaboró una matriz base para la identificación del impacto ambiental ocasionado por la alteración de la calidad de las aguas subterráneas (Cuadro 4.17) teniendo como indicadores el pH y el valor admisible de la concentración de metales  $C_{VLA}$  con relación a la concentración real o existente  $C_r$ .

Cuadro 4.17 Matriz base para la evaluación del riesgo ambiental subterráneo debido al caudal y concentración de metales

Nivel de riesgo	pH			Concentración de metales
	Riego	Cons. humano	Piscícola	
Leve	$4,5 \geq \text{pH} > 3,5$	$6,5 \geq \text{pH} > 5,5$	$6 \geq \text{pH} > 5$	$1,05C_{VLA} \geq C_r > C_{VLA}$
Moderado	$3,5 \geq \text{pH} > 2,5$	$5,5 \geq \text{pH} > 4,5$	$5 \geq \text{pH} > 4$	$1,10C_{VLA} \geq C_r > 1,05C_{VLA}$
Alto	$\text{pH} \leq 2,5$	$\text{pH} \leq 4,5$	$\text{pH} \leq 4$	$C_r > 1,10 C_{VLA}$

#### 4.6. Medidas correctivas para el impacto ambiental con relación al agua subterránea

##### 4.6.1. Para el impacto ambiental por efecto del caudal

El impacto ambiental por efecto del caudal de agua en las excavaciones subterráneas está relacionado con la inundación, cuya medida correctiva es la utilización de un sistema de bombeo, sea centrífugo (fig. 4.15.a) o sumergido (fig. 4.15.b).

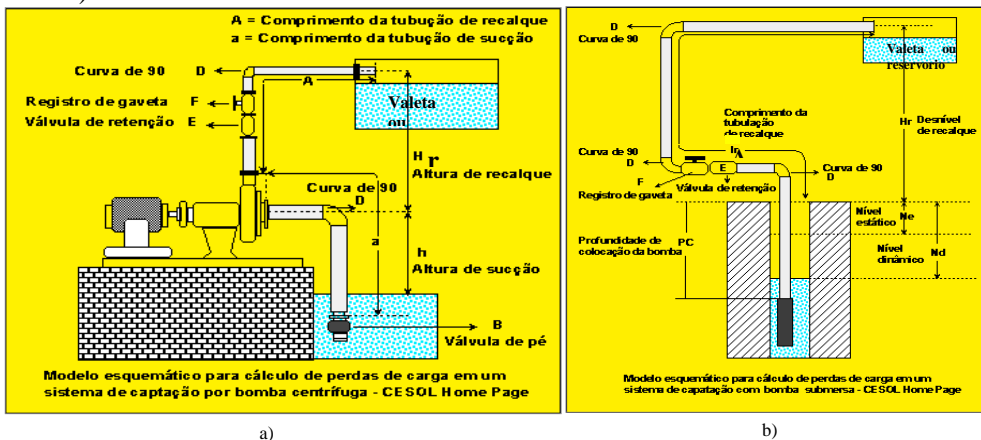


Figura 4.15 Esquema del sistema de bombeo con bomba succión/compresión a) y con bomba sumergida b) (adaptado de www.geocities.com)

La búsqueda de las medidas correctivas consiste en determinar la altura manométrica total de bombeo y con el caudal de agua caracterizado, dimensionar la potencia del motor de la bomba y seleccionar el equipo adecuado para el caso específico. Es conveniente indicar que las bombas de tipo centrífugo presentan limitaciones extremas en relación con la profundidad de succión.

Para el cálculo de la altura manométrica total  $AMT$  (m) en un sistema utilizando una bomba centrífuga, se consideran las siguientes variables: el desnivel de succión  $h$  (m), el desnivel de la represión  $H$  (m), la pérdida de la fricción en las tuberías y represión (Anexo 4.1), pérdida por fricción en las conexiones (Anexos 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5) y caudal máximo anual de agua subterránea caracterizado en un sitio determinado  $Q$  (l/s).

El modelo esquemático de la Figura 4.15 muestra un sistema típico utilizando bomba centrífuga y sumergida y los parámetros a considerar para el cálculo de la altura manométrica total. El número y tipo de conexiones son variables, en la práctica, para cada situación específica.

Para el cálculo de la altura manométrica total para bombas centrífugas  $AMT_c$  (m) se utiliza la ecuación (4.11) donde la altura manométrica de succión es  $AMS$  (m), la altura manométrica de refricción es  $AMR$  (m).

$$AMT_c = 1.1(AMS + AMR) \quad (4.11)$$

La altura manométrica de succión  $AMS$  está determinada con la ecuación (4.12) donde las pérdidas por fricción en el interior de la tubería de succión están representadas por  $PAS$  (m), las pérdidas de presión en las conexiones de succión por  $PSC$  (m) (Cuadros de los Anexos 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5) y la altura de sección mediante  $h$  (m).

$$AMS = PAS + PSC + h \quad (4.12)$$

El  $PAS$  se determina en función del coeficiente de fricción  $C_a$  (%) (Cuadro del Anexo 4.1) y la longitud de las tuberías de succión  $L_s$  (m) con la ecuación (4.13).

$$PAS = \frac{C_a L_s}{100} \quad (4.13)$$

La altura manométrica de refricción  $AMR$  (m) se calcula por la ecuación (4.14) donde las pérdidas de carga por fricción en la tubería de refricción es  $PAR$  (m), las pérdidas de presión en las conexiones en la refricción es  $PCR$  (m) (Cuadros de los Anexos 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5) y la altura de refricción es  $H_r$  (m).

$$AMR = PAR + PCR + H_r \quad (4.14)$$

La  $PAR$  está determinada en función del coeficiente de fricción  $C_a$  (%) (Cuadro del Anexo 4.1) y la longitud de las tuberías de succión  $L_r$  (m) con la ecuación (4.15).

$$PAR = \frac{C_a L_r}{100} \quad (4.15)$$

La potencia del sistema de bombeo se calcula por la ecuación (4.16) considerada por Karassik, I. J., 1992, donde  $PB$  es la potencia de la bomba (Hp),  $Q$  es el caudal de agua (l/s),  $AMT$  es la carga total (m),  $\rho$  es la densidad del agua ( $t/m^3$ ) y  $E$  es el rendimiento combinado del motor y de la bomba (factor).

$$PB = \frac{Q \cdot AMT \cdot \rho}{76 \cdot E} \quad (4.16)$$

El modelo esquemático de la fig. 4.15.b muestra un sistema típico utilizando bomba sumergida y los parámetros a ser considerados para el cálculo de la altura manométrica total. El número y tipo de conexiones también son variables, en la práctica, para cada situación específica.

Para este caso la altura manométrica total  $AMT_s$  (m) se puede calcular con la ecuación (4.17), donde  $Nd$  es el nivel dinámico (m) y la altura manométrica de refricción  $AMR$  se calcula con la ecuación (4.14).

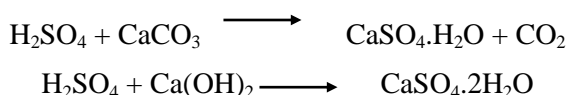
$$AMT_c = 1.1(AMR + Nd) \quad (4.17)$$

Las pérdidas por fricción en las tuberías y conexiones se obtienen en cuadros específicos para cada diámetro en particular. La potencia del motor de las bombas sumergidas también se calcula con la ecuación (4.16) dada para bombas centrífugas.

Con la altura manométrica total, caudal de agua y la potencia del motor calculados se puede definir la bomba a instalar como medida correctiva. Otro procedimiento técnico es utilizar las curvas características de las bombas y seleccionar la bomba requerida. En función del requerimiento las bombas pueden ser instaladas en serie o en paralelo, dotándose siempre una de reserva (seguridad) para cada bomba.

#### 4.6.2. Para el impacto ambiental por efecto del drenaje ácido

a) *Neutralización de la acidez del agua:* el proceso consiste en la adición de un material alcalino, siendo el más usado la caliza ( $CaCO_3$ ) y la cal propiamente dicha ( $CaO$  o  $Ca(OH)_2$ ), debido a su bajo costo y eficacia, aunque otros reactivos como la soda cáustica ( $NaOH$ ), en polvo ( $Na_2CO_3$ ) y rellenos alcalinos también son útiles en algunos casos. El proceso químico de neutralización implica las siguientes reacciones:



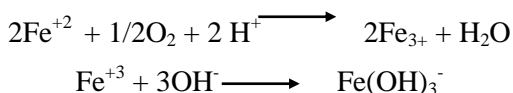
El primer producto obtenido mediante este proceso es el yeso como parte soluble en agua (2.1 g/l a 25°C) que forma parte del único sulfato en proporción de unos 2,1 g/l.

b) *Oxidación y precipitación*: la mayor parte de los metales precipitan en forma de hidróxidos u óxidos de metal hidratados y cuando están asociados a los sulfuros precipitan en forma de yeso. Especies como As, Sb, P, V, Ti y Si precipitan como compuestos con calcio en el caso de usar cal como neutralizante.

La efectividad en el proceso de la precipitación es limitada por la solubilidad de los precipitantes y del pH del sistema. En general, las operaciones de precipitación de la mayoría de los metales son de un pH de 9 a 9,5.

El éxito o fracaso en el tratamiento mediante este proceso está en la comprensión del proceso químico y variables operacionales en relación con el consumo de cal, de la energía, del volumen de lodos y de la calidad del tratamiento del efluente. De seguidas se presenta el comportamiento químico de algunos metales:

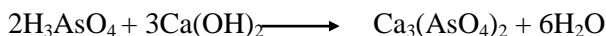
*Hierro*: está presente en las aguas ácidas como ión ferroso ( $Fe^{+2}$ ) o férrico ( $Fe^{+3}$ ). La precipitación del ión ferroso requiere de un alto consumo de cal y consecuentemente la formación de lodo que genera problemas de manipulación y su velocidad de oxidación es más rápida que el ión férrico cuando la solución es de pH neutral.



*Manganeso*: los iones presentes son  $Mn^{+2}$ ,  $Mn^{+3}$  y  $Mn^{+4}$  siendo que la precipitación de  $Mn^{+2}$  en solución acuosa produce el  $Mn(OH)_2$  a un pH sobre 10,5, y entonces mediante la oxidación de  $Mn^{+2}$  de  $Mn^{+3}$  o de  $Mn^{+4}$  precipitan en forma de  $Mn_2O_3 \cdot xH_2O$  o  $MnO_2$  a un pH por encima de 9,5. El  $Mn^{+2}$  es resistente a la oxidación en condición neutral o ácida pero puede ser oxidado el  $Mn^{+3}$  o  $Mn^{+4}$  en condición básica con oxidación de agentes como permanganato de potasio o de cloro. En caso de usar el sistema de reciclaje en el tratamiento el contaminante en el lodo es  $MnO_2$ .

La completa oxidación del  $MnO_2$  se realiza con consumo bajo de cal y la producción de lodos es estable en un medio con pH constante. Mediante este proceso es difícil remover el manganeso, por lo que el proceso orgánico es el más recomendable.

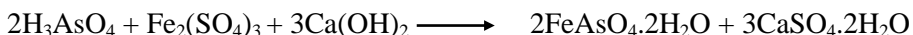
*Arsénico*: puede ser removido con cal en medio acuoso con  $pH > 12$ , mediante el siguiente proceso químico:

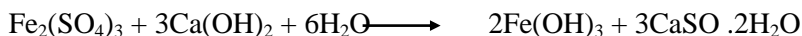


La solubilidad del arseniato de calcio crece dramáticamente cuando el pH decrece y también en contacto con bióxido de carbono, pero el  $CaCO_3$  actúa como deprimente, como se describe en la siguiente reacción química:

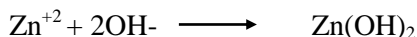


El proceso de la precipitación del arseniato férrico está expresado por la siguiente ecuación:

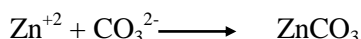




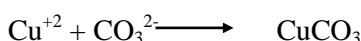
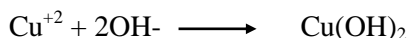
*Zinc*: puede precipitar como hidróxido dependiendo de la ecuación química que muestra el proceso:



Teóricamente el pH óptimo para la precipitación del hidróxido de zinc es de 9,5. El zinc en solución puede también precipitar como carbonato.



*Cobre*: el pH teórico para precipitar el cobre en forma de hidróxido está cerca de 8,2, sin embargo, es suficiente con un pH de 7,0. Tal como el zinc, el cobre puede precipitar en forma de carburo o hidróxido, mediante el proceso químico para la precipitación de hidróxido de cobre:



El proceso de neutralización y precipitación mediante la utilización del medio alcalino (cal) se puede observar en la fig. 4.16 y fig. 4.17.

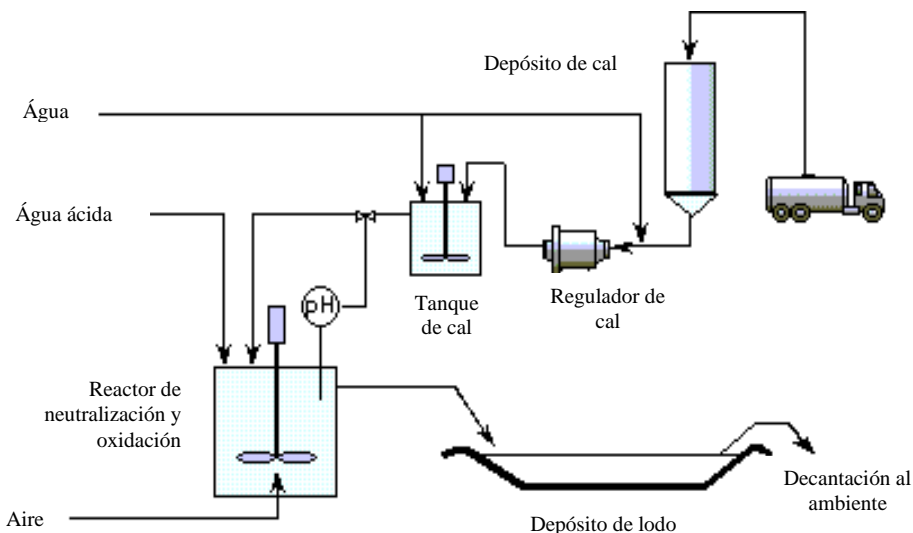


Figura 4.16 Proceso del tratamiento de neutralización de agua ácida con el uso de cal

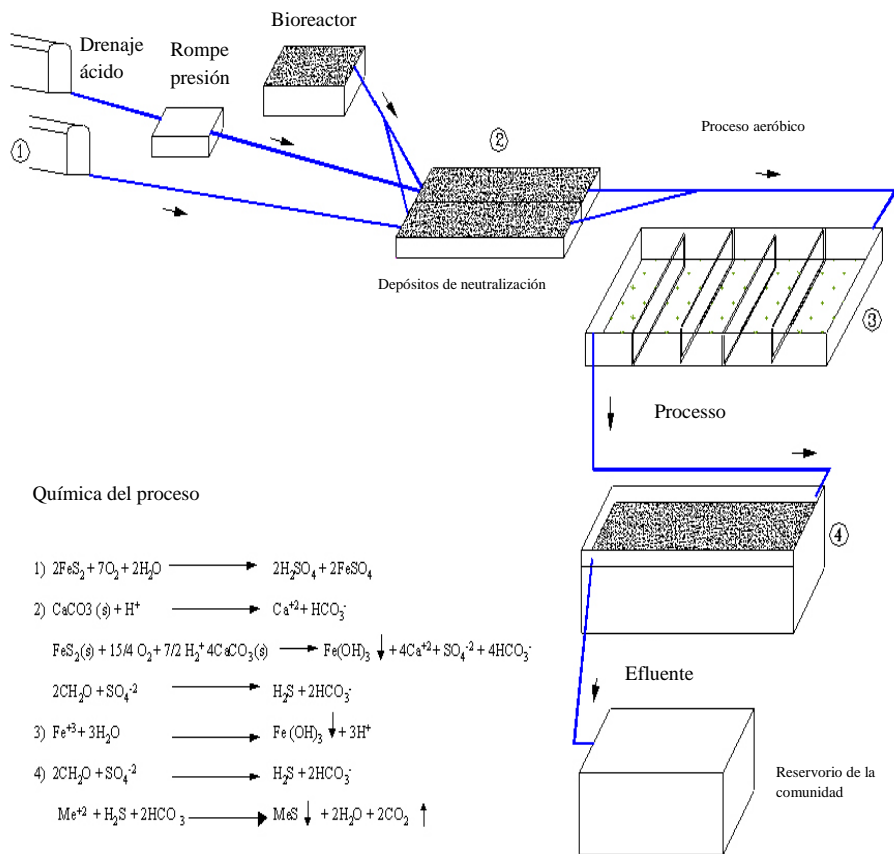


Figura 4.17 Proceso de precipitación de elementos metálicos del agua ácida

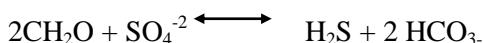
c) *Tratamiento de la acidez y contaminantes metálicos de los efluentes con proceso aeróbico y anaeróbico:* los procesos aeróbicos son organismos para los cuales el oxígeno libre del aire es imprescindible a la vida. Los anaeróbicos, por el contrario, no requieren aire u oxígeno libre para mantener la vida.

El sistema anaeróbico utiliza material orgánico además de producir la reducción biológica del sulfato.

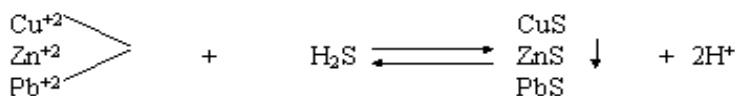
*Fracciones orgánicas:* los compuestos biológicos en general contienen diferentes grupos funcionales, que producen una variedad de reacciones con los iones metálicos en solución, disminuyendo su concentración en los efluentes;

*Reducción biológica del sulfato:* consiste en remover la acidez y producir el sulfuro de hidrógeno, que dependiendo del pH permite la formación de sulfuros de metales insolubles en forma de precipitado.

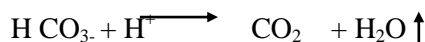
Se puede afirmar que hay una gran actividad de las bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio sp*) que atenúan el sulfato en el agua de mina, para producir sulfuro de hidrógeno y bicarbonato.



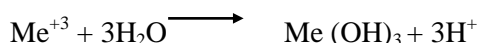
El sulfuro de hidrógeno (o ácido sulfídrico) resultante reacciona con los metales pesados en el agua de mina, y se produce la precipitación de los elementos como los sulfuros:



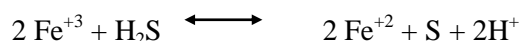
La reacción antes descrita aún produce la acidez, mas la reacción reductora de sulfato produce más alcalinidad (un mol en exceso sobre la acidez producida) y así prevalecen las condiciones alcalinas.



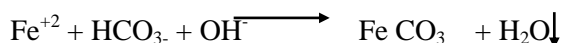
El aumento del pH del efluente en algunos metales permite la formación del hidróxido u óxido para en seguida precipitar.



Además del proceso descrito se presenta un movimiento del ión hierro:



Finalmente, se estabiliza precipitando como carbonato de hierro.



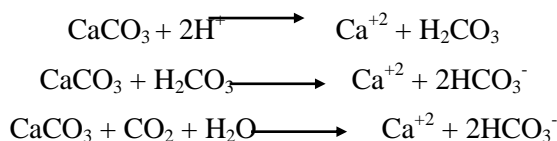
El hierro siempre se presenta como  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{Fe}^{+2}$ . El primero está controlado mediante un proceso *aeróbico* por oxidación y como hidróxido a un pH >5,5 y el segundo en un proceso *anaeróbico* por reducción como sulfuro.

El proceso de tratamiento de aguas ácidas de mina mediante sistemas pasivos comprende desde la descarga de agua ácida (efluente problema), neutralización, el depósito anaeróbico y el efluente final (fig. 4.18).

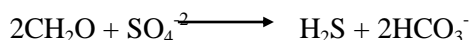


Donde, BSR = Bacterias Sulfato Reductoras ( $1 \times 10^6$  UFC/ml) y Me = Cu, Fe, Pb o Zn.

Con la caliza ocurren las siguientes reacciones:



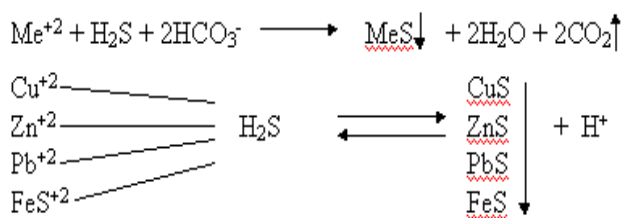
En la interacción entre el compuesto y el líquido problema ocurre lo siguiente:



Dependiendo de las condiciones químicas del agua ácida, los componentes para este proceso pueden ser: 150 kg de aserrín de madera, 487 kg de estiércol de oveja, 345 kg de sedimento vegetal y 98 kg de arena clasificada de río.

Las bacterias *tiobacillus ferroxidans*, que son las que originan el bajo pH de los efluentes de mina, con la consecuente disolución de los metales, son mitigadas por las bacterias sulfato-reductoras del género *desulfovibrio*, *desulfotomaculum* y *desulfococcus*, que habitan en el compuesto incubado previamente en 21 días en el estanque (*wetland*) anaeróbico.

Para la aplicación de estos procesos químicos y biológicos se recomienda realizar pruebas a escala piloto y luego a escala industrial.



Información adicional relativa al tratamiento pasivo de aguas ácidas se puede encontrar en la tesis intitulada Ambiente mineiro: tecnologias de diagnóstico, prevenção e tratamento passivo das águas ácidas contaminadas por minerais sulfurados (Fidalgo de Matos, M.C, 2002).

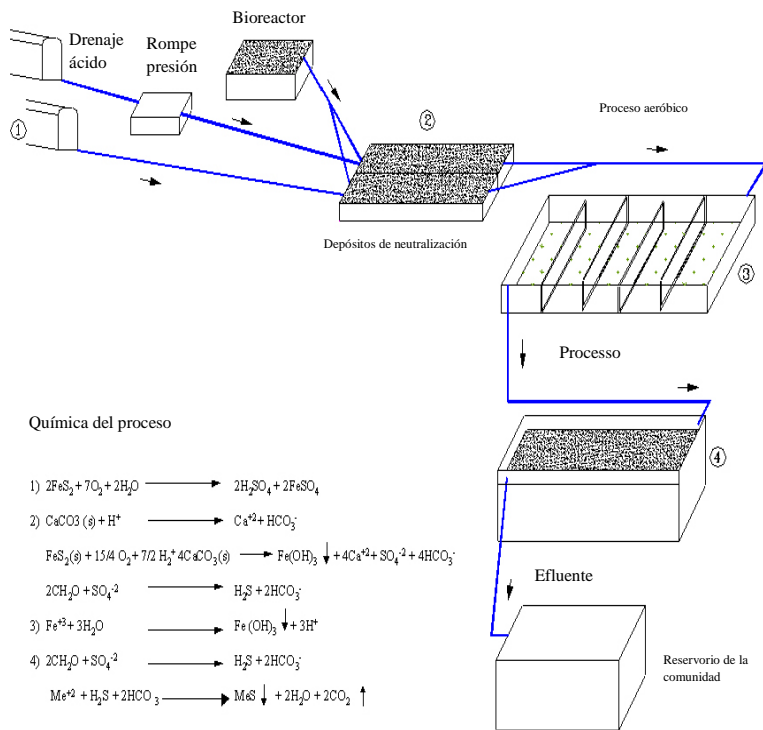


Figura 4.18 Tratamiento de aguas ácidas mediante el sistema pasivo



#### **4.7. Monitoreo y control**

El monitoreo tiene dos objetivos: detectar el inicio de la oxidación que puede conducir al drenaje ácido y evaluar la efectividad de la medida correctiva aplicada.

El monitoreo de la cantidad y calidad del agua subterránea obedece a estándares o normas determinadas. Las estaciones de monitoreo deberán estar localizadas en puntos estratégicos de modo que sea posible evaluar el nivel de efectividad de la medida correctiva, que permita conservar la calidad ambiental.

El monitoreo del caudal del agua subterránea es recomendable realizarlo en estaciones de medición localizadas en los afluentes de la red de drenaje por gravedad en el sentido de la estación de bombeo y en la salida al exterior o superficie principalmente.

Para el caso del monitoreo de la calidad del agua debe ser básicamente en la salida del agua subterránea a la superficie y aguas arriba y aguas abajo del río, si la descarga es a un río o ribera.

La ingeniería del ambiente subterráneo relacionada con las aguas subterráneas considera una secuencia de acciones (Figura 4.19) que permiten caracterizar las fuentes de alteraciones de las condiciones naturales de las aguas subterráneas, identificar el nivel del impacto ambiental, buscar alternativas de medidas correctivas, aplicar la medida correctiva más viable y acompañar con el monitoreo y control para verificar la efectividad de las medidas aplicadas y de esta forma garantizar la efectiva protección ambiental.

La frecuencia del monitoreo debe ser semanal o mensual y el monitoreo adicional cuando se presenten situaciones de cambio (deshielos, fuertes lluvias, cambios en la carga del contaminante, cambios en el proceso de explotación).

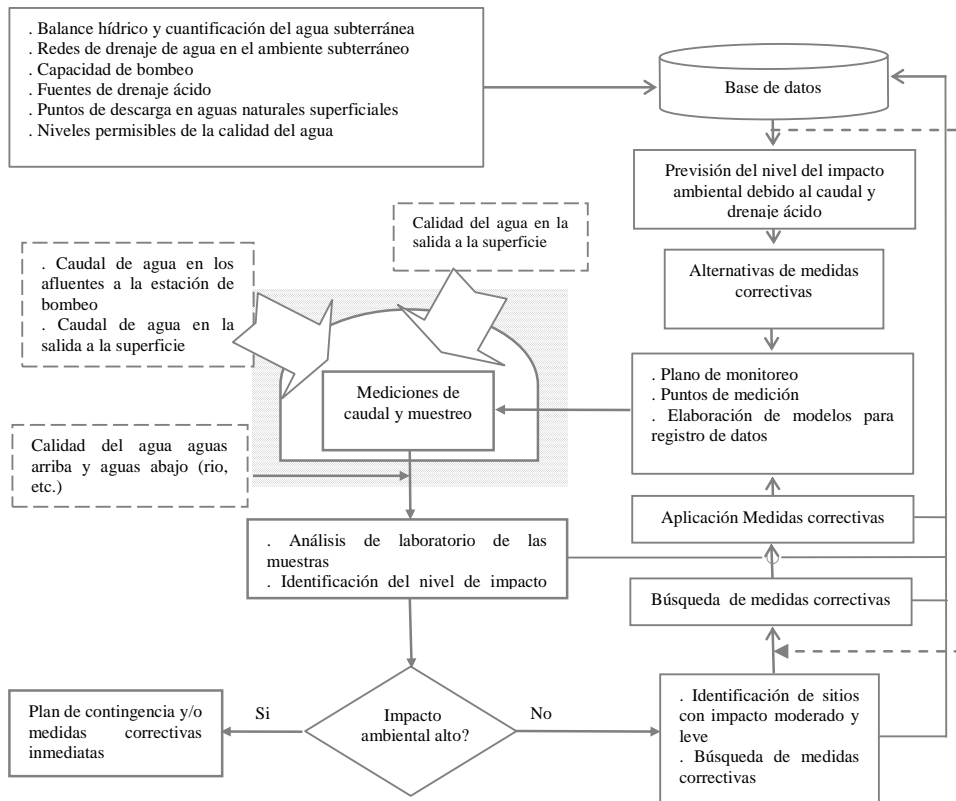


Figura 4.19 Metodología de gestión ambiental del agua subterránea

## Capítulo 5

### INESTABILIDAD Y DESLIZAMIENTO DE ROCAS

#### 5.1. Efectos de la inestabilidad y deslizamiento de rocas

La abertura subterránea resulta de la excavación de rocas hecha por el hombre con el objeto de aprovechar el recurso natural (mineral) o el espacio del subsuelo. Esta abertura produce alteración del estado natural de las tensiones del medio rocoso, con la posibilidad de originar deslizamientos o caída de bloques, pudiendo causar efectos ambientales negativos, problemas operacionales y hasta atentar contra la propia vida humana.

El desplazamiento y caída de bloques en el ambiente subterráneo constituye un riesgo ambiental, ya sea en el subsuelo o en el exterior. En el exterior a través de las subsidencias del terreno que alcanzan la superficie y en el subsuelo, por arriesgar la vida humana (del trabajador) y afectar las operaciones de explotación.

Los efectos de los deslizamientos en el ambiente subterráneo, se reflejan en:

- a) Lesiones leves
- b) Lesiones que inhabilitan al hombre
- c) Lesiones mortales o fatales

En los trabajos de explotación subterránea, ocurren con mucha frecuencia accidentes fatales, siendo las caídas o desprendimiento de rocas el factor más importante, como se muestra en el caso de las minas de Perú (fig. 5.1)

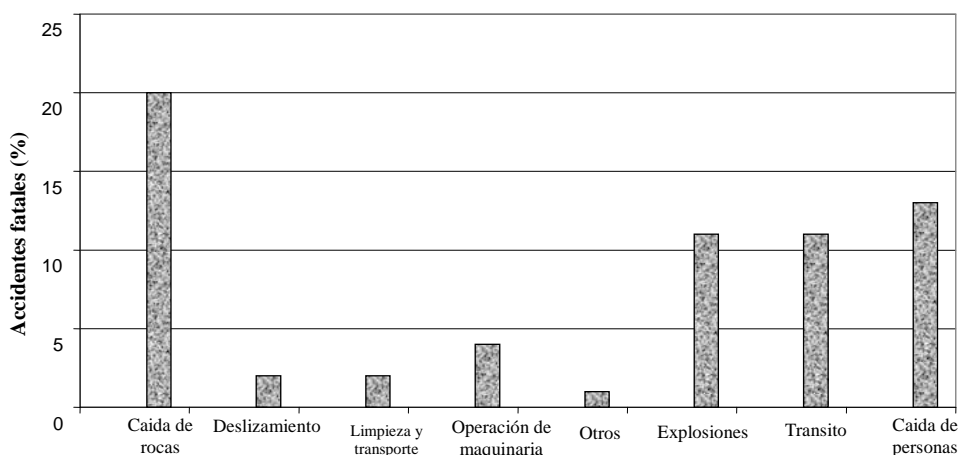


Figura 5.1 Causas de la pérdida de vidas humanas en minas subterráneas de Perú (Sociedad Nacional de Minería, Energía y Petróleo del Perú, [www.snmp.org.pe](http://www.snmp.org.pe), 2007)

## 5.2. Causas de la inestabilidad y deslizamiento de rocas

La inestabilidad y desprendimiento de rocas en excavaciones subterráneas depende de los siguientes factores: propiedades geomecánicas y geotécnicas del macizo rocoso circundante, forma y tamaño de la abertura, profundidad a la que se encuentra y método constructivo utilizado.

## 5.3. Caracterización geotécnica del medio rocoso de las aberturas subterráneas

La efectiva aplicación de medidas correctivas para los riesgos ambientales debido a inestabilidad y caída de rocas está en función del nivel de identificación real de los parámetros o factores que provocan tal situación, lo que se realiza mediante estudios geológicos y geotécnicos.

### 5.3.1. Calificación del macizo rocoso mediante índices

Uno de los índices más usado es el denominado *Rock Mas Ratio* (RMR) propuesto por Bieniawski, Z.T. (1989) que se utiliza para la calificación y clasificación de las rocas, determinado mediante la ecuación (5.1) que considera los parámetros de resistencia a la comprensión (1), el valor RQD (*Rock Quality Designation*) y la separación de las diaclasas (2+3), el estado de las diaclasas (4), el efecto de las aguas y la orientación de la excavación (5), lo que se puede evaluar mediante el Cuadro 5.1. El índice RMR conduce a la clasificación del macizo rocoso en cinco categorías (Cuadro 5.2).

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5) \quad (5.1)$$

Otro índice muy usado es el Q (*Tunneling Quality Index*) propuesto por Barton, N. *et al.*, (1980), determinado mediante la ecuación (5.2) donde, RQD es el *Rock Quality Designation* (Deere, D.U., 1964),  $J_n$  es el valor relacionado con las juntas,  $J_r$  es el valor de rugosidad,  $J_a$  es el valor función de la alteración,  $J_w$  es el factor relacionado con el agua, y SRF es el factor debido a la condición de la tensión. Todos los índices son determinados con base en el Cuadro 5.3 propuesto por Barton.

$$Q = \left( \frac{RDQ}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SRF} \right) \quad (5.2)$$

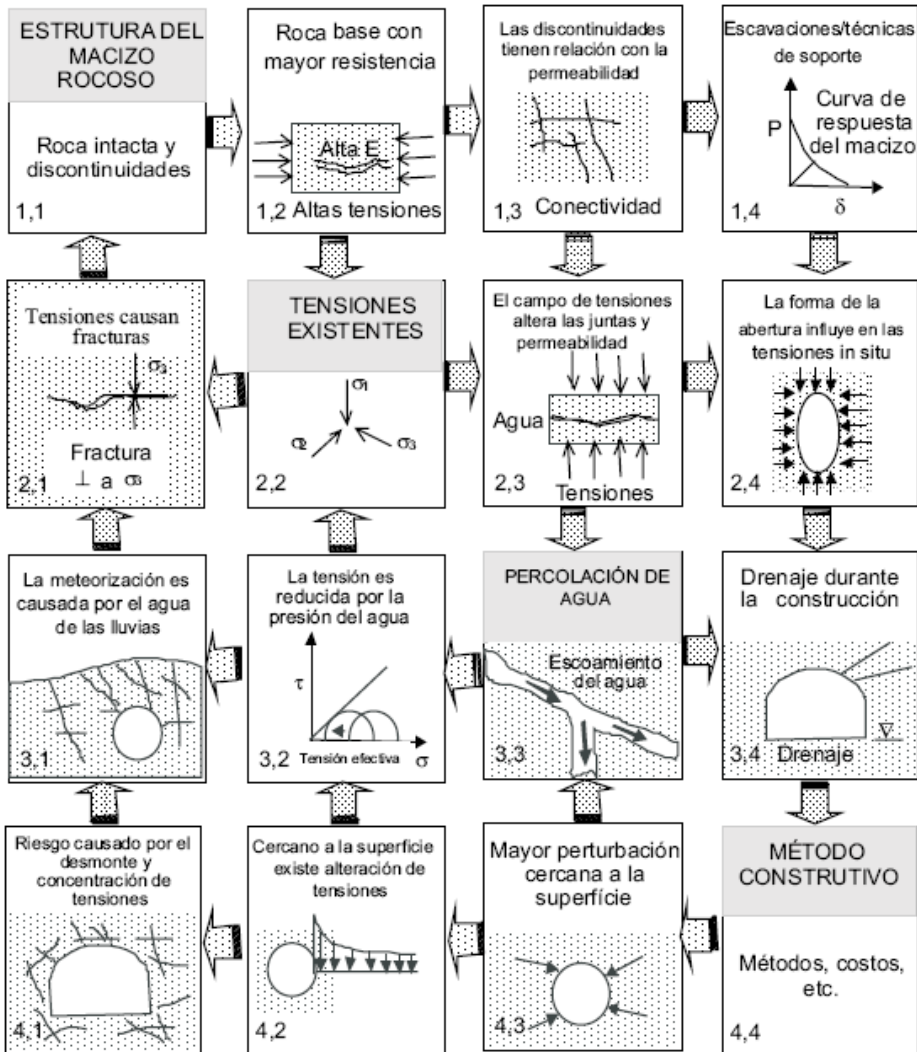


Figura 5.2 Matriz de interacción para aberturas subterráneas (Hudson, J.A. et al 1997)

Cuadro 5.1 Parámetros de calificación del macizo rocoso (Bieniawski, 1989)

RMR (1) Resistencia a la compresión simple de la roca intacta																
Valor (kg/cm <sup>2</sup> )	>2500	1000-2500	500-1000	250-500	50-250	10-50	<10									
Ponderación	15	12	7	4	2	1	0									
RMR (2 + 3) RQD y separación de las diaclasas																
Juntas por metro	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ponderación	40	34	31	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
Juntas por metro		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ponderación		17	6	15	14	14	13	13	12	12	11	11	10	10	9	9
Juntas por metro		31	2	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Ponderación		9	8	8	7	7	7	6	6	6	5	5	5	4	4	4
RMR (4) Estado de las diaclasas																
Resistencia	<1		1 – 3 m		3 – 10 m		10 – 20 m		20 m							
Ponderación	6		4		2		1		0							
Abertura	0		< 0,1 mm		0,1 – 1 mm		1 – 5 mm		5 mm							
Ponderación	6		5		4		1		0							
Rugosidad	Muy rugoso		Rugoso		Ligeramente rugoso		Liso		Espejo de falla							
Ponderación	6		5		3		1		0							
Relleno	No hay		Duro con espesor < 5 mm		Duro con espesor > 5 mm		Blando con espesor < 5 mm		Blando con espesor > 5 mm							
Ponderación	6		5		4		1		0							
Meteorización	No afectado		Ligero		Moderado		Alto		Descompuesto							
Ponderación	6		5		3		2		0							
RMR (5) Efecto del agua																
Estado	Seco		Lig. húmedo		Húmedo		Goteando		Escurriendo							
Ponderación	15		10		7		4		0							
RMR (5) Correlación según la orientación de la excavación subterránea y las discontinuidades																
Dirección perpendicular al eje de la excavación				Dirección paralela al eje de la excavación		Pendiente 0° - 20° cualquier dirección										
Excavación a la pendiente		Excavación contra la pendiente														
Pendiente 45° - 90°	Pendiente 20° - 45°	Pendiente 45° - 90°	Pendiente 20° - 45°	Pendiente 45° - 90°	Pendiente 20° - 45°											
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Media										
0	-2	-5	-10	-12	-5	-5										

Cuadro 5.2 Categorías del macizo rocoso según el Índice RMR (Bieniawski, 1989)

RMR	Categoría	Estado de la roca
81 - 100	I	Muy buena
61 - 80	II	Buena
41 - 60	III	Media
20- 40	IV	Mala
< 20	V	Muy mala

Cuadro 5.3 Ponderación de parámetros para el índice Q (Barton, N et al. 1980)

Descripción	Valor	Descripción	Valor
1. ROCK QUALITY DESIGNATION RQD A. Calidad muy mala B. Calidad mala C. Calidad media D. Calidad buena E. Calidad excelente	RQD 0 – 25 25 – 50 50 – 75 75 – 90 90 - 100	4. ÍNDICE DE DIACLASAS (Jn) Macizo sin diaclasas o con pocas fisuras Una familia de diaclasas Una familia y algunas diaclasas aleatorias Dos familias de diaclasas Dos familias y algunas diaclasas aleatorias Tres familias de diaclasas Tres familias y algunas diaclasas aleatorias Cuatro familias de diaclasas Roca triturada y terrosa	0,5 – 1,0 2 3 4 6 9 12 15 20
2. ÍNDICE DE DISCONTINUIDADES DE LAS DIACLASAS (Jr) a) Contacto entre planos de la discontinuidad b) Contacto entre planos de la discontinuidad con desplazamiento < 10 cm. A. Diaclasas discontinuas B. Diaclasas onduladas, rugosas e irregulares C. Diaclasas onduladas lisas D. Diaclasas onduladas perfectamente lisas E. Diaclasas planas, rugosas o irregulares F. Diaclasas planas, lisas G. Diaclasas planas, perfectamente lisas c). Roca fuera de contacto H. Zona con arcilla, minerales requiere mucha prevención del contacto de la pared de la roca. I. Zona de arena, grava y queda, requiere mucha prevención del contacto de la pared de la roca.	   4 3 2 1,5 1,5 1,0 0,5  1,0 1,0	5. FACTOR DE REDUCCIÓN POR AGUA (Jw) A. Excavaciones secas o pequeñas afluencias inferiores a 5l/min de forma localizada. B. Afluencia o presión media con lavado ocasional del relleno de diaclasas. C. Afluencia importante o alta presión, en roca competente con discontinuidades sin llenado D. Afluencia importante o alta presión, con lavado considerable del relleno de diaclasas. E. Afluencia excepcionalmente alta del flujo o presión elevada, al momento de disparos y decadencia con el tiempo F. Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada persistente, sin disminución apreciable.	   1,0 0,66 0,5 0,33 0,2-0,1 0,1-0,05
3. ÍNDICE DE ALTERACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES (Ja) a) Contacto entre planos de la discontinuidad A. Discontinuidad cerrada, dura impermeable, cuarzo. B. Planos de discontinuidad inalterados, superficie ligeramente manchada. C. Ligera alteración de discontinuidades. Presenta minerales secos, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla, etc. D. Cobertura de arcilla con limo y arena. Fracción pequeña de arcilla (no blanda). E. Cobertura de arcilla blanda o de baja fricción, suave o pequeñas capas (1 – 2 mm) de arcilla y mineral caolinita, mica, clorita, talco y grafito. b). Contacto entre planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm (relleno de minerales de pequeños espesores). F. Partículas de arena, arcilla desintegrada de roca, etc. G. Fuerte consolidación, compactación, relleno de arcilla y minerales (continuo <5 mm espesor). H. Consolidación media a baja, relleno de acilla y mineral suave (< 5 mm espesor). I. Relleno de arcilla expansiva, montmorillonita (continuo <5 mm espesor). c). No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (reellenos de mineral de gran espesor). J. Zonas o capas de desintegración. K. Caída de rocas y arcilla. L. Condiciones varias de arcilla. M. Zonas de arcilla con limo o arena con algunas partes no secas. N. Zonas o bandas continuas de arcilla de espesor grueso. Ñ. Similar a N con condiciones varias de arcilla.	0,75 1,0 2,0 3,0 4,0 4,0 6,0 8,0 8,0-12,0 6,0 8,0 8,0-12,0 5,0 10-13 13,20	6. ÍNDICE POR CONDICIONES DE TENSION (SRF) a). Zonas débiles interceptan a la excavación, pudiéndose producir deslizamiento de la roca a medida que la excavación del túnel avanza. A. Muchas zonas débiles, contienen arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de entorno muy inestable (a cualquier profundidad de excavación). B. Zonas débiles aisladas con arcilla o desintegración química de rocas (profundidad de excavación <50 m). C. Zonas débiles aisladas con arcilla o desintegración química de rocas (profundidad de excavación > 50 m). D. Múltiples zonas de fractura en roca incompetente (sin arcilla) roca de entorno suelta (cualquier profundidad de excavación). E. Zona de fracturas aisladas en roca competente (sin arcilla) (profundidad de excavación <50 m). F. Zona de fractura aisladas en roca competente (sin arcilla) (profundidad de excavación > 50 m). G. Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado (a cualquier profundidad). b). Rocas competentes, problemas de tensión en las rocas. H. Baja tensión, cerca de la superficie, diaclasas abiertas. J. Tensión media, condiciones de tensión favorable. K. Tensión alta, estructura muy compacta. L. Relajamiento moderado de la roca después de algunos minutos en roca maciza. M. Relajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en roca. N. Estallido violento de la roca y deformaciones dinámicas inmediatas en roca maciza c). Rocas deformables: fluencia plástica de la roca incompetente en medio de altas presiones de roca. O. Suave presión de deformación. P. Presión de deformación intensa. d). Roca expansiva: función de la presencia de agua. R. Suave presión expansiva. S. Intensa presión expansiva.	10,0 5,0 2,5 7,5 5,0 2,5 5,0 1,0 0,5-2,0 5,0-50,0 50-200 200-400 5,0-10,0 10-20 5,0-10,0 10-20

La correlación entre el índice Q y la dimensión equivalente ( $D_e$ ) según la ecuación de Barton (5.3) se ilustra en la fig. 5.3, donde se observa la curva crítica ( $D_{ec}$ ) y su respectiva ecuación que define la necesidad o no de soporte para una determinada calidad de roca Q y tamaño de la abertura, expresado como dimensión equivalente ( $D_e$ ).

$$D_e = \frac{L}{ESR} \quad (5.3)$$

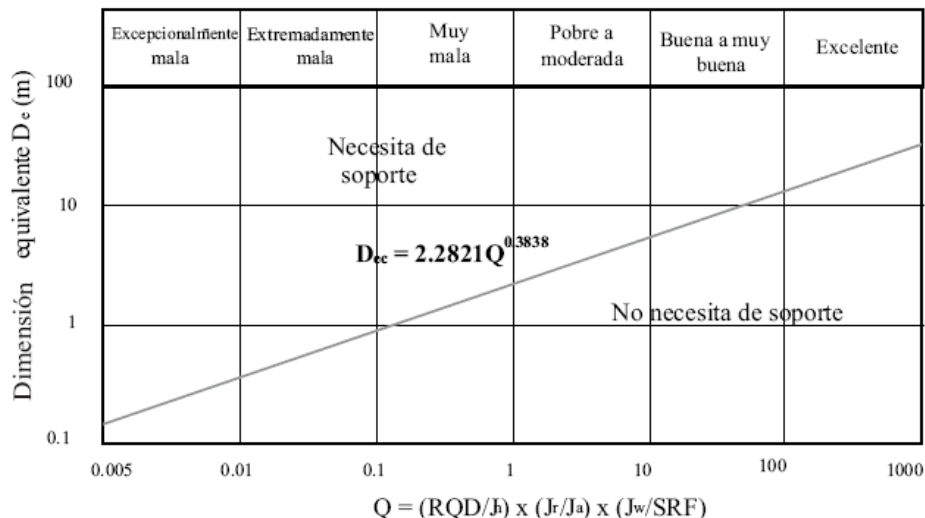


Figura 5.3 Clasificación geomecánica según el índice Q y requisito de soporte (Barton, 1980)

En la ecuación (5.3.)  $L$  es el ancho, diámetro o altura de la excavación (m) y  $ESR$  es el índice de soporte de la excavación (*Excavation Support Ratio*) (Cuadro 5.4).

Cuadro 5.4 Valores de ESR actualizados (Barton, N et al 2000)

Categoría de la excavación	ESR
A. Excavaciones mineras de carácter temporal	2 - 5
B. Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas, túnel piloto, galerías de avance en grandes excavaciones, cámaras de compensación hidroeléctrica	1,6 - 2
C. Cámaras de almacenamiento, planta tratamiento de agua, túneles de carreteras y ferrocarriles, acceso a túneles.	1,3 - 1,6
D. Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carreteras y ferrocarriles primarios, cámaras para defensa civil, acceso e intersección de túneles.	0,9 - 1,2
E. Centrales de energía nuclear subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fábricas, túneles para tuberías principales de gas.	0,5 - 0,8

La correlación entre los índices RMR y Q, considerando el tipo de obra subterránea, se puede expresar mediante las ecuaciones (5.4), (5.5) y (5.6).

$$RMR = 10.5 \ln Q + 44 \quad \text{Para excavaciones de túneles de obras civiles} \quad (5.4)$$

$$RMR = 10.5 \ln Q + 42 \quad \text{Para excavaciones en minería} \quad (5.5)$$

$$RMR = 15 \ln Q + 50 \quad \text{Barton} \quad (5.6)$$

Barton, N. y Grimstad, E. (2000) correlacionan la velocidad de las ondas  $P$  o longitudinales  $V_p$  (m/s) con el índice Q, basado en proyectos realizados en Noruega, Suecia, Inglaterra y China (Hong Kong), obteniendo la ecuación (5.7).



$$Q = 10^{\frac{V_p - 3500}{1000}} \quad (5.7)$$

Laubscher D.H. (1990), relaciona el esfuerzo a la compresión uniaxial (ECU) y la razón de ECU ( $r_{ECU}$ ) con el índice de RMR para obtener el índice *Rock Mas Strength* (RMS) mediante la ecuación (5.8). El valor de  $r_{ECU}$  se puede determinar mediante el Cuadro 5.5.

$$RMS = 0.8ECU \left( \frac{RMR - r_{ECU}}{80} \right) \quad (5.8)$$

Cuadro 5.5 Valores típicos de la razón de compresión uniaxial ( $r_{ECU}$ ) (Laubscher, 1990)

ECU(Mpa)	>185	165-185	145-164	125-144	105-124	85-104	65-84	45-64	35-44	25-34	12-24	5-11	1-4
$r_{ECU}$ (%)	20	18	16	14	12	10	8	6	5	4	3	2	1

Barton propone la ecuación (5.9) para determinar el valor crítico del índice Q para el vano de una excavación subterránea (B) en relación al índice ESR.

$$Q = (B / 2ESR)^{2.5} \quad (5.9)$$

### 5.3.2. Características de resistencia, de deformabilidad y el efecto de las discontinuidades

#### 5.3.2.1. Parámetros de resistencia

La ecuación de Mohr-Coulomb (5.10), expresa el criterio de ajuste plástico mediante la tensión axial de rotura  $\sigma'_1$  para diferentes valores de la tensión de confinamiento  $\sigma'_3$ , dada por la ecuación (5.10) en función de la resistencia a la compresión simple del macizo  $\sigma_{cm}$  y el factor  $k$ :

$$\sigma'_1 = k \cdot \sigma'_3 + \sigma_{cm} \quad (5.10)$$

El factor  $k$  es la pendiente de la línea que se obtiene al representar  $\sigma_1$  en función de  $\sigma_3$  y está dado en función del ángulo de fricción del macizo rocoso  $\phi$ , por:  $k = \tan^2(45^\circ + \phi/2) = \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi}$ .

La resistencia a la compresión simple del macizo rocoso  $\sigma_{cm}$  viene dada por la ecuación (5.11) en función de la cohesión  $C$  y el ángulo de fricción interno:

$$\sigma_{cm} = \frac{2C \cos \phi}{(1 - \text{sen}\phi)} \quad (5.11)$$

La ecuación de Hoek y Brown (5.12) describe el criterio de rotura bien en roca intacta o en macizos rocosos con diaclasamiento y meteorización, relacionando los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma$  (Hoek, E; Brown E.T., 1982) en función de la

resistencia a la compresión simple de la roca intacta y los factores  $m$  y  $s$  que dependen de las propiedades de la roca (Cuadro 5.6).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{cm} \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{cm}} + s \right)^{0.5} \tag{5.12}$$

Cuando no existe confinamiento lateral ( $\sigma_3 = 0$ ) y  $s = 1$  (ensayos de laboratorio), resulta  $\sigma_1 = \sigma_{cm}$ .

La resistencia a la tracción  $\sigma_t$  se determina considerando  $\sigma_1 = 0$ , por lo que  $\sigma_3 = \sigma_t$  resultando la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = 0.5\sigma_{cm} \left( m - (m^2 + 4s)^{0.5} \right) \tag{5.13}$$

Cuadro 5.6 Valores típicos de los parámetros del criterio de rotura  $m$  y  $s$  (Hoek y Brown, 1980)

Tipo de roca	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
Calidad RMR	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
100 (íntacta)	7,0	1,0	10,0	1,0	15,0	1,0	17,0	1,0	25,0	1,0
85 (muy buena)	3,5	0,1	5,0	0,1	7,5	0,1	8,5	0,1	12,5	0,1
65 (buena)	0,7	0,004	1,0	0,004	1,5	0,004	1,7	0,004	2,5	0,004
44 (normal)	0,14	0,0001	0,2	0,0001	0,3	0,0001	0,34	0,0001	0,5	0,0001
23 (mala)	0,04	0,00001	0,05	0,00001	0,08	0,00001	0,09	0,00001	0,13	0,00001
3 (muy mala)	0,007	0	0,01	0	0,015	0	0,017	0	0,025	0

(1): Rocas carbonatadas bien cristalizadas (dolomitas, piedra caliza, mármol, etc.)

(2): Rocas arcillosas litificadas (argilitas, limolitas, esquistos, etc.)

(3): Rocas arenosas bien cimentadas (areniscas, cuarcitas, etc.)

(4): Rocas ígneas de grano fino (andesita, dolerita, diabasa, riolitas, etc.)

(5): Rocas ígneas de grano grueso (gneis, granito, cuarzo-diorita, etc.)

Las ecuaciones determinadas por Ucar, R. (1986) (5.14 y 5.15) son aplicables para calcular la resistencia al corte  $\tau_\alpha$  y la tensión normal  $\sigma_n$  en función del ángulo entre la tangente a la superficie de la falla y la dirección del esfuerzo principal menor (envolvente de rotura de Mohr-Coulomb).

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} \text{ donde } \beta \text{ es la inclinación de la envolvente de la falla.}$$

$$\tau_\alpha = \frac{m \cdot \sigma_{cm}}{8} \left[ \frac{1 - \text{sen}\beta}{\tan \beta} \right] \tag{5.14}$$

$$\sigma_n = \frac{m \cdot \sigma_{cm}}{8} \left[ \frac{1}{2 \text{sen}^2 \beta} + \text{sen}\beta \right] - \sigma_c \left[ \frac{3m}{16} + \frac{s}{m} \right] \tag{5.15}$$

La tensión vertical principal  $\sigma_v$  (MPa) se encuentra en función de la profundidad  $z$  (m) cuya expresión obtenida por Hoek y Brown (1982) a través de datos experimentales realizados en muchos países del mundo resulta la ecuación (5.16) y la correlación entre  $\sigma_v$  (tensión vertical *in situ*) y  $\sigma_h$  (tensión horizontal media) se expresa por la ecuación (5.17).










$$\sigma_v = 0.027z \quad (5.16)$$

$$\sigma_v = K \cdot \sigma_h \quad \text{para : } (100/z) + 0.3 < K < (150/z) + 0.5 \quad (5.17)$$

Un modelo práctico para estimar la tensión tangencial  $\sigma_\theta$  ( $\sigma_{\theta t}$  en el techo y  $\sigma_{\theta h}$  en los hastiales) es el propuesto por Hoek y Brown basado en la tensión vertical *in situ*  $\sigma_v$ , valores de A y B (Cuadro 5.7) y función de la geometría de la abertura subterránea, según las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{\theta t} = (A \cdot k - 1) \sigma_v \quad (5.18) \quad \sigma_{\theta h} = (B - k) \sigma_v \quad (5.19)$$

Cuadro 5.7 Valores de las constantes A y B (Hock y Brown, 1982)

VALORES DE LAS CONSTANTES A Y B									
									
A	5,0	4,0	3,9	3,2	3,1	3,0	2,0	1,9	1,8
B	2,0	1,5	1,8	2,3	2,7	3,0	5,0	1,9	3,9

Para el caso de las cámaras y pilares, Bieniawski realizó estudios del comportamiento geotécnico de los pilares obteniendo la ecuación (5.20).

$$\sigma_p = \sigma_1 \left( 0.64 + 0.36 \frac{B}{H} \right) \quad (5.20)$$

En que,  $\sigma_p$  es el esfuerzo en el pilar,  $\sigma_1$  es esfuerzo de una muestra cúbica de dimensiones críticas (ejemplo de 1m para carbón),  $B$  y  $H$  son ancho y alto del pilar, respectivamente.

### 5.3.2.2. Parámetros de deformación

Para caracterizar la deformación de la roca se usa normalmente el *Coefficiente de Poisson* y el *módulo de Young*. Actualmente se admite que el Coeficiente de Poisson del macizo rocoso es igual al de la roca intacta determinado en laboratorio.

El módulo de deformación  $E_m$  (GPa) puede ser calculado con las ecuaciones de Bieniawski, 1978 (5.21), de Serafim y Pereira, 1983 (5.22), de Hoek y Brown, 1995 (5.23), de Boyd, 1993 (5.24), de Barton, 1995 (5.25), de Hoek y Carranza-Torres, 2002 (5.26) y de Barton y Grimstad, 2000 (5.27 y 5.28); en las cuales  $\sigma_c$  es la resistencia a la compresión simple de la roca (MPa),  $GSI$  (*Geological Strenght Index*),  $p'$  es la tensión efectiva ( $p'$  máxima=1 MPa y  $p'$  mínima=0,1 MPa),  $D$  es el factor de efectos por detonación del explosivo y relajación de la tensión (Cuadro 5.8) y  $V_p$  es la velocidad de propagación de las ondas longitudinales (m/s).

$$E_m = 2RMR - 100, \text{ para } RMR > 50 \quad \text{Bieniawski} \quad (5.21)$$

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}}, \text{ para } 35 < RMR < 50 \quad \text{Serafim y Pereira} \quad (5.22)$$

$$E_m = \left(\frac{\sigma_c}{100}\right)^{0.5} 10^{\frac{GSI-10}{40}}, \text{ para } RMR > 50 \quad \text{Hoek y Brown} \quad (5.23)$$

$E_m = RMR^3 / 10^4$  (p' máxima) y  $E_m = RMR^4 / 10^6$  (p' mínima),  
para  $RMR < 35$  Boyd (5.24)

$$E_m = 10 \log Q^{0.33} \quad \text{Barton} \quad (5.25)$$

$$E_m = \left(\frac{1-D}{2}\right) \left(\frac{\sigma_c}{100}\right)^{0.5} 10^{\frac{GSI-10}{40}}, \text{ para } RMR > 50 \quad \text{Hoek y Carranza-T.} \quad (5.26)$$

$$E_m = 25 \log Q \quad \text{Para rocas no porosas} \quad \text{Barton y Grimstad} \quad (5.27)$$

$$E_m = \frac{V_p - 3500}{40} \quad \text{Para } V_p > 3500 \text{ m/s} \quad \text{Barton y Grimstad.} \quad (5.28)$$

Cuadro 5.8 Factor de los efectos por detonación del explosivo y relación de la tensión (D) (Adaptado de Barton, 2002 por Romana Ruiz, M., 2002)

Tipo de trabajo	RMR	Método de excavación	D
Túnel	Medio a bueno	Desmonte controlado	0
	Medio a bueno	TBM/Mecánica	0
	Pobre	Mecánica/sin presión	0
	Pobre	Mecánica/presionando	0.5
	Cualquier	Desmonte deficiente	0.8
Rampa	Cualquier	Desmonte controlado	0.7
		Rasgado/corte	0.7
		Desmonte deficiente	1.0
Cielo abierto/cantera	Cualquier	Mecánica	0.7
		Desmonte de producción	1.0

Las ecuaciones indicadas tienen una base experimental o práctica, lo que refuerza la confiabilidad para su aplicación a problemas en el dominio ambiental de las rocas, sin embargo, también se pueden utilizar otros métodos, tales como:

- Métodos de medición *in situ* (presiodilatómetros y en planos)
- Ensayos presiométricos (aplicación en suelos)
- Ensayos dilatométricos (aplicación en rocas)

### 5.3.3. EDZ (Excavation Damaged Zone)

La detonación del explosivo confinado en los barrenos perforados en roca, genera un gran volumen de gases a altas temperaturas (2000 – 5000 °C) y altas presiones (10 - 40 GPa). La aplicación repentina de estas descargas produce impulsos de tensión compresiva en la superficie interna del agujero perforado (roca), provocando daños en la zona circundante de la abertura subterránea. Las

dimensiones de los daños en esa zona dependen del tamaño de la carga explosiva detonada, de la resistencia a la fuerza dinámica de las rocas, de la velocidad de propagación de la onda, y de las velocidades de vibración transmitidas a la roca.

Cuando una carga explosiva detona dentro del agujero pueden distinguirse daños de diverso tipo y dimensión en la zona circundante: 1) Zona de roca triturada; 2) Zona de fracturas radiales; 3) Zona de expansión de las fracturas; y 4) Zona elástica, donde no se forma ninguna fractura. Los daños que pueden ocurrir en la roca se verifican antes de la zona elástica (fig. 5.4 a la izquierda).

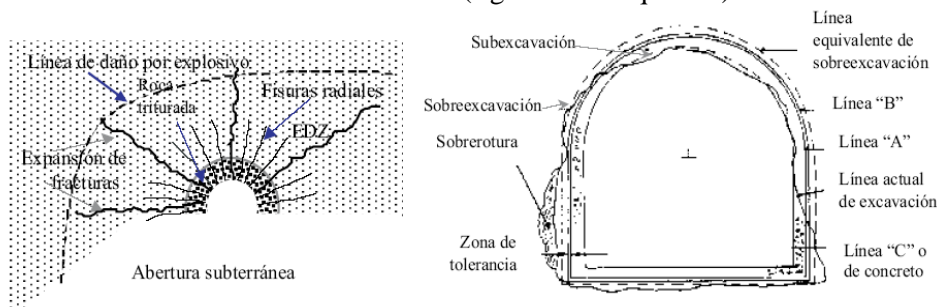


Figura 5.4 EDZ ocasionado en la excavación de una abertura subterránea con uso de explosivos

La zona de trituración y fracturación se denomina EDZ (*Excavation Damaged Zone*) que se presenta en dos formas: sobreexcavación (“overbreak”) y subexcavación (“underbreak”) llamada también DOW (*Damage to the Opening Wall*) (fig 5.4 derecha), que es el daño de determinado espesor de la roca circundante a la abertura ocasionado por la acción explosiva (fig. 5.4 izquierda).

Los factores que influyen en el valor de EDZ pueden convenientemente agruparse en dos categorías: características del macizo rocoso (factores geológicos) y del explosivo (factores de desmonte de roca) (Cuadro 5.9).

Cuadro 5.9 Factores geológicos y de desmonte de rocas que influyen en el EDZ (Navarro Torres V e Dinis da Gama, C. 2002)

Factores geológicos	Factores del desmonte de rocas
Orientación de las diaclasas	Tipo de explosivo y factor de potencia
Espaciamiento de las diaclasas	Concentración de la carga explosiva
Relleno con arcilla o alteración	Tiempo de retardo
Resistencia de la roca	Plano de fuego
Efectos de la tensión <i>in situ</i>	Error en la perforación
Influencia del agua subterránea	Diámetro y longitud de los barrenos cargados y vacíos

### 5.3.3.1 Cuantificación de la sobreexcavación y subexcavación

Para medir la sobreexcavación y la subexcavación, actualmente existen tres métodos basados en la cuantificación del perfil de la excavación: manual, topográfico y fotográfico. Este último método, denominado *photographic light sectioning method* (LSM) ofrece diversas ventajas y se basa en el principio de la proyección de una luz radial al perímetro de la abertura subterránea, de modo que

los rayos caracterizan el contorno del perímetro de la cavidad. La imagen de este perímetro se guarda en archivo informativo para el análisis computarizado.

Los análisis gráficos y numéricos permiten el cálculo de los valores de EDZ o sea del *Overbreak* (O) y *Underbreak* (U) de forma cuantitativa, que se expresa normalmente en porcentaje (%) (Cuadro 5.10). Estos valores se pueden correlacionar con los factores geológicos expresados en el índice de Barton Q (*Tunneling Quality Index*), o mediante la velocidad de propagación de las ondas P,  $V_p$  (m/s) y con el factor de desmonte de rocas expresado en Energía Específica Periférica EPP.

Cuadro 5.10 Resultados del análisis gráfico y numérico

Información general	Parámetros de EDZ
Nombre de la abertura subterránea	Volumen excavado (m <sup>3</sup> /m)
Localización exacta de la sección (perfil)	Volumen de sobreexcavación (m <sup>3</sup> /m) (%)
Fecha y hora de la medición	Volumen de subexcavado (m <sup>3</sup> /m) (%)

La Energía Específica Periférica EEP se define como la energía explosiva utilizada en la excavación del macizo rocoso correspondiente a la zona periférica anillar de la sección de la abertura subterránea. La EEP (kcal/m<sup>3</sup>) determinada por la ecuación (5.29), sobre la base del factor de potencia de la carga explosiva utilizada en los barrenos periféricos  $P_f$ , dividido por el volumen de roca desmontada en esta zona anillar (kg/m<sup>3</sup>) y la energía liberada por el tipo de explosivo o explosivos utilizados  $E_e$  (kcal/kg).

$$PPF = F_p \cdot E_e \tag{5.29}$$

El índice Q de Barton se determina por la ecuación (5.2) o por las ecuaciones (5.4), (5.5) o (5.6).

Correlacionando estos dos parámetros con el *Overbreak* (O) y el *Underbreak* (U) se obtienen las ecuaciones (5.30) y (5.31), donde los factores A, B, C, A', B' y C' son coeficientes cuyos valores se obtienen mediante procesos estadísticos de regresión múltiple y que ponderan la calidad del macizo rocoso, expresado por la velocidad de propagación de las ondas P,  $V_p$  (m/s), y la Energía Específica Periférica, EEP (kcal/m<sup>3</sup>).

$$O (\%) = A + B \cdot PPF - C \cdot V_p \tag{5.30}$$

$$U (\%) = A' - B' \cdot PPF + C' \cdot V_p \tag{5.31}$$

Los valores de los seis factores se obtienen a partir de estudios *in situ*, por lo que las ecuaciones indicadas son particulares para cada caso o proyecto.

A continuación se presenta una ecuación particular determinada con base en los datos obtenidos durante la excavación de un túnel del proyecto hidroeléctrico en Nararit México (Ibarra, J.A., et al., 1996) en que los coeficientes, para una correlación basada en el índice Q de Barton y el factor de potencia periférica del explosivo (ANFO) dieron una correlación de 0,86 y 0,913, respectivamente.

$$O (\%) = 3,38 + 0,01538EEP - 0,00145V_p$$

$$U (\%) = 5,8 - 0,01163EEP + 0,00072V_p$$

Incluso para un caso particular, estas ecuaciones pueden ser útiles para las previsiones iniciales modificando los factores B y B' según el tipo de explosivo a utilizar.

La velocidad sísmica de las ondas P es un parámetro de fácil determinación pero necesita tener en consideración la influencia de la profundidad y la porosidad (fig. 5.5).

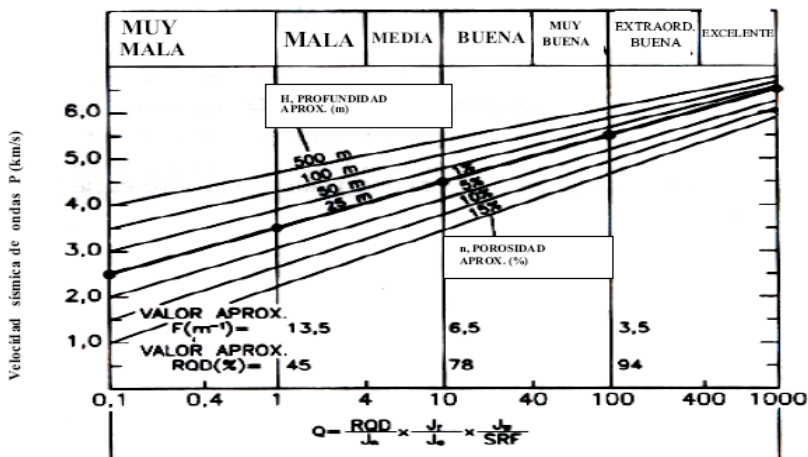


Figura 5.5 Velocidad sísmica de las ondas P en diferentes tipos de rocas (Barton, N., et al 2000)

### 5.3.3.2. Cuantificación del espesor de la roca dañada en la zona circundante a la abertura subterránea

Investigaciones efectuadas por Holmberg R. (1982) probaron que la dimensión de los daños de cualquier macizo rocoso, provocado por la acción de los disparos con explosivos en aberturas subterráneas depende del tiempo de exposición, de la presencia de agua, de la orientación, de los planos de discontinuidades y de las tensiones existentes en el macizo rocoso.

Holmberg establece que el fenómeno de los daños que alcanza una distancia  $D$  está correlacionado con la velocidad pico de partículas  $v_c$ , inducidas por la detonación de las cargas explosivas  $Q_e$  expresadas por la ecuación (5.32),

$$v_c = a.Q_e^b .D^c , \quad (5.32)$$

Donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son coeficientes que dependen de las propiedades de la roca, del tipo de explosivo y de las técnicas de carga usadas.

Holmberg al estudiar los daños en túneles construidos en granito señala que las grietas se originan cuando la velocidad pico de las partículas alcanza valores entre los 700 a 1000 mm/s. Esto significa que una concentración linear de 1 kg/m crea un volumen de 1 a 1,4 m de radio de roca dañada detrás del agujero cargado.

Una conclusión similar estableció Brawner (1974) cuando definió la formación de un conjunto de grietas en un disparo en rocas duras, con velocidad

pico de las partículas entre 610 y 1270 mm/s con los cuales se inicia el rompimiento en la roca.

Los valores de la velocidad pico de las partículas (velocidad vibratoria crítica)  $v_c$ , se pueden correlacionar con la tensión dinámica o transmitida  $\sigma_d$ , la densidad de la roca,  $\rho$ , y la velocidad de propagación de las ondas longitudinales  $V_p$ , mediante la ecuación (5.33).

$$\sigma_d = \rho \cdot V_p \cdot v_c \tag{5.33}$$

Dinis da Gama, C. (1998) atendiendo a las ecuaciones 5.32 y 5.33 obtiene una ecuación que permite estimar los daños provocados  $D$  en metros (fig. 5.6) en tajeos subterráneos con explosivos (5.34).

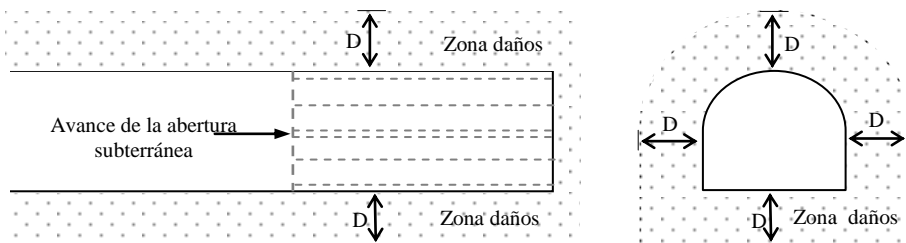


Figura 5.6 Espesor de la roca dañada por la detonación del explosivo

$$D = \left( \frac{\sigma_d}{\rho \cdot V_p \cdot a \cdot Q e^b} \right)^{\frac{1}{c}} \tag{5.34}$$

en donde  $\sigma_d$  (tensión dinámica o transmitida a la roca) se expresa en Pa,  $\rho$  (densidad del macizo rocoso) en  $\text{kg/m}^3$ ,  $V_p$  (velocidad de propagación de las ondas del macizo) en m/s,  $Q_e$  (carga explosiva detonada por retardo) en kg y los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes que dependen de las propiedades de la roca, tipo de explosivo y técnicas de carga utilizadas.

Para determinar los valores de los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$  en condiciones particulares, el proceso se basa en mediciones de las velocidades  $V_p$  para cargas explosivas  $Q_e$  y distancias  $D$  correspondientes para después determinarlos aplicando técnicas estadísticas de regresión.

Investigaciones realizadas por varios estudiosos, en ciertas condiciones y en diversos lugares del mundo, recomiendan los valores indicados en el Cuadro 5.11.

Cuadro 5.11 Valores de los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (C. Dinis da Gama et al., 2001)

Autor	Tipo de roca	Lugar	a	b	c
Johnson	Roca base	E.U.A.	3450	0,73	-1,87
Johnson	Alterada y suave	E.U.A.	11560	0,73	-1,50
Holmberg	Masa granítica	Suecia	700	0,70	-1,50
E.P.M	Granito con alteraciones	España	14542	1,42	-1,59
D. da Gama	Granito con alteraciones	Portugal	14542	0,70	-1,59
Vidal N Torres	Esquistos/vetas de cuarzo	Portugal	472	0,40	-1,58



### 5.4 Estándares geotécnicos

Para controlar los problemas de inestabilidad y deslizamiento de rocas provocados por las excavaciones subterráneas que pueden causar impactos ambientales de carácter geotécnico es necesario comprender la respuesta del macizo en las excavaciones y las exigencias de soporte.

Para ello, se presenta la siguiente información técnica relacionada con los parámetros geotécnicos e índice de calidad conocidos, que si bien no son estándares exactos, pueden ser de mucha utilidad en la cuantificación de la respuesta de la roca, y formar una base para la evaluación y gestión ambiental relacionada con este componente. En los Cuadros 5.12, 5.13 y 5.14 se presentan los valores obtenidos por diversos estudios realizados.

Cuadro 5.12 Parámetros geotécnicos de algunas rocas intactas (*Department of Army U.S. Army Corps of Engineers Washington*, disponible en [www.usace.army.mil/inet/usace-doc/eng-manuals/em1110-2-2901/toc.pdf](http://www.usace.army.mil/inet/usace-doc/eng-manuals/em1110-2-2901/toc.pdf))

Tipo de roca	Localización	Masa volumétrica (Mg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	CUS (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
Anfibolita	California	2,94	92,4	278	22,8
Andesita	Nevada	2,37	37,0	103	7,2
Basalto	Michigan	2,70	41,0	120	14,6
Basalto	Colorado	2,62	32,4	58	3,2
Basalto	Nevada	2,83	33,9	148	18,1
Conglomerado	Utah	2,54	14,1	88	3,0
Diabasa	Nueva York	2,94	95,8	321	55,1
Diorita	Arizona	2,71	46,9	119	8,2
Dolomita	Illinois	2,58	51,0	90	3,0
Gabro	Nueva York	3,03	55,3	186	13,8
Gneiss	Idaho	2,79	53,6	162	6,9
Gneiss	New Jersey	2,71	55,2	223	15,5
Granito	Georgia	2,64	39,0	193	2,8
Granito	Maryland	2,65	25,4	251	20,7
Granito	Colorado	2,64	70,6	226	11,9
Graywacke	Alasca	2,77	68,4	221	5,5
Yeso	Canada	-	-	22	2,4
Caliza	Alemania	2,62	63,8	64	4,0
Caliza	Indiana	2,30	27,0	53	4,1
Mármol	Nueva York	2,72	54,0	127	11,7
Mármol	Tennessee	2,70	48,3	106	6,5
Filita	Michigan	3,24	76,5	126	22,8
Cuarcita	Minnesota	2,75	84,8	629	23,4
Cuarcita	Utah	2,55	22,1	148	3,5
Sal	Canadá	2,20	4,6	36	2,5
Arenisca	Alaska	2,89	10,5	39	5,2
Arenisca	Utah	2,20	21,4	107	11,0
Esquisto	Colorado	2,47	9,0	15	
Esquisto	Alaska	2,89	39,3	130	5,5
Esquisto	Utah	2,81	58,2	216	17,2
Esquisto	Pensilvania	2,72	31,2	101	1,4
Esquisto	Pensilvania	2,76	30,6	113	2,8
Pizarra	Michigan	2,93	75,9	180	25,5
Pizarra	Nevada	2,39	3,7	11	1,2
Tufo volcánico	Japón	1,91	76,0	36	4,3

Cuadro 5.13 Índice de resistencia a la compresión no confinada (disponible en Mining Life, <http://banners.orbitcycle.com/router/mininglife/Resources/0000/b-306037.html>)

Calidad de la roca	UCS (MPa)	Carga Puntual (MPa)	Schmidth (Tipo L Hammer)	Ejemplos*
R5 Extremamente resistente	>250	>10	50 - 60	Basalto fresco, cherte, diabasa, gneis, granito, cuarzita
R4 Muy resistente	100 - 250	4 - 10	40 - 50	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneis, granodiorita, caliza, mármol, riolita, tufo
R3 Resistente	50 - 100	2 - 4	30 - 40	Caliza, mármol, filita, arenisca, esquisto, esquisto arcilloso
R2 Resistencia media	25 - 50	1 - 2	15 - 30	Arcilla metamórfica, carbón, esquisto, esquisto arcilloso, limolita
R1 Débil	5 - 25	**	<15	Tiza, sal, potasio
R0 Muy débil	1 - 5	**		Roca muy alterada
Extremamente débil	0,25 - 1	**		Arcilla suave
* Todas las rocas muestran heterogeneidad en la composición y anisotropía en la estructura				
** Rocas con UCS (Uniaxial Compresión Stress) <25 MPa muestran resultados ambiguos en los ensayos				

Cuadro 5.14 Comportamiento típico del macizo rocoso (*Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington*, disponible en [www.usace.army.mil/inet/usace-doc/eng-manuals/em1110-2-2901/toc.pdf](http://www.usace.army.mil/inet/usace-doc/eng-manuals/em1110-2-2901/toc.pdf))

Resistencia a la compresión (MPa)	Rocas típicas	Comportamiento del macizo rocoso
440	Basalto denso, cuarzita, diabasa, gabro	Estallido de roca con violencia regional y local
220	Granito, mayoría de rocas ígneas, gneis, mármol metamórfico resistente, esquistos	Salidas de la ruptura en los barrenos y estallido de poca roca, astillado y agrietamiento.
110	Roca sedimentaria densa y dura, tufo compacto, dolomita, caliza	Proyección
55	Roca esquisto	Exfoliación
28	Filita	Exfoliación
14	Roca sedimentaria de baja densidad, tiza	Placas tensionales
7	Tufos	Poco desplazamiento
3,4	Marga, esquisto arcilloso	Desplazamiento secuencial y esquistos pobremente cementados
1,7	Esquisto arcilloso débil	Se hincha cuando se destruye el cemento
0,8	Roca alterada	Colapso de arcilla fisurada
0,4	Arcilla dura	Arcilla suave no fisurada
· Aumento de anhídrita (> 2 MPa aumento con presión de agua infiltrada)		Nota: Aproximadamente el límite inferior del estallido de la roca es: 125-165 MPa

La inestabilidad y deslizamiento de las rocas en la excavación de aberturas subterráneas están relacionados con los efectos nocivos provocados por las explosiones que están asociados a la velocidad vibratoria del macizo rocoso. Cuando esta velocidad supera la velocidad vibratoria crítica ( $v_c$ ) ocurre el daño o fracturación de la roca (Cuadro 5.15).

Cuadro 5.15 Velocidades sísmicas de ondas longitudinales  $V_p$  y velocidades vibratorias crítica  $v_c$  (Orche, E. 2001 y mediciones en la mina de Panasqueira 2001)

Aire, agua y rocas			Depósitos minerales de E.U.A. y Portugal		
Roca	$V_p$ (m/s)	$V_c$ (m/s)*	Tipo de depósito	$V_p$ (m/s) Mineral	$V_p$ (m/s) Roca encajante
Aire	330		Pórfido de cobre	Óxido: 1620	3810
Água	1400 – 1700			Sulfuro: 2670	
Capa meteorizada	250 – 1000			Mixto: 2160	
Aluviones	300 – 1000		Pórfiro de cobre	1860	3350
Arena saturada	1200 – 1900		Cu disseminado en skarn	2130	3050
Arcilla	1100 – 2500		W disseminado en tactita	3970 – 10150	2700
Marga	1800 – 3200		W disseminado en tactita	5210 – 7200	3050 – 3930
Arenisca	1800 – 3200	0,93 – 1,65	Sulfuro macizo Cu-Zn	3200	1770
Yeso	3100 – 3600		Filón de Ag	1420 – 3050	1220 – 3930
Anhidrita	4500 – 5800		Filón de Au – Ag	610 – 1800	2400 – 3660
Calizas	3400 – 6000	0,28 – 0,50	Oro en aluvión	2740	4880
Dolomitas	5000 – 6000	0,19 – 0,23	Oro en aluvión	1520	2870 – 5550
Sal maciza	4300 – 7000	0,16 – 0,26	Oro en aluvión	1220	3050
Cuarcita	5100 – 6100	0,82 – 0,98	Fosfato sedimentado	1220	3050
Esquistos	2400 – 5000	0,50 – 1,00	Talco en dolomita y gneis	5550	2010 – 3380
Gneis	3100 – 5400	0,77 – 1,30	Barita en placer	4570	1620 – 2350
Granito	5000 – 6200	0,55 – 0,70	Veta de $WO_3$ en esquistos	6462	Nota: Media de 14 registros 5100 m/s Mina Panasqueira
Gabro	6400 – 6800	0,68 – 0,75	Veta de $WO_3$ en esquistos	4662	
Basalto	5500 – 6300	0,70 – 0,80	Veta de $WO_3$ en esquistos	4663	
Dunita	7500 – 8400		Veta de $WO_3$ en esquistos	5000	
Diabasa	5800 – 7100	2,68 – 3,68	Veta de $WO_3$ en esquistos	4091	

\* Calculados con los valores de los Cuadros 3.63 y 3.66

En el caso de las aberturas subterráneas con uso de explosivo en zonas urbanas los estándares utilizados están relacionados con la velocidad vibratoria crítica, con el tipo de estructura y con la frecuencia de vibración (fig. 5.7).

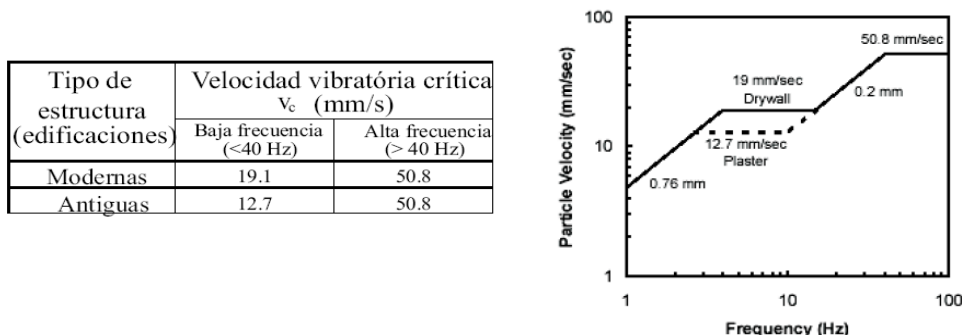


Figura 5.7 Velocidad vibratoria crítica de edificaciones próximas a fuentes de vibración en el ambiente subterráneo (Siskind, D.E, et al, 1980)

En el Cuadro 5.16,  $Q$  es la carga máxima del explosivo a ser detonado por retardo (lb) y  $D$  la distancia entre la zona de explosión a la estructura más próxima, edificio público, escuela, iglesia u otros edificios comerciales o institucionales.

Cuadro 5.16 Distancia recomendada, velocidad vibratoria crítica, ecuación de la carga explosiva y distancia a edificaciones civiles cercanas de una explosión minera ([www.lrc.state.ky.us/kar805/004/155.html](http://www.lrc.state.ky.us/kar805/004/155.html))

Distancia a la zona de explosión (m)	$v_c$ (cm/s)	Ecuación
0 a 91,44	3,175	$Q_e = (D/50)^2$
91,74 a 1542	2,540	$Q_e = (D/55)^2$
> 1542	1,905	$Q_e = (D/65)^2$

La norma Portuguesa NP-2074 (Evaluación de la influencia en construcciones de las vibraciones por explosiones o situaciones similares) que sigue, en líneas generales, a la Norma DIN 4150 (*Vibrations in building: influence on constructions*, 1975), establece un valor límite de la velocidad de vibración  $v_L$  (m/s) comparado con el valor máximo de la velocidad que caracteriza a la vibración  $v_R$  (m/s).

El valor máximo de la velocidad que caracteriza la vibración  $v$ , se obtiene del registro temporal con transductor triaxial (una unidad de amplificación y un registrador) en gama de frecuencias de 3 KHz a 60 Hz, con el transductor rígidamente fijo al elemento de la estructura, de forma que una de las direcciones horizontales coincida con la línea definida por el punto de medición y el origen de la solicitud (componente radial de vibración), obteniéndose el registro de los tres componentes de la velocidad de vibración con los cuales la  $v_R$  se determina por la ecuación (5.35), donde  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$  y  $v_z(t)$ , son los valores de los componentes de la velocidad de vibración en función del tiempo expresado en m/s.

$$v_R = \max \left| \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} \right| \tag{5.35}$$

$$v_L = \alpha\beta\gamma 10^{-2} \tag{5.36}$$

La norma NP-2075 considera que  $v_R$ , calculada por la ecuación (5.35) no debe exceder el valor  $v_L$  a fin de evitar la generación de grietas o daños a la construcción. La velocidad límite admisible  $v_L$  (m/s), según esta norma debe calcularse a través de la ecuación (5.36) donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son coeficientes que asumen los valores indicados en los Cuadros 5.17 y 5.18;

Cuadro 5.17 Valores de coeficiente  $\alpha$

Características del terreno	$\alpha$
Rocas y suelos cohesivos rígidos ( $v > 2000$ m/s)	2
Suelos cohesivos muy duros, duros y de consistencia media; suelos no cohesivos compactos; arenas y mezclas arena-grava bien graduadas, arenas uniformes ( $1000 < v < 2000$ m/s)	1
Suelos no cohesivos sueltos; arenas y mezclas arena-grava bien graduadas, arenas uniformes, suelos cohesivos suaves y muy suaves ( $v < 1000$ m/s)	0,5

Cuadro 5.18 Valores de los coeficientes  $\beta$  e  $\gamma$

Tipo de construcción	$\beta$	Número medio diario de solicitudes	$\gamma$
Construcciones que exigen cuidados especiales (monumentos históricos, hospitales, depósito de agua, chimeneas)	0,5	< 3	1
Construcciones corrientes	1	> 3	0,7
Construcciones reforzadas	3		

Una norma de carácter general de importancia es la curva definida por Barton, Lien y Lunda (1980) que permite estimar la *necesidad o no de soporte* de una abertura subterránea, teniendo como referencia la dimensión equivalente  $D_e$ , calculada con la ecuación (5.37) para un medio rocoso definido por el Índice Q (fig. 5.3). Esta curva corresponde a una ecuación exponencial (5.37), que en el presente trabajo se denomina *curva crítica del riesgo ambiental geotécnico para excavaciones subterráneas* ( $D_{ec}$ ).

$$D_{ec} = 2.2821Q^{0.3838} \tag{5.37}$$

Basado en esta ecuación (5.37) para una abertura expresada por  $D_e$  y un tipo de roca con índice Q corresponde apenas un punto de la curva crítica del riesgo ambiental geotécnico  $D_{ec}$  (fig. 5.8) y una recta que pasa por este punto. En la recta, los valores de  $D_e$  mayores que  $D_{ec}$  *necesitan* soporte y los valores menores *no necesitan* soporte, constituyendo una buena referencia (norma) a los fines de identificación del nivel de impacto ambiental geotécnico para excavaciones subterráneas.

Otros indicadores importantes que se pueden usar como normas de referencia para efectos de la identificación del nivel de impacto ambiental *geotécnico*, son la deformación  $\delta$  (convergencia), la relación de tensión y RMS (*Rock Mass Strength*) ( $\Delta$ tensión/RMR), la variación de tensión ( $\Delta\sigma$ ), la relación de tensión y resistencia a la compresión uniaxial UCS ( $\Delta$ Tensión/ECU), etc.

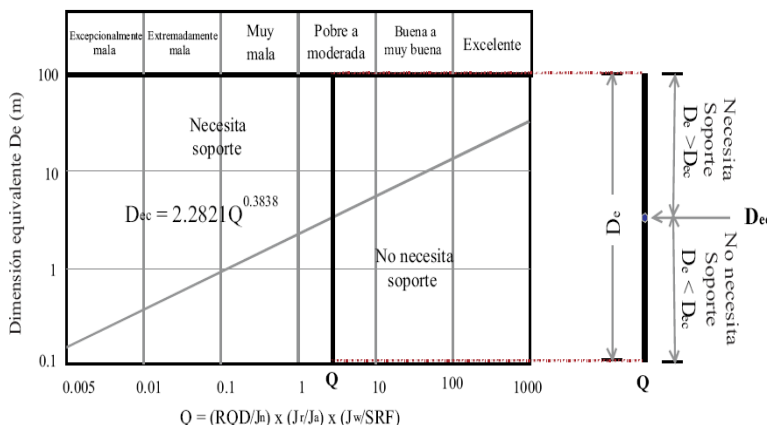


Figura 5.8 Referencia para la identificación del nivel de impacto ambiental geotécnico

### 5.5 Matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental geotécnico

La matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental debido a la inestabilidad y deslizamiento de rocas en excavaciones subterráneas (Cuadro 5.19) se basa en la ecuación límite del riesgo ambiental geotécnico (5.37) y en los indicadores o relaciones propuestos como estándares, que como ya fue dicho, no tienen carácter definitivo pero pueden ser muy útiles para la búsqueda de alternativas de prevención o medidas correctivas para atenuar a niveles permisibles y evitar efectos ambientales negativos.

Cuadro 5.19 Matriz base para identificación de niveles de impacto ambiental debido a la inestabilidad y deslizamiento de rocas

Nivel de impacto	$D_e$ para un índice $Q$	Velocidad de vibración $v_R$	Convergencia ( $\delta$ )	$\Delta$ Tensión ( $\Delta\sigma$ )	$\Delta$ Tensión/RMS	$\Delta$ Tensión/ECU
Leve	$D_{ec} \leq D_e < 1.25D_{ec}$	$v_L \leq v_R < 1.25v_L$	$p \leq \delta < 1.25p$	$q \leq \Delta\sigma < 1.25q$	$r \leq \Delta\sigma/RMS < 1.25r$	$s \leq \Delta\sigma/ECU < 1.25s$
Moderado	$1.25D_{ec} \leq D_e < 1.5D_{ec}$	$1.25v_L \leq v_R < 1.5v_L$	$1.25p \leq \delta < 1.5p$	$1.25q \leq \Delta\sigma < 1.5q$	$1.25r \leq \Delta\sigma/RMS < 1.5r$	$1.25s \leq \Delta\sigma/ECU < 1.5s$
Alto	$D_e \geq 1.5D_{ec}$	$v_R \geq 1.5v_L$	$\delta \geq 1.5p$	$\Delta\sigma \geq 1.5q$	$\Delta\sigma/RMS \geq 1.5r$	$\Delta\sigma/ECU \geq 1.5s$

Los valores de  $p, q, r, s$  deben ser obtenidos de muchas y sistemáticas mediciones durante la fase constructiva.

### 5.6. Medidas correctivas para atenuar el impacto ambiental geotécnico

#### 5.6.1. Tratamiento del terreno

Aplica para suelos o terrenos muy fracturados e inestables, para túneles de obras civiles y urbanas, para mejorar las características de resistencia del terreno, permitiendo realizar la excavación en condiciones de seguridad y obtener un control del agua aceptable.

Para la aplicación de acciones de tratamiento del terreno se necesita de estudios detallados de investigación geológica, geotécnica e hidrológica.

Las técnicas empleadas están en función de las características del terreno y pueden ser de inyecciones o congelación, reducción del nivel freático con drenaje controlado e impermeabilización. En el Cuadro 5.20 se presentan algunos parámetros de dimensionamiento importantes.

La inyectabilidad se refiere a la permeabilidad del suelo (Cuadro 5.21). Una aplicación moderna en las técnicas de inyección es la inyección denominada *Jet Grouting*, aplicable para suelos granulares a finos y con todos los compuestos utilizados como cemento y resina (fig. 5.9).

Los equipos básicos utilizados para las inyecciones de cementos son: mezclador coloidal, agitador, bomba, manómetros, medidores de caudal y mangueras.

Cuadro 5.20 Técnica de inyección en el tratamiento de suelos (López Jimeno, C. 1997)

Cemento/ agua	Penetración de inyección				Presión de inyección
3/1	Tipo cemento	Permeabilidad (cm/s)	Tamaño d85 del cemento (mm)	Tamaño d15 del suelo (mm)	. Rocas débiles estratificadas: 0,025 MPa/m de profundidad. . Rocas duras: 0,10 MPa/m de profundidad.
	Portland normal	$2,3 \times 10^{-1}$	0,0047	0,87	. Suelos: función de porosidad, permeabilidad y otros
	Alta Resistencia	$1,3 \times 10^{-1}$	0,033	0,67	<i>Inyectabilidad:</i> . En suelos: $N_s = d_{15} \text{ solo} / d_{85}$ inyección
	Fino coloidal	$3,2 \times 10^{-2}$	0,019	0,38	$N_s > 24$ inyección consistente $N_s < 11$ no es posible inyección
Muy fino	$3,5 \times 10^{-3}$	0,006	0,12	. En rocas: $N_r = \text{abertura de fisura} / d_{95}$ inyección $N_r > 5$ : inyección consistente $N_r < 2$ : no es posible inyección	

Cuadro 5.21 Capacidad de inyección

Permeabilidad (cm/s)	Capacidad de inyección
$10^{-1} - 10^{-2}$	Fácilmente inyectables
$10^{-3} - 10^{-4}$	Moderadamente inyectables
$10^{-4} - 10^{-5}$	Marginalmente inyectables
$< 10^{-5}$	No inyectables

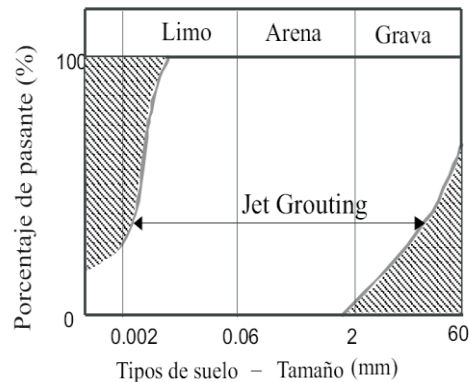


Figura 5.9 Aplicación de Jet Grouting

5.6.2. Interacción entre el soporte y el macizo rocoso en excavaciones

1. *Método de convergencia-confinamiento de la excavación:* la ruptura de macizo rocoso que implica una abertura subterránea, ocurre cuando la presión de soporte  $p_i$  es inferior a la presión crítica de soporte  $P_{cr}$ , en función de la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso ( $\sigma_{cm}$ ) y al factor  $k$  (considerado en la ecuación 5.10). La presión crítica viene dada por la ecuación (5.38).

$$P_{cr} = \frac{2p_o - \sigma_{cm}}{1 + k} \tag{5.38}$$

En la hipótesis que la presión de soporte ( $p_i$ ) sea mayor que la presión crítica, no se produce la ruptura, por lo tanto, el comportamiento del macizo es elástico (fig. 5.10) y la deformación elástica radial  $\mu_e$  se define por la expresión (5.39)

$$\mu_e = r_o \left( \frac{1+\nu}{E} \right) (p_o - p_i) \tag{5.39}$$

en donde  $r_o$  es el radio de la abertura subterránea,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson del macizo,  $E$  es el módulo de Young o de deformabilidad del macizo,  $p_o$  es la presión hidrostática *in situ* (profundidad x densidad del macizo rocoso) y  $p_i$  es la presión de soporte.

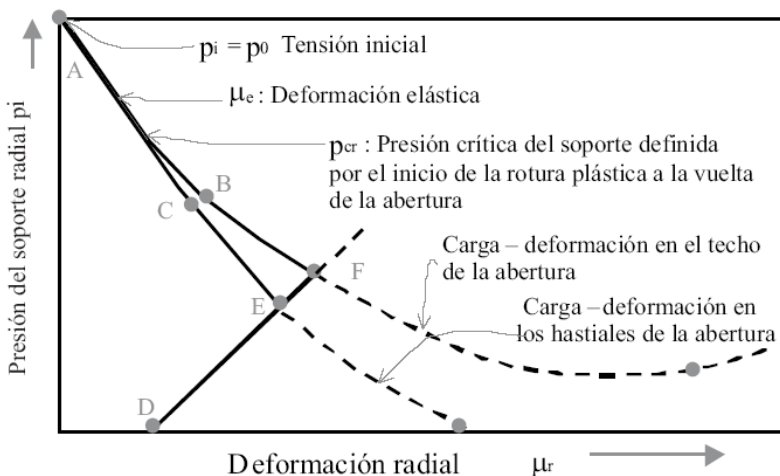


Figura 5.10 Curva característica de una excavación con soporte (Hoek, E, 1995)

Cuando la presión interna de soporte  $p_i$  es menor que la presión crítica  $p_{cr}$  ocurre la ruptura y el radio de la zona plastificada circundante al túnel  $r_p$  viene dado por la ecuación (5.40).

$$r_p = r_o \left[ \frac{2(p_o(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{k-1}} \tag{5.40}$$

Para el caso de una ruptura plástica, la deformación convergente total del perímetro de la abertura subterránea se expresa por la ecuación (5.41).

$$\mu_p = \frac{r_o(1+\nu)}{E} \left[ 2(1-\nu)(p_o - p_{cr}) \left( \frac{r_p}{r_o} \right)^2 - (1-2\nu)(p_o - p_i) \right] \tag{5.41}$$

Hoek, E. (2000), realizó estudios sobre la deformación del túnel en el medio rocoso con soporte utilizando el análisis de probabilidad de Montecarlo y obtuvo las ecuaciones (5.42) y (5.43).

$$\frac{r_p}{r_o} = \left[ 1.25 - 0.26 \left( \frac{p_i}{p_o} \right) \right] \left[ \frac{\sigma_{cm}}{p_o} \right]^{p_i p_o^{-0.57}} \tag{5.42}$$



$$\frac{\mu_p}{r_o} = \left[ 0.002 - 0.0025 \left( \frac{p_i}{p_o} \right) \right] \left[ \frac{\sigma_{cm}}{p_o} \right]^{2.4 \frac{p_i}{p_o} - 2} \quad (5.43)$$

Existen también métodos de cálculo numéricos que exigen modelos de elementos finitos del macizo en el entorno de la excavación para resolver los problemas de tensión-deformación mediante la aplicación de programas, como el FLAC, PLAXIS, ANSYS, GDA, etc.

En la práctica los elementos de soporte aplicados en una excavación subterránea no alcanzan la etapa plástica, porque la curva característica es similar a una línea recta (fig. 5.11)

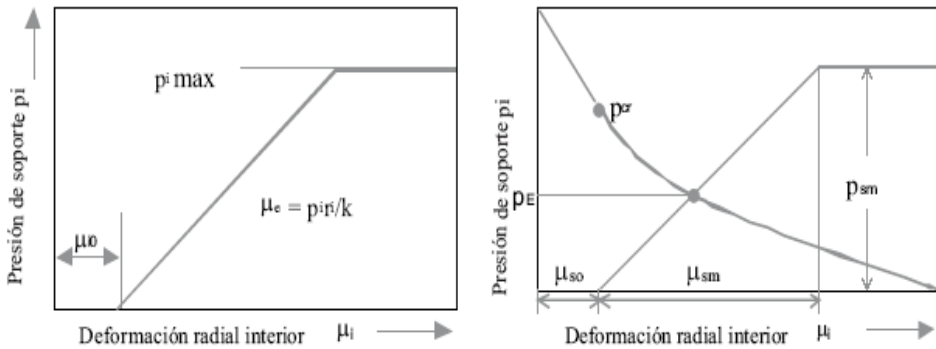


Figura 5.11 Curva característica del soporte y deformación

Un parámetro característico del soporte es la rigidez  $K_s$  ( $K_s = \sigma_{i \max} / \mu_s$ ), donde  $\mu_s$  es el desplazamiento máximo que el soporte puede admitir.

2. *Efectos del frente de excavación:* normalmente el soporte se coloca a cierta distancia del frente de excavación, por lo que hay un trecho sin soporte, en aparente estabilidad hasta proceder a su colocación. El frente de excavación ejerce un efecto de confinamiento cuyo valor varía en función de la distancia al sistema de soporte instalado, para lo que Panet estima la variación de la presión radial que se indica en la fig. 5.12.

3. *Factor de seguridad:* la correlación entre la presión de soporte ( $p_i$ ) y la presión hidrostática ( $p_o$ ) permite calcular el factor de seguridad  $F_s$  con la ecuación (5.44).

$$F_s = \frac{p_i}{p_o} \quad (5.44)$$

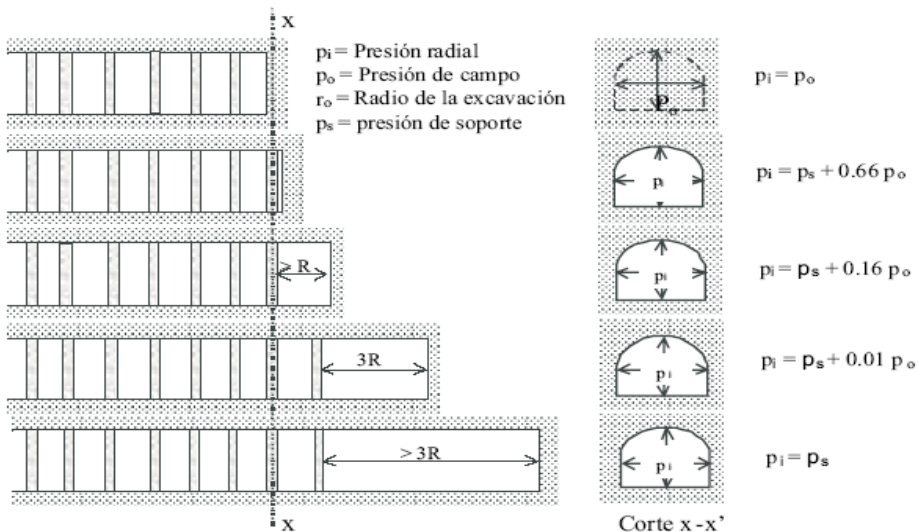


Figura 5.12 Efecto del frente de la excavación en el soporte (Hoek y Brown, 1982)

### 5.6.3. Dimensionamiento del soporte mediante el sistema Q

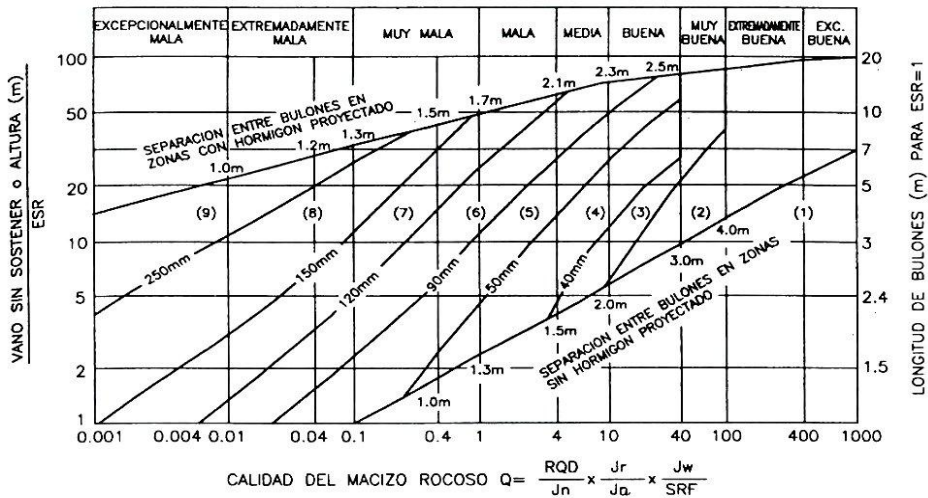
El primer paso para elegir un sistema de soporte se realiza con base en la caracterización geológica y geotécnica del macizo rocoso, para lo cual se recomiendan los siguientes pasos:

a) Calcular el índice Q (*Tunneling Quality Index*) de Barton, Lien y Lunde con base en el índice RMR (*Rock Mass Index*) de Bieniawski mediante la ecuación (5.45) o en cualquier otro parámetro.

$$Q = e^{\frac{RMR-44}{9}} \quad (5.45)$$

b) Determinar el índice ESR (*Excavation Support Ratio*) de Barton y calcular  $D_e$  (Dimensión Equivalente) con la ecuación (5.13).

c) Con los valores de Q y  $D_e$  determinar el tipo de soporte recomendable en el ábaco (fig. 5.13) de Barton, N. y Grimstad, E. (2000) (el ábaco es una actualización basada en más de 1.050 registros de nuevos casos relativos a los principales túneles excavados en Noruega). Este procedimiento posibilita la selección de un tipo de soporte para un tipo de roca y tamaño de la abertura incluyendo el espesor del hormigón proyectado, el espaciamiento entre bulones y la longitud de estos.



$$CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Tipos de soporte	
(1) Sin soporte	(6) Hormigón proyectado con fibras de 90 – 120 mm y bulonado, S(fr)+B
(2) Bulonado puntual, sb	(7) Hormigón proyectado con fibras de 120 – 150 mm y bulonado, S(fr)+B
(3) Bulonado sistemático, B	(8) Hormigón proyectado con fibras > 150 mm con bulonado y arcos armados con hormigón proyectado, S(fr)+RRS+B
(4) Bulonado sistemático con hormigón proyectado, 40 – 100 mm, B+S	(9) Revestimiento con hormigón, CCA
(5) Hormigón proyectado con fibras de 50 – 90 mm y bulonado, S(fr)+B	

Figura 5.13 Dimensionamiento del sistema de soporte basado en el sistema Q (Barton y Grimstad, 1993)

En la fig. 5.13 se observa que, por el efecto arco del hormigón proyectado, el espaciamento entre bulones es entre 20% a 40% mayor cuando se utiliza hormigón proyectado que cuando se usan solamente bulones.

Por ejemplo, el soporte de clase 4 consiste en bulones de roca y hormigón proyectado sin refuerzo, cuando el tamaño de los bloques es pequeño ( $RQD/J_n < 10$ ). El espesor típico S (hormigón proyectado sin malla metálica) se sitúa entre 4 y 6 cm en los túneles pequeños, donde el tamaño de bloques ( $RQD/J_n$ ) es limitado, no obstante, para grandes excavaciones con alturas significativas de los hastiales es habitual usar hasta 10cm de espesor, incluso cuando Q tenga altos valores, próximos a 30.

Las clases de sostenimiento 5, 6, y 7 consisten en la aplicación de S(fr) con espesores que varían de 7 a 15 cm, combinando con anclajes sistemáticos de bulones. En estos casos se aplicarán los espaciamentos entre bulones según los indicados en la diagonal superior del gráfico. Estas clases de sostenimiento se pueden también aplicar al sistema de arcos metálicos RRS.

Los arcos armados reforzados con hormigón proyectado RRS (clase de soporte 8), son necesarios cuando el espesor normal de S(fr) sea insuficiente para soportar las cargas, o cuando la superficie de la abertura sea irregular. El refuerzo

con RRS es muy flexible ya que el espesor y el espaciado de los arcos pueden variar según las necesidades.

En rocas excepcionalmente malas y en excavaciones amplias es necesario utilizar galerías temporales, pre-inyecciones y medidas de drenaje, utilizar el sistema de soporte RRS con revestimiento de hormigón en la sección completa CCA reforzando con placas de acero. El CCA puede variar de 0,3 hasta 1,0 m.

El gráfico del sistema Q (fig. 5.13) fue desarrollado específicamente para el soporte del techo de las aberturas subterráneas, pero puede ser utilizado para la selección del soporte temporal aplicable en los hastiales con Q modificado (Cuadro 5.22)

Cuadro 5.22 Método de selección de soporte temporal de los hastiales usando valores del sistema Q (Barton, N. Grimstad, E. 2000)

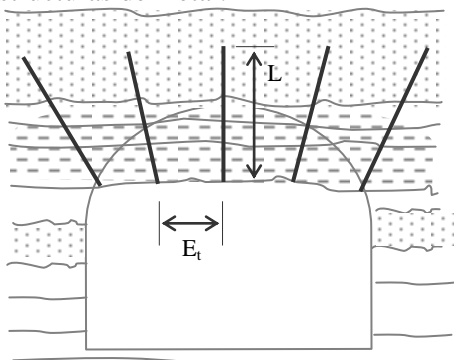
(1)	Soporte temporal	a) Aumentar el ESR hasta 1,5ESR b) Aumentar el índice Q hasta 5Q (en el techo) c) Aumentar Qw hasta 5Qw
(2)	Soporte de los hastiales con Q modificado (Qw)	a) Escoger Qw = 5Q (cuando Q > 10) b) Escoger Qw = 2,5Q (cuando Q < 10) c) Escoger Qw = 1,0Q (cuando Q < 0,1)
(1): Utilizar la altura total de la excavación (H) para el dimensionamiento del soporte de los hastiales		
(2): Q representa la calidad general de la roca en el techo y hastiales del túnel		

### 5.6.4. Dimensionamiento del soporte para excavaciones subterráneas

Existen muchos métodos sobre procedimientos de dimensionamiento del soporte, por lo que a continuación se presentan las metodologías de dimensionamiento más usuales:

1. *Soporte con bulones*: el sistema de soporte con bulones consiste en anclar en el interior de la roca una barra de material resistente, que confiere una resistencia a la tracción y confina el macizo aprovechando sus características resistentes (fig. 5.14).

Con base en el sistema RMR se puede seleccionar un sistema de anclaje utilizando el Cuadro 5.23 donde también se considera el hormigón proyectado estructuras de metal.



- L: Longitud de los bulones
- E<sub>t</sub>: Espaciado
- D: Diámetro

Figura 5.14 Esquema típico de soporte con bulones

Cuadro 5.23 Sistemas de soporte para un vano de 10m, tensión vertical de 25 MPa (Hoek y Brown, 1982)

RMR	Excavación	Soporte		
		Bulones ( $\phi=20$ mm)	Hormigón proyectado	Estructuras de metal
81 - 100	3 m de avance	Generalmente no requieren soporte y solo ocasionalmente bulones		
61 - 80	1 a 1,5 m de avance Soporte a 20 m del frente	Longitud: 3 m $E_t$ : 2.5 m Malla: ocasional Local: corona	50 mm en la corona en caso sea necesario	No
41 - 60	Realce y banco, 1,5 a 3 m de avance. Soporte a 10 m del frente	Longitud: 4 m $E_t$ : 1,5 a 2 m Malla: em corona Local: corona - hastiales	50 a 100 mm en la corona, 30 mm en los hastiales	No
21 - 40	Realce y banco, 1 a 1,5 m de avance. Soporte a menos de 10 m de frente	Longitud: 4 a 5 m $E_t$ : 1 a 1,5 m Malla: corona-hastiales	100 a 150 mm en la corona, 100mm en los hastiales	Ligero en los hastiales, espaciados a 1,5 m
<20	Varias galerías, 0,5 a 1,5 m de avance. Soporte continuo.	Longitud: 5 a 6 m $E_t$ : 1 a 1,5 m Malla: corona - hastiales	150 a 200 mm en la corona, 150 mm en los hastiales y 50mm en el frente.	Medio en los hastiales y en la corona, espaciados 0,75 m

La carga del soporte  $P$  (kN) y la altura de sobrecarga de la roca  $H$  (m) se pueden determinar utilizando el índice  $RMR$ , la densidad de la roca  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) y el largo de la excavación subterránea  $B$  (m) mediante las ecuaciones (5.46) y (5.47) propuestas por Unal (1983).

$$P = \rho B \left( \frac{100 - RMR}{100} \right) \quad (5.46)$$

$$H = B \left( \frac{100 - RMR}{100} \right) \quad (5.47)$$

La longitud  $L$  y el espaciamiento  $E$  se calculan con las ecuaciones (5.48) y (5.49) propuestas por Bieniawski (1992).

$$L = 2 + 0.15 \frac{B}{ESR} \quad \text{ou} \quad L = \frac{B}{3} \quad \text{ou} \quad L = B^{\frac{2}{3}} \quad (5.48)$$

$$E = \left( \frac{0.6P}{\rho B} \right)^{0.5} \quad (5.49)$$

En roca estratificada el peso máximo  $p_{max}$  que puede soportar un bulón para un factor de seguridad  $S$  (1,5 – 3), espaciamiento longitudinal  $E_l$  está dado por la ecuación (5.50).

$$p_{max} = S \cdot E_t \cdot E_l \cdot H \cdot \rho \quad (5.50)$$

Un caso común corresponde al anclaje de un bloque de roca de peso  $P_b$  en la hipótesis de no existir cohesión en las juntas individuales del bloque, para calcular el número de bulones requeridos  $N_p$  para una fuerza vertical  $F_v$  se puede usar la ecuación (5.51).

$$N_p = \frac{S.P_b}{F_v} \tag{5.51}$$

En terrenos plastificados la fuerza axial  $F_a$  que un bulón de diámetro  $D$  y resistencia específica de acero  $\sigma_a$ , puede soportar se calcula a través de la ecuación (5.52).

$$F_a = \frac{\pi D^2}{4\sigma_a} \tag{5.52}$$

La fuerza de adherencia  $f_a$  de un bulón con una longitud de anclaje  $L_a$  y adherencia al terreno  $\tau$  se calcula con la ecuación (5.53).

$$f_a = \pi D.L_a.\tau \tag{5.53}$$

Al admitir que entre el bulón y la roca existe una cohesión  $c$  y un ángulo de fricción  $\phi$ , la tensión tangencial  $\tau$ , en un modelo de Mohr-Coulomb se expresa por la ecuación (5.54) y cuando el terreno pierde totalmente la cohesión, la tensión tangencial que podrá soportar el bulón obedece a la ecuación (5.55).

$$\tau = c + \sigma.\text{tag}\phi \tag{5.54}$$

$$\tau = \sigma.\text{tag}\phi \tag{5.55}$$

2. *Hormigón proyectado*: consiste en revestir el techo y las paredes de la excavación subterránea con una capa de mezcla de cemento y arena (fig. 5.15).

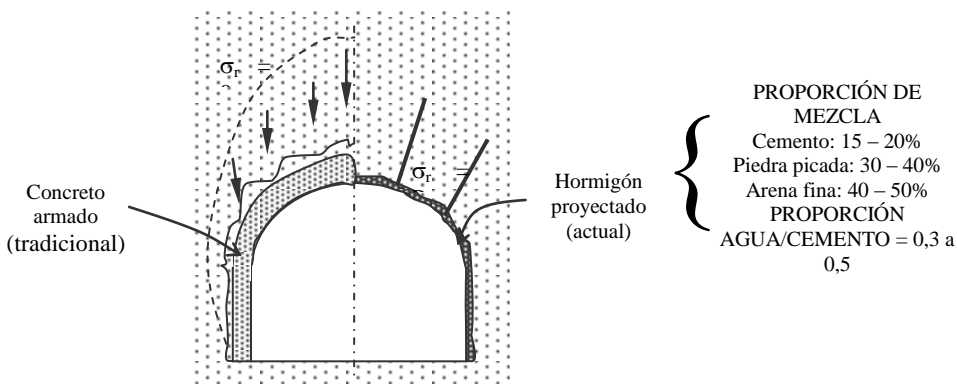


Figura 5.15 Esquema de soporte de concreto (hormigón) proyectado comparado con hormigón armado

Existen dos tipos básicos de hormigón proyectado: mezcla por vía seca y mezcla por vía húmeda, que son proyectados a una determinada presión utilizando una bomba.

Las ventajas del hormigón proyectado están relacionadas con la posibilidad de su proyección, una rápida consistencia con uso de compuestos aceleradores (4 a 8 horas), una buena vida útil y un bajo costo.

En el Cuadro 5.24 se presenta las mezclas típicas del hormigón proyectado y sus respectivas propiedades.

3. *Soporte con estructuras metálicas*: es el tipo de soporte clásico y todavía utilizado actualmente. Se caracteriza por poseer la ventaja de ser resistente a los esfuerzos de tracción y compresión, pudiendo soportar elevados momentos de flexión. Las formas típicas utilizadas son las indicadas en la fig. 5.16. Se puede ver que la forma ideal corresponde al círculo cerrado.

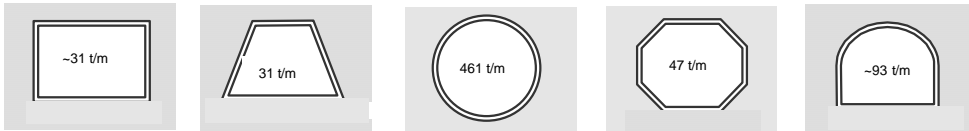


Figura 5.16 Formas típicas de soporte con estructuras metálicas (López Jimeno, C, 1997)

Cuadro 5.24 Mezclas típicas de hormigón proyectado y sus propiedades (Hoek y Brown, 1982)

Proyecto	Materiales			Mezcla (%)				Resistencia a compresión (MPa)				Módulo de elasticidad (GPa)				
	Húmeda o seca	Tipo de	Tamaño máx.	Cemento	Agregado grueso	Agregado fino	Arena	Agua	1 - 3 horas	3 - 8 horas	1 día	28 días	6 - 7 horas	1 día	3 - 8 días	28 días
Vancouver Tunel	Seca	I	19	16,6	23,0	21,7	38,7		3,7 - 4,1	6,9 - 18,6	16,3 - 32,3					
Illinois Institute on Shotcrete	Seca	III	13	13,5	31,5		55,0		0,4 - 1,3	0,4 - 5,2	14,9	27,8				
	Seca	III	13	17,9	29,9		52,2		0,76 - 3,45	3,45 - 10,7	20,3	29,6	4,0 - 7,1	13,6 - 23,4	18,8 - 21,3	17,8 - 23,1
University Illinois	Seca	I	9	18,4	41,4		40,2		4,96 - 6,37		27,6 - 41,4	6,2 - 15,9		21,4 - 50,3		
New Melones Represa	Seca	II	19	18,8	38,2		43,0		3,7 - 4,1	6,9 - 18,6	16,3 - 32,3			17,2 - 23,9		19,7 - 27,5
Hecla Minig Co.	Húm.	II	13	15,8	34,5	41,3		8,4			6,9	27,6				
Waterway Experimentation	Húm.	II	19	16,3	30,8		44,8	8,1				57,7				
Illinois Institute on Shotcrete	Húm.	III	13	16,7	27,9		48,7	6,7	0 - 1,17	1,17 - 5,59	18,9 - 20,3	33,3 - 39,4		12,3 - 28,0	22,3 - 27,0	23,8 - 35,9
Henderson mine	Húm.	I	9	17,8	27,4		54,8									

Los perfiles son los elementos utilizados para la construcción de las estructuras y pueden trabajar a los esfuerzos de compresión, torsión y flexión. Estos esfuerzos se pueden calcular mediante las ecuaciones (5.56), (5.57) y (5.58).

$$M_f = W_x \cdot \sigma_p \tag{5.56}$$

$$W_x = \frac{I_x}{d} \tag{5.57}$$

$$W_y = \frac{I_y}{d} \tag{5.58}$$

Donde  $M_f$  es el momento de flexión, y  $W_x, W_y$  son los módulos que representan la capacidad del perfil de resistir a los esfuerzos de flexión normales al plano del perfil,  $\sigma_p$  es la resistencia del perfil,  $I_x, I_y$  son los momentos de inercia según sus ejes principales y  $d$  la distancia del eje neutro a la fibra mas lejana de la viga en flexión. Los momentos de inercia permiten determinar la sección del perfil requerido en el soporte (Cuadro 5.25).

Cuadro 5.25 Dimensiones y propiedades de los perfiles H (basado en López Jimeno C. 1997)

Tamaño normal	89x89	102x102	114x114	127x114	152x127
Altura de la sección (mm)	88,9	101,6	114,3	127,0	152,4
Ancho de sección (mm)	88,9	101,6	114,3	114,3	127,0
Masa de la sección (kg/m)	19,35	23,07	26,79	29,76	37,20
Área de la sección (cm <sup>2</sup> )	2,9	29,4	34,4	37,3	47,5
$I_x$ (cm <sup>4</sup> )	306,7	486,1	735,4	979,0	1818,0
$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	101,1	154,4	223,1	241,9	378,8
$R_x$ (cm)*	3,51	4,06	4,62	5,12	6,20
$R_y$ (cm)*	2,01	2,29	2,54	2,55	2,82
$E_x$ (cm <sup>3</sup> )**	82,7	113,4	151,2	180,9	278,6
$E_y$ (cm <sup>3</sup> )**	38,03	50,70	65,63	70,85	99,85

4. *Soporte con pilar del macizo rocoso*: una forma de evitar el deslizamiento de rocas en aberturas subterráneas es mediante pilares del propio macizo rocoso (fig. 5.17).

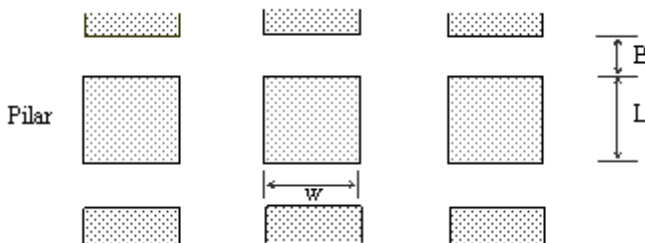


Figura 5.17 Elementos geométricos de un sistema de soporte mediante pilares del macizo

El proceso de dimensionamiento de pilares del macizo rocoso recomendado por Bieniawski (1992) consiste en:

1. Basado en testigos de sondeo de 54 mm de diámetro, realizar ensayos de compresión uniaxial en laboratorio  $\sigma_c$  y con diámetro  $D$  de la muestra, utilizando la ecuación de Gaddy (5.59) calcular el valor de  $K$ . Este valor varía de 1640 a 10600 con una media de 6120, aunque es conveniente realizar el cálculo para cada caso.

$$K = \sigma_c D^{0.5} \tag{5.59}$$

2. Determinar el esfuerzo del pilar  $\sigma_p$  usando la ecuación de Bieniawski (5.20), que está en función del esfuerzo de compresión uniaxial  $\sigma_l$ , el ancho del pilar  $B$  y altura del pilar  $H$ .



3. Determinar la carga en el pilar  $S_p$  con la ecuación (5.60) en función del ancho de la excavación  $B$  (cámara), longitud del pilar  $L$  y profundidad existente desde superficie hasta la excavación  $H$ .

$$S_p = 1.1H \left( \frac{w+B}{w} \right) \left( \frac{L+B}{w} \right) \quad (5.60)$$

4. Con el factor de seguridad  $F_s$  que normalmente varía entre 1,5 a 2,0 evaluar el resultado del cálculo del pilar para el ancho  $w$ , mediante la ecuación (5.61).

$$S_{p'} = \frac{\sigma_p}{F_s} \quad (5.61)$$

5. Si la excavación subterránea es para fines de explotación de un yacimiento mineral, con las consideraciones económicas, evaluar el porcentaje de recuperación (%) con la ecuación (5.62).

$$e = 1 - \left( \frac{w}{w+B} \right) \left( \frac{L}{L+B} \right) \quad (5.62)$$

6. En caso que el porcentaje de recuperación no sea aceptable se necesita aumentar con la disminución del ancho del pilar  $w$ , seleccionando como en el paso 5 el ancho y largo que satisfaga la recuperación requerida dentro del límite de las condiciones de estabilidad del macizo. Este requisito se calcula a través de la relación del factor de seguridad expresada en la ecuación (5.63).

$$F_s = \frac{\sigma_p}{S_p} \quad (5.63)$$

Un procedimiento práctico para la estimación de la capacidad de soporte se realiza utilizando las ecuaciones de Brady y Brown (1995) (Cuadros 5.26, 5.27 y 5.28). Las presiones de soporte obtenidas son para secciones circulares, por lo que, se recomienda tener ciertas precauciones.

Cuadro 5.26 Estimación de la capacidad de soporte de perfiles de acero (Hoek, 2000)

Tipo de soporte	Ancho	Altura	Peso (kg/m)	$p_{max}$ de soporte (MPa), $D^*$ y $S^{**}$
Perfil (H) IPN	305	305	97	$p_{max} = 19,9D^{-1.23/S}$
	203	203	67	$p_{max} = 13,2D^{-1.3/S}$
	150	150	32	$p_{max} = 7,0D^{-1.4/S}$
Perfil (H) HEB	203	254	82	$p_{max} = 17,6D^{-1.29/S}$
	152	203	52	$p_{max} = 11,1D^{-1.33/S}$
Perfil (U) TH	171	138	38	$p_{max} = 15,5D^{-1.24/S}$
	124	108	21	$p_{max} = 8,8D^{-1.27/S}$

\* D: diámetro de abertura subterránea, \*\* S: espaciamiento entre armazones

Cuadro 5.27 Estimación de la capacidad de soporte con sistema de anclaje

Tipo de anclaje	Ecuación de $p_{max}$ de soporte (MPa)	Tipo de anclaje	$p_{max}$ de soporte (MPa) y $S^{**}$
Anclaje de 34 mm	$p_{max} = 0,354/S^2$	SWELLEX EXX	$p_{max} = 0,11/S^2$
Anclaje de 25 mm	$p_{max} = 0,267/S^2$	B. Resina 20 mm	$p_{max} = 0,17/S^2$
Anclaje de 19 mm	$p_{max} = 0,184/S^2$	F. de vidrio 22 mm	$p_{max} = 0,26/S^2$
Anclaje de 17 mm	$p_{max} = 0,10/S^2$	Cabo plano	$p_{max} = 0,15/S^2$
SPLITSET SS39	$p_{max} = 0,05/S^2$	C. jaula de pájaro	$p_{max} = 0,30/S^2$

Cuadro 5.28 Estimación de la capacidad de soporte con hormigón proyectado (Hoek, E. 2000)

Espesor (mm)	Tiempo (minutos)	Resistencia a compresión simple	$p_{max}$ de soporte (MPa) y $D^{**}$
1000	28	35	$p_{max} = 57,8D^{-0.92}$
300	28	35	$p_{max} = 19,1D^{-0.92}$
150	28	35	$p_{max} = 10,6D^{-0.97}$
100	28	35	$p_{max} = 7,3D^{-0.98}$
50	28	35	$p_{max} = 3,8D^{-0.99}$
50	3	11	$p_{max} = 1,1D^{-0.97}$
50	0,5	6	$p_{max} = 0,6D^{-1.0}$

### 5.7. Monitoreo y control geotécnico

Está relacionado con la observación sistemática en la etapa de excavación, el diagnóstico de situaciones anómalas y las decisiones con respecto a la adopción de medidas para la resolución de los problemas identificados. La instrumentación es un medio determinante en el proceso de monitoreo y control geotécnico.

En el monitoreo y control es imprescindible usar equipos que permitan efectuar mediciones de los desplazamientos relativos, rotaciones, presión del agua, variación de tensiones y orientación de los taladros.

La selección de los equipos generalmente está relacionada con aspectos de eficiencia, compatibilidad con los objetivos y aspectos operacionales, tales como:

- Funcionalidad de los aparatos como las condiciones de tamaño y condiciones geotécnicas de la roca huésped.
- Adaptabilidad a las condiciones de construcción del ambiente subterráneo, sin generar perturbaciones en el sitio de instalación.
- Confiabilidad y precisión adecuadas.
- Robustez y bajo mantenimiento.
- Automatización en la captación del comportamiento geotécnico del macizo, registro, lectura y transferencia de datos mediante sistemas electrónicos.
- Costo razonable y compatible para el tipo de excavación subterránea.

Son utilizados diversos instrumentos para el monitoreo geotécnico del ambiente subterráneo (fig. 5.18) (Ribeiro y Sousa, 2001). Entre los más usados están los convergenciómetros, que existen de muchos tipos y miden la variación de distancia entre dos puntos en la pared de la excavación, revestimiento o soporte, en dirección horizontal, vertical y/o inclinada.

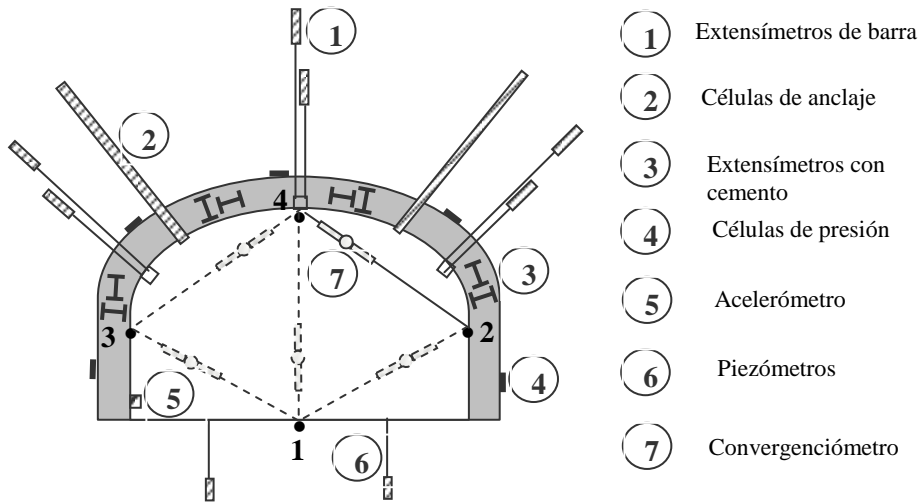


Figura 5.18 Posición de los equipos para la monitorización geotécnica (basados en Ribeiro y Sousa, 2001)

Para las mediciones de presión transmitidas por el terreno y de tensiones instaladas en los soportes de hormigón se usan células hidráulicas del tipo Glotzl o de Geosistemas.

Para la medición de las deformaciones en los soportes, y consecuentemente de tensiones, se utilizan extensómetros de resistencia o de cuerda vibrante. Para la medición de las tensiones, se pueden seguir utilizando almohadillas planas de pequeña superficie.

En las fuerzas en anclajes, para medir el pre-esfuerzo, se utilizan las células de presión.

El monitoreo del agua se hace con los piezómetros y los indicadores de nivel del agua. Los más conocidos son los del tipo báscula, en donde el agua entra por un embudo para alcanzar un pequeño reservorio y cuando este se encuentra lleno, la báscula permite establecer un contacto electrónico que constituye información automática.

Los piezómetros electrónicos de cuerda vibrante, de lectura automática también son recomendables para el monitoreo subterráneo.

La gestión del macizo rocoso en la ingeniería del ambiente subterráneo debe ser un proceso sistemático y secuencial (fig. 5.19) de modo que las alteraciones geotécnicas provocadas por las excavaciones subterráneas sean controladas. Para ello es necesario contar con información geotécnica consistente y confiable para prever el nivel de impacto ambiental geotécnico, procurar medidas preventivas y correctivas, aplicarlas y realizar un acompañamiento con instrumentación, muestreo y observación *in situ* para el reajuste constante de los parámetros geotécnicos.

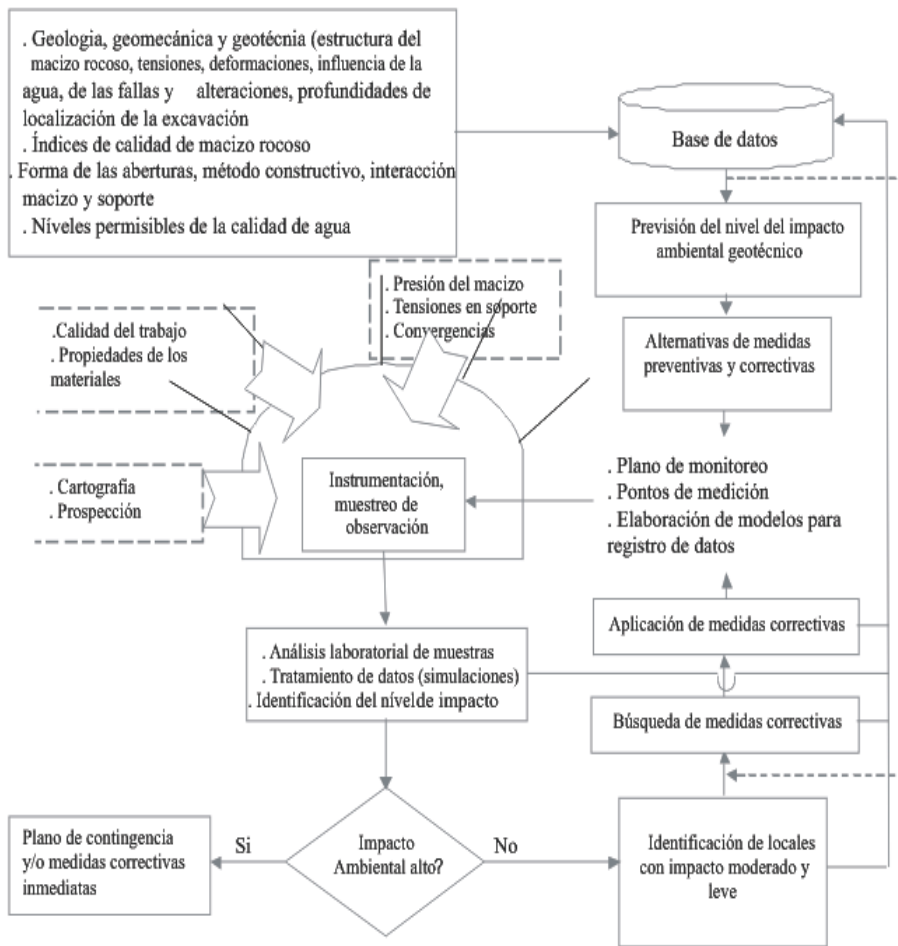


Figura 5.19 Metodología de gestión del macizo rocoso en la ingeniería del ambiente subterráneo

## Capítulo 6

### ECONOMIA DEL AMBIENTE SUBTERRÁNEO

#### 6.1 Costo ambiental en la industria minera

##### 6.1.1 Costo de la conservación ambiental en la industria minera

Una gestión ambiental basada en la calidad y eficiencia ambiental en la industria minera, debe considerar los costos ambientales en cada una de las operaciones unitarias del proceso productivo minero, desde la evaluación de los impactos ambientales, la prevención y protección ambiental, el monitoreo e incluso la participación de las comunidades.

Los costos ambientales en minería varían en función de los factores operacionales, las diferencias físicas y geológicas, los métodos de explotación (a cielo abierto o subterráneo), los métodos de prevención y los métodos de protección ambiental.

El costo ambiental global en la industria minera, en algunos países (Australia) es de alrededor del 5% de la inversión total en nuevos proyectos (*Commonwealth of Australia*, Agosto 2002).

Cordner, J. P., (1980) estimó el costo ambiental de diferentes sectores en Australia (Cuadro 6.1), determinando para la industria del carbón, acero y aluminio un costo de control ambiental en 23%, 13% y 10% respectivamente, con un valor promedio de 12,5% en los sectores considerados.

Cuadro 6.1 Costo del control ambiental de la industria en Australia  
(Cordner, J. P., 1980)

Industria	Costo de control ambiental % del capital total
Alimentos, bebidas y tabaco	9
Textil, ropa y calzados	7 – 8
Química, petróleo y carbón	23
Acero	13
Aluminio	10

En los Estados Unidos de América, según Huisingh, D., *et al*, (1982), la inversión en tecnología limpia para la protección ambiental en el sector minero (Cuadro 6.2) varía entre el 10% y el 13%.

##### 6.1.2 Costo ambiental subterráneo

El costo ambiental subterráneo varía en función de las condiciones locales, físicas, geológicas, tipo de yacimiento, profundidad, método de explotación, nivel de mecanización, tamaño de la producción, entre otros parámetros.

Cuadro 6.2 Inversión en tecnología limpia de distintas industrias en los E.U.A (% de la inversión total), incluida la minería (Huisingh, D., *et al.*, 1982)

Industria	1979	1980	1981
Acero	8	7	9
Minería	10	13	13
Minerales no metálicos	15	18	14
Canteras y arcilla	15	21	24
Química	18	15	15
Caucho	20	33	20
Maquinaria, excepto eléctrica	23	21	23
Papel	28	19	17
Alimentos y bebidas	33	33	27
Fabricación de metales	33	20	35
Maquinaria eléctrica	36	31	25
Textil	40	57	37
Gas	60	67	57

En cuanto al costo de protección ambiental, relacionado con el aire de la atmósfera subterránea, se pueden citar cuatro minas subterráneas en diferentes condiciones (Cuadros 6.3 y 6.4), variando el costo entre 0,41 €/t y 1,96 €/t.

Cuadro 6.3 Minas subterráneas de Indonesia, Portugal y Perú

Mina	Lugar	Metal	Método	Producción (t/día)
DOZ Mine*	Indonesia	Cobre	Excavación por bloques Block Caving	25000
Neves Corvo	Portugal	Cobre	Corte y relleno	6500
San Rafael	Perú	Estaño	Sub Level Stoping	2500
Panasqueira	Portugal	Wolframio	Cámaras y pilares	2000

\* Calizaya, F. *et al.*, 2002.

Cuadro 6.4 Costos de protección ambiental del aire en la atmósfera subterránea

Mina	País	Volumen de aire (m <sup>3</sup> /s)	Costo de operación		
			(€/año)	€/t	m <sup>3</sup> aire/€
DOZ Mine	Indonesia	1040	2307800	0,41	8761
Neves Corvo	Portugal	837	1245618	0,85	13058
San Rafael	Perú	235	1102896	1,96	3828
Panasqueira	Portugal	114	644544	1,43	52712

El costo de reducción de las emisiones de los motores diesel en el ambiente subterráneo es de 8 a 12 €/hp para la oxidación catalítica, de 30 a 50 €/hp para filtros de emisión de partículas y de 50 €/hp para la reducción catalítica selectiva (*Diesel Emission Evaluation Program DEEP*, 2002, y *Manufactures of Emission Controls Association MECA*, 2000). Con este costo, la vida útil de los equipos y el rendimiento horario, se puede determinar el costo por tonelada del mineral.

El costo del control de la emisión de gas NO<sub>x</sub> producido por los motores diesel en el ambiente subterráneo, la EPA de E.U.A lo estimó en 2564 € para el año

2007 con motores promedio, con una reducción a 1412 € para 2012 y, para motores mayores el costo fue de 3227 € en 2007 y de 1866 € en 2012 (EPA420-R-00-028, 2000).

Cuadro 6.5 Costos de bombeo del agua por año (Thomson, J., *et al.*, 2002)

c€/kWh	35 hp	75 hp	100 hp	125 hp	150 hp	200 hp
5,0	€2400	€4500	€5900	€7200	€8500	€11200
5,5	2600	4900	6300	7800	9200	12100
6,0	2800	5300	6800	8400	10000	13100
6,5	2900	5600	7300	9000	10700	14100
7,0	3100	6000	7800	9600	11400	15000
7,5	3300	6400	8300	10200	12100	16000
8,0	3500	6700	8800	10800	12900	17000
8,5	3600	7100	9300	11400	13600	17900
9,0	3800	7500	9800	12000	14300	18900
9,5	4000	7800	10200	12700	15100	19900
10	4200	8200	10700	13300	15800	20800
11	4500	8900	11700	14500	17200	22800
12	4900	9700	12700	15700	18700	24700
13	5200	10400	13700	16900	20100	26600
14	5600	11200	14600	18100	21600	28600
15	5900	11900	15600	19300	23100	30500
16	6300	12600	16600	20500	24500	32400
17	6600	13400	17600	21800	26000	34400
18	7000	14100	18500	23000	27400	36300
19	7300	14800	19500	24200	28900	38200
20	7700	15600	20500	25400	30300	40200
21	8100	16300	21500	26600	31800	42100
22	8400	17000	22400	27800	33200	44000

Thomson, J. *et al.*, (2002) recomiendan la utilización del factor de corrección en función del tiempo de operación anual (Cuadro 6.5), de manera que para obtener el costo total se deben multiplicar los costos indicados con los factores del Cuadro 6.6.

Cuadro 6.6 Factor de corrección debido al tiempo de operación anual (Thomson, J. *et al.*, 2002)

Horas/año	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
Factor	0,67	0,83	1,00	1,177	1,33	1,50	1,67	1,83	2,00

Los costos de predicción del drenaje ácido de aguas subterráneas depende del tipo y método de ensayo a realizar (Cuadro 6.7). Las pruebas estáticas tienen un menor costo (23 a 170 €) que los cinéticos (100 a 3500 €). El tratamiento de las aguas ácidas de la mina depende de la técnica utilizada. Por ejemplo, en la UK, estudios realizados a lo largo de 3 años en la mina Whel Jane (Cuadro 6.8), mediante la utilización de cal, muestra un costo de operación anual de 1196,8 € (Cuadro 6.9) y un costo de capital de 2,4 millones de euros para una capacidad instalada de 300 l/s.

Cuadro 6.7 Costo de predicción del drenaje ácido de las aguas subterráneas (U.S. EPA 530-R-94-036, 1994)

Pruebas Estáticas		Pruebas dinámicas	
Método	€	Método	€
Acid Base Accounting	34-110	BC Research Confirmation Test	300
Modified Acid Base Accounting	34-110	Shake Flasks	1500-3500
BC Research Initial Alkaline Production Potential: S	65-170	Sokhelet Reactor	425-850
Net Acid Production	34-110	Humidity Cell	100-500
	25-68	Columns/lysimeters	500-1500

Cuadro 6.8 Condiciones de aplicación del tratamiento de drenaje ácido en la mina de Wheal Jane UK, en ppm, excepto pH (McGinness, S., 1999)

Contaminante	1992 <sup>(a)</sup>	1995 <sup>(b)</sup>
pH	2,6-3,1	3,5
Al	170-197	30
As	26-29	9
Cd	1,4-1,9	1
Cu	14-18	1,5
Fe	1720-1900	300
Mn	11-25	12
Zn	1260-1700	120

(a) Hamilton *et al*, 1996, (b) Dodds-Smith *et al*, 1995

Cuadro 6.9 Costo de operación anual de la planta de tratamiento de aguas ácidas con cal en la mina Wheal Jane UK (McGinness, S., 1999)

Detalle	Consumo	Precio Unitario	Costo anual
Capacidad instalada			300 l/s
Razón del tratamiento			155 l/s
Electricidad	0,38 KWh/m <sup>3</sup>	0,0288€/m <sup>3</sup>	140 €
Cal	0,87 Kg/m <sup>3</sup>	0,0928€/m <sup>3</sup>	456 €
Floculante	3 g/m <sup>3</sup>	0,0096€/m <sup>3</sup>	43,2 €
Agua y varios		0,0288€/m <sup>3</sup>	144 €
Mantenimiento		0,0192€/m <sup>3</sup>	96 €
Eliminación de lodos		70€/t secos	316,8 €
TOTAL		0,243€/m <sup>3</sup>	1196,8 €

Los costos de tratamiento de las aguas ácidas de las minas dependen de la cantidad y calidad de estas aguas y de la tecnología utilizada. En el Cuadro 6.10 se presentan las condiciones y características de cuatro métodos (reactivos) de tratamiento, así como los costos que se presentan en el Cuadro 6.11, determinados por el *Department of the Interior-Office of Surface Mining* de E.U.A. (<http://www.osmre.gov/osm.htm>).



Cuadro 6.10 Diferentes condiciones de las aguas ácidas de mina  
(<http://www.osmre.gov/osm.htm>)

Condición	Caudal (l/s)	Acidez (mg/l)	Fe (mg/l)	Tiempo (años)
1	3,15	100	5	3
2	6,30	250	10	5
3	15,77	500	100	5
4	31,52	1000	300	10

Estudios realizados por *Agriculture & Natural Resources Development of West Virginia University* (2001) concluyen que los costos totales del tratamiento de las aguas ácidas de las minas mediante el uso de amoníaco, CaO y NaOH, resultan los indicados en el Cuadro 6.12.

El cuadro muestra que el tratamiento químico basado en CaO representa el 37% del costo del tratamiento con amoníaco y el 16% del costo con soda cáustica.

Cuadro 6.11 Costos de tratamiento de aguas ácidas de mina en € con 6% de interés anual (<http://www.osmre.gov/osm.htm>)

Condición 1				
Detalle	Cal hidratada	Soda Ash*	Soda Cáustica	Amoníaco**
Instalación	2500	4000	2500	15000
Reparación	3300	0	0	1000
Reactivos	10000	500	500	5000
Valor residual	526	3016	4289	1116
Total	10038	4355	5068	6157
VPN	26832	11641	13546	16458
Condición 2				
Instalación	35000	4000	2500	15000
Reparación	3400	0	0	1000
Reactivos	12500	500	750	4000
Valor residual	2631	15079	21447	5580
Total	12123	15940	22051	9432
VPN	51067	67144	94784	39731
Condición 3				
Instalación	50000	-	7500	15000
Reparación	3500		0	1000
Reactivos	15000		1000	3000
Valor residual	13158		107237	27904
Total	25867		108840	31931
VPN	108963		458474	134510
Condición 4				
Instalación	80000	-	7500	15000
Reparación	4000		0	1000
Reactivos	20000		1000	2500
Valor residual	52634		428948	111614
Total	67351		429892	114461
VPN	495712		3164040	842454

\* Carbonato de sodio \*\* Anhidro de amoníaco

Cuadro 6.12 Costos del tratamiento químico de aguas ácidas (basado en *Agriculture & Natural Resources Development de West Virginia University, 2001*)

Técnica	Northern West Virginia	Southern West Virginia		Clay County
	€/l	€/l	€/año	€/año
Amoníaco	0,00037	-	-	2328
CaO	0,00014	0,00003	14000	1534
NaOH	-	0,00018	87000	5369

### 6.2. Procedimiento del plan de protección y costo ambiental

La estimación del costo ambiental y, en particular, en el ambiente subterráneo (a nivel de detalle), requiere de la comprensión en relación a la aplicación de normas legales y conceptos relacionados con la ingeniería de costos, aplicables a un plan de protección ambiental.

La fig. 6.1 muestra las fases, documentos clave, los puntos de decisión y las acciones que se deben realizar en un plan de protección ambiental.

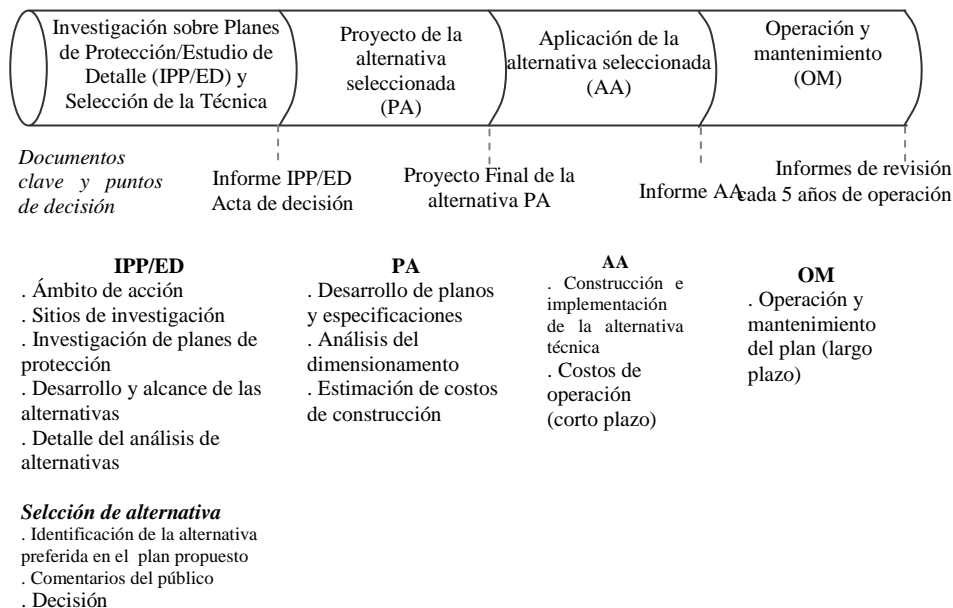


Figura 6.1 Fases, acciones y documentos clave de decisión, en un plan de protección ambiental (EPA 540-R-00-002 -OSWER 9355.0-75, 2000)

La *investigación sobre los procesos de protección (IPP)* y el *estudio de detalle (ED)* son utilizados en la recolección de la información necesaria para la selección de un plan de protección ambiental que se encuentre dentro de las exigencias de los estándares y leyes vigentes.

El IPP incluye el muestreo y análisis para caracterizar la naturaleza y extensión de la contaminación, la evaluación de riesgos futuros, actuales y potenciales en relación a la salud humana y al ambiente; la evaluación de la eficacia de las tecnologías de tratamiento o de recuperación para reducir la toxicidad, la

movilidad o el volumen de sustancias peligrosas o contaminantes (EPA E.U.A, 40 CFR Part 300).

El *estudio de detalle* (ED) consiste de dos fases principales: a) Desarrollo y selección de alternativas de medidas correctivas; b) Comparación de cada alternativa, que consiste en un análisis detallado para seleccionar la más viable. Una gama de alternativas de acciones correctivas se realiza durante el ED, con los datos disponibles de la caracterización del sitio en IPP, ayudando a reducir las incertidumbres relacionadas con los costos y el desempeño de las alternativas de tratamiento (Role Cost, EPA E.U.A, 1996).

Durante la selección del plan de protección ambiental, se debe identificar la alternativa seleccionada, a ser presentada en la propuesta de plan para el conocimiento de la opinión pública.

Mapas, especificaciones y otros documentos del plan de tratamiento, deben ser llevados a cabo en el plan detallado de la medida correctiva (PA), para la acción o ejecución de la medida correctiva (AA) y para la operación y mantenimiento del plan (OM).

### 6.3. Costos de protección ambiental

La Asociación para el Avance de la Ingeniería de Costos (Associação para o Avanço da Engenharia do Custo AACE), que tiene carácter internacional, define un estimado de costos como la evaluación de todos los costos de los componentes de un proyecto (AACE, 1990).

La variación ( $\Delta$ ) de los costos de protección ambiental de un proyecto está influenciada por los diversos factores que intervienen en la definición del proyecto (figura 6.2).

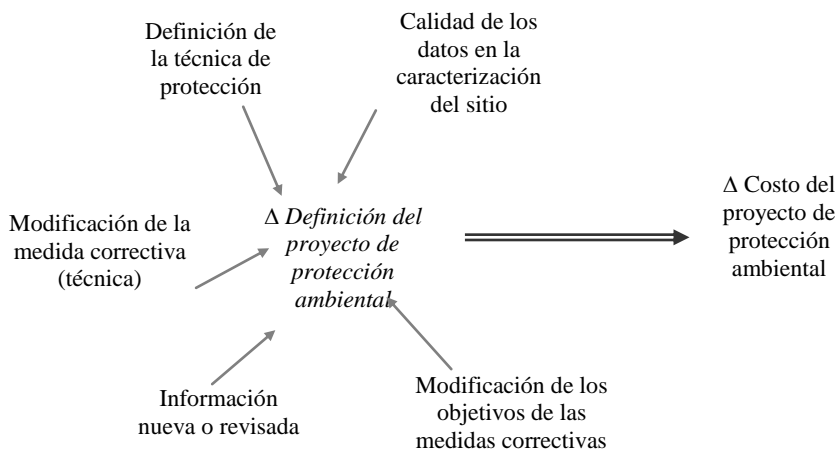


Figura 6.2 Relación entre la definición de un proyecto y la estimación de costos de protección ambiental

Para la estimación del costo de protección ambiental se deben considerar los siguientes costos: costo de capital, costo anual de operación y mantenimiento, costos periódicos (figura 6.3) y finalmente, realizar el análisis del Valor Actual.

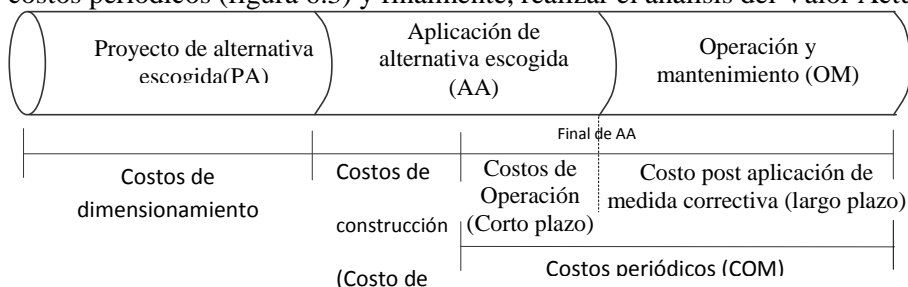


Figura 6.3 Costos durante las fases de protección ambiental

Los costos de capital incluyen el trabajo, equipos, materiales, trabajo de los contratistas, gastos generales asociados con actividades tales como: movilización/desmovilización, monitoreo, trabajos en sitio, instalación de equipos de extracción de contaminantes o de los sistemas de tratamiento o eliminación, costos de los servicios profesionales/técnicos que son necesarios para la construcción de la medida correctiva (Cuadro 6.13).

### 6.3.2 Costos anuales de operación y mantenimiento (COM)

Son los costos de post-construcción necesarios para asegurar o verificar la continua eficacia de la medida correctiva. Estos costos son estimados en la mayoría de los casos con base anual e incluyen: todos los trabajos; equipos y costos de materiales; trabajo de contratistas; gastos generales; costos asociados con actividades tales como: monitoreo, extracción o sistemas de tratamiento o su eliminación. Los costos anuales de COM incluyen también los gastos para los servicios de profesionales/técnicos necesarios (Cuadro 6.14).

### 6.3.3 Los costos periódicos (CP)

Son aquellos que ocurren periódicamente o en pocos años (por ejemplo cada cinco años, reposición de equipos) o gastos que ocurren solo durante la operación y mantenimiento o reparaciones (Cuadro 6.15). Estos costos se pueden considerar dentro de CC, pero debido a su naturaleza periódica es más práctico considerarlos por separado.

### 6.3.4 Costos indirectos (CI)

Son los costos que no participan directamente en la construcción, operación y mantenimiento de la medida o alternativa de protección ambiental y están relacionados fundamentalmente con los aspectos de gestión y actividades de apoyo.

Los elementos de los diferentes gastos de protección ambiental están referidos en los Cuadros 6.14 y 6.15 antes señalados, para mayor información se recomienda la consulta en <http://www.frtr.gov/cost/ec2/wbs1.html>,

<http://www.frtr.gov/cost/ec2/wbs2.html>, <http://www.em.doe.gov/aceteam/eces.html>, entre otros.

Cuadro 6.13 Elementos del costo de capital CC y descripción de actividades

Elementos del costo	Descripción
1. Equipos primarios y auxiliares	Adquisición de equipos primarios y secundarios. Materiales necesarios
2. Movilización y desmovilización . Equipos de construcción . Implementación . Facilidades temporales . Manuales de operación, etc.	Transporte de equipos y de personal al sitio (movilización) o remoción (desmovilización) para construir o instalar una acción correctiva. Incluye la preparación de construcción, de las instalaciones y servicios públicos provisionales
3. Monitoreo, toma de muestras, ensayos y análisis	Pruebas, análisis <i>in situ</i> o fuera del sitio, tratamiento de datos, y garantía de control de calidad. Incluye el monitoreo para evaluar los aspectos legales
4. Local de trabajo . Demolición, movimiento de tierra . Accesos . Servicios y facilidades, etc.	Actividades para construir la infraestructura necesaria para el proyecto (es decir, la preparación del sitio). Incluye también las mejoras y la restauración permanente de las áreas. El trabajo generalmente de limpieza de modo que no exista ningún contacto con medios o materiales contaminados. Excluye todo lo relacionado con el trabajo de construcción o de instalación de alguna facilidad en el sitio
5. Recolección de agua superficial . Bombeo, drenaje . Zanjas, canales . Tanques, estanques, represas	Recolección del agua superficial contaminada. Excluye el transporte y tratamiento fuera del sitio, o el tratamiento o eliminación del agua superficial contaminada
6. Extracción y/o recolección de aguas subterráneas . Bombeo, drenaje . Canales, tuberías y tanques, etc.	Extracción o contención del agua subterránea contaminada. Excluye el transporte o tratamiento fuera del sitio
7. Recolección de polvos y gases provenientes de las operaciones, roca e equipos	Recolección de polvo de rocas y emisiones diesel, gases tóxicos, explosivos o inflamables, de rocas y de emisiones diesel. Gas de detonaciones o disparos en los tajeos
9. Excavación de suelos . Excavación y remoción . Disposición, etc.	Excavación y remoción de suelo contaminado. Excluye el tratamiento o transporte fuera del sitio
10. Remoción de sedimentos y lodo . Excavación, remoción . Disposición, etc.	Remoción o contención de sedimentos o lodos contaminados. Excluye transporte y tratamiento fuera del sitio
11. Demolición y remoción . Tambores, tuberías, tanque, etc.	Demolición y remoción de materiales o estructuras contaminadas o peligrosas. Excluye el tratamiento o transporte fuera del sitio
12. Personal profesional y técnico . Gestión del proyecto . Proyecto de la medida correctiva . Gestión de la construcción, etc.	Servicios para soporte legal, de la opinión pública, etc. para la construcción/instalación de la acción correctiva. Servicios para proyectar una acción correctiva, incluye la recolección de los datos. Servicios para controlar la construcción/instalación de la acción correctiva
13. Control institucional, etc.	Administrativo y legal, mediciones para reducir o minimizar el potencial riesgo de exposición a la contaminación del sitio

Cuadro 6.14 Elementos del costo anual de operación y mantenimiento (COM) y descripción de actividades

Elementos del costo	Descripción
1. Monitoreo, toma de muestras, ensayos y análisis	Monitoreo, toma de muestras, análisis <i>in situ</i> o en laboratorio, procesamiento de datos y control de calidad durante el período de la operación y mantenimiento. Puede incluir el monitoreo para evaluar el desempeño de la medida correctiva, en concordancia con los reglamentos
2 Eliminación, contención o sistema de tratamiento	La operación y mantenimiento de los sistemas de extracción y el mantenimiento de los sistemas de extracción en sitio, contención o tratamiento (contaminación del aire, agua subterránea, agua superficial, inestabilidad del macizo rocoso)
3. Eliminación o tratamiento fuera del sitio	Tratamiento y/o eliminación de los dos desechos generados durante la operación y mantenimiento
4. Contingencia	Los costos para cubrir aspectos desconocidos, circunstancias inesperadas, o circunstancias no previstas asociadas con la operación y mantenimiento de la acción correctiva
5. Personal profesional y técnico . Gestión del proyecto . Soporte técnico	Servicios de personal para controlar las actividades de la operación y mantenimiento. Servicios de monitoreo, evaluación e informes sobre el progreso de la acción correctiva
6. Control institucional	Actualización o mantenimiento anual para reducir o minimizar la exposición potencial a la contaminación del sitio o de los peligros

Cuadro 6.15 Elementos del costo periódico durante la operación y mantenimiento

Elementos del costo	Descripción
1. Falla en el sistema y/o instalación y su restitución	Actividades de construcción para sustituir la instalación o algunos componentes clave
2. Desmovilización del sitio, eliminación, contención o sistema de tratamiento	Actividades para el desmontaje o examen, extracción, contención e instalaciones de tratamiento
3. Contingencia	Costos para cubrir circunstancias y actividades imprevistas relacionadas con la operación y mantenimiento
4. Personal profesional y técnico . Revisión durante 5 años . Estudios de eficiencia	Servicios para preparar informes de revisión durante 5 años (si los niveles de contaminación superan los límites permitidos). Servicios para analizar y optimizar la protección ambiental

Temas relacionados con el análisis de los elementos de los tipos de costos de protección ambiental también pueden ser consultados en los siguientes websites: <http://www.frtr.gov/cost/ec2/index.html>, <http://www.frtr.gov/cost>, <http://www.hnd.usace.army.mil/traces>, <http://www.talpart.com/products/racer/index.html>, <http://www.epa.gov/superfund/programs/nrrb>.

### 6.3.5. Pasos para la estimación de los costos de protección ambiental

Los pasos recomendados para la estimación del costo ambiental subterráneo están indicados en el esquema de la figura 6.4.

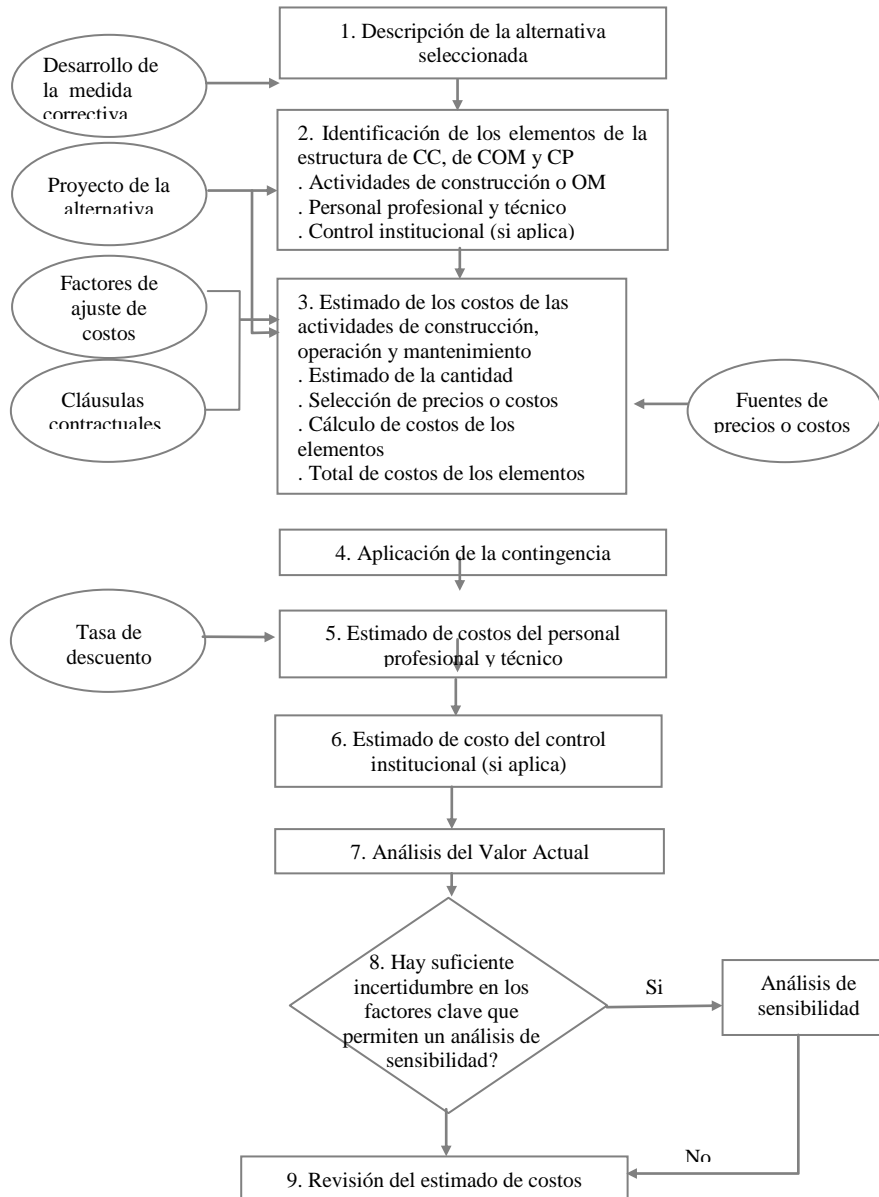


Figura 6.4 Pasos para la estimación de los costos de una alternativa de medida correctiva

Estos pasos son: descripción de la alternativa de la medida correctiva; identificación de la estructura de costos de capital; costo anual de operación y mantenimiento y costos periódicos; estimado de costos de las actividades de construcción, operación y mantenimiento; aplicación de la contingencia; estimado de costos del personal profesional y técnico; estimado del costo institucional (si

aplica); análisis del valor actual; análisis de sensibilidad (si aplica); y revisión del estimado de costos.

Para estimar el Costo de Protección Ambiental CPA (€/año) se recomienda la ecuación general (6.1), que incluye todos los elementos que comprenden cada tipo de costo (costos de capital (CC), costos de operación y mantenimiento (COM), costos periódicos (CP) y costos indirectos (CI)), incluidos los relacionados con el personal profesional y técnico.

$$CPA = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot c_i}{V_u} + \sum_{i=1}^n A_i \cdot a_i + \sum_{i=1}^n P_i \cdot p_i + \sum_{i=1}^n G_i \cdot g_i \quad (6.1)$$

Donde,  $C_i$  es la cantidad de elementos de los costos de capital como son los equipos, instrumentos (unidades), etc,  $c_i$  es el costo unitario de adquisición de los equipos o instrumentos (€),  $V_u$  es la vida útil de los equipos o de los instrumentos (años),  $A_i$  es la cantidad de elementos de los costos de operación y mantenimiento (unidades/año),  $a_i$  es el costo unitario del elemento de los costos de operación y mantenimiento (€),  $P_i$  es la cantidad de elementos de los costos periódicos (unidades/año),  $p_i$  es el costo unitario del elemento de los costos periódicos (€),  $G_i$  es la cantidad de elementos de los costos indirectos (unidades/año) y  $g_i$  es el costo unitario de los elementos del costo indirecto (€).

El detalle de estos costos debe ser elaborado con la cantidad estimada, selección de precios o costos, cálculo de costos totales de los elementos y el costo total general (modelo en el Cuadro 6.16).

Cuadro 6.16 Modelo para el estimado de costos ambientales (basado en EPA 540-R-00-002 -OSWER 9355.0-75, 2000)

Alternativa:..... Costos de capital (CC) o					
Nombre:..... Costos de operación y mantenimiento (COM) o					
Costos periódicos (CP)					
Costos indirectos (CI)					
Sitio:.....			Descripción:.....		
Fase:.....			.....		
Año base:.....			.....		
Fecha:.....			.....		
No.	Elemento	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Total
1					
2					
.					
n					
Total general					

### 6.4 Análisis del valor actual

Las medidas correctivas de protección ambiental suelen incluir los costos de construcción (costos de capital, CC), que se producen al inicio del proyecto y los costos en los años posteriores relativos a la implementación y mantenimiento de la alternativa, después de la construcción inicial (COM+CO+CI).

El análisis del valor actual es un método para evaluar los gastos de capital o de operación y mantenimiento, que ocurren en diferentes períodos de tiempo



(Cuadro 6.17). Esta metodología permite comparar el costo de diferentes alternativas de las medidas correctivas con base en un solo número (costo) para cada alternativa. Este simple valor, denominado como valor actual, es la cantidad monetaria requerida, en relación al año base, para satisfacer gastos futuros por una cierta cantidad de años.

El análisis del *valor actual* de una alternativa de medida correctiva implica cuatro etapas básicas: 1. Definición del período de análisis; 2. Cálculo de los flujos de fondos (pagos) para cada año del proyecto; 3. Selección de una tasa de descuento para ser usada en el cálculo del valor actual; y 4. Cálculo del valor actual.

*Definición del período de análisis:* en general el período de análisis es equivalente a la duración del proyecto o vida útil de la medida de protección ambiental. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los E.U.A recomienda un período de 30 años, aunque puede ser menor o mayor. Por ejemplo, la contaminación por la radioactividad requiere un tiempo aproximado de 1000 años (USEPA, 2000).

Cuadro 6.17 Modelo para el estimado del Valor Actual  
(basado en EPA 540-R-00-002 -OSWER 9355.0-75, 2000)

Alternativa:..... Análisis del Valor Actual						
Nombre:.....						
Sitio:.....			Descripción:.....			
Fase:.....			.....			
Año base:.....			.....			
Fecha:.....			.....			
Años	Costo de capital	Costo anual de operación y mantenimiento	Costos periódicos	Costo total	Tasa de descuento	Valor Actual
1						
2						
.						
.						
.						
n						

*Cálculo de los flujos de fondos anual:* esta etapa consiste en agregar a las salidas de capital y OM para cada año del proyecto (es decir, los flujos de fondos anuales). Estos incluyen los costos significativos para construir la alternativa de la medida correctiva, los costos anuales de operación y mantenimiento y los costos periódicos. La mayoría de los análisis comienzan con una suposición simplificada en el sentido de que la duración de la construcción inicial es inferior a un año (el trabajo de construcción ocurre en el año 0 del proyecto). Este supuesto año 0 puede ser modificado si los anteproyectos se desarrollan y se conoce que el costo de capital de la construcción supera el año. En el análisis se utiliza el valor constante de la moneda (inflación cero).

*Selección de la tasa de descuento:* esta tasa refleja la productividad del capital y es equivalente a la tasa de intereses. Por ejemplo en los E.U.A la tasa de descuento es de 7% (USEPA, 1993, 1994, <http://www.epa.gov/superfund/>, <http://www.whitehouse.gov/OMB/circulars/a094/a094.html>). La misma tasa de

descuento deber ser utilizada para todas las alternativas de medidas correctivas, incluso si el período de análisis varía.

*Cálculo del Valor Actual (VP)*, es calculado mediante la ecuación (6.2) en función del valor del capital en el año t,  $X_t$  (t = 0 para el año base) y la tasa de descuento  $i$  (en forma decimal).

$$PV = \frac{X_t}{[1 + i]^t} \tag{6.2}$$

Para la serie de pagos futuros, el Valor Actual Total,  $VPT$ , del año 1 hasta el año  $n$  se calcula mediante la ecuación (6.3).

$$VPT = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{X_t}{[1 + i]^t} \tag{6.3}$$

### 6.5 Análisis de sensibilidad

En el desarrollo del estimado de costo de la alternativa de la medida correctiva, se debe considerar un análisis de sensibilidad (Cuadro 6.18) para aquellos factores que tienen un nivel relativamente elevado de incertidumbre y que, con algún pequeño cambio en su valor, podría afectar significativamente el costo total de la alternativa. Este tipo de análisis se considera independiente del crecimiento de los costos o riesgos en relación con el análisis de costos, aplicado para determinar el valor de la contingencia en el cálculo del costo.

Cuadro 6.18 Modelo para análisis de sensibilidad de costos ambientales (basado en EPA 540-R-00-002 -OSWER 9355.0-75, 2000)

Alternativa:..... Análisis de Sensibilidad					
Nombre:.....					
Sitio:.....	Descripción.....				
Fase:.....	.....				
Año base:.....	.....				
Fecha:.....	.....				
Año	Costo de Valor Actual (por factor de evaluación)				
	1	2	3	4	5
Factor de evaluación:					
1:.....					
2:.....					
3:.....etc.					

Los factores a considerar para el análisis de sensibilidad de una alternativa correctiva incluyen:

*Naturaleza y extensión de la contaminación*, estimación del volumen medio de material y grado de contaminación, que dependen de las condiciones locales.

*El fracaso de la alternativa/vida útil de la tecnología*, dado a que el fracaso potencial de una medida correctiva o de sus componentes requeriría de importantes costos adicionales.

*Duración del proyecto*, es el tiempo requerido para que una acción correctiva o sus componentes logre los objetivos de la medida, pudiendo ser un factor importante, especialmente para aquellas acciones que requieren muchos años de operación y mantenimiento.

*Tasa de descuento*, aunque se debe considerar una tasa del 7%, un rango de valores por debajo del 7% (o por arriba) se puede utilizar para investigar la incertidumbre de las circunstancias económicas futuras.

Un análisis de sensibilidad puede variar los valores para este factor (bajo, medio, alto), para mantener los valores de otros factores y observar el impacto sobre el costo total estimado.

Las ventajas del análisis de sensibilidad son: ayuda a identificar los *factores críticos*, donde los recursos adicionales tengan que ser dedicados a la recolección de datos. Porque potenciales respuestas a distintas situaciones no requieren el uso de las probabilidades, como otros métodos, tales como el análisis de Monte Carlo.

Los resultados del análisis de sensibilidad se deben presentar en términos de *Valor Actual Total* para cada escenario, incluyendo la estimación original, a efectos comparativos.

## 6.6 Relación costo/beneficio en la gestión ambiental

Para el cálculo de costo y beneficio de un proyecto de explotación del espacio subterráneo basado en un análisis de costos ambientales, se propone la ecuación (6.4), que se representa por el valor actual  $VP$  calculado en función del valor de los beneficios de la protección ambiental  $BPA_t$  en el año  $t$ , el costo de la protección ambiental en el año  $t$   $CPA_t$ , la tasa de descuento  $i$  (interés) y  $t = 1, \dots, T$  para cualquier año.

$$VP = \sum_{t=1}^T \frac{(BPA_t - CPA_t)}{(1+i)^t} \quad (6.4)$$

El cálculo del beneficio ambiental está relacionado con los beneficios económicos generados por la conservación de la buena calidad del aire subterráneo (mayor rendimiento del hombre, menor gasto posible por enfermedades y pérdidas de vidas), con el control y protección del agua subterránea (evitar gastos provocados por inundaciones y contaminación con aguas ácidas) y con la prevención y control de la inestabilidad y derrumbe de rocas (prevenir gastos debidos a posibles accidentes, pérdida de vidas, etc).

Un concepto interesante es el denominado *eficiencia*, que une dos tipos de eficiencia: la eficiencia económica y la eficiencia ambiental. La *eficiencia económica* considera los beneficios económicos conseguidos por unidad de costo económico. La *eficiencia ecológica*, relaciona los beneficios ambientales a los costos ambientales y están frecuentemente relacionados con evaluaciones del impacto ambiental.

La eficiencia es un concepto fundamental de la productividad, que se mide con los logros obtenidos en relación con los gastos efectuados. La *ecoeficiencia* evolucionó del concepto convencional del análisis beneficio/costo, que es familiar para los economistas.

El objetivo de la *ecoeficiencia* es maximizar los beneficios ambientales y económicos y simultáneamente minimizar estos costos.

La ecuación de la *ecoeficiencia* EE (6.5) relaciona el beneficio de la protección ambiental (BPA) con los costos de protección ambiental (CPA). La mayoría de los modelos incluyen herramientas cuantitativas y cualitativas (*International Council on Metals and the Environment*, 2001).

$$EE = \frac{BPA}{CPA} \tag{6.5}$$

Para el análisis de beneficios y costos ambientales de un proyecto también se puede utilizar la ecuación (6.6), expresada en valor actual VP (Jenkins and Harberger, 1990). Este procedimiento es más usual y recomendable.

$$PV = \sum_{t=1}^T \frac{(B_t - C_t - CPA_t + BPA_t)}{(1+i)^t}, \tag{6.6}$$

Donde,  $B_t$  es el valor de beneficios del proyecto en el año  $t$ ,  $C_t$  es el valor de los costos del proyecto en el año  $t$ ,  $CPA_t$  es el valor del costo de protección ambiental en el año  $T$ ,  $BPA_t$  los beneficios de la protección ambiental en el año  $t$ ,  $i$  es la tasa de descuento (interés) y  $t = 1, \dots, T$  para cualquier año.

Una ecuación general (6.7) para el estimado de beneficios y costos de cualquier proyecto es la propuesta por Martinez J.G. e S. Bauer (2001).

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{\sum_{n=1}^N a_n (B_{nt} - C_{nt}) \pm \sum_{e=1}^q f_e E_{et}}{(1+i)^t}, \tag{6.7}$$

Donde,  $NPV$  es el saldo del valor actual,  $a_i$  es el factor relacionado con los beneficios o costos de cualquier ingreso del grupo  $n$ , de conformidad con su significado social (valor distribuido),  $f_e$  es el valor de cualquier impacto ambiental  $e$  (carga ambiental),  $B_{nt}$  es el valor de los beneficios del proyecto de todos los ingresos del grupo  $n$  en el año  $t$ ,  $C_{nt}$  es el valor de los costos del proyecto de todos los ingresos del grupo  $n$  en el año  $t$ ,  $E_{et}$  es el valor de cualquier beneficio ambiental (efectos positivos o negativos) en el año  $t$ ,  $i$  es la tasa de descuento (interés),  $n = 1, \dots, N$  para grupos de ingresos,  $t = 1, \dots, T$  para cualquier año,  $e = 1, \dots, q$  para cualquier efecto ambiental.

Otro concepto de la economía ambiental se relaciona con el nivel óptimo de degradación ambiental (Kula, E., 1992).

En la figura 6.5 (izquierda) en el punto  $o$  el costo marginal es cero (0) y en el  $B$  el beneficio marginal corresponde a cero (0). El beneficio está situado en  $OAB$ , los costos en  $ODB$  y los beneficios totales de la sociedad (comunidad) están en

$OAD'B'$  (máximo beneficio de la actividad industrial) que resulta de  $OAB$  menos  $ODB$ , siendo  $OCB$  común a las dos áreas que resultan de la resta  $CDB$  (igual a  $CB'D'$ ) de  $OAC$ .

Cuando se reduce la escala de la actividad de B a E, los beneficios de la sociedad aumentan rápidamente (Beneficios =  $OACE$ , Costos =  $OCE$  y beneficios totales =  $OAC$ ).

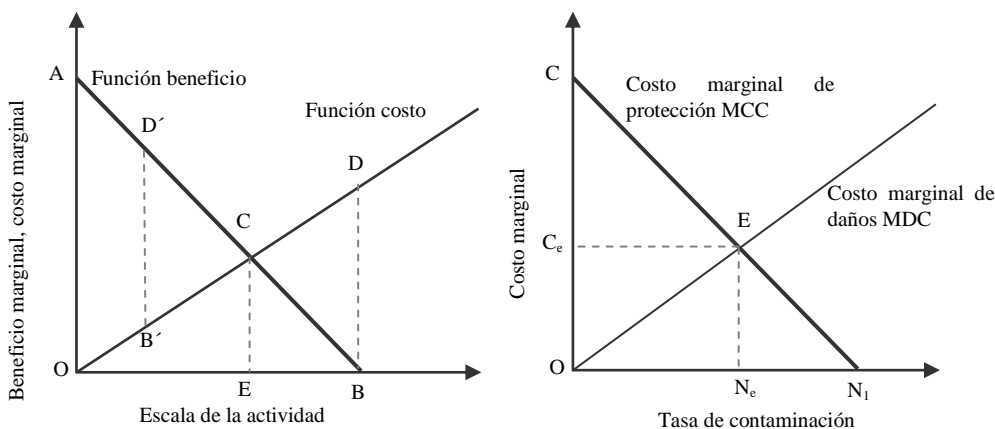


Figura 6.5 Nivel óptimo de degradación ambiental (Kula, E., 1992)

$OAC$  es mejor que  $OAD'B'$  e  $B'D'C$ ; esta es la ventaja social en relación con la escala de la actividad industrial y, cuando esta se sitúa en  $E$  constituye el nivel óptimo de degradación ambiental, correspondiendo al punto  $C$  (punto de equilibrio).

Existen varios métodos para la obtención del nivel óptimo de contaminación ambiental (solución de la negociación, de derecho consuetudinario y del impuesto a la contaminación). La figura 6.5 (derecha) muestra el método del impuesto a la contaminación (*impuestos pigouvianos*), que utiliza el costo marginal de los daños ambientales  $MDC$  (*marginal damage cost*). Es definido, en términos generales, como una carga social, que es similar a la figura 6.5 (izquierda) y al control del costo marginal  $MCC$  (*marginal control cost*) que corresponde al costo atribuido al sistema de protección ambiental. El  $MCC$  es cero cuando el nivel de contaminación está en el punto  $N_1$  donde no se necesita ningún proceso correctivo de control ambiental.

En el caso que un gobierno establece un impuesto de contaminación ambiental, la consecución de este objetivo corresponde a un costo ambiental de protección ambiental. Cuando el nivel de emisiones se reduce de  $ON_1$  a  $ON_e$  la contaminación disminuida corresponde a  $N_1N_e$  existiendo una contaminación remanente  $ON_e$ . En este caso  $N_e$  corresponde al nivel de impacto ambiental óptimo que corresponde a un costo  $C_e$ , donde existe un punto de equilibrio  $E$  (nivel óptimo de contaminación ambiental) que es definido por la intersección entre el  $MDC$  y el  $MCC$ .



# **TERCERA PARTE**

## **APLICACIÓN A MINAS PORTUGUESAS Y PERUANAS**

---





## Capítulo 7

### APLICACIÓN EN LA MINA NEVES CORVO

---

#### 7.1 Introducción

La aplicación de la metodología de la Ingeniería Ambiental Subterránea (IAS), propuesta en el capítulo 2 de la primera parte (sección 2.5 y fig. 2.14) está desarrollada en la segunda parte de este libro, así como la mina Neves Corvo en lo relativo a la contaminación de la atmósfera subterránea e inestabilidad y desprendimiento de rocas.

En relación a la aplicación del aspecto térmico se utiliza la metodología y modelos matemáticos desarrollados en el capítulo 3.1 y Fig. 3.25 el aspecto dinámico (velocidad y caudal), se utiliza los desarrollados en el ítem 3.4 y la fig. 3.47 y en el dominio ambiental de la roca, los desarrollados en el capítulo 5 y fig. 5.20.

La aplicación de la IAS en la atmósfera subterránea incide sobre la contaminación ambiental ocasionada por la alteración térmica y aerodinámica del aire que circula en las aberturas subterráneas de las áreas de Corvo, Neves y Graça, localizadas a más de 650 m de profundidad, donde en algunas zonas el aire sufre un calentamiento que origina impacto ambiental térmico y en otras existe un caudal de área insuficiente que ocasiona un impacto ambiental dinámico y volumétrico.

La aplicación en el medio rocoso trata del riesgo ambiental ocasionado por la alteración de las condiciones naturales del macizo rocoso al construir la rampa CRAM03 y el tajeo de Neves Norte.

El impacto ambiental térmico del medio subterráneo se evalúa considerando como indicador fundamental la temperatura del aire, el impacto ambiental dinámico se basa en la velocidad del aire, el impacto volumétrico tiene como base el caudal del aire y el impacto ambiental geotécnico los parámetros geoambientales.

La aplicación de la IAS desarrollada está orientada a la protección y gestión de la calidad ambiental subterránea, mediante un proceso sistemático:

- Definición del ámbito de acción del ambiente subterráneo.
- Caracterización de la atmósfera subterránea en el aspecto térmico, dinámico, volumétrico y geotécnico.
- Identificación del nivel de impacto ambiental térmico, dinámico, volumétrico y geotécnico.
- Búsqueda y aplicación de medidas correctivas.
- Monitoreo y control.

#### 7.2 Definición del ámbito de acción

##### 7.2.1. Localización geográfica y clima

La mina de Neves Corvo, en la época de la realización del estudio pertenecía a la Sociedad Minera de Neves Corvo S.A (Somincor) con la participación de la EDM (51%) y de Río Tinto pls (49%), está ubicada en el Bajo

Alentejo, al oeste de la llamada faja piritosa ibérica, a 230 km al sureste de Lisboa y cerca de las aldeas de Castro Verde y Almodóvar. La altitud es aproximadamente de 200 metros (fig. 7.1).

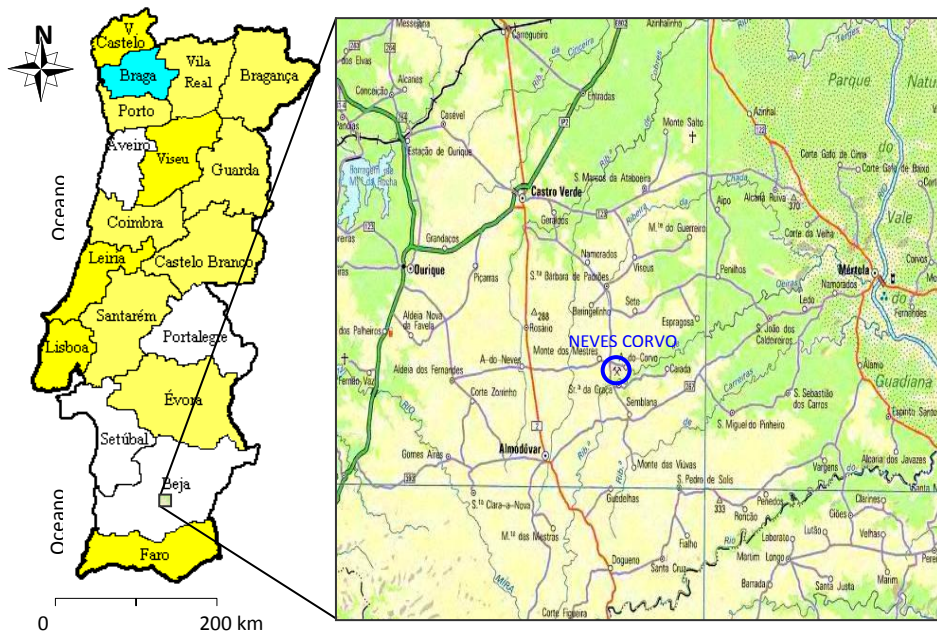


Figura 7.1 Localización geográfica de la mina Neves Corvo

A lo largo del año, en el ambiente exterior de la mina de Neves Corvo (Cuadro 7.1 y fig. 7.2), se registra una temperatura mínima media de 8,95°C en enero y una temperatura máxima media de 24,43°C, en julio, con una humedad relativa media de 72,18% y 52,00% respectivamente.

Cuadro 7.1 Temperatura del ambiente exterior registrado próximo de las entradas y salidas de aire del ambiente subterráneo (basado en los registros de la estación meteorológica de Somincor 1999)

Meses	T máx (°C)	T min (°C)	T med (°C)	Hr (%)
Enero	15,17	2,73	8,95	72,18
Febrero	16,26	2,15	9,21	64,70
Marzo	16,28	6,33	11,29	68,52
Abril	18,63	7,60	13,11	58,50
Mayo	22,73	10,59	16,66	59,63
Junio	25,11	11,97	18,54	50,32
Julio	31,91	16,94	24,43	52,00
Agosto	32,92	15,20	24,06	54,98
Septiembre	28,48	14,34	21,41	61,95
Octubre	23,64	12,07	17,85	69,89
Noviembre	17,78	4,52	11,15	71,17
Diciembre	15,32	6,09	10,71	80,97

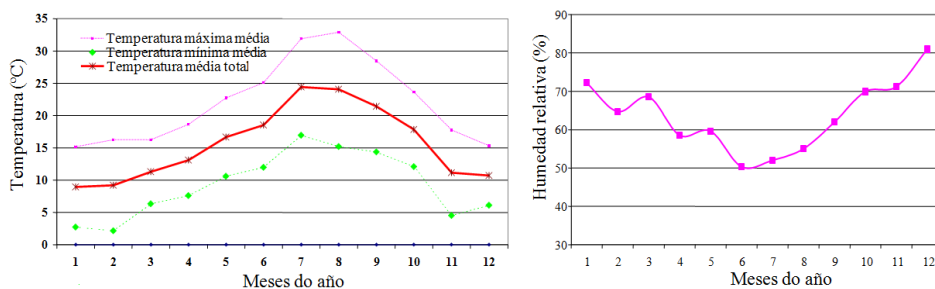


Figura 7.2 Variación de la temperatura y humedad relativa en el exterior, próximo de las entradas y salidas del ambiente subterráneo

### 7.2.2. Formaciones rocosas y yacimiento mineral

Las aberturas subterráneas realizadas para la explotación de los yacimientos de Corvo, Graça y Neves, están situadas en una sucesión de formaciones que se extienden desde el Devónico Superior hasta el Carbonífero y, en sentido ascendente se diferencian tres unidades geológicas principales (Carvalho P., 1986), fig. 7.3.

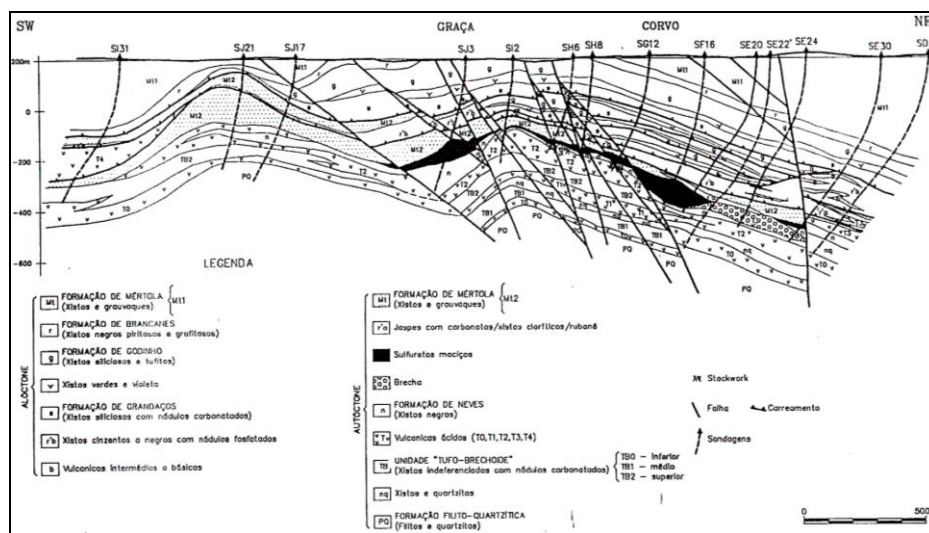


Figura 7.3 Corte Geológico Graça Corvo (Carvalho, P., 1986)

*Grupo filito cuarztítico (PQ)*, constituido por esquistos oscuros y negros que en la parte superior contiene un nivel continuo de cuarcitas y limolitas.

*Complejo vulcano – sedimentario (CVS)*, concordante sobre el anterior, con una característica esencialmente volcánica ácida, constituido por episodios volcánicos de composición riolítica y hialoclástica separados por formaciones sedimentarias. El tope se compone de esquistos negros arcillosos y carbonosos con capas milimétricas sílticas. Estos esquistos constituyen la pared de la mineralización.

*Grupo Flysch*, constituido por una alternancia de esquistos y gravas, subsidencia a gran escala, secuencia de esquistos negros y oscuros, capa de complejo volcánico, alternancia de capas de esquistos negros y esquistos silicosos y lenticulas carbonatadas; finalizando nuevamente con gravas y esquistos negros arcillosos. En el área de Neves Corvo el espesor de esta unidad sobrepasa los 700 metros.

Es importante caracterizar la litología del macizo rocoso, dado que interactúa con la atmósfera y el agua subterránea a través de su propiedad térmica, de su composición litológica en los polvos suspendidos en el aire, en la formación de aguas ácidas y en el acondicionamiento de las características físicas de la superficie de la excavación subterránea (rugosidad).

Los depósitos minerales de Neves Corvo comprenden cinco cuerpos localizados en el flanco del anticlinal Rosario – Neves Corvo, tres de los cuales están en actual explotación, que son Corvo, Graça y Neves. Los otros dos yacimientos que todavía no están en explotación son Zambujal y Lombador.

La mineralización está constituida por sulfuros, resultado de la precipitación de fluidos hidrotermales, en cuencas submarinas, estructuralmente controladas. Los minerales son sulfuros masivos de cobre, plomo, cinc y estaño principalmente, cuyas características generales y reservas del yacimiento de Neves Corvo se presentan en el Cuadro 7.2.

Cuadro 7.2 Características generales y reservas del yacimiento de Neves Corvo (Departamento de geología Somincor, 2000).

Yacimiento	Características	Pirita (aprox.)*	Reservas			
			Kt	Cu (%)	Zn (%)	Sn (%)
Graça	Inclinación 70° S y 10° en la parte superior dimensiones de 700x500 m, potencia máxima 80 m y profundidad de 230 a 450 m	70%	3457	2,73	6,04	0,17
Corvo	Inclinación de 20° -35° NE-SW, dimensión de 600x1100 m, potencia máxima de 92 m y profundidad de 230 a 800 m	60%	20473	5,20	3,07	0,30
Neves	Inclinación de 20°-25° NE, dimensión de 1200x700 m, potencia máxima de 55 m y profundidad de 340-450 m	30%	28721	1,79	4,17	0,17
Zambujal	Inclinación de 0°-20° N, dimensión de 550x600 m, potencia máxima de 53 m y profundidad de 300-450 m	60%	32347	1,42	4,07	0,07
Lombador	Inclinación de 20°-40° N, dimensión de 600x1350 m, potencia máxima de 100 m	85%				

\*Richard y Sides (1991)

\*\* Richard y Ferreira. Somincor, (diciembre de 1998), informe semestral.

### 7.2.3 Aberturas subterráneas

#### 7.2.3.1 Infra-estructuras

Las aberturas subterráneas excavadas para la explotación de los yacimientos de Graça, Corvo y Neves, se ubican entre las altitudes de +200 metros hasta un máximo de -450 metros, y están referidas a un nivel (*level mine datum*) equivalente a la cota 0,0 metros que se denomina nivel 1000. El total alcanza cerca de 80 kilómetros entre verticales, inclinadas y horizontales.

A nivel general, el ambiente subterráneo relacionado con la infra-estructura se presenta en la fig. 7.4 cuyas características se resumen en los siguientes párrafos:

*Pozo Santa Bárbara*, utilizado fundamentalmente para la extracción del mineral, tiene 5 m de diámetro, 592 m de profundidad desde la boca, cota 1210m.

*Rampa de Castro*, es el acceso principal del personal y equipos a todos los yacimientos, ya que a diferentes niveles de esta rampa, tienen origen otra dos (rampa de Neves y rampa de Graça) que acceden a los yacimientos del mismo nombre. La rampa de Castro tiene sección media de 17 m<sup>2</sup>, longitud de 3500 m, pendiente de 10 % a 12 %, lo que posibilita alcanzar hasta el nivel de transporte de 550 descendiendo un total de 660 m de profundidad.

*Chimeneas para el flujo del mineral y ventilación*, las chimeneas de mineral comunican con los tajeos de explotación y con los niveles de descarga, sirviendo las chimeneas de ventilación para la circulación del aire fresco y contaminado, teniendo algunas comunicaciones con el exterior (Cuadro 7.3).

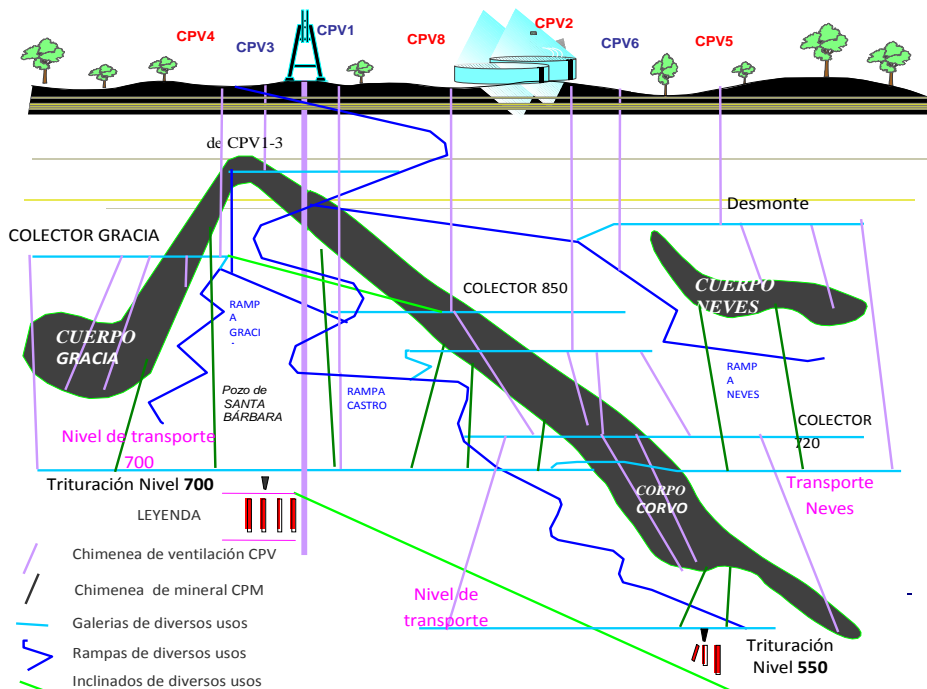


Figura 7.4 Aberturas subterráneas correspondientes a la infra-estructura general

Cuadro 7.3 Chimeneas de mineral y ventilación (con base en la lista general de pozos y chimeneas, por función, Somincor julio 2000)

Función	Cantidad total	Longitud (m)		Diámetro (m)
		Total	Medio	
Ventilación superficie (CPV)	16	3959,91	247,40	2,10 – 4,20
Ventilación mina (CV)	118	12100,62	102,55	1,80 - 2,10
Minería (CM)	147	11873,31	80,77	1,80 – 2,10

Existen tres niveles de transporte:

- Transporte Graça y Corvo superior, denominado nivel de transporte 700, con sección de 21 a 24 m<sup>2</sup>, que recoge el mineral producido en los tajeos de la explotación de los yacimientos de Graça y Corvo superior.
- Transporte Neves (Norte y Sur) localizado en el nivel 690, con sección similar al anterior y recoge el mineral producido en el yacimiento de Neves.
- Transporte Corvo inferior, localizado en el nivel 550, para la explotación de Corvo debajo del nivel 690 con sección similar a los anteriores y longitud de 960 metros.

Además de estas aberturas, la mina posee cámaras de trituración (550 y 700), rampa de acceso para la carga del mineral triturado a los skips del pozo, talleres para el mantenimiento de equipos, subestaciones eléctricas, almacenes, colectores de aire contaminado (910, 850, 830, 720 en Gracia), etc.

### 7.2.3.2 Tajeos de explotación

La forma y dimensiones geométricas de las aberturas subterráneas generadas por los tajeos durante la explotación de los yacimientos, están relacionadas con los métodos utilizados. Actualmente, en Neves Corvo se utilizan cuatro vaianes de explotación (D. Coupers, J. Lobato. J. Pinto, 1998).

a) *Drift and Fill* (fig. 7.5) es la variante ascendente en la cual es necesario construir un primer acceso con inclinación de -15% desde la rampa principal, variando con el avance de la explotación de 5 m en 5 m de altura. Los sistemas de soportes utilizados son el relleno hidráulico (arena, relaves de la planta de tratamiento y cemento), cables y anclajes (bulones).

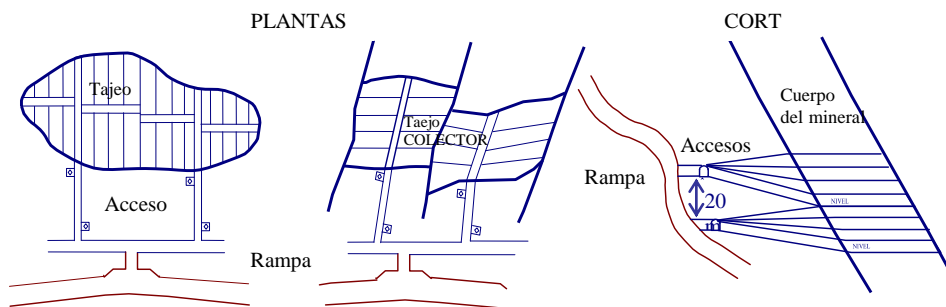


Figura 7.5 Esquema de explotación *drift and fill*

b) *Bench and Fill* (Fig. 7.6) aplicado a los minerales fisurados del yacimiento de Neves Norte, y consiste en la realización de tajeos transversales al yacimiento con la ubicación de una galería en el techo y otra en el piso, a una distancia mínima de 4 m.

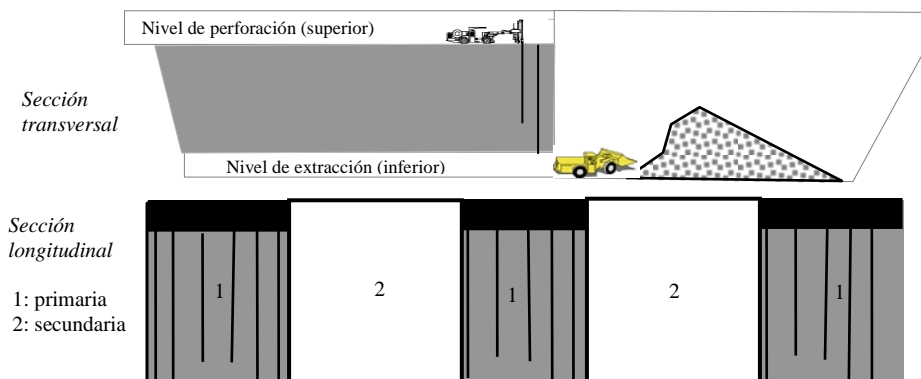


Figura 7.6 Sistema de explotación *bench and fill*  
(D. Coupers, J. Lobato, J. Pinto, 1998)

Después la galería superior se extiende a 12 m en ramales de 20 m, con soporte de bulones *swelex* y cables. Seguidamente se construye una chimenea de 2 m de diámetro como caldera del desmote, luego se amplía a un rectángulo de 5 m de longitud y ancho de 6 m para después disparar en la mitad del orificio.

Al finalizar estos trabajos se procede a la preparación de barrenos verticales con 12 m de largo y a la realización de los disparos de producción. A continuación se rellena con relaves y arena cementada y en los tajeos secundarios (entre los primeros) llenado no cementado (D. Coupers, J. Lobato, J. Pinto, 1998). Los ambientes de explotación en el mes de julio 2000 tenían la distribución que se presenta en el Cuadro 7.4.

Cuadro 7.4 Tajeos de explotación y sus accesos (en basado al informe del área de ventilación de minas de la mina de Neves Corvo, junio 2000)

Área	Accesos y paneles de explotación
Graça	C933(1B, 2B, 3B), G943GC, CG931GE, G832(1B), G827(2B), G786(1B), G816(3B), C828(7B), C804(2B), C773(4B)
Corvo +700	C693 (3B), C693 (2T), C727 (1T), C733 (1T), C741 (1B), C768 (1T), C733 (1B, 2B)
Corvo -700	C528(3B), C548(C2, C9), C563(C3, C7, C9), C620(4B, 6B, 8B), C625(8B)
Neves Norte	N789(1B), N784(2B), B818(S10), B760(S10), B790(S31, S52, S92), B770(S83)
Neves Sur	S842 (2B, 3B), S848 (5B), S837 (6B), S829 (7B)

También en esta mina se aplica el sistema denominado *Mini-Benching*, que es similar al método *Bench and Fill*, con la diferencia de que es longitudinal, en paneles típicos de 10 x 10 m x 40 m. En este sistema se utiliza el relleno hidráulico

o *paste fill*. Finalmente en las operaciones de explotación, se aplica el sistema de recuperación del pilar de solera denominado *Sill Pillar Recovery*.

### 7.3. Contaminación de la atmósfera subterránea

#### 7.3.1. Identificación preliminar del ambiente subterráneo

El flujo de aire identificado en Neves Corvo es forzado (extracción) y tiene un sistema típico mostrado en la fig. 7.7, cuyas características geométricas y de cobertura se resumen en los Cuadros 7.5 y 7.6. A la época de las mediciones, el sistema de suministro del aire estaba constituido por 7 ventiladores instalados en la boca de los pozos CPV2, CPV4, CPV5 y CPV8, que permitían la entrada del aire por el pozo de Santa Bárbara, la rampa de Castro CPV1, CPV3, CPV6 y CPV9, fluyendo por todas las aberturas subterráneas, realizadas para la explotación.

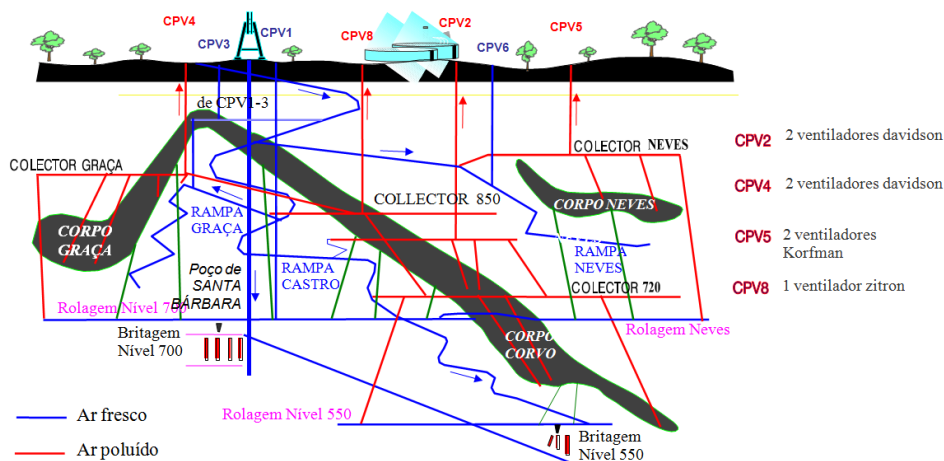


Figura 7.7 Esquema típico de la circulación del aire en la mina de Neves Corvo (Somincor, 2000)

Cuadro 7.5 Sistema de extracción del aire en la mina de Neves Corvo (área de ventilación de minas Somincor, 2000)

Chimeneas	Ventilador		Cobertura		Diám. (m)	Área mina
	Cantidad	Marca y modelo	De	A		
CPV2	2	Davidson APG.56	841,55	1216,60	4,20	Corvo
CPV4	2	Davidson APG.56	886,08	1200,33	4,20	Corvo
CPV5	2	Korfman KGL180	915,01	1224,10	3,00	Gracia
CPV8	1	Zitron ZVN 1-23-306/6	861,66	1210,00	3,10	Neves



Cuadro 7.6 Entradas principal del aire atmosférico de la mina Neves Corvo (área de ventilación de minas Somincor, 2000)

Local	Cobertura		Diám. (m)	Área mina
	De	A		
CPV3	1222,40	870,50	4,10	Gracia
Pozo Santa Bárbara	1210,00	700,00	5,00	Corvo
CPV6	1217,00	869,02	2,10-3,10	Neves
Rampa de Castro	1209,50	550,00	12m <sup>2</sup>	Corvo
CPV1	1070,50	708,69	2,40-2,75	Corvo
CPV9	1221,02	808,50	2,10-3,05	Neves

El sistema de circulación del aire tiene 5 galerías colectoras del aire contaminado, que son: colector de Graça (880), colector de Neves (910), colector (850), y colectores 830 y 720, que son de la zona de Corvo.

Para la regulación y control del flujo del aire se utilizan puertas simples o puertas dobles, con accionamiento electro-hidráulico.

La interacción de los dominios ambientales en el medio subterráneo de la mina Neves Corvo, particularmente el componente térmico, dinámico y volumétrico, se puede representar conforme a lo mostrado en la fig. 7.8

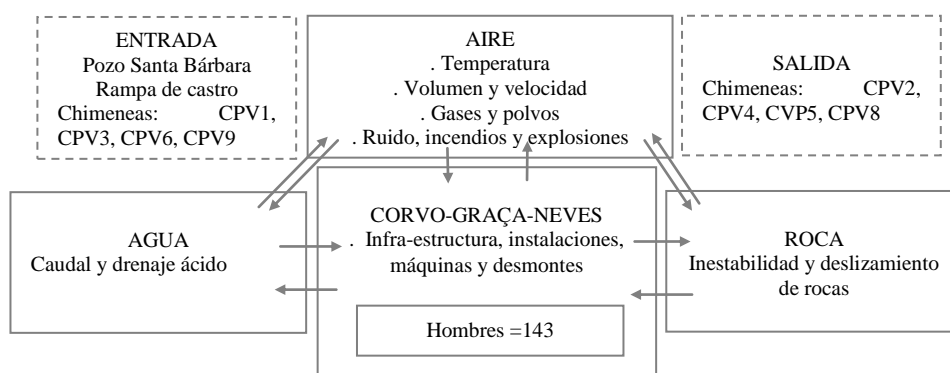


Figura 7.8 Interacción de los componentes del ecosistema en el ambiente subterráneo de la mina de Neves Corvo

En los tajeos, el aire circula forzado por ventiladores auxiliares de 50 KW y mangas de ventilación que captan el aire del circuito principal (rampas principales), por los accesos a los frentes de explotación. Las figuras 7.9 y 7.10 muestran esquemáticamente este sistema de circulación secundaria del aire.

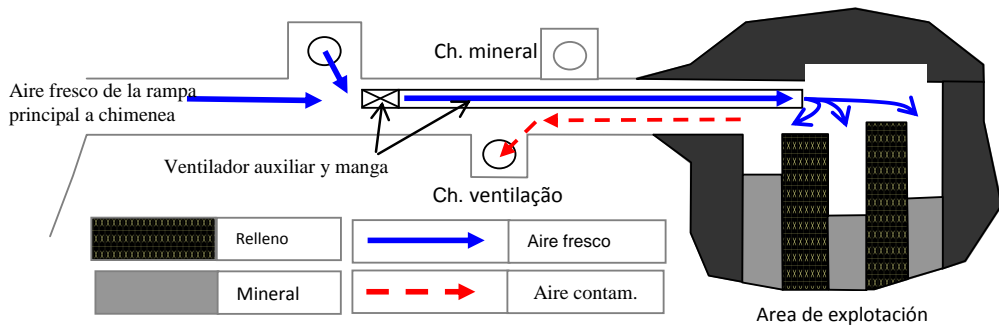


Figura 7.9 Esquema de ventilación auxiliar en el sistema *Drift and Fill*

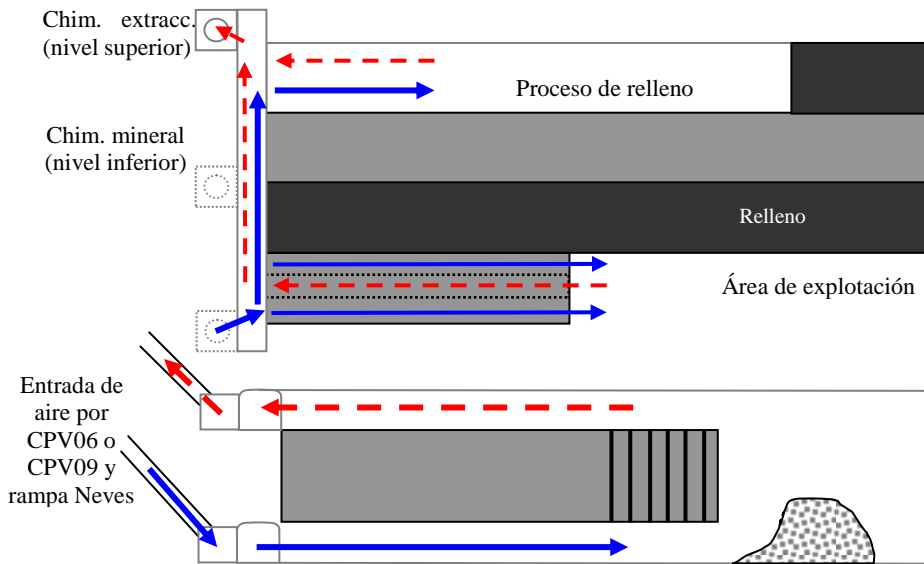


Figura 7.10 Esquema de ventilación auxiliar en el sistema *Bench and Fill*

Antes de las mediciones de los parámetros térmicos, dinámicos y volumétricos *in situ* se procedió en oficina a predefinir el sentido del flujo del aire, de los ramales y de los nudos de las aberturas subterráneas. La fig. 7.11 ilustra, cómo referencia, esta acción realizada en los accesos al desmonte C570 del área de Corvo.

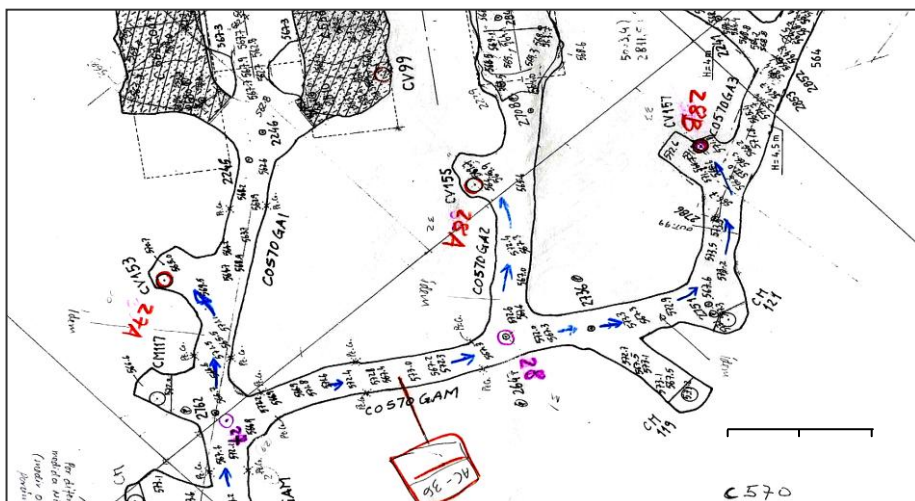


Figura 7.11 Predefinición del sentido del flujo de aire, en los ramales y nudos de acceso al desmante C570 del área de Corvo

Las estaciones de medición fueron localizadas en zonas adecuadas en cada ramal, y aproximadamente en la mitad de su longitud

### 7.3.2 Instrumentos utilizados para la medición

Los instrumentos utilizados fueron del Laboratorio de Ingeniería del Ambiente Subterráneo L.E.A.S de la Sección de Explotación de Minas del Instituto Superior Técnico de la Universidad Técnica de Lisboa y fueron:

- Termo/Higrómetro Casella London Ltd para medir la temperatura seca y húmeda. En cada estación de medición se procedió a la rotación del equipo durante 4 a 5 minutos, para después efectuar la lectura directa;
- Anemómetro AIRFLOW LCA 6000 digital y de lectura discreta para la medición de la velocidad del aire. En cada estación se realizaron las mediciones en 5 puntos de la sección de la abertura, considerando el valor medio de las cinco lecturas, como velocidad de la estación;
- Barómetro AIRFLOW digital, de lectura continua, utilizado para la medición de la presión barométrica absoluta o diferencial. Las mediciones fueron realizadas con tiempo de espera hasta la estabilización del registro digital y después efectuar la lectura directa;
- LOGGER DL20K de ROTRONIC, con cuatro sondas (velocidad, temperatura, humedad relativa y presión), que permite 240 registros por segundo, es autónomo y transportable y los datos pueden ser transferidos a un PC. El equipo fue instalado en los pozos por los cuales entra el aire con registro en largo periodo de tiempo.
- Mira topografía extensible de 5 metros y una cinta métrica de acero de 3 metros, para la medición de las secciones.

Por la imposibilidad de realizar mediciones directas de las secciones, se optó por dividir la sección en 5 sub-secciones trapezoidales, para medir 5 alturas y la base de la sección (fig. 3.42).

### 7.3.3. Mediciones *in situ* y consolidación de la base de datos

#### 7.3.3.1 Mediciones *in situ*

Las mediciones de temperatura, velocidad y datos para la determinación del caudal del aire fueron realizadas en julio de 2000 (fig. 7.12) al momento de la parada de las operaciones de producción, con todos los ventiladores principales a funcionar y los ventiladores auxiliares desconectados.



Figura 7.12 Medición de la velocidad, caudal y temperatura con anemómetro AIRFLOW LCA 6000 digital y con Termo/Higrómetro Casella

Las mediciones de velocidad, temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en las entradas principales del aire (CPV, CPV9, CPV6 y CPV3 y en la rampa de Castro), fueron realizados con el Data LOGGER DL20K (fig. 7.13), en intervalo de tiempo de 3 a 4 horas y con registros de datos a cada minuto, cuyos resultados están en el Anexo 7.1 y las variaciones en el Anexo 7.2.

Durante las mediciones *in situ* fueron registradas: la denominación del sitio de medición; los ramales identificados con números en los nodos; longitud; sección; velocidad del aire; presión barométrica; temperatura seca; temperatura húmeda, irregularidad de los hastiales; grado de obstrucción y sinuosidad de las aberturas; tipo de roca; y tipo de soporte o revestimiento de la superficie de las aberturas. Estos datos forman parte de la base de datos consolidados (Anexos 7.3, 7.4 y 7.5).

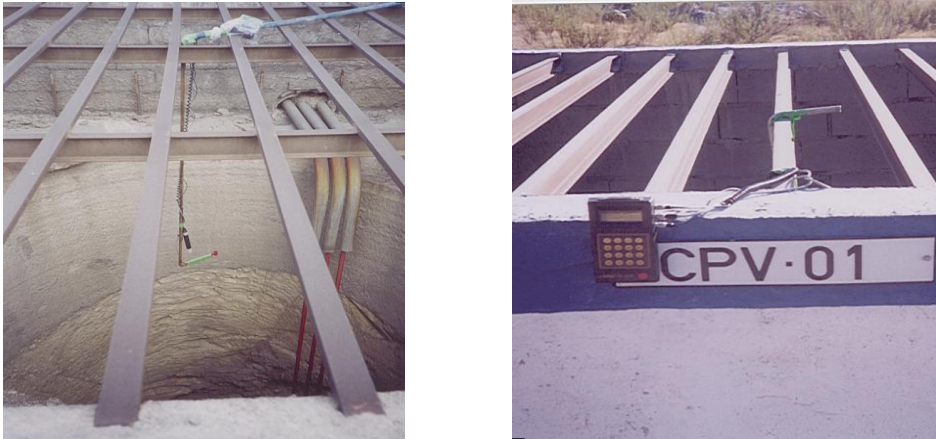


Figura 7.13 Medición de la velocidad, temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en las entradas principales de aire, utilizando el Data LOGGER DL20K

#### 7.3.3.2 Consolidación de la base de datos

Para la evaluación efectiva del impacto ambiental, térmico, dinámico y volumétrico en la atmósfera subterránea de la mina Neves Corvo fue necesario elaborar una base de datos, correspondiente a los siguientes aspectos:

- Los caudales de aire en las aberturas subterráneas, calculados aplicando la ecuación (3.60), y con las velocidades y secciones medidas para cada estación;
- La humedad relativa en las aberturas subterráneas calculadas con ecuación (3.33), y con base en las temperaturas secas, las temperaturas húmedas y presiones barométricas medidas.
- El factor de fricción de las aberturas subterráneas, determinado utilizando el Cuadro 3.46 con base en el tipo de revestimiento o soporte de las excavaciones, sinuosidades, uniones, discontinuidades, etc., identificadas (temperaturas, velocidad y sección).
- La longitud equivalente en cada ramal, determinada utilizando el Cuadro 3.47.
- El perímetro de las secciones de las aberturas calculado utilizando la expresión desarrollada en la sección 3.4.3.2 para aberturas subterráneas con sección mayor de  $12 \text{ m}^2$ .
- Enumeración secuencial de los nodos de ramales de los sitios de la atmósfera subterránea iniciando en el número 1, utilizando el software VnetPC2000.

La base de datos consolidada se encuentra en el Anexo 7.3 para el área Corvo, en el Anexo 7.4 para el área Graça y en el Anexo 7.5 para el área Neves.

#### 7.3.4 Redes de distribución del aire en el ambiente subterráneo

Las redes de distribución del aire en el ambiente subterráneo de la mina de Neves Corvo, caracterizadas en julio de 2000, tienen la particularidad de ser integrales, o sea, agrupan las tres áreas Corvo, Neves y Graça.

a) *Las redes de aire en el ambiente subterráneo de la zona de Corvo* están definidas por la entrada de aire limpio por la rampa de Castro, por el pozo de Santa

Bárbara y por la chimenea CPV1 y la salida de aire contaminado por las chimeneas CPV8 y CPV2, (figuras 7.14, 7.15 y 7.16).

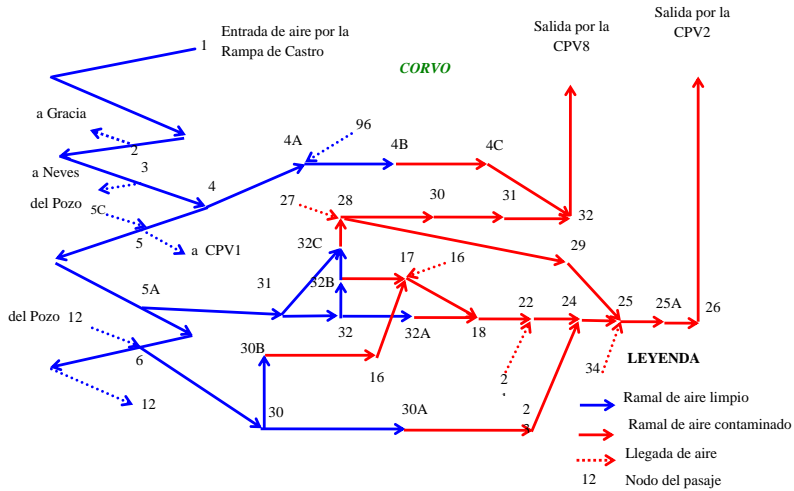


Figura 7.14 Red de aire del área de Corvo con entrada por la Rampa de Castro

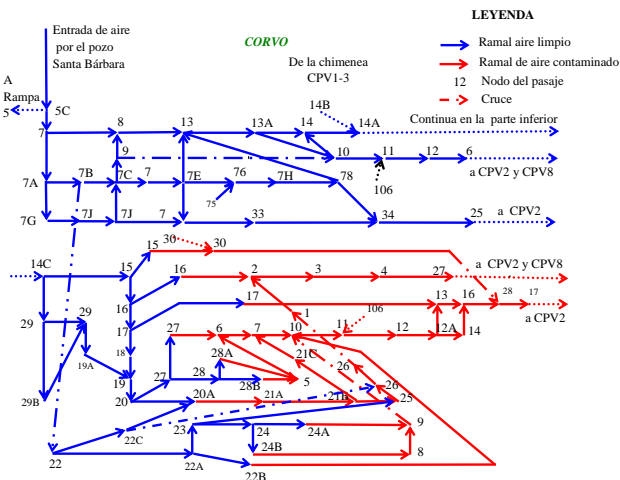


Figura 7.15 Red de aire del área Corvo con entrada por el pozo de Santa Bárbara

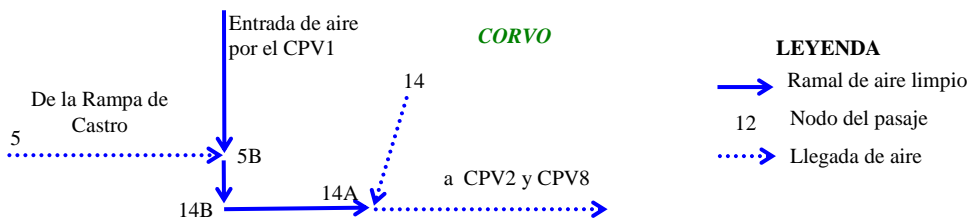


Figura 7.16 Red de aire del área Corvo con entrada por la chimenea CPV1

b) Las redes de aire en el ambiente subterráneo de la zona de Neves están definidas con la entrada de aire limpio por las chimeneas CPV6 y CPV9, y la salida del aire contaminado por la CPV5 (fig. 7.17 y 7.18).

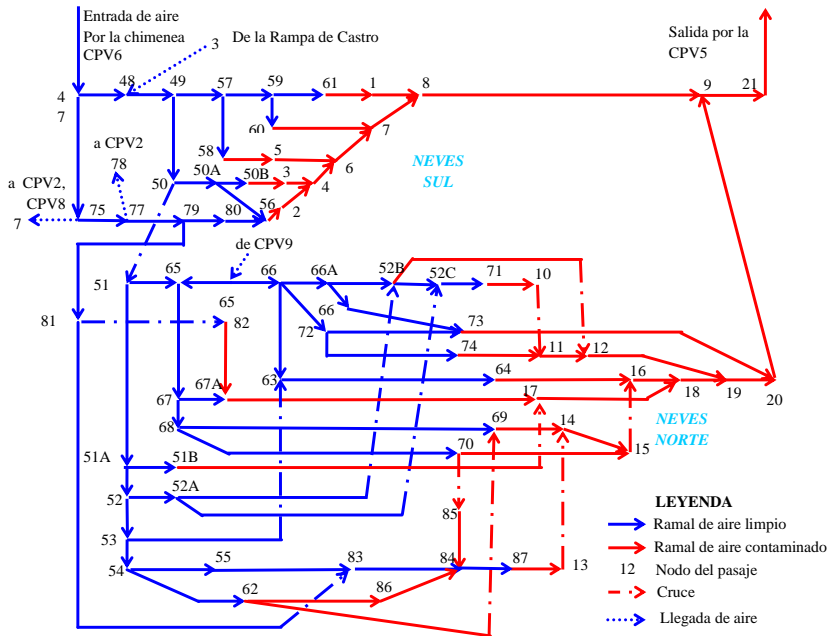


Figura 7.17 Redes de aire de la zona Neves con entrada por la chimenea CPV6

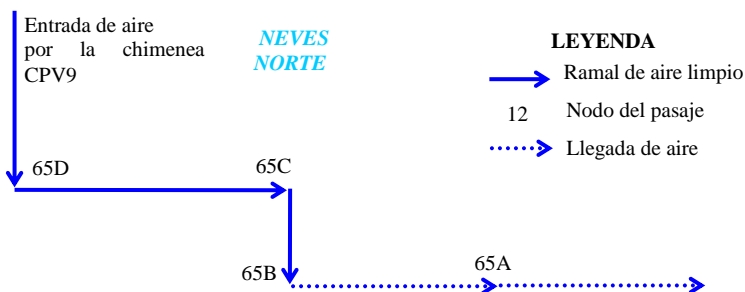


Figura 7.18 Red de aire de la zona de Neves con entrada por la chimenea CPV9

Los circuitos de aire típicos identificados son 34 en el área de Corvo, 15 en el área de Graça y 25 en el área de Neves, que hacen un total de 74, distribuidos de la siguiente manera:

- Área de Corvo: CPVI-CPV2, Pozo Santa Bárbara-CPV2, Pozo Santa Bárbara-CPV8, Rampa de Castro-CPV2 y Rampa de Castro-CPV8;
- Área de Graça: CPV3-CPV2, CPV3-CPV4 y CPV3-CPV8,

- Área de Neves: CPV6-CPV5 y CPV9-CPV5.

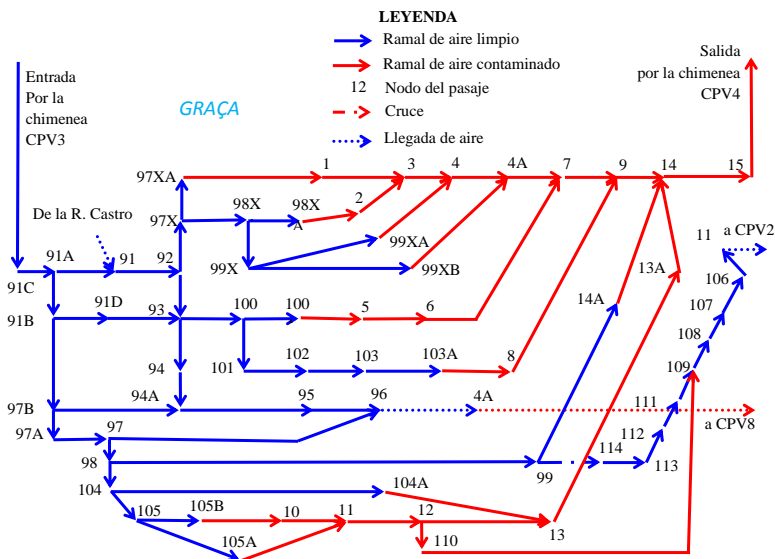


Figura7.19 Red de aire del área de Graça con entrada por la chimenea CPV3

### 7.3.5. Caracterización de la situación dinámica y volumétrica

El comportamiento dinámico (velocidad) y volumétrico (caudal) del aire en el ambiente subterráneo, caracterizado en la época de las mediciones (julio 2000), se analiza en dos partes: en las entradas de aire, con base en los registros del Data LOGGER DL20K y en las aberturas subterráneas basadas en las mediciones con anemómetro, psicrómetro y barómetro.

Los resultados de las mediciones de velocidad y caudal en las entradas de aire en el ambiente subterráneo por las chimeneas CPV1, CPV9, CPV6 y CPV3 con Data LOGGER DL20K, están en el Anexo 7.2, cuyas características son similares al gráfico de los registros en la chimenea CPV1 (fig. 7.20 y 7.21).

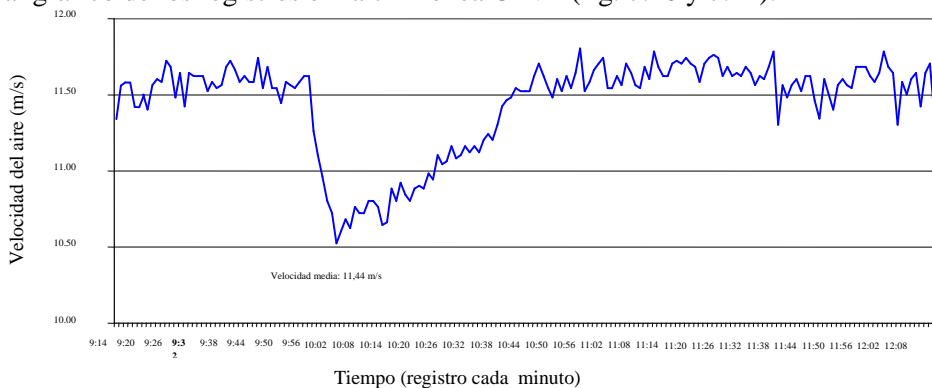


Figura 7.20 Variación de la velocidad del aire que entra en el ambiente subterráneo por la chimenea CPV1 medida con Data LOGGER DL20K, (25 de julio de 2000)



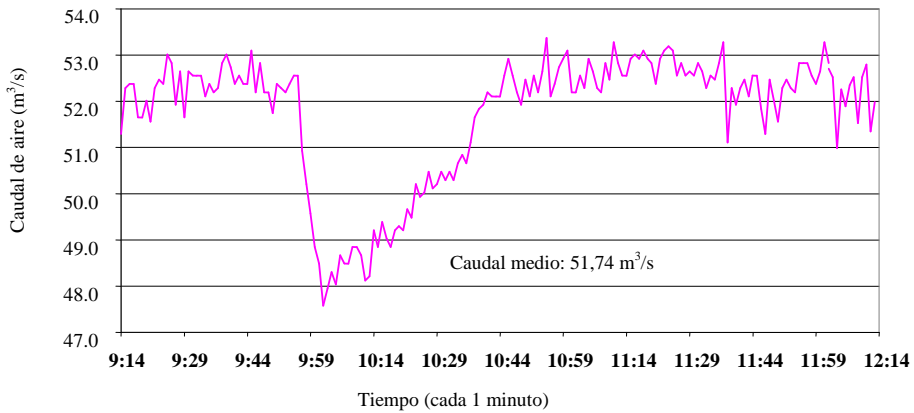


Figura 7.21 Variación del caudal de aire que entra en el ambiente subterráneo por la chimenea CPV1 medida con Data LOGGER DL20K (25 de julio de 2000)

El resultado de las velocidades y caudales medios respectivamente, son los siguientes: en el CPG=10,82 m/s y 67,37 m³/s, en el CPV6=13,96 m/s y 105,17 m³/s, en el CPV3=11,84 m/s y 164,03 m³/s y, en CPVI 11,44 m/s y 51,74 m³/s. Las características de la velocidad y caudal de aire en la atmósfera subterránea de la mina de Neves Corvo, en julio de 2000 (Figuras 7.22, 7.23, 7.24, 7.25, 7.26 y 7.27) se pueden resumir en los siguientes términos:

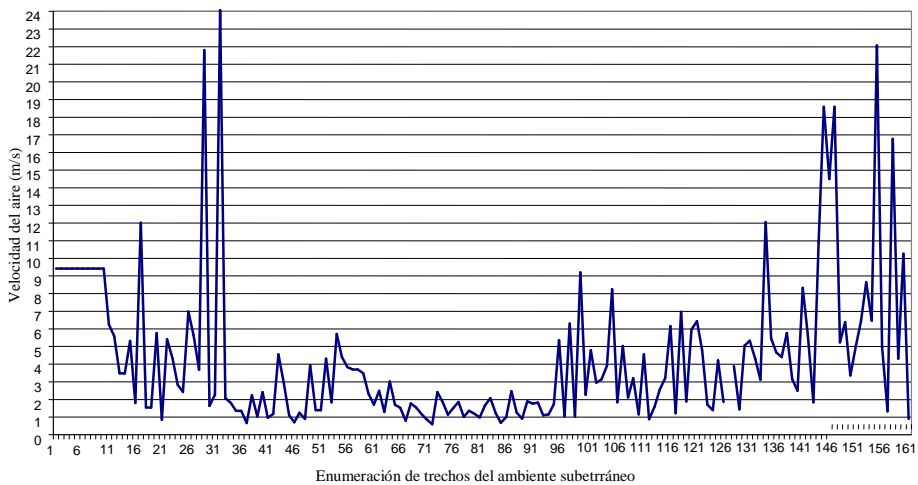


Figura 7.22 Velocidad del aire en el área de Corvo

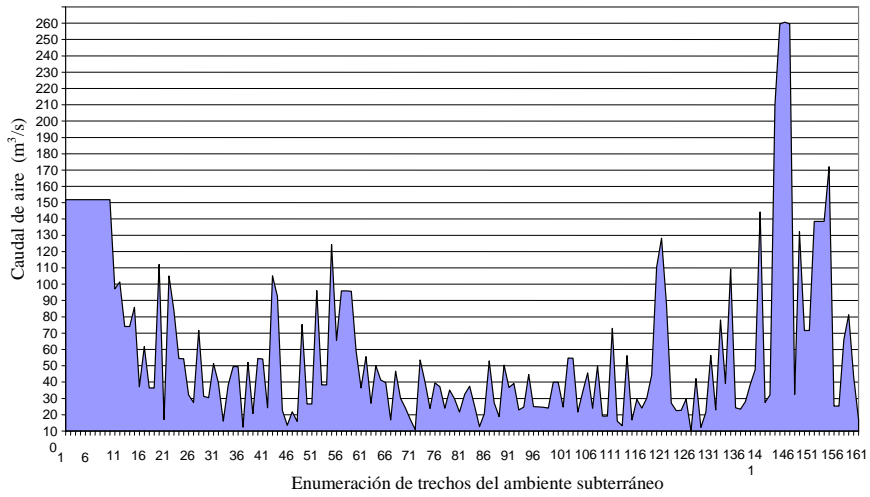


Figura 7.23 Caudal del aire en el área de Corvo

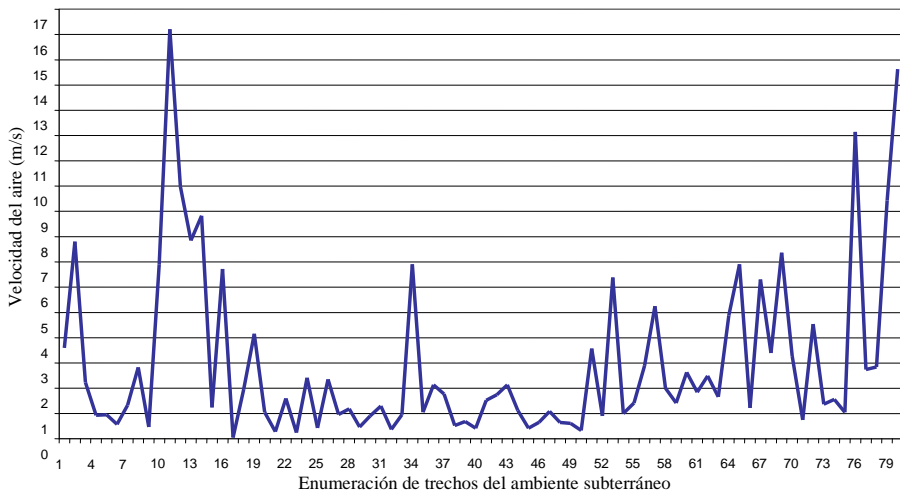


Figura 7.24 Velocidad del aire en el área de Graça

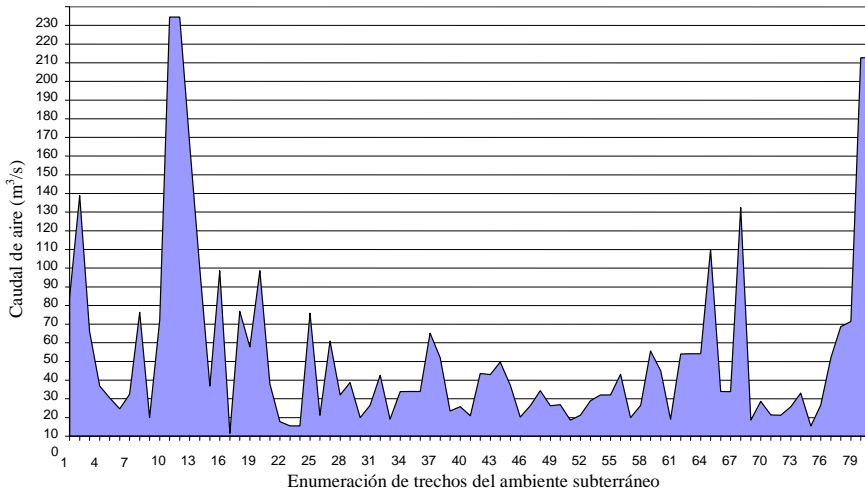


Figura 7.25 Caudal del aire en el área de Graça

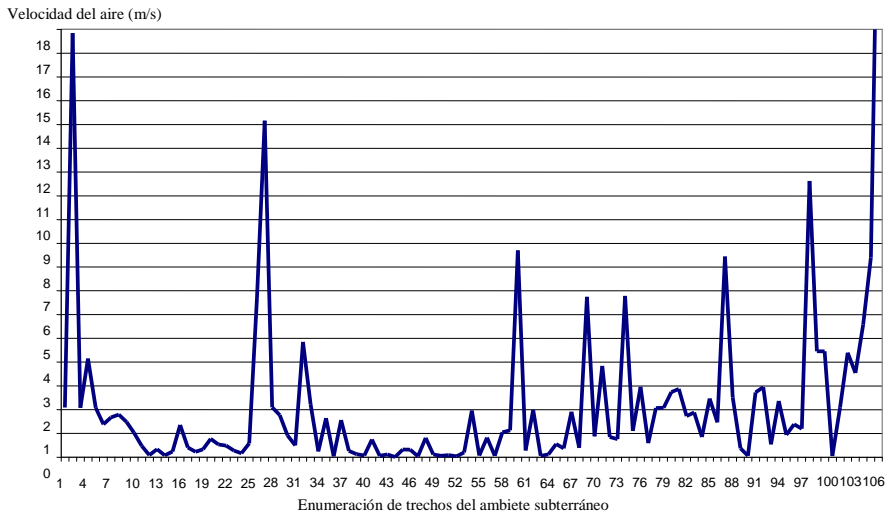


Figura 7.26 Velocidad del aire en el área de Neves

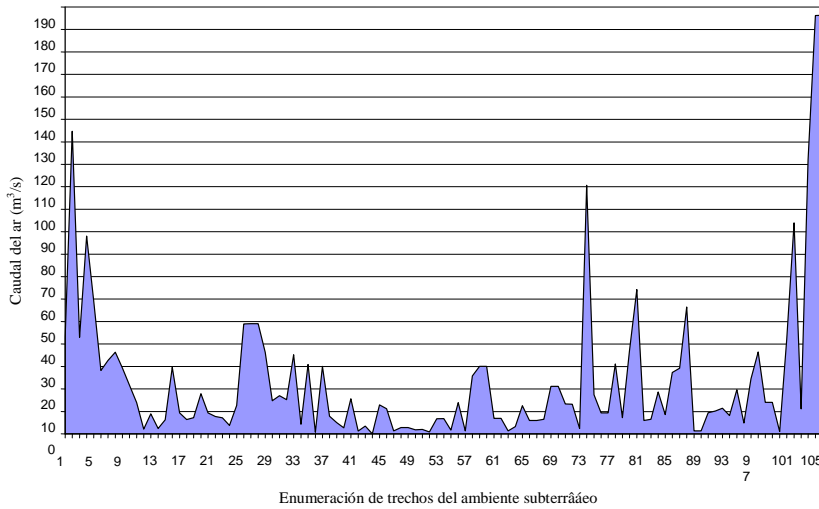


Figura 7.27 Caudal del aire en el área de Neves

a) Los valores del *pico de velocidad* (12 m/s a 23 m/s) corresponden al acceso de la pequeña sección (5to acceso al pozo, LP7A7B) y las chimeneas de extracción (CPV2 y CPV8). Los valores del pico de caudal (180 m<sup>3</sup>/s a 250 m<sup>3</sup>/s) corresponden a las chimeneas de entrada y salida del aire, en las que no hay presencia de hombres.

b) En zonas con presencia de hombres (galerías, rampas, traviesas, locales de oficinas, etc.), se registraron velocidades máximas de 0,86 m/s y caudales de 141,8 m<sup>3</sup>/s, como el caso de la rampa de Castro, que en algunos casos alcanzan elevados valores.

Realizando el balance global del aire en la atmósfera subterránea, resulta un total de 647,00 m<sup>3</sup>/s de entrada de aire limpio y 654,94 m<sup>3</sup>/s de salida de aire contaminado con una escasa diferencia de 1,23% entre la entrada y la salida del aire (Cuadro 7.7).

Cuadro 7.7 Balance de aire en julio de 2000

ENTRADA		SALIDA		
Local	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Local	Cantidad ventiladores	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
CPV03	160,03	CPV02	2	210,77
Pozo S. Bárbara	121,39	CPV04	2	209,10
CPV06	105,17	CPV05	2	134,93
Rampa de Castro	141,30	CPV08	1	100,14
CPV01	51,74			
CPV09	67,37			
Total	647,00	Total		654,94

Este balance fue realizado con base a mediciones en las entradas (con equipos de precisión en julio de 2000) y en las salidas (resultados de la modelación

con el programa VnetPC2000) para un total de 7 ventiladores principales (caudal y presión indicados en el Cuadro 7.8).

Cuadro 7.8 Caudal en función de la presión de los ventiladores de extracción

(2) Davidson APG-52 Chimenea CPV2		(2) Davidson APG-52 Chimenea CPV4		(2) Korfman 1800mm Chimenea CPV5		(1) Zitron ZVN 1-23- 360/6 – Chimenea CPV8	
Fan Setting : 0		Fan Setting : 0		Fan Setting : 5		Fan Setting : 5,5	
P(Pa)	Q(m <sup>3</sup> /s)	P(Pa)	Q(m <sup>3</sup> /s)	P(Pa)	P(Pa)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(m <sup>3</sup> /s)
2155	107,52	2155	107,52	3000	58,00	3310	84,00
1905	120,00	1905	120,00	2500	81,00	2520	90,00
1571	130,00	1571	130,00	2000	91,00	2000	103,00
1333	140,00	1333	140,00	1500	106,00	1500	120,50
905	150,00	905	150,00	1000	118,00	1150	126,00
425	160,00	425	160,00	500	120,00		

### 7.3.6 Situación de temperatura y presión barométrica en el ambiente subterráneo

La situación de la temperatura y presión barométrica en las chimeneas de entrada de aire (CPV1, CPV9, CPV6, CPV3 y rampa de Castro) monitoreadas con Data Logger DL20K se encuentran ilustradas en los gráficos del Anexo 7.2, presentándose, como ejemplo, la realizada en la chimenea CPV1 (fig. 7.28 y fig. 7.29).

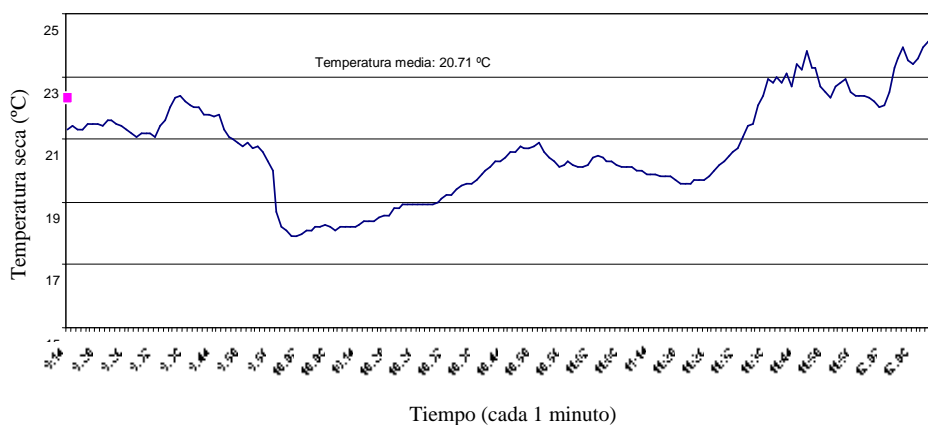


Figura 7.28 Variación de la temperatura en la entrada de aire por la chimenea CPV1 (25 de julio de 2000)

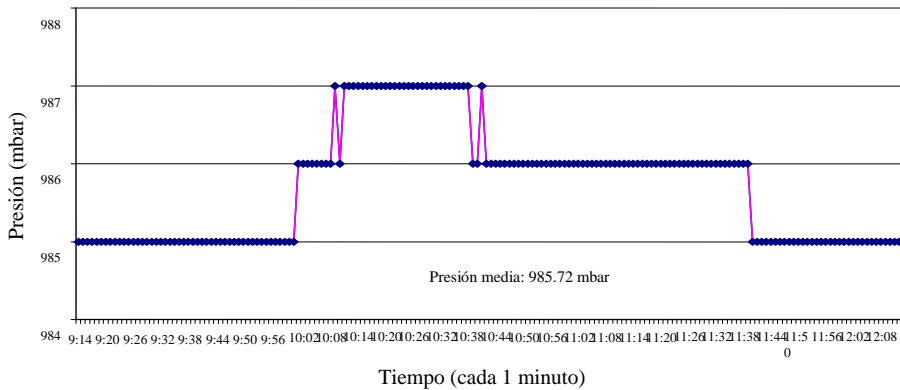


Figura 7.29 Variación de la presión barométrica en la entrada del aire por la chimenea CPV1 (25 de julio de 2000)

Al realizar las mediciones de temperatura en las chimeneas CPV1 y CPV3 en una misma fecha y entre las 9:14 y las 15:23 horas se aprecia que existe una variación aproximada de 4 °C y, en la tarde cerca de 2 °C. En CPV6 y CPV9 el monitoreo fue realizado entre las 13:02 y las 16:07 horas y, en ambos casos las tendencias son de un crecimiento de 3 a 4 °C.

La ponderación de los resultados promedio de las temperaturas registradas en horas matinales (rampa de Castro 23,43 °C, rampa de Castro 26,5 °C, CPV1 20,71°C) y vespertinas (CPV3 24,61 °C y CPV6 25,65 °C y CPV9 31,32 °C) permiten concluir que las mediciones en el ambiente subterráneo se realizaron en condiciones en que la temperatura del ambiente exterior presentaba un valor promedio de 25,37 °C (variando de 20,71 °C a 31,32 °C).

Asimismo, la presión promedio general del ambiente exterior, en el momento de los ensayos realizados fue de 981,54 mbar (variando de 965,08 mbar hasta 992,13 mbar) y la humedad relativa de 56,8%.

Las mediciones de temperatura en la chimenea CPV5 (salida de aire) alcanzaron valores promedio de 26,1°C con una humedad relativa de 56,33% cuando en el ambiente exterior circundante se registraba una temperatura y humedad relativa media de 32,6°C y 29,16% respectivamente.

Para una caracterización detallada de la temperatura del *ambiente subterráneo*, fue necesario identificar todas las redes de aire (Cuadro 7.9).

Cuadro 7.9 Redes de aire identificadas en el ambiente subterráneo en julio 2000

Área	Red principal de entrada y salida del aire		No. redes de aire	Distancia de circulación (m) Mín-Max	Profundidades máximas (m)	Temperatura máxima (°C)
	Entrada	Salida				
Corvo	CPV1	CPV2	7	2427.32-3338.21	641.07	29.5
	Pozo Santa Bárbara	CPV2	14	2072.29-4323.97	672.60	29.5
	CPV1	CPV8	2	2395.62-3306.51	671.77	28.5
	Pozo Santa Bárbara	CPV8	2	2946.90-3324.68	712.49	28.5
	Rampa de Castro	CPV2	7	3925.30-4119.08	492.00	24.5
	Rampa de Castro	CPV8	2	2527.00-3972.54	487.63	24.5
Graça	CPV3	CPV2	2	2988.03-314.23	521.90	26.0
	CPV3	CPV4	11	1256.66-2048.15	417.20	25.0
	CP3	CPV8	2	1595.57-1842.98	392.28	27.0
Neves	CPV6	CPV5	19	1467.24-2900.35	539.81	27.0
	CPV9	CPV5	6	1147.94-157.35	4423.86	27.0

a) En el área de Corvo (fig. 7.30 y 7.31), en las redes de aire con entrada por la chimenea CVP2 y el pozo de Santa Bárbara, las temperaturas registradas fueron de 25 °C en la parte inferior de la chimenea, de 23 a 36 °C en la rampa y galerías, 29,5 °C en los accesos a los frentes de explotación, de 25 a 27 °C en los colectores y de 26,1 °C en la salida. En los circuitos con entrada en la rampa de Castro el aire entra con 26,5 °C, y baja hasta los 22,5 °C en las galerías. En los accesos a los frentes de explotación, la temperatura registrada fue de 22 a 24 °C y de salida similar al caso anterior. La humedad relativa en esta área oscila entre 85 y 95%.

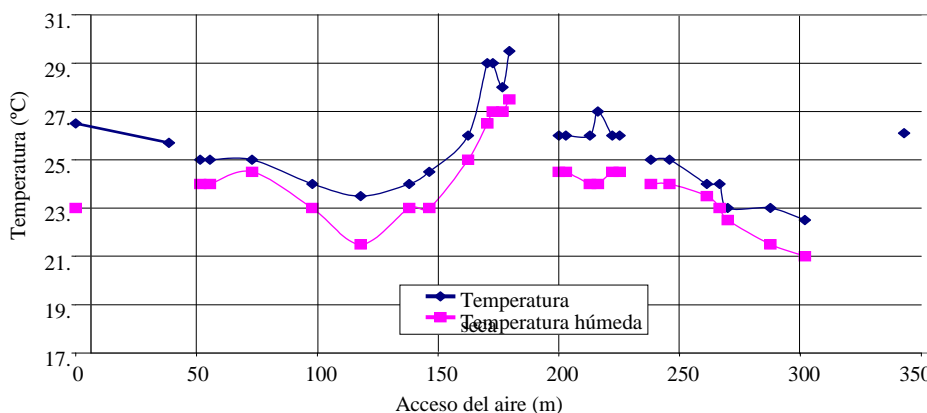


Figura 7.30 Variación de la temperatura en la red de aire típica nº 1 (entre CPV1-CPV2) en el área de Corvo

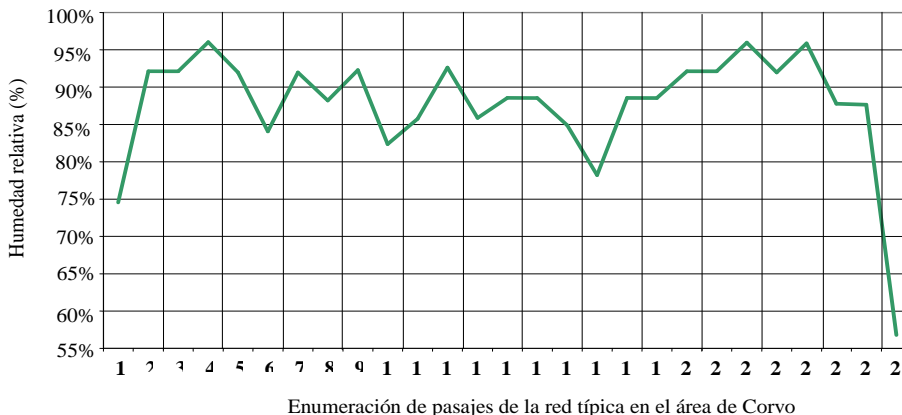


Figura 7.31 Variación de la humedad relativa en la red de ventilación típica número 1 (entre CPV1-CPV2) en el área de Corvo

b) En el área de Graça (fig. 7.32 y fig. 7.33), la temperatura de autocompresión alcanza 28 °C en la base de la chimenea, disminuyendo en la rampa y galerías hasta los 20 a 24 °C, en los accesos a los tajeos de 23 a 27 °C, en el colector de 22,5 a 25 °C, y en la salida es similar a los anteriores. La humedad relativa en esta área varía de 75 a 85%.

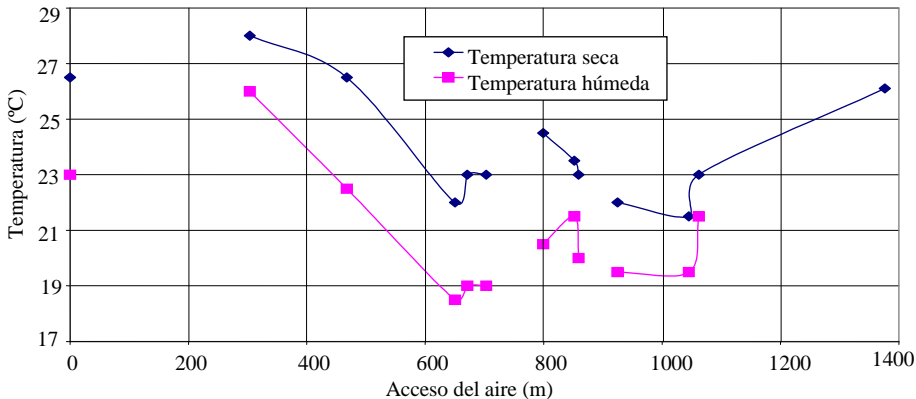


Figura 7.32 Variación de la temperatura en la red típica nº 1 (entre CPV3 CPV4) en el área de Graça



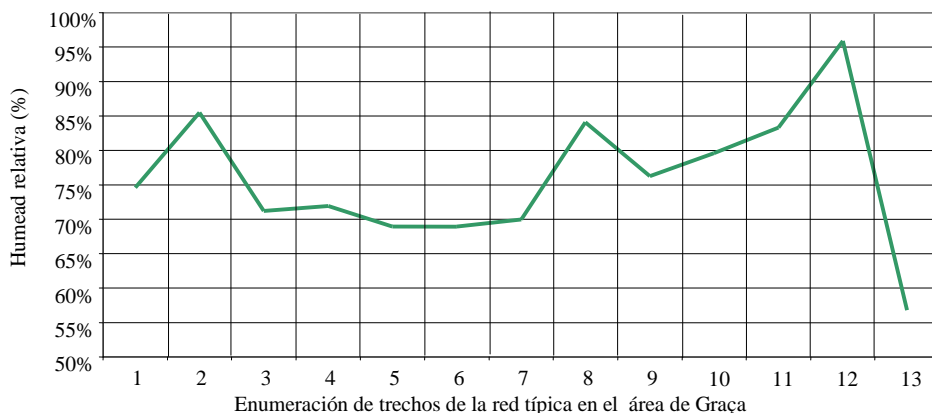


Figura 7.33 Tendencia de la humedad relativa en una red de aire típica nº1 (entre CPV3-CPV4), en el área de Graça

c) En el área de *Neves* (fig. 7.34 y fig. 7.35) la temperatura medida en la base de las chimeneas fue de 21 a 24 °C, en los accesos a los frentes explotación 23,5 °C, en los colectores de 23,5 a 24 °C y en la salida es similar a los casos anteriores. La humedad relativa media registrada fue de 90%.

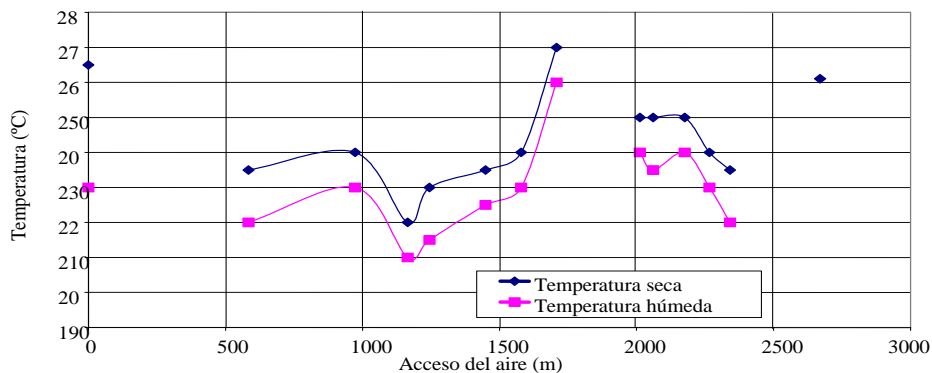


Figura 7.34 Variación de la temperatura seca y húmeda en la red de aire típica nº 15 (entre CPV6-CPV5), en el área de Neves

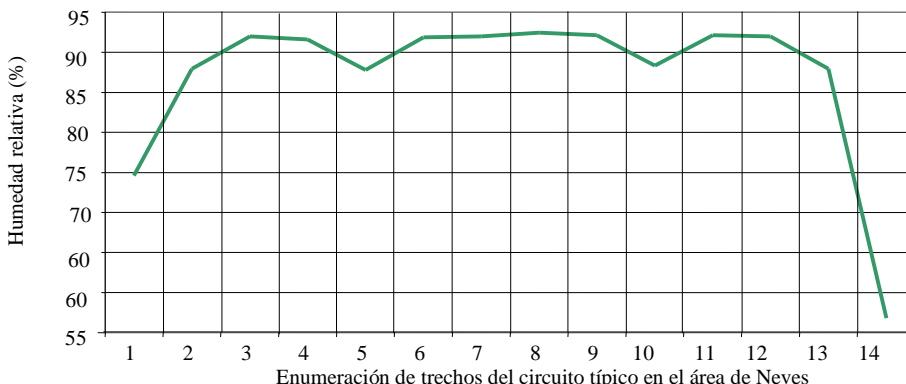


Figura 7.35 Variación de la temperatura seca y húmeda en la red típica n°15 (entre CPV6-CPV5), en el área de Neves

### 7.3.7 Velocidad, caudal y temperatura del aire en los frentes de explotación

Los parámetros térmicos medidos en los tajeos de las tres áreas de la mina Neves Corvo, muestran valores elevados en las áreas de Corvo y Neves (Cuadro 7.10 y Cuadro 7.11).

La variación de la temperatura seca en los primeros 5 meses es baja, con un aumento en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, disminuyendo en los dos últimos meses del año (fig. 7.36). El margen de la variación media de la temperatura seca del área de Corvo y Gracia es de 6,1 °C y en el área de Neves de 4,7 °C. La variación media para la mina en general es de 5,6 °C para la temperatura seca y de 5 °C para la húmeda.

Cuadro 7.10 Parámetros térmicos en los tajeos (basado en los registros del DTS Departamento de Estudios y Planeamiento Minero de Somincor 1998, 1999 hasta junio 2000)

MÊS	ÁREA CORVO						ÁREA GRAÇA						ÁREA NEVES						MINA			
	Temp. Seca (°C)			Temp. Húmeda(°C)			Temp. Seca (°C)			Temp. Húmeda(°C)			Temp. Seca (°C)			Temp. Húmeda(°C)			Temp. Seca (°C)			
	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	Min	Máx	Méd	
Enero	20	29	24.9	18.5	25	22.6	17.5	29	22.6	15.5	25	20.3	24	29	25.3	19	26	21.4	20.5	29.0	24.3	
Febrero	22	28	25.8	21	25	23.6	19	29	23.8	17	25	23.2	25	30	27	21	25	23.6	22.0	29.0	24.4	
Marzo	20	30	24.8	19.5	27	22.6	20	22	21	17	20	18	24	34	27.3	19	29	24.2	21.3	28.7	24.4	
Abril																						
Mayo	24	30	26.7	22.5	27	24.8	21	25	22.7	18.5	23	20.2	23	27	25.8	21	25	22.6	22.7	27.3	25.1	
Junio	25.5	30	27.3	22	28	25.1	21.5	27	24.1	19	24	21.6	24.5	28	26.9	21	27	24.3	23.8	28.3	26.1	
Julio	27	30	28.8	24.5	27.5	25.8	25	28	27	22	25	23.9	27.5	32	29.5	24.5	27.5	25.9	26.5	30.0	28.4	
Agosto	26.5	31	28.9	25	29	26.9	21	37	27.2					25	28	26				24.2	32.0	27.4
Setiembre	23	30	28.1	21	29	26.7	25	36	28.4	23	29	25.4	23	31	26.2	21	28	24.1	23.7	32.3	27.6	
Octubre	23	30	28.2	21	27.5	25.2	23	28	26	21	25	23	27	30	28.1	24	27.5	25.1	24.3	29.3	27.4	
Noviembre	27	31	28.9	25	29.5	26.8	19	23	20.7	15	21	17.7	23	26.5	24.6	21	24	22.1	23.0	26.8	24.7	
Diciembre	19	25	22.7	18	23	17.3	20	25	21.7	16	22	19	22	28	24.2	19	25	22	20.3	26.0	22.9	

Cuadro 7.11 Valores medios de los factores dinámicos, volumétricos y térmicos en condiciones de la mina en producción (basado en los registros DTS Departamento Estudios Planeamiento Minero de Somincor, realizados del 21 al 29 de julio de 1998)

ÁREA	VELOCIDAD(m/s)			CAUDAL AIRE (m <sup>3</sup> /s)			TEMPERATURA SECA(°C)			TEMPERATURA HÚMEDA(°C)			FRENTE DE EXPLOTACIÓN
	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	
Corvo	13	20	15.5	7	10	8	27	30	28.8	24.5	27.5	25.8	542-4B-11, 542-4B-14, 620-6B, 760-1B, 762-1F
Graça	2	21	8.2	1	11	3.8	25	28	27	22	25	23.9	817-2B, 806-3B, 921-E, 928-3B, 804-2B-07
Neves	5	16	12	3	13	7	27.5	32	29.5	24.5	27.5	25.9	779-1B, 779-2B, 770-S58, 818-S18, 790-S40-38, 700GF7

Una fuerte variación de la temperatura exterior (fig. 7.36 a) a lo largo del año (15,48 °C año) influye *levemente* la variación de la temperatura en los tajeos (5,5 °C año). La temperatura media en el ambiente subterráneo es mayor que la temperatura media en el ambiente exterior, debido principalmente a las propiedades térmicas de la roca virgen.

Para comparar los parámetros ambientales medidos en condiciones subterráneas *con paradas de producción* y en condiciones de la *mina en producción*, se tomaron como base los registros de la Ventilación Secundaria DTS del Departamento de Estudio y Planeamiento Minero de la Somnicor realizados entre el 21 y el 29 de julio de 1998 (Cuadro 7.12), similares a la fecha de realización de las mediciones.

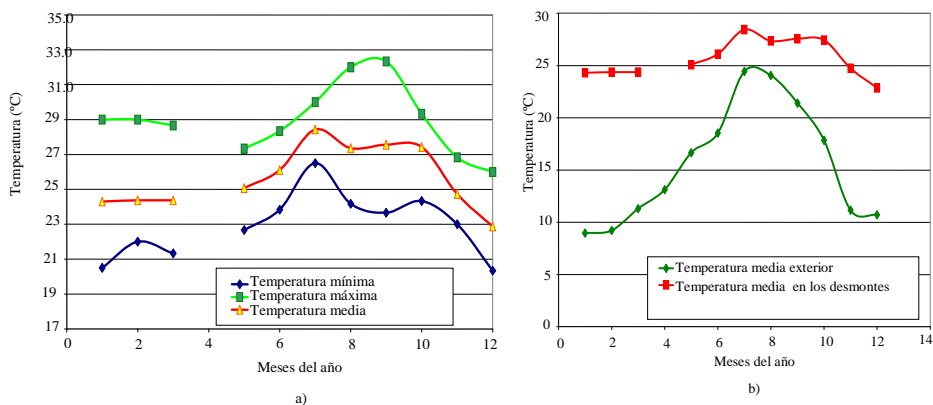


Figura 7.36 Variación de las temperaturas (medias mensuales) en el exterior (a) y comparación de las temperaturas (medias mensuales) en el exterior y en los frentes de explotación (b)

Cuadro 7.12 Comparación de los parámetros térmicos del ambiente subterráneo en condiciones de *mina parada* y *en producción* (basado en los registros del DTS Departamento de Estudios Planeamiento Minero de Somincor, julio de 1998 y ensayos julio 2000)

ÁREA	Temperatura seca (°C)						Temperatura húmeda (°C)						Velocidad Media(m/s)		Temperatura efectiva(°C)	
	Mina en producción			Mina parada			Mina en producción			Mina parada			Mina en Producción	Mina parada	Mina en Producción	Mina parada
	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín
Corvo	27	30	28.8	22.5	29.5	25.4	24.5	27.5	25.8	21	27.5	25.5	15.5	0.77	11.2	24.7
Graça	25	28	27	20	24	22.4	22	25	23.9	18	22	19.8	8.2	0.91	16.63	19.67
Neves	27.5	32	29.5	20	27	24.1	24.5	27.5	25.9	19	26	22.7	12	0.32	14.98	22.8

En las mediciones realizadas en la época de producción a la velocidad y consecuentemente el caudal, son mayores relativamente a las realizadas en el momento en que hubo paradas de producción, esto se debe a que en el primer caso, los registros fueron realizados con ventiladores auxiliares conectados, o sea, en mejores condiciones y, en el segundo caso, se realizó con ventiladores auxiliares desconectados. En las condiciones referidas, existen las siguientes diferencias:

- Temperatura seca: Corvo 3,4 °C, Graça 4,6 °C, Neves 5,4 °C, media general 4,5 °C.
- Temperatura húmeda: Corvo 0,3 °C, Graça 4,1 °C, Neves 3,2 °C, media general 2,5 °C.
- Temperatura efectiva: Corvo 13,7 °C, Graça 3,04 °C, Neves 7,82 °C, media general 8,2 °C.

### 7.3.8. Identificación del impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico

#### 7.3.8.1 Matriz, base para la identificación del impacto ambiental

Para la identificación del impacto ambiental térmico se aplica la matriz base propuesta en el Cuadro 3.10 que, conforme el artículo 148 del Decreto ley n°. 162/90 del 22 de mayo (Cuadro 3.6), la matriz base específica para la mina de Neves Corvo resulta la indicada en el Cuadro 7.13.

Cuadro 7.13 Matriz base para la evaluación del impacto ambiental térmico

Temperaturas (°C)	Niveles de impacto ambiental		
	Leve ▽	Moderado ⊗	Alto ◆
Seca ( $t_s$ )	$31 < t_s \leq 33$	$33 < t_s \leq 35$	$t_s > 35$
Húmeda ( $t_h$ )	$26 < t_h \leq 28$	$28 < t_h \leq 30$	$T_h > 30$

De la misma forma para la identificación del impacto ambiental dinámico y volumétrico se aplica la matriz base propuesta en el Cuadro 3.52 que, en particular para el caso estudiado, resulta expuesto en el Cuadro 7.14.

Cuadro 7.14 Matriz base para la evaluación del impacto ambiental dinámico y volumétrico

Tipo de impacto	Niveles de impacto ambiental		
	Leve ▽	Moderado ⊗	Alto ◆
Dinámico (m/s) V	$0,2 > V \geq 0,15$ $8 < V \leq 9$	$0,15 > V \geq 0,10$ $9 < V \leq 10$	$V < 0,10$ $V > 10$
Volumétrico (m <sup>3</sup> /s) Q	$q^* > Q \geq 0,9q^*$	$0,9q^* > Q \geq 0,7q^*$	$Q < 0,7q^*$

El caudal mínimo permisible varía en relación con el número de hombres y la potencia de los equipos diesel presentes en los frentes de trabajo, en condiciones críticas de operación y aplicando la ecuación 3.73, resultan los valores que se encuentran en el Cuadro 7.15.

Cuadro 7.15 Condiciones críticas de operación (Departamento de producción de la mina Neves Corvo 2000) y caudal mínimo de aire permisible

Sitios	Hombres simultáneos	Equipos simultáneos*	Potencia (hp)	q (m <sup>3</sup> /s)
Tajeos	3	1 LHD	224	10,67
Talleres de mantenimiento	12	Equivalente a 1 LHD	224	11,12
Nivel de transporte	4	2 DUMPER	706	18,60
Galerías y rampas	15	Vehículo transporte personal	136	5,51

En las rampas y otros ambientes donde existe la presencia de hombres y máquinas, las condiciones no son críticas. En el sistema colector del aire, generalmente no hay la presencia de hombres ni máquinas, ya que su función es de recolectar el aire contaminado de la mina.

### 7.3.8.2 Identificación del impacto ambiental térmico y dinámico

Con las matrices específicas elaboradas (Cuadro 7.13 y Cuadro 7.14) se definen los caudales de aire permisibles (Cuadro 7.15). La matriz del impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico se presenta en el Cuadro 7.16.

En el área de Corvo existe una zona donde la temperatura húmeda alcanza de 26,5 °C a 27,5 °C y la temperatura seca varía de 28 a 29,5 °C, existiendo por tanto un riesgo ambiental *leve* por la temperatura húmeda (no se encuentra indicado en la matriz de impacto).

La matriz de impacto ambiental muestra que el área con mayor riesgo ambiental térmico, dinámico y volumétrico es el de *Neves*.

En los sitios de las redes de aire primario no existe impacto ambiental térmico, sin embargo existe un impacto térmico *leve* en los tajeos de las áreas de Corvo y Neves.

Los tajeos del área de Neves y Graça, presentan un impacto ambiental dinámico y volumétrico *alto* y en Corvo *moderado*. Este resultado es coherente con los elevados riesgos ambientales identificados en los *accesos*.

Tanto en Corvo, como en Graça y Neves en las *galerías de transporte* el nivel de riesgo ambiental dinámico y volumétrico es *alto*, debido fundamentalmente a la presencia de camiones que son utilizados para el transporte del mineral.

En el área de Corvo existe una zona donde la temperatura húmeda alcanza de 26,5 °C a 27,5 °C y la temperatura seca varía de 28 a 29,5 °C, existiendo por tanto un riesgo ambiental *leve* por la temperatura húmeda (no se encuentra indicado en la matriz de impacto).

La matriz de impacto ambiental muestra que el área con mayor riesgo ambiental térmico, dinámico y volumétrico es el de *Neves*.

En los sitios de las redes de aire primario no existe impacto ambiental térmico, sin embargo existe un impacto térmico *leve* en los tajeos de las áreas de Corvo y Neves.

Los tajeos del área de Neves y Graça, presentan un impacto ambiental dinámico y volumétrico *alto* y en Corvo *moderado*. Este resultado es coherente con los elevados riesgos ambientales identificados en los *accesos*.

Tanto en Corvo, como en Graça y Neves en las *galerías de transporte* el nivel de riesgo ambiental dinámico y volumétrico es *alto*, debido fundamentalmente a la presencia de camiones que son utilizados para el transporte del mineral.

Las figuras 7.37 y 7.38 representan los mapas del impacto ambiental donde se presentan los niveles de riesgo ambientales identificados.

Cuadro 7.16 Matriz de impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico en el ambiente subterráneo de la mina Neves Corvo

Área	Ramos	Ambiente subterráneo	Tipo y niveles de impacto		
			Térm.	Dinám.	Volum.
CORVO	5C-5	Oficina 810			♦
	13A-10	Transporte Corvo			♦
	14-10	Transporte Corvo		⊗	♦
	9-10	Transporte Corvo			♦
	10-11	Transporte Corvo			♦
	25-26	Acceso Cv159		♦	♦
	15-15A	C693GAM		⊗	♦
	varios	<i>Tajeos (Cuadro 3.10)</i>	∇	♦	⊗
GRAÇA	97B-94A	Acceso a CPV-3		♦	♦
	109-108	Transporte Graça			♦
	110-109	Transporte Graça			⊗
	113-114	Transporte Graça			♦
	varios	<i>Tajeos (Cuadro 3.10)</i>		♦	♦
NEVES	54-55	Rampa Neves		♦	♦
	50A-50B	Acceso a CVM96		♦	♦
	51-65	N810GAM		∇	⊗
	67-67A	Acceso a CV44			⊗
	68-69	Acceso a CV48		♦	♦
	52A-52C	B760S92		⊗	∇
	52A-52B	Acceso a 52B		♦	♦
	66 <sup>A</sup> -52B	B790GAM		♦	♦
	72-74	Acceso a CV80		♦	♦
	75-76	Transporte Neves		⊗	♦
	75-77	Transporte Neves		♦	♦
	77-78	Transporte Neves		♦	♦
	77-79	Transporte Neves		♦	♦
	79-81	Transporte Neves		♦	♦
	81-83	Transporte Neves		♦	♦
	84-87	Acceso a CV42		♦	♦
	55-83	Vinculación rampa		♦	♦
	varios	<i>Tajeos (Cuadro 3.10)</i>	∇	♦	♦

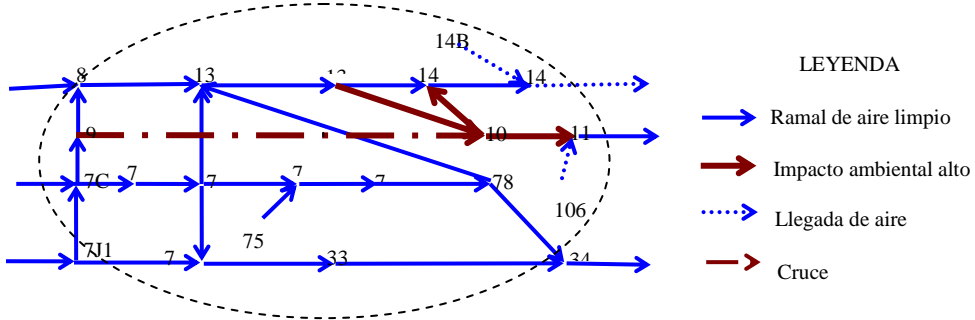


Figura 7.37 Sitios con impacto volumétrico alto en el área de Corvo

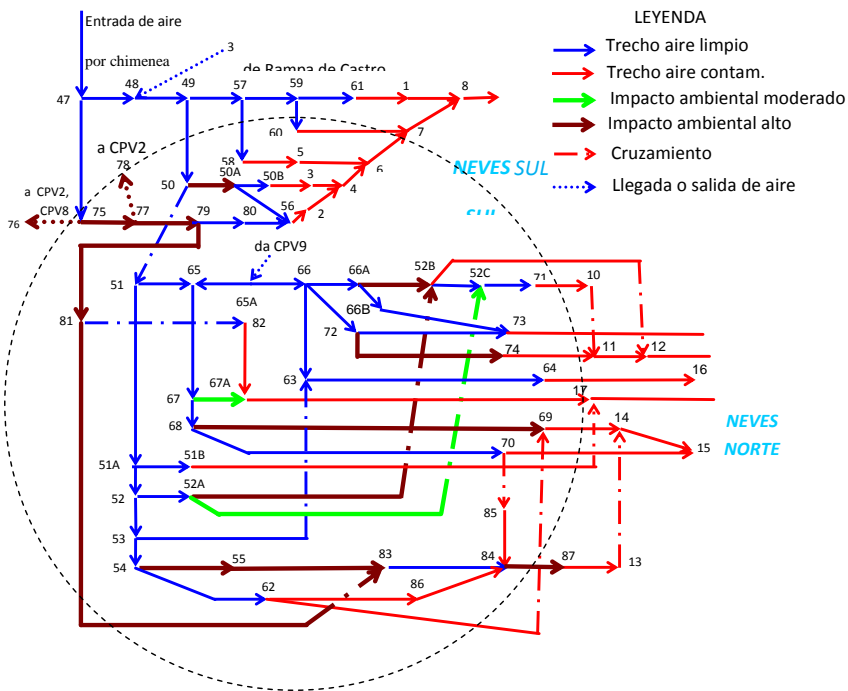


Figura 7.38 Sitios en el área de Neves con impacto dinámico y volumétrico de moderado a alto

### 7.3.9 Medidas correctivas para el impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico en los tajeos

En la matriz de impacto ambiental (Cuadro 7.16) se mostró que en las áreas de Graça y Neves existe un impacto ambiental dinámico y volumétrico *alto*, en los tajeos del área de Corvo un impacto dinámico *moderado* y volumétrico *alto* y en el área de Neves y Corvo hay un impacto térmico *leve*.

7.3.9.1 Medidas correctivas para el impacto ambiental térmico

En los tajeos del área de Neves fueron registradas temperaturas medias máximas de 32 °C (Cuadro 7.10), mostrando esto que en algunos tajeos probablemente esta temperatura sea mayor.

La ventilación de los tajeos se hace mediante el uso de ventiladores auxiliares (fig. 7.9 y 7.10) en un ambiente lineal con sección variable, tanto en el método de explotación *Drift and fill* como *Bench and Fill*, pudiéndose aplicar las ecuaciones 3.1, 3.6, 3.10, 3.11, 3.14 y 3.15, para las condiciones locales siguientes:  $P = 20,96 \text{ m}$ ,  $S = 27,56 \text{ m}^2$ ,  $h_1 = 659,30 \text{ m}$ ,  $h_{tcn} = 30 \text{ m}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $g_g = 30,30 \text{ m}^\circ\text{C}$ ,  $\lambda = 0,1837 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\rho_a = 1,1774$ ,  $C_e = 1,005$ ,  $f_m, f_t = 0,032$ ,  $q_d = 2,9 \text{ kW/kW}$ ,  $P_d = 204 \text{ kW}$ ,  $C_e = 342 \text{ kJ/Kg}$  y  $e_u = 342 \text{ kg ANFO/ día-frente}$ , sustituyendo estos valores en las ecuaciones referidas, se obtiene la ecuación particular siguiente:

$$T_{\text{salida}} = T_{\text{entrada}} + [20,461/(1 + 2,97Q)] + 29,025/Q$$

En las mediciones realizadas en julio de 2000 se registraron en los accesos a los tajeos del área de Neves temperaturas máximas de 27 °C. Con el objetivo de intentar obtener una solución general del impacto ambiental para varios casos, se modeló no solamente para esta temperatura, sino también para temperaturas de 26 °C hasta 30 °C (fig. 7.39).

En la hipótesis en que la temperatura del aire en la entrada al desmote sea de 27 °C (registro Julio del 2000), para mantener el ambiente con temperatura inferior a 31 °C (máximo permitido por la norma), el caudal necesario es de 9 m<sup>3</sup>/s, y para una temperatura de entrada de 28 °C se necesita un caudal de 12 m<sup>3</sup>/s.

En la hipótesis en que la temperatura del aire a la entrada al desmote sea de 29 °C es necesario un caudal de aire de 18,5 m<sup>3</sup>/s; caudal que todavía resulta ser viable enviar al frente de explotación. Sin embargo, en el caso que la temperatura de entrada de aire sea mayor o igual a 30 °C es necesario un caudal mucho más elevado, siendo inviable técnica y económicamente.

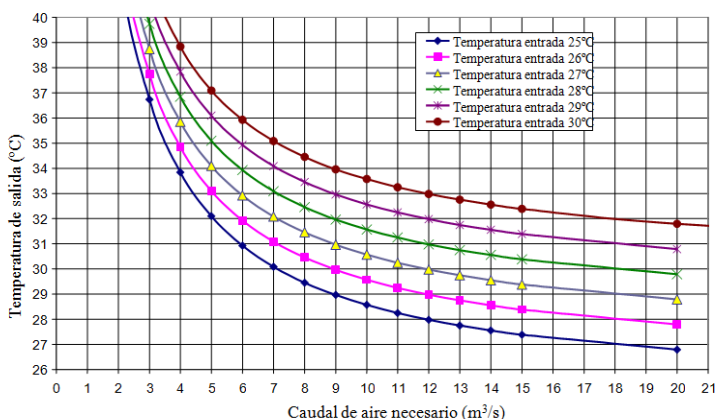


Figura 7.39 Tendencia de la temperatura en función del caudal de aire en los tajeos



7.3.9.2 Medida correctiva para la parte dinámica y volumétrica

El caudal mínimo permisible de aire en los tajeos es de 3,67 m<sup>3</sup>/s (Cuadro 7.15) por lo que la medida correctiva debe garantizar este caudal de aire a través de los ventiladores auxiliares (Cuadro 7.17). Este caudal mínimo no solo está orientado a mitigar el impacto dinámico y volumétrico, sino también debe mitigar el impacto térmico.

Cuadro 7.17 Caudal mínimo necesario para corregir el impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico en los tajeos

Temperatura del aire en la entrada del desmonte (°C)	Caudal mínimo de aire para mantener la temperatura <31°C en los tajeos (m <sup>3</sup> /s)	Caudal mínimo permisible por el D. Lei 162/90 (m <sup>3</sup> /s)	Caudal mínimo de la medida correctiva (m <sup>3</sup> /s)
27	9,00	10,67	18,50
28	12,00		
29	18,40		

Para la aplicación de esta medida correctiva, es necesario evaluar el dimensionamiento del sistema de ventilación auxiliar.

En la mina de Neves Corvo, para la ventilación auxiliar se utilizan ventiladores Korfmann, de esta forma la evaluación se realiza para estos equipos, utilizando el método de longitud máxima expresado por la ecuación (3.64).

Para estos ventiladores, con las curvas características presentadas en el Anexo 7.7 y caudal de la medida correctiva definida, se obtienen las ecuaciones indicadas en el Cuadro 7.18.

Cuadro 7.18 Ecuaciones de longitud máxima del acceso/desmante

Ventilador	H <sub>máx</sub> (curva)	Ecuación de longitud máxima
ESN9-750	2400	$L_{máx} = 7,011906 / [ (0,02548/D^5) + 0,0000541 ]$
AL10-300	1200	$L_{máx} = 3,505715 / [ (0,02548/D^5) + 0,0000541 ]$
AL10-220	1000	$L_{máx} = 2,235026 / [ (0,02548/D^5) + 0,0000541 ]$
AL10-180	960	$L_{máx} = 2,146103 / [ (0,02548/D^5) + 0,0000541 ]$

Para obtener las ecuaciones de longitud máxima se utilizan los siguientes parámetros:  $\lambda = 0,0260$  (Cuadro 2.49),  $Q = 18,50$  m<sup>3</sup>/s (Cuadro 3.15),  $f = 0,0278$  (Cuadro 3.46),  $P = 18,4$  m,  $S = 21,15$  m<sup>2</sup> (D.Coupers J. Lobato 1998),  $Le = 9,144$  m (Cuadro 3.47).

Por lo tanto, la medida correctiva determinada para el impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico en el desmante de la mina de Neves Corvo consiste en la utilización de un ventilador y manga adecuados para una longitud máxima de acceso/desmante, utilizando las ecuaciones indicadas en el Cuadro 7.18 o las curvas de la fig. 7.40. A título de ejemplo, se presentan algunos casos en el Cuadro 7.19.

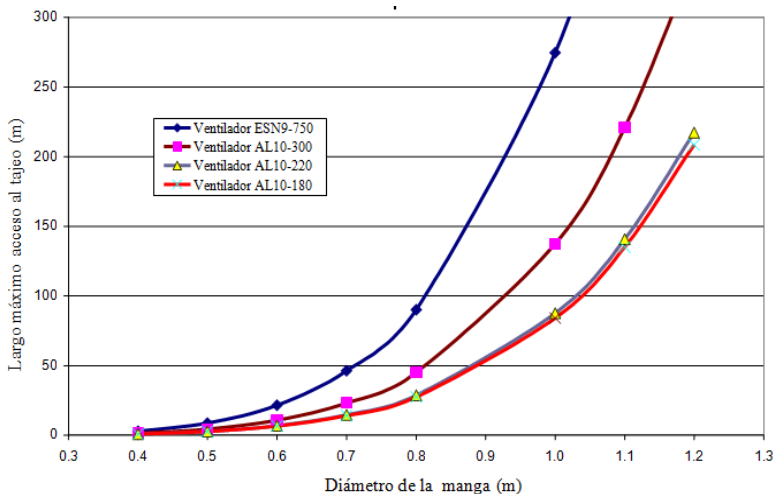


Figura 7.40 Longitud máxima de los accesos y/o tajeos (manga) en función del diámetro de la manga de ventilación

Cuadro 7.19 Ejemplo de medidas correctivas para la mitigación del impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico a 50, 100 y 150 m del acceso y/o desmonte

$L_{m\acute{a}x}$	ESN9-750	AL10-300	AL10-220	AL10-180
50	0,70	0,80	0,88	0,90
100	0,82	0,94	1,03	1,03
150	0,88	1,01	1,12	1,12

### 7.3.10. Medidas correctivas para el impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico en las redes primarias de aire

#### 7.3.10.1 Soporte informático

Con el fin de obtener la medida correctiva para el impacto ambiental dinámico y volumétrico identificado en las redes primarias de aire, se utilizó el programa VnetPC2000 de Ventilation Service, Inc, de los EUA, como herramienta principal.

El VnetPC2000 es un programa interactivo que requiere de un ambiente Windows 95, 98, 200 o NT, computadora Pentium con un mínimo de 16 MB de memoria Ram, y monitor VGA, ya que para la modelación es necesario introducir datos básicos (fig. 7.41 izquierda) como: título del trabajo, eficiencia de los ventiladores, costo unitario de la energía, densidad del aire y tipo de unidad a utilizar.

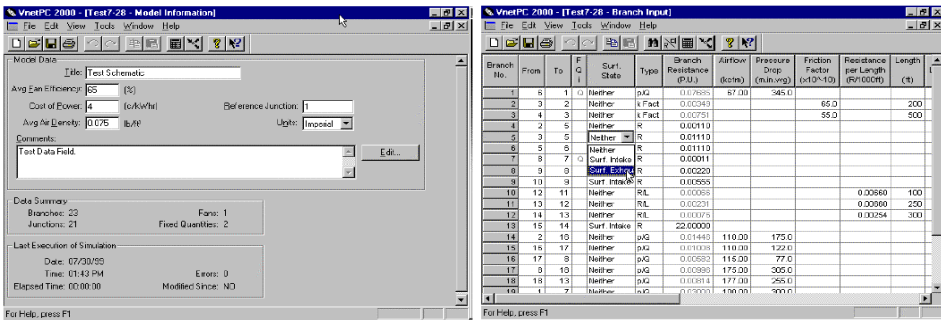


Figura 7.41 Modelo de informaciones básicas para el *input* del programa VnetPC2000

Seguidamente, como parte del *input*, se requiere de la información y los factores sobre las características físicas de las aberturas subterráneas (fig. 7.41 derecha), que son: ramales definidos en los nodos inicial y final, el factor de fricción, longitud de los ramales, longitud equivalente, sección, perímetro, nombre del ambiente subterráneo. Con el fin de procesar estos datos, el programa necesita que se defina la opción de utilización del factor de fricción.

El programa permite utilizar presiones, caudales fijos o curvas características de los ventiladores (con por lo menos 5 puntos), considerando el número de ventiladores y la instalación en serie o en paralelo (fig. 7.42).

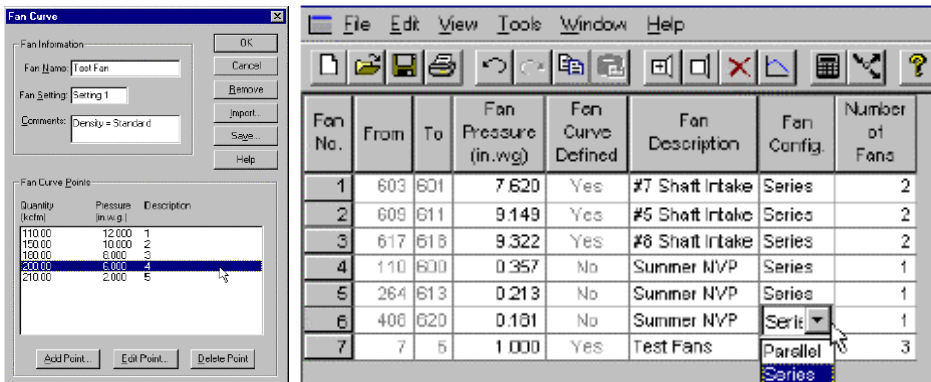
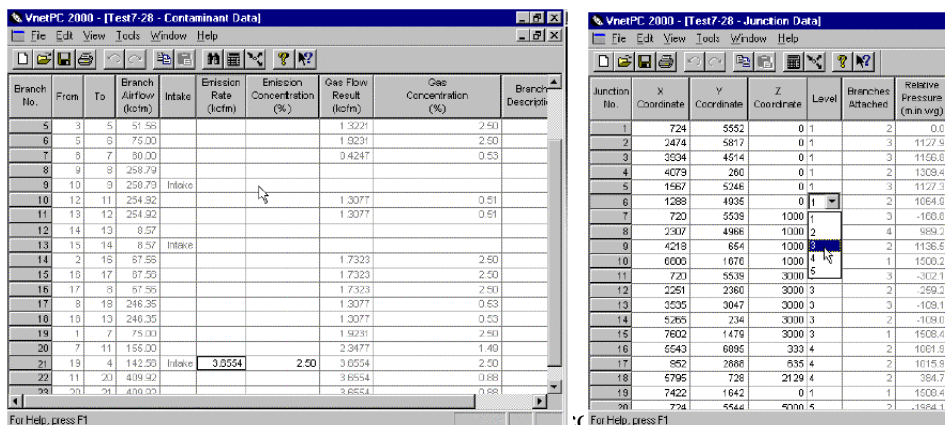


Figura 7.42 *Input* de la capacidad de los ventiladores basado en las curvas características

El programa igualmente dispone de una opción para el modelaje de la concentración de los gases contaminantes y coordenadas de los nodos (fig. 7.43) en latitud, longitud y altitud para la representación gráfica.



Con los datos introducidos (*input*) se procede a la simulación de la red de aire subterráneo, para lo cual la metodología adoptada fue de simular la situación inicial (referencia) caracterizada con los resultados más próximos a la realidad (1 a 2% de diferencia) y después, modelar las alternativas posibles, logrando mitigar el impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico identificado. Los resultados (*output*) muestran, para cada ramal la resistencia total, caudal de aire, potencia, costo por año y descripción, así como el esquema de la red de ventilación (fig. 7.44).

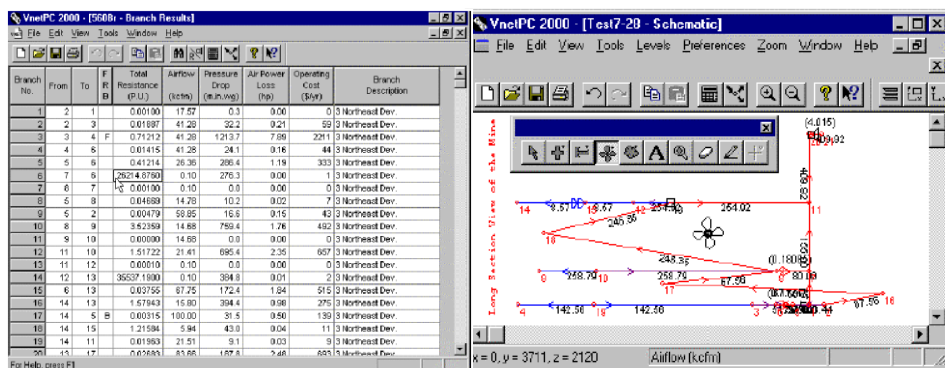


Figura 7.44 Informaciones básicas en el *output* del programa VnetPC2000

### 7.3.10.2 Medida correctiva obtenida mediante la modelación

En las simulaciones para la búsqueda de la medida correctiva más viable fue tomado en consideración, como un criterio fundamental, la utilización de los recursos existentes (infra-estructura y ventiladores) y, solo en el caso de la imposibilidad de mitigar el impacto con los recursos existentes, es que se considera la construcción o ampliación de los pozos y chimeneas.

La simulación inicial o de base, fue realizada considerando la medición realizada en el mes de julio de 2000, siendo el resultado cercano a la realidad (Anexo 7.8 y Cuadro 7.20).

Cuadro 7.20 Comparación de los caudales de entrada y salida de aire medidos en Julio de 2000 y resultados de la modelación con VnetPC2000

Entrada			Salida	
Sitio	Julio 2000 Caudal (m <sup>3</sup> /s)	VnetPC2000 Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Sitio	VnetPC2000 Caudal (m <sup>3</sup> /s)
CPV3	160,03	161,39	CPV2	210,77
Pozo S. Bárbara	121,39	121,39	CPV4	209,10
CPV6	105,17	107,96	CPV5	134,93
Rampa de Castro	141,30	141,99	CPV8	100,14
CPV1	51,74	53,27		
CPV9	67,37	68,93		
Total	647,00	654,93	Total	654,94

Analizando los resultados presentados en el Cuadro 7.21, fig. 7.45 y fig. 7.46, se concluye que, tanto la Alternativa 1 como la Alternativa 2, son medidas correctivas que resuelven el problema del impacto ambiental identificado, obteniéndose velocidades y caudales mayores que el mínimo permisible.

Cuadro 7.21 Comparación entre los resultados de las simulaciones de las medidas correctivas y de las mediciones realizadas en julio 2000, en los sitios con presencia del impacto ambiental dinámico y volumétrico moderado a alto

Área	Ramales		Ambiente subterráneo	No.	Registros en Julio 2000		VnetPC2000 Alternativa 1		VnetPC2000 Alternativa 2	
	Julio 2000	VnetPC2000			Q(m <sup>3</sup> /s)	V(m/s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	V(m/s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	V(m/s)
CORVO	5C-5	22-14	Oficina 810	1	7,10	0,28	95,43	3,79	63,69	3,14
	13A-10	39-41	Transporte Corvo	2	11,70	0,54	20,60	0,60	20,56	0,88
	14-10	40-41	Transporte Corvo	3	3,60	0,14	27,47	1,08	15,94	0,78
	9-10	31-41	Transporte Corvo	4	11,70	0,68	6,80	0,39	26,78	1,62
	10-11	41-42	Transporte Corvo	5	5,80	0,33	54,87	3,10	63,28	3,78
	25-26	63-64	Acceso Cv159	6	0,80	0,03	18,09	0,65	38,84	1,85
	15-15A	48-75	C693GAM	7	2,60	0,11	27,63	1,16	17,17	0,88
	varios	varios	Tajeos*	8	8,00	0,26	18,50	0,62	18,50	0,62
GRACA	97B-94A	134-133	Acceso a CPV-3	9	1,50	0,05	41,91	1,46	27,11	1,27
	109-108	172-171	Transporte Gracia	10	10,20	0,42	51,19	2,10	52,97	2,69
	110-109	173-172	Transporte Gracia	11	16,30	0,65	25,83	1,03	26,48	1,32
	113-114	176-177	Transporte Gracia	12	8,60	0,33	25,36	0,98	26,49	1,30
	varios	varios	Tajeos*	13	3,80	0,13	18,50	0,62	18,50	0,62
NEVES	54-55	206-207	Rampa Neves	14	2,10	0,09	8,47	0,30	13,61	0,71
	50A-50B	209-210	Acceso CVM96	15	2,40	0,08	11,51	0,38	13,09	0,60
	51-65	202-220	N810GAM	16	3,80	0,17	20,64	0,92	29,16	1,54
	67-67A	230-231	Acceso a CV44	17	4,30	0,25	8,71	0,50	7,65	0,46
	68-69	232-233	Acceso a CV48	18	0,80	0,04	8,04	0,41	8,13	0,46
	52A-52C	235-237	B760S92	19	5,00	0,13	8,86	0,23	9,90	0,25
	52A-52B	235-237	Acceso a 52B	20	2,70	0,07	9,48	0,24	11,23	0,29
	66 <sup>s</sup> -52B	227-237	B790GAM	21	1,30	0,03	13,63	0,65	11,82	0,56
	72-74	239-241	Acceso a CV80	22	1,40	0,04	19,20	0,55	20,36	0,59
	75-76	242-36	Transporte Neves	23	2,80	0,12	29,44	1,27	23,25	1,21
	75-77	242-244	Transporte Neves	24	1,70	0,06	3,41	0,14	38,17	1,77
	77-78	244-38	Transporte Neves	25	2,00	0,09	32,40	1,49	19,50	1,05
	77-79	244-246	Transporte Neves	26	0,80	0,04	29,07	1,37	57,68	3,15
	79-81	246-247	Transporte Neves	27	1,70	0,07	26,31	0,78	10,38	0,53
	81-83	248-250	Transporte Neves	28	1,30	0,06	48,76	2,20	59,47	3,17
	84-87	251-254	Acceso a CV42	29	1,40	0,06	12,20	0,52	13,23	0,68
	55-83	208-250	Unión rampa	30	3,30	0,12	12,25	0,45	17,45	0,84
varios	varios	Tajeos*	31	7,00	0,23	18,50	0,62	18,50	0,62	

\* Registros de ventilación secundaria DTS Departamento de Estudios y Planeamiento Minero de SOMINCOR, realizados de 21 al 29 de julio de 1998 y resultados de la medida correctiva para tajeos

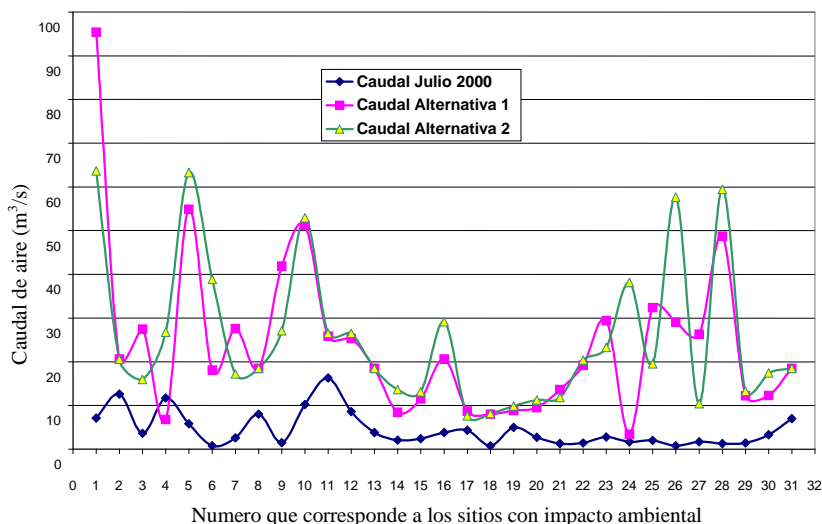


Figura 7.45 Caudal de aire obtenido por las alternativas 1 y 2 con respecto a lo medido en julio de 2000 en el ambiente subterráneo con impacto ambiental dinámico y volumétrico

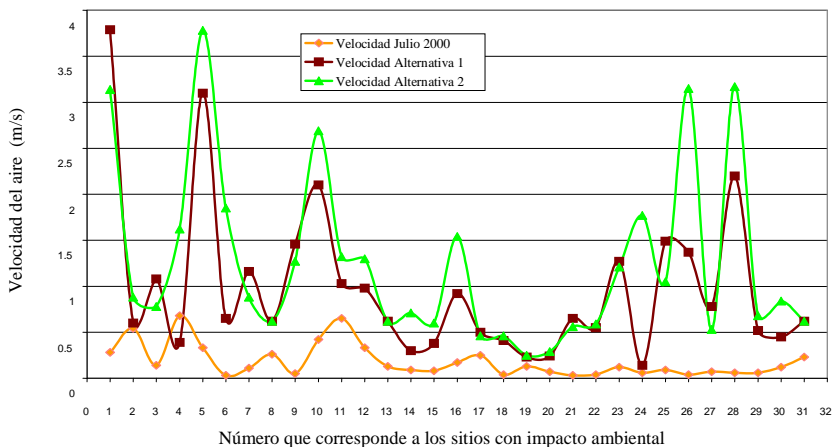


Figura 7.46 Velocidad de aire obtenida para las alternativas 1 y 2 en relación a lo medido en julio 2000 en el ambiente subterráneo con impacto ambiental dinámico y volumétrico

En el Cuadro 7.22, se presentan los resultados de las alternativas 1 y 2 (medidas de corrección) comparando con las mediciones realizadas en julio 2000, en los sitios donde se identificaron los impactos ambientales dinámico y volumétrico *moderado a alto*, en el Anexo 7.8 los resultados de la simulación de la alternativa 2 y en el Anexo 7.9 las redes base de la alternativa 2.

Sin embargo, entre las dos alternativas, la 1 presenta problemas en dos sitios, debido al hecho de no poder obtener una velocidad y caudal mayor que el

mínimo permisible. Esta alternativa 1 genera, en la rampa de Castro, una velocidad de 9,98 m/s (caudal de 159,08 m<sup>3</sup>/s) siendo mayor que el mínimo permisible (8m/s) y necesita de 4 ventiladores nuevos, con la ventaja de que no se requiere realizar ampliar el pozo CPV1.

Por lo tanto, la alternativa 2 es más viable, dado que resuelve el problema del impacto ambiental dinámico y volumétrico con un margen muy importante del mínimo permisible, por lo que constituye la medida correctiva deseada.

Cuadro 7.22 Acciones a realizar en la implementación de las mejores alternativas de simulación

Área	Alternativa 1		Alternativa 2		
Corvo	.Retirar los 2 ventiladores Korfmann AL1200 del acceso al CPV1 (OF.810). .Instalar 1 ventilador AL12-370, en el ramal 26-26A (AC.CV159).		.Retirar los 2 ventiladores Korfmann AL1200 del acceso al CPV1 (OF.810). .Instalar 1 ventilador AL12-370, en el ramal 22C-20A (OHV4 antiguo). .Alargar pozo CPV1 de un $\phi$ de 2,4 m a 4,2 m.		
Graça	.Instalar los 2 ventiladores Korfmann AL1200 en el ramal 109-108 (G0700RA) Transporte Gracia		.Instalar los 2 ventiladores Korfmann AL1200 en el ramal 109-108 (G0700RA) Transporte Gracia		
Neves	.Construir una chimenea para la zona Neves Norte de superficie al nodo 20, unión de CV60-2 y N900GV1 (313,70 m y 4,20 m de diámetro). .Instalar en esta chimenea 2 ventiladores Korfmann KGL180 (extracción). .Retirar la puerta de ventilación en el ramal 55-54 (rampa de Neves). .Instalar 2 ventiladores Korfmann AL1200 en el nivel de transporte N700RO2 (ramales 75-76 y 77-79).		.Construir una chimenea en la zona Neves Norte de superficie al nodo 20 unión de CV60-2 y N900GV1 (313,70 m y 4,20 m de diámetro). .Instalar en esta chimenea 2 ventiladores Korfmann KGL 180 (extracción) .Retirar la puerta de ventilación en el ramal 55-54 (rampa de Neves).		
Resumen	Ventiladores		Pozo		
	Existentes	Nuevos	Existentes	Nuevos	313,70 m, 4,2 m de diámetro.
	2	4	2	3	Alargar a 4,2 m diámetro, 387 m

Económicamente, la alternativa 2 necesita de una inversión de 961139,99 €; calculado con base en las informaciones proporcionadas por el Departamento de Planificación de la mina Neves Corvo (D. Coupers, 2000) e implica:

- o Construcción de un nuevo pozo de 313,70 m con diámetro de 4,2 m: 307426,00€;
- o Ampliación del pozo CPV1 de 2,4 m a 4,2 m de diámetro: 153713,00€;
- o Costo de 2 ventiladores Korfmann de 250 kW cada uno = 500000,00 €.

La información utilizada es: pozo de 4,20 m de diámetro 1980 €/m, costo de adquisición más instalación de 2 ventiladores de 250 kW cada uno de 500000 €.

Las actividades para la realización de la alternativa 2 se presentan en el Cuadro 7.22. Los 2 ventiladores Korfmann AL 1200 a instalar en el Transporte Gracia, son los retirados del acceso al CPV1 (Oficinas 810) no constituyendo una solicitud para la adquisición.

Los trabajos y actividades necesarios para materializar las alternativas 1 y 2 se presentan en los mapas de la fig. 7.47 y fig. 7.48.

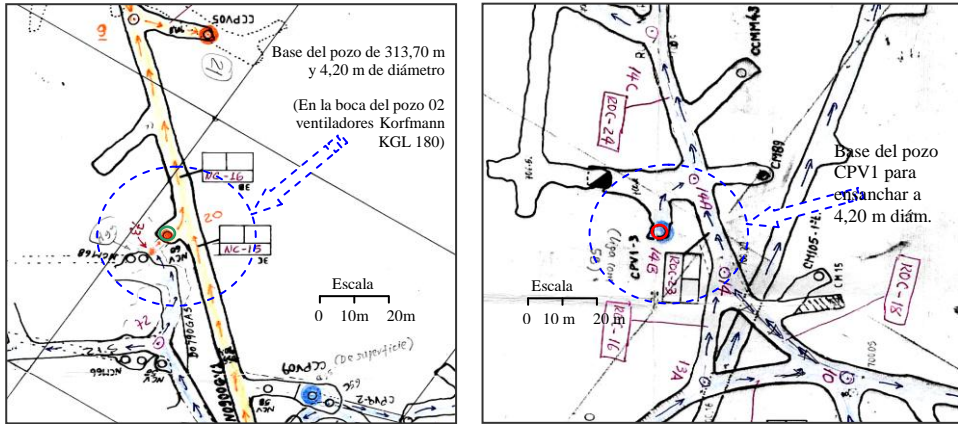


Figura 7.47 Localización del pozo Neves Norte, para la extracción del aire contaminado y del pozo CPV1 a ser ampliado en el área Corvo para la entrada del aire limpio

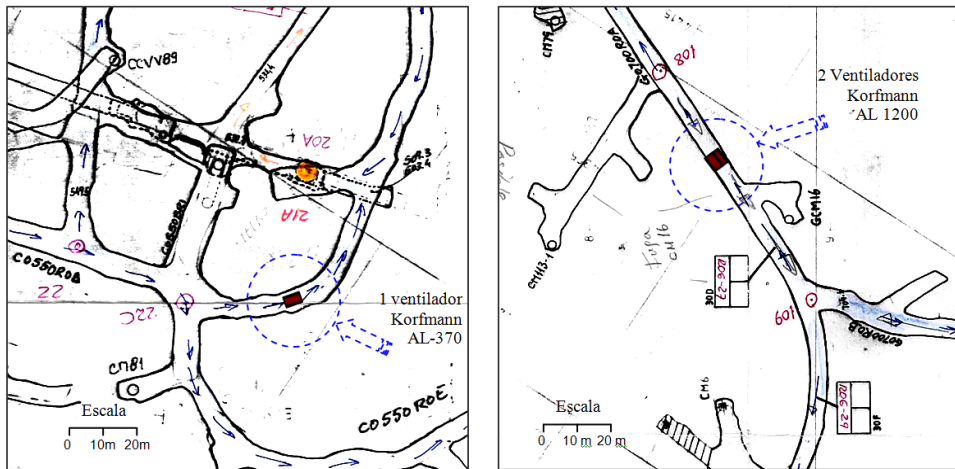


Figura 7.48 Localización de los ventiladores auxiliares en el área de Corvo y transporte de Graça

El balance del aire de la alternativa 2 se encuentra reflejado en el Cuadro 7.23, donde se puede observar que es posible obtener en el ambiente subterráneo un caudal total de  $836,72 \text{ m}^3/\text{s}$ , hecho que resuelve el problema del impacto ambiental.



Cuadro 7.23 Balance del aire con la alternativa 2, factor de fricción y resistencia de los sitios de entrada y salida de aire

Entrada				Salida			
Local	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Factor de fricción (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup> )	Sitio	Factor de fricción (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (Ns/m <sup>8</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
CPV3	151,67	0,0269	0,0376	CPV02	0,0102	0,00836	215,34
Pozo S. Bárbara	105,33		0,07100	CPV04	0,0102	0,02162	211,25
CPV6	106,24	0,0111	0,08767	CPV05	0,0102	0,08972	126,46
Rampa de Castro	133,20	0,0083	0,01311	CPV08	0,0102	0,08242	101,85
CPV1	267,87	0,0056	0,17741	CPV Neves N	0,0102	0,01691	181,82
CPV9	72,05	0,0056	0,04185				
Total	836,72			Total			836,72

Considerando un costo de 0,09 €/kW.h, la alternativa 2 puede proporcionar aire al ambiente subterráneo a un menor costo en 3,2% que las condiciones iniciales caracterizadas en julio de 2000 (Cuadro 7.24) con un ahorro de 66756,50 €/año, pudiéndose recuperar la inversión en 14 años, por lo tanto, esta alternativa es viable técnica y económicamente.

Cuadro 7. 24 Costo de operación unitario comparativo entre la Alternativa 2 y las condiciones de referencia caracterizadas en julio de 2000

Condición	Potencia instalada (kW)	Caudal total (m <sup>3</sup> /s)	Costo de operación (m <sup>3</sup> de ar/€)
Julio 2000	2046	647,00	12648,62
Alternativa 2	2563	836,72	13058,45

En conclusión, el impacto térmico, dinámico y volumétrico identificado en julio de 2000, puede ser atenuado a los niveles permisibles por la legislación portuguesa, con las siguientes acciones: la construcción de un pozo vertical de 4,2 m de diámetro y 313,70 m de longitud para la extracción del aire mediante dos ventiladores Korfmann KGL 180 (250 kW); con la ampliación del pozo CPV1 a 4,2 m de diámetro; con el cambio de los ventiladores Korfmann AL 1200 del acceso a CPV1 en el nivel de transporte Gracia; y finalmente con la instalación de un ventilador auxiliar Korfmann AL 12-370 en el antiguo OHV4 del área de Corvo, con un costo total de 961139,99 €.

Siendo la inversión en el orden de 961139,99 €, con un ahorro de 3,2% en los costos de ventilación, la inversión es recuperable en un plazo de 14 años.

### 7.3.11 Monitoreo y control en el aire de la atmósfera subterránea

El programa de monitoreo y control es extremadamente importante, en la medida en que permite verificar la efectividad de la medida correctiva a aplicar, de

modo que sea posible garantizar una calidad ambiental cónsona con los estándares y normas vigentes.

Para este fin es importante el uso de aparatos de alta precisión y confiabilidad, tales como los indicados en el Cuadro 3.48, recomendándose la realización de un programa para la red primaria y la secundaria (Cuadro 7.25).

Cuadro 7.25 Programa de monitoreo y control

Red primaria		Red secundaria (tajeos)	
Genérico	Detallado	Normal	Especial ( $T_s > 31\text{ °C}$ )
Mensual (10 a 20 de cada mes)	Enero, Abril, Julio, Octubre (10 a 20 de cada mes)	Cada 15 días (mitad del mes)	Diario (en operación normal)

El monitoreo genérico en la red primaria debe ser realizado en las estaciones correspondientes a los principales sitios de flujo del aire en las áreas de Corvo, Gracia y Neves. El detalle deberá realizarse en todas las áreas de las estaciones existentes.

En la red secundaria (accesos y tajeos), se deben monitorear los sitios donde existan operaciones de explotación.

La información obtenida debe ser procesada adecuadamente y ser comparada con los valores de la medida correctiva aplicada, para realizar acciones de reajuste, en caso que sea necesario.

#### 7.4. Impacto ambiental geotécnico

##### 7.4.1. Caracterización general

Para la aplicación de la metodología de evaluación de impacto ambiental geotécnico en el ambiente subterráneo de la mina Neves Corvo se consideraron dos áreas: la rampa CRAM03 con sección de 5 m x 5 m y los tajeos *Bench and Fill* del área Neves Norte. Como ya se indicó en la sección 7.2.2, las rocas son principalmente del grupo filita-cuarcita (PQ) y del complejo vulcano-sedimentario (CVS).

Según los ensayos realizados por el L.N.E.C. (Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil) en 1987, la resistencia a la compresión uniaxial (RCU) de las rocas del grupo PQ varía de 70 MPa a 100 MPa y del grupo CVS de 160 Mpa a 200 MPa, con densidad media de 3200 kg/m<sup>3</sup>. Cuando hay presencia esquistos negros fracturados y poca cantidad de sílice el valor es aproximadamente de 30 MPa.

El L.N.E.C. considera que el índice de RMR (*Rock Mass Ratio*) para estos tipos de rocas es de 70 y el coeficiente de Poisson de 0,20, encontrándose este valor entre 0,15 y 0,30, según Hoek y Brown, 1980 (J. Lobato 2001, mina Neves Corvo). Aplicando la ecuación (5.21) resulta un módulo de elasticidad o de Young que varía entre 31,60 y 40,00 MPa.

Para esta mina, las principales tensiones verticales y horizontales, utilizando las ecuaciones (5.16), con las modificaciones recomendadas por Golder 1994 (J. Lobato 2001) son:  $\sigma_1 = 0,032z$  ( $z$  es la profundidad en m),  $\sigma_1 = \sigma_2$  ( $\sigma_2$  es la tensión horizontal en el sentido Norte Sur),  $\sigma_3 = 0,5\sigma_1$  ( $\sigma_3$  es la tensión horizontal en el sentido Este Oeste).

### 7.4.2 Caracterización del área de rampa CRAM03 y tajeos Neves Norte

El índice RQD (*Rock Quality Designation*) del macizo rocoso del área de la rampa CRAM03, determinado con base en los sondeos realizados para la evaluación del yacimiento, se encuentran en el Anexo 7.10. El Cuadro 7.26 representa los valores de los parámetros determinados, utilizando la escala del Cuadro 5.3, que sirven de base para calcular el índice Q (*Tunneling Quality Index*).

Cuadro 7.26 Parámetros geotécnicos para la determinación del índice Q (J. Lobato 2001, Neves Corvo)

Roca/Parámetros	$J_n$	$J_r$	$J_a$	$J_w$	SRF
CVS	12	2	2	1	1
PQ	6	3	2	1	1

Con estos datos, con la información existente en las estaciones de convergencia (fig. 7.49) y aplicando la ecuación (5.2) para calcular Q, la ecuación (5.5) para calcular RMR y la ecuación (5.8) para calcular RMS, resulta la caracterización geotécnica para la zona de la rampa CRAM03 (Cuadro 7.27).

En términos generales el tipo de roca presente en la zona analizada es buena a muy buena, con presencia de algunas zonas de calificación de media a mala.

Los tajeos de Neves Norte se localizan entre las cotas 760 m y 823 m, el ancho de la explotación varía de 5 m x 5 m con *Drift and Fill* y de 16 m de ancho y altura máxima de 30 m con *Bench and Fill*. La fig. 7.50 muestra la secuencia de explotación proyectada.

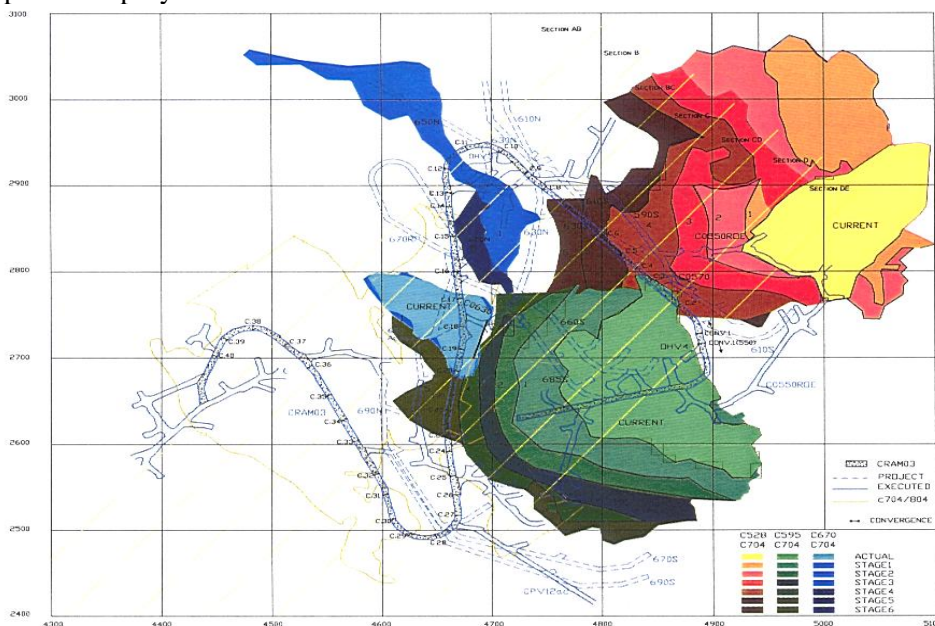


Figura 7.49 Rampa CRAM03 en relación a la localización de los tajeos adyacentes (J. Lobato 2001, Neves Corvo)

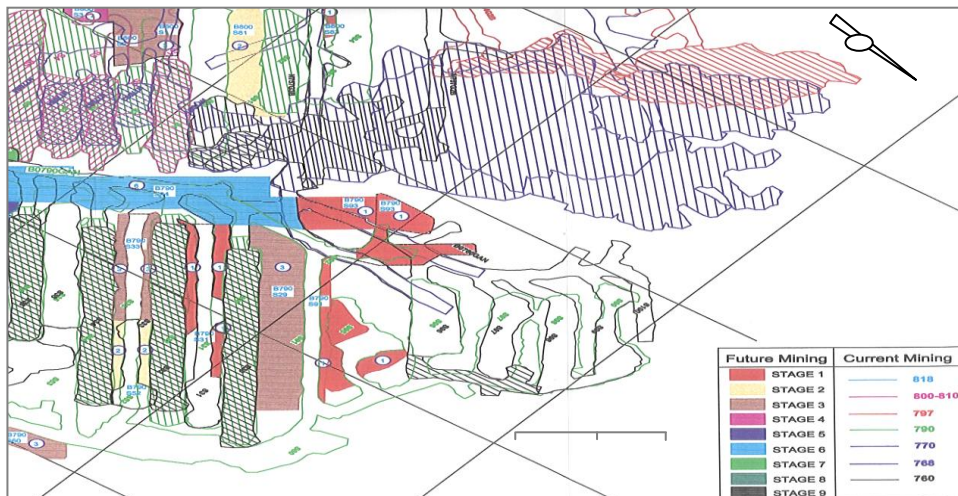


Figura 7.50 Tajeos de la zona Neves Norte (Estudios y Planeamiento, mina de Neves Corvo)

Cuadro 7.27 Características geotécnicas en las estaciones de convergencia de la rampa CRAM03 (basado en J. Lobato, mina de Neves Corvo)

Estación Convergencia	Cota	Tipo de roca	RQD	Q	RMR	ECU	$\Gamma_{ECU}$	RMS
550-C1	559	CVSsup	72	6,0	60,8	70	8	37,0
C2	566	CVSsup	43	3,6	55,4	100	10	45,4
C4	573	CVSsup	85	7,1	62,6	60	6	33,9
C6	579	PQ	28	7,0	72,2	170	18	75,5
C7	586	PQ	71	17,8	73,6	170	18	92,1
C9	592	PQ	81	20,3	73,5	170	18	94,5
C11	602	PQ	80	20,0	73,5	170	18	94,3
C12	609	PQ	80	20,0	73,5	170	18	94,3
C15	618	PQ	52	20,0	68,9	120	12	94,3
C17	625	PQ	46	13,0	67,6	120	12	68,3
C20	636	PQ	40	11,5	66,2	50	6	66,8
C24	645	CVSinf	30	10,0	51,6	70	8	30,1
C27	655	CVSinf	30	2,5	51,6	70	8	30,5
C28	661	CVSinf	30	2,5	51,6	70	8	30,5
C31	666	CVSinf	30	2,5	51,6	70	8	30,5
C32	673	CVSinf	30	2,5	51,6	70	8	30,5
C34	683	PQ	90	22,5	74,7	170	18	96,4
C36	687	PQ	70	17,5	72,1	100	10	62,1
C37	691	PQ	80	20,0	73,5	120	12	73,7

La roca huésped de los tajeos de Neves Norte son principalmente de dos tipos: tufo volcánicos con mineral fracturado y sulfuros (Mf) y sulfuros masivos (Sm). Estudios realizados por Golder en 1994 (*Bench and Fill Mining of Neves Orebody*) indican que el ECU de la roca intacta es aproximadamente de 160 Mpa, alcanzando 210 Mpa en zonas silíceas, de acuerdo con los estudios de laboratorio

del L.N.E.C. (130 MPa a 220 MPa), el índice Q es 9, el módulo de elasticidad (Young) 20000 MPa, el coeficiente de Poisson 0,2 y el valor promedio de RMR calculado con la ecuación (2.180) es de 65,1.

La orientación del conjunto de discontinuidades obtenidas mediante el mapeo *in situ* (Cuadro 7.28) indica que el conjunto 1 es aproximadamente paralelo a los tajeos, por lo que afecta fuertemente la estabilidad, el conjunto 2 es perpendicular al conjunto 1 y afecta el pilar al final del tajeado y, mientras la esquistosidad o las juntas sub-horizontales no afectan la estabilidad del pilar.

Cuadro 7.28 Resumen del mapeo geotécnico *in situ*  
(Departamento de Mecánica de rocas mina Neves Corvo)

Grupo de Diaclasas	Inclinación	Rumbo de la inclinación	Abertura media (m)	Rugosidad	Textura	Relleno
Familia 1A	84°	145°	0.20	Ondulado	Rugosa	Alterado
Familia 1b	88°	182°			Rugosa	Alterado
Familia 2	88°	286°	0.50	Ondulado	Rugosa	Alterado
Esquistosidad 3A	38°	028°	0.10	Ondulado	Lisa	Alterado
Esquistosidad 3b	40°	320°			Lisa	Alterado

### 7.4.3 Daño al macizo rocoso provocado por la utilización de explosivos

Las informaciones disponibles servirán para caracterizar la roca huésped de la rampa CRAM03 (Cuadro 7.29) y determinar los posibles daños provocados por el uso de explosivos.

Cuadro 7.29 Daño del macizo rocoso provocado por la utilización de explosivos en la rampa CRAM03

Clase de roca	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidad sísmica (m/s)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Espesor de la roca fracturada (m)
PQ	3200	4000 - 6000	70 - 100	7 - 10	1,15 – 1,71
CVS	3200	4000 - 6000	160 - 200	16 - 20	0,33 – 0,56

Con un consumo específico de carga explosiva de 2,5 kg/m<sup>3</sup>, para la sección de 25 m<sup>2</sup>, avance de 3 m, para el tipo de roca estudiada, es preciso perforar 53 barrenos, con una carga total de 187,5 kg de explosivo y 14,20 kg/retardador, por lo tanto, aplicando la ecuación (5.34) con coeficientes de Johnson a= 0,085, b= 0,73 y c= -1,87, resulta un valor promedio de distancia de 5,12 m para el tipo de roca PQ y de 2,74 m para el tipo de roca CVS con valor promedio para ambos tipos de rocas de 3,93 m en la zona del macizo circundante a la abertura de la rampa CRAM03.

### 7.4.4. Identificación del impacto ambiental geotécnico

#### 7.4.4.1. Estándar de referencia

Aplicando la ecuación (5.37) para los tipos de roca huésped de la rampa CRAM03, se obtiene la curva límite del riesgo ambiental geotécnico (fig. 7. 51). Con el uso de la ecuación (5.3) el diámetro equivalente (D<sub>e</sub>) para la rampa es de

2,78 y para los tajeos de Neves Norte de 8,89. Estos resultados indican que no existen riesgos ambientales significativos en la rampa CRAM03, sin embargo, en los tajeos el riesgo es eminente.

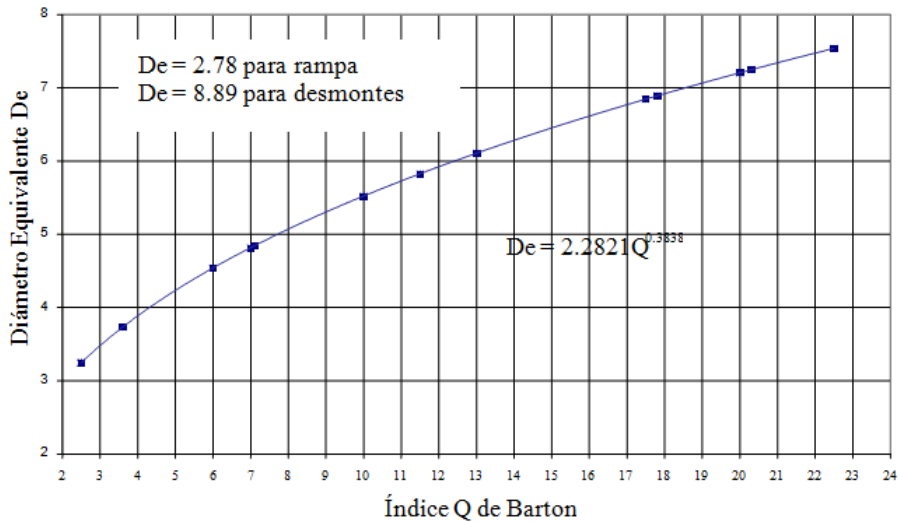


Figura 7.51 Curva límite del riesgo ambiental geotécnico para la rampa CRAM03

Con la finalidad de obtener una base sólida que constituya el *estándar de referencia*, se considera el histórico del mapeo geotécnico de la rampa CRAM03, realizado por el departamento de mecánica de rocas y de producción de la mina de Neves Corvo, desde 1992 (Cuadro 7.30). Además, basado en el Cuadro 7.27 y 7.30, se determinaron los indicadores para la evaluación del nivel de impacto ambiental (Cuadro 7.31).

Cuadro 7.30 Histórico de daños registrados y sistemas de soportes en la rampa CRAM03 (basado en J. Lobato, Neves Corvo)

Estación Conv.	Tipo de roca	1992-94-96	Rehabilitación 1996	Evaluación 2000	Total Conv. (mm)	Variación Tensión (MPa) 1990-2000	Nivel de daños
550-C1	CVSsup		Hormigón proyectado y perno con resina (25 mm)	Caída de bloques de esquisto	26	-3,6	D3
C2	CVSsup		Hormigón proyectado y perno con resina (25 mm)	Hormigón proyectado con algún estallido (techo y hastiales)	NA	0,2	D2
C4	CVSsup		Hormigón proyectado y perno con resina (25 mm)	Daños del hormigón proyectado en la parte de la esquina superior izquierda	10	-4,2	D2
C6	PQ		Hormigón proyectado y perno con resina (25 mm)	Algún estallido de hormigón proyectado	5	4,9	D1
C7	PQ		Perno con resina (25 mm)	Masivo y competente (pequeños bloques)	3	0,4	Nada
C9	PQ		Perno con resina (25 mm)	Terreno masivo y competente	4	1,9	Nada
C11	PQ		Perno con resina (25 mm)	Terreno competente	2	2,5	Nada
C12	PQ		Perno con resina (25 mm)	Terreno muy competente	4	0,5	Nada
C15	PQ	Juntas forman bloques cuñas con orientación no favorable	Perno con resina (25 mm)	Humedad en la falla sin relleno y roca poco competente	NA	2,0	D1
C17	PQ		Perno con resina (25 mm)	Irregularidad del techo causado por fallas en el terreno	4	7,0	D1
C20	PQ	Fracturación del hormigón proyectado hasta exposición roca(92) fallas profundas en el techo(94)	Hormigón proyectado y perno con resina (25 mm)	Fallas en el hormigón proyectado, daños en el techo y esquinas superiores	20	3,7	D2
C24	CVSinf	Falla muy húmeda con baja cohesión. Material dejado por agua	Hormigón proyectado y anclaje cable	Terreno poco competente	10	0,5	Nada
C27	CVSinf	Terreno pobre debido a la esquistosidad de la roca	Perno con resina (25 mm)	Caída de esquistos negros y bloques en el hastial derecho	6	0,4	D1
C28	CVSinf	Terreno pobre debido a la esquistosidad de la roca	Hormigón proyectado	Rotura de hormigón proyectado exteriormente	8	2,5	Nada
C31	CVSinf	Hormigón proyectado completamente fracturado en el techo y esquinas (92) y fracturación de la roca (95)	Hormigón proyectado	Rotura de hormigón proyectado exteriormente	9	5,0	Nada
C32	CVSinf		Hormigón proyectado	Daños en las esquinas superiores, evidencia de rotura del hormigón proyectado	12	0,2	D2
C34	PQ	Esquistosidad con poca resistencia en los planos de contacto		Esquistosidad tenue (40°)	3	0,8	Nada
C36	PQ	Techo no uniforme presencia de material dejado por agua	Anclaje cables	Bloques de terreno entre dos fallas	2	10,6	Nada
C37	PQ			Terreno competente	3	8,8	Nada

D1: Pequeños daños

D2: Daño medio

D3: Daños severos

Cuadro 7.31 Indicadores para la identificación del nivel de impacto ambiental geotécnico

Estación Conv.	550-C1	C2	C4	C6	C7	C9	C11	C12	C15	C17	C20	C24	C27	C28	C31	C32	C34	C36	C37
$\Delta\sigma$ (%)	42	51	4	1	25	13	2	3	19	37	11	3	14	11	2	28	-25	1	-17
$\Delta\sigma$ /RMS	24	23	2	0	6	3	0	1	6	11	7	2	8	6	1	16	-5	0	-5
$\Delta\sigma$ /ECU	12,6	10,6	1,3	0,1	2,9	1,5	0,2	0,3	3,1	5,8	4,0	0,7	3,6	2,7	0,6	7,0	-2,5	0,2	-3,0

Existiendo en la zona de la rampa CRAM03 dos tipos de rocas con comportamiento geotécnico diferente, la matriz base de evaluación del impacto ambiental geotécnico, considerando este hecho, es la que se muestra en el Cuadro 7.32.

Cuadro 7.32 Matriz base para la evaluación del impacto ambiental geotécnico en la rampa CRAM03

Nivel de impacto ambiental	Tipo de roca							
	CVS				PQ			
	$\delta$ (mm)	$\Delta\sigma$ (%)	$\Delta\sigma$ /RMS	$\Delta\sigma$ /ECU	$\delta$ (mm)	$\Delta\sigma$ (%)	$\Delta\sigma$ /RMS	$\Delta\sigma$ /ECU
Leve ▽	$6 \leq \delta < 10$	$8 \leq \Delta\sigma < 14$	$5 \leq \Delta\sigma/\text{RMS} < 10$	$2.5 \leq \Delta\sigma/\text{ECU} < 4$	$3 \leq \delta < 5$	$17 \leq \Delta\sigma < 25$	$6 \leq \Delta\sigma/\text{RMS} < 12$	$2 \leq \Delta\sigma/\text{ECU} < 3$
Moderado ⊗	$10 \leq \delta < 19$	$14 \leq \Delta\sigma < 51$	$10 \leq \Delta\sigma/\text{RMS} < 23$	$4 \leq \Delta\sigma/\text{ECU} < 10$	$5 \leq \delta < 13$	$25 \leq \Delta\sigma < 37$	$12 \leq \Delta\sigma/\text{RMS} < 24$	$3 \leq \Delta\sigma/\text{ECU} < 5$
Alto ◆	$\delta \geq 19$	$\Delta\sigma \geq 51$	$\Delta\sigma/\text{RMS} \geq 23$	$\Delta\sigma/\text{ECU} \geq 10$	$\delta \geq 13$	$\Delta\sigma \geq 37$	$\Delta\sigma/\text{RMS} \geq 24$	$\Delta\sigma/\text{ECU} \geq 5$

En los tajos de Neves Norte se consideran como base las observaciones realizadas en zonas accesibles por el departamento de mecánica de rocas de la mina de Neves Corvo (Cuadro 7. 33).

Cuadro 7.33 Observación de daños en los pilares de *Bench and Fill* del área de Neves Norte (Departamento de Mecánica de Rocas de Neves Corvo, 2001)

Localiz. Pilar	Tipo Pilar	Cota (m)	Material	Longitud L (m)	Altura H (m)	L/H	Carga/ ECU	ECU (MPa)	Resist. Pilar (MPa)	Tensión Pilar (MPa)	FS	Daños
S83/S84	Entrada	790	Sm	4	5	0,80	0,29	200	59	45	1,3	D1
S83/S84	Entrada	790	Sm	5	5	1,00	0,35	200	70	40	1,7	Nada
S81/S82	Entrada	810	Sm	5	5	1,00	0,35	200	70	40	1,7	D1
S81/S80	Entrada	810	Sm	5	5	1,00	0,35	200	70	35	2,0	Nada
S80/S1	Entrada	810	Sm	5	5	1,00	0,35	200	70	35	2,0	Nada
S1/S2	Entrada	810	Sm	10	5	2,00	0,58	200	117	35	3,3	Nada
S2/S3	Entrada	810	Sm	3	5	0,60	0,24	200	47	35	1,4	Nada
S3/S4	Entrada	810	Sm	5	5	1,00	0,35	200	70	35	2,0	Nada
S61/S43	Entrada	790	Mf	3	5	0,60	0,24	160	38	38	1,0	D3
S61/S43	Cost.	760/790	Mf	5	18	0,28	0,13	160	21	38	0,6	D3
S42/S62	Entrada	790	Mf	4	5	0,80	0,29	160	47	45	1,0	D3
S43/S62	Entrada	760	Mf	6	5	1,20	0,40	160	64	42	1,5	D1
S96/S97	Entrada	760	Mf	10	5	2,00	0,58	160	94	28	3,3	D1
S97/S98	Entrada	760	Mf	4	5	0,80	0,29	160	47	35	1,3	D2
S97/S98	Entrada	760	Mf	3	5	0,60	0,24	160	38	38	1,0	D3
S98/S99	Entrada	760	Mf	2	5	0,40	0,17	160	28	35	0,8	D3
S98/S99	Cost.	760/775	Mf	5	15	0,33	0,15	160	24	25	1,0	D3
S99/S100	Entrada	760	Mf	3	15	0,20	0,10	160	17	35	0,5	D3

D1: Pequeños daños

D2: Daños medios

D3: Daños severos



En el área de Neves Norte seleccionada para esta aplicación, existen también dos tipos de terreno, habiendo sido elaborada la matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental para estos dos tipos de rocas (Cuadro 7.34).

Cuadro 7.34 Matriz base para la evaluación del impacto ambiental geotécnico en los tajeos de Neves Norte basado en el factor de seguridad, FS

Nivel de impacto ambiental		Tipo de roca	
		Sm	Mf
Leve	∇	$3 \geq FS > 2$	$3 \geq FS > 1,5$
Moderado	⊗	$2 \geq FS > 1,5$	$1,5 \geq FS > 1,0$
Alto	◆	$FS \leq 1,5$	$FS \leq 1,0$

#### 7.4.4.2 Identificación del impacto ambiental geotécnico

Para la aplicación de la metodología propuesta en la rampa CRAM03 se consideran los resultados de la modelación numérica con el programa NFLOD, realizados por J. Lobato (Neves Corvo, 2001), de conformidad con los planes de largo plazo de esta mina, en particular los correspondientes a los años 2001 y 2003, obteniéndose la matriz de impacto ambiental presentada en el Cuadro 7.35, determinada en función del indicador  $\Delta\sigma/RMS$ .

Cuadro 7.35 Matriz de impacto ambiental geotécnico en la rampa CRAM03

Estación Convergencia	Tipo de Roca	Previsiones para el año 2001		Previsiones para el año 2003	
		$\Delta\sigma/RMS$	Niveles de Impacto	$\Delta\sigma/RMS$	Niveles de Impacto
550-C1	CVSsup	-5		-5	
C2	CVSsup	0		0	
C4	CVSsup	-5		-5	
C6	PQ	9	∇	-2	
C7	PQ	4		5	
C9	PQ	9	∇	10	∇
C11	PQ	9	∇	11	∇
C12	PQ	5	∇	5	∇
C15	PQ	10	⊗	14	⊗
C17	PQ	11	∇	3	
C20	PQ	6	∇	4	
C24	CVSinf	1		1	
C27	CVSinf	1		1	
C28	CVSinf	3		5	
C31	CVSinf	6	∇	9	∇
C32	CVSinf	1		3	
C34	PQ	10	∇	11	∇
C36	PQ	28	◆	40	◆
C37	PQ	30	◆	37	◆

Para el tajeo Neves Norte se tomó también como referencia de aplicación los resultados de la modelación con el mismo programa para los mismos años, obteniéndose los resultados de la identificación del impacto ambiental en el Cuadro 7.36.

Cuadro 7.36 Matriz de impacto ambiental geotécnico en los tajeos Neves Norte en sulfuros masivos (Sm)

Avance Explotación	Tajeos de explotación	Pilares de entrada en el <i>Bench and Fill</i>				Pilares secundarios en el <i>Bench and Fill</i>			
		Pilar Resist. (Mpa)	Pilar Tensión (Mpa)	FS	Nivel de impacto ambiental	Pilar Resist. (Mpa)	Pilar Tensión (Mpa)	FS	Nivel del impacto ambiental
2001	S52+S10+S81	70	35	2,0	▽	70	35	2,0	▽
2003	S33+S29+S60D+S42+S1	70	45	1,6	⊗	70	35	2,0	No existe

Las matrices de impacto ambiental geotécnico llevan a concluir que, por la influencia de los avances de los tajeos en las zonas próximas a la rampa CRAM03, en los años 2001 a 2003, de un total de 19 estaciones, no existió ningún impacto ambiental en un total de 8 a 11 (50%), respectivamente. Habría así, un nivel de impacto ambiental geotécnico *leve* en 5 a 8 estaciones (33%), respectivamente, un impacto *moderado* en una estación (C15) y *alto* en las dos estaciones (C36, C37) que representan el 17%.

En los frentes de explotación de Neves Norte en el año de referencia 2001 existiría un riesgo ambiental *leve* en los tajeos S52, S10 y S81 y en el año 2003 un impacto ambiental *moderado* en los tajeos S33, S29, S60D, S42 y S1.

**7.4.5 Medidas correctivas para la atenuación del riesgo ambiental geotécnico**

La aplicación de la técnica de dimensionamiento de sistemas de soporte (sección 5.6.3) para zonas donde el macizo rocoso, circundante a las excavaciones subterráneas, presentan riesgo ambiental geotécnico se realiza con base en el índice Q (determinado en base al índice RMR) (Cuadro 7.37) y la dimensión equivalente  $D_e$ .

Cuadro 7.37 Índice para la selección del sistema de soporte para mitigar el impacto ambiental geotécnico identificado

Índices/Local	Rampa CRAM03			Tajeos Neves Norte
	C15	C36	C37	S33+S29+S60D+S42+S1
RMR	68,9	72,1	73,5	65,1
Q	20,0	17,5	20,0	9,0
$D_e$	2,80	2,80	2,80	4,60

Para seleccionar el tipo de soporte se utilizó el programa GDA (*Geomechanical Design Analysis*) que se basa en los modelos geotécnicos de Barton y Grimstad, en los valores del índice Q (de las áreas de rampa CRAM03 y tajeos de Neves Norte) y con la dimensión equivalente de las aberturas, calculadas con la sección de la rampa que es de 5 m y de los tajeos 16 m, utilizando el valor del factor ESR de 1,8 (Cuadro 5.4).

El programa GDA es un programa que examina la estabilidad de las aberturas subterráneas, en particular para el diseño de túneles, galerías, rampas y tajeos de minas subterráneas.

El GDA incluye un análisis relativo a la clasificación del macizo rocoso, utilizando el RMR, GSI, Q y Q'; la determinación de las propiedades del macizo rocoso para la modelación numérica; valor, soporte y análisis de sensibilidad del RMR y valores de Q; el análisis y dimensionamiento del sistema de soporte por cables (*cabolebolting*); el análisis de las tensiones en galerías y tajeos de varias formas y en 2-D; el análisis de la sensibilidad de las tensiones debido a la secuencia de las aberturas considerando la forma, tamaño y orientación; el análisis tetraedral de las cuñas en túneles, galerías, rampas, intersecciones y tajeos en 3-D; el análisis de la sensibilidad de la estabilidad de las cuñas en términos de forma, tamaño, orientación de galerías y túneles, intersección y tajeos; y el análisis del sistema de soporte de las cuñas mediante pernos de roca y estructuras.

Los mecanismos de inestabilidad en aberturas subterráneas se encuentran relacionados con la discontinuidad estructural (fallas) de los macizos rocosos que pueden formar bloques en el techo y hastiales de la excavación (Hoek & Brown, 1980). El módulo del programa relacionado con este aspecto, analiza la dimensión de la abertura en relación con la calidad de la roca, cuyo resultado es útil para la selección del tipo de soporte.

El resultado de la simulación para la rampa CRAM03 (fig. 7.52), indica que no es necesario aplicar ningún tipo de soporte, pero para las zonas donde existe riesgo de derrumbe de rocas es necesario aplicar anclajes con pernos de roca puntuales de 2,4 m de longitud y 20 mm de diámetro y, para los *tajeos*, aplicar anclajes sistemáticos con pernos de roca de 3,5 m de longitud y 20 mm de diámetro y espaciamiento de 2,5 m (Cuadro 5.18), con el uso ocasional de redes metálicas.

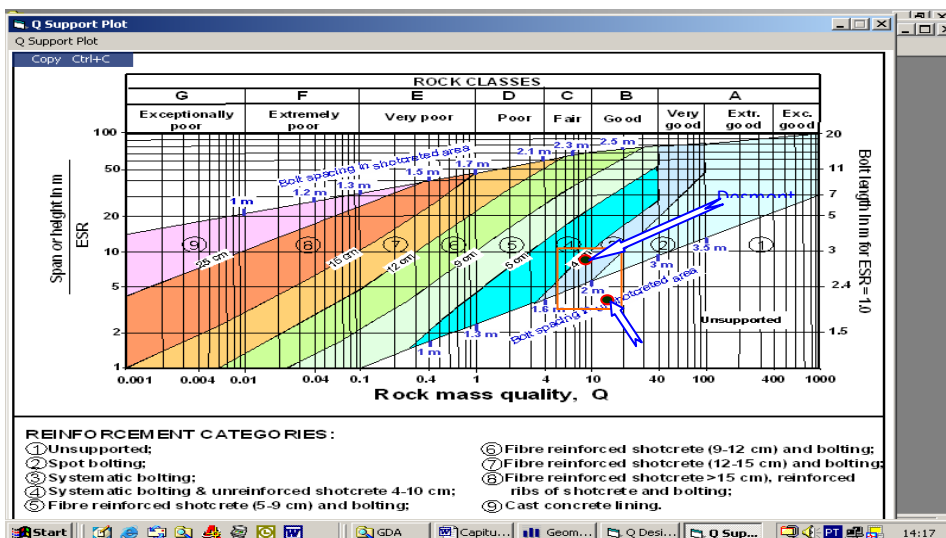


Figura 7.52 Determinación de la medida correctiva con el ábaco de Barton y Grimstad

#### ***7.4.6. Monitoreo y control geotécnico***

El monitoreo y control geotécnico deberá realizarse de forma constante y permanente, mediante la metodología y aparatos indicados en la sección 3.7 del capítulo 3, de la segunda parte del libro, con el objeto de obtener una calidad ambiental aceptable con los estándares de referencia preestablecidos.

## Capítulo 8

### APLICACIÓN EN LA MINA PANASQUEIRA

---

#### 8.1 Introducción

La aplicación de la metodología de la Ingeniería Ambiental Subterránea (IAS) en la mina Panasqueira, propuesta en el capítulo 2 de la primera parte (sección 2.5 y fig. 2.14) y desarrollada en la segunda parte de este trabajo, se realizó en los tres dominios ambientales: en el aire de la atmósfera subterránea, en el agua subterránea y en el macizo rocoso.

La aplicación del IAS en la mina Panasqueira, en el aspecto dinámico y volumétrico se realizó utilizando la metodología y modelos matemáticos desarrollados en el punto 3.4 y fig. 3.47, en relación a los gases tóxicos del punto 3.2 y fig. 3.31, respecto a los polvos del punto 3.3 y fig. 3.39, lo relativo a los ruidos del 3.7 y figura 3.76, con respecto al agua subterránea del Capítulo 4 y fig. 4.19 y por último, en cuanto a las rocas del Capítulo 3 y fig. 5.20.

La aplicación en el aire de la atmósfera subterránea está solamente en las alteraciones ambientales provocadas en el aspecto dinámico, volumétrico, polvos, gases y ruido. No se consideró el aspecto térmico, en la medida en que esta mina es poco profunda por lo que no presenta ningún riesgo ambiental térmico.

En el agua subterránea la aplicación se realizó en relación a la alteración de las condiciones naturales de cantidad y calidad.

En el ambiente rocoso, en lo relativo a los daños en el macizo rocoso circundante, provocados por las aberturas por la acción de las detonaciones con explosivo en los tajeos para la explotación.

#### 8.2 Definición del ámbito de acción

##### 8.2.1 Localización geográfica y clima

La mina Panasqueira, propiedad de la empresa Beralt Tin & Wolfram (Portugal) S.A. produce wolframio a un ritmo promedio de 320000 toneladas del mineral y 1330 toneladas de  $WO_3$  anuales. Está localizada en la vertiente sur de la cordillera montañosa de *Serra da Estrela* a una altitud cercana a los 700 metros, en la localidad de Barroca Grande, a 60 kilómetros al este de Coimbra y a 250 kilómetros al noroeste de Lisboa (fig. 8.1 izquierda).

El clima es típico de la región montañosa de Beiras y de la península ibérica con temperaturas medias bajas de 7,5 °C (fig. 3.53 derecha) (Naique, R., 2001).

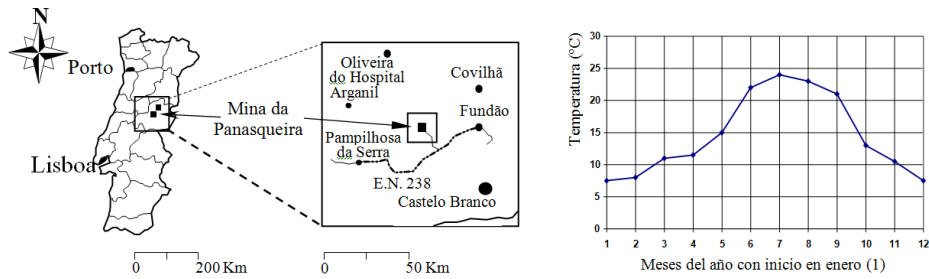


Figura 8.1 Localización geográfica y variación media mensual de la temperatura en la mina Panasqueira

### 8.2.2. Macizo rocoso y yacimiento mineral

El macizo rocoso está constituido fundamentalmente por esquistos con diferentes grados de metamorfismo, originados por una intrusión granítica subyacente y por vetas cuarzosas donde se ubican mineralizaciones útiles (fig. 8.2).

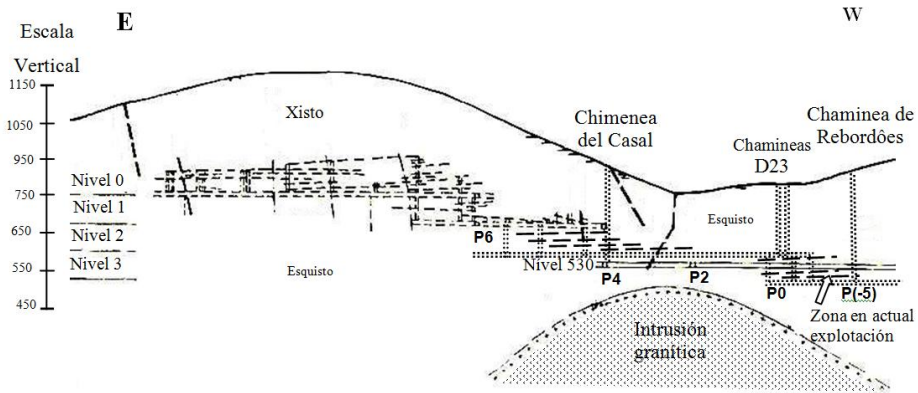


Figura 8.2 Corte geológico en zonas de exploración en el yacimiento Panasqueira

La zona mineralizada consiste de vetas cuarzosas, sub-horizontales, suprayacentes y rellenan las fracturas que ocurren en las rocas esquistosas (fig. 8.33), con anchuras media de 30 a 40 cm, siendo el principal mineral, objeto de explotación, la wolframita. Más allá de este mineral ocurre una gran variedad de otros minerales tales como: casiterita, calcopirita, blenda, topacio, apatita, fluorita, mica y marcasita.

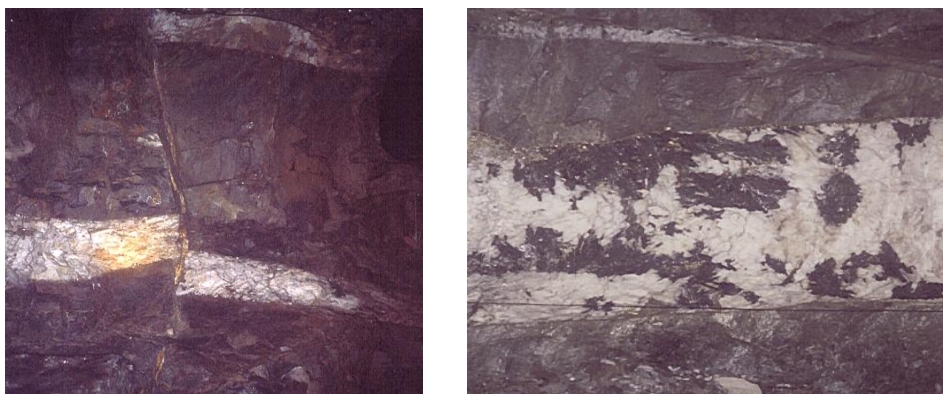


Figura 8.3 Vetas de cuarzo con intercalaciones de wolframita en esquistos (roca encajante)

El mineral producido tiene un tenor promedio de 4,2 kg  $WO_3$ /tonelada (31,04 kg/m<sup>2</sup>, extraído actualmente del nivel 3, con cierta posibilidad de ampliarse en el futuro al nivel 4.

### 8.2.3 Ambiente subterráneo

Las aberturas realizadas por el hombre en el macizo rocoso (esquistos) con fines de explotación del wolframio (fig. 8.4), constituyen el ambiente subterráneo donde existe una interacción del aire, agua subterránea y macizo rocoso.

Actualmente el acceso principal se realiza por la rampa Rebordões hasta el nivel 1, a partir de este nivel se accede al nivel 2 mediante la rampa D13 y finalmente entre el nivel 2 y el nivel 3 por las rampas L2/L3, D15, D19 y D23.

Las aberturas subterráneas de los niveles 1, 2, 3 y 530, están comunicadas a través de un sistema de chimeneas verticales de ventilación y del mineral, construidas con el sistema *raise borer*, cuyas alturas varían de 30 a 60 metros y diámetro de 1,82 metros.

Para el proceso de chancado o trituración primaria del mineral, existe un equipo que opera en cámaras de trituración, donde se transporta mediante un sistema de correas y po el inclinado de Santa Bárbara. Esta cámara está localizada en la unión del pozo relacionado con el nivel 530; por otra parte existe una estación de bombeo del agua subterránea cerca de 10 metros por debajo del nivel 3 en la zona norte.

También existen aberturas subterráneas para el polvorín, para talleres de mantenimiento de equipos, entre otros.

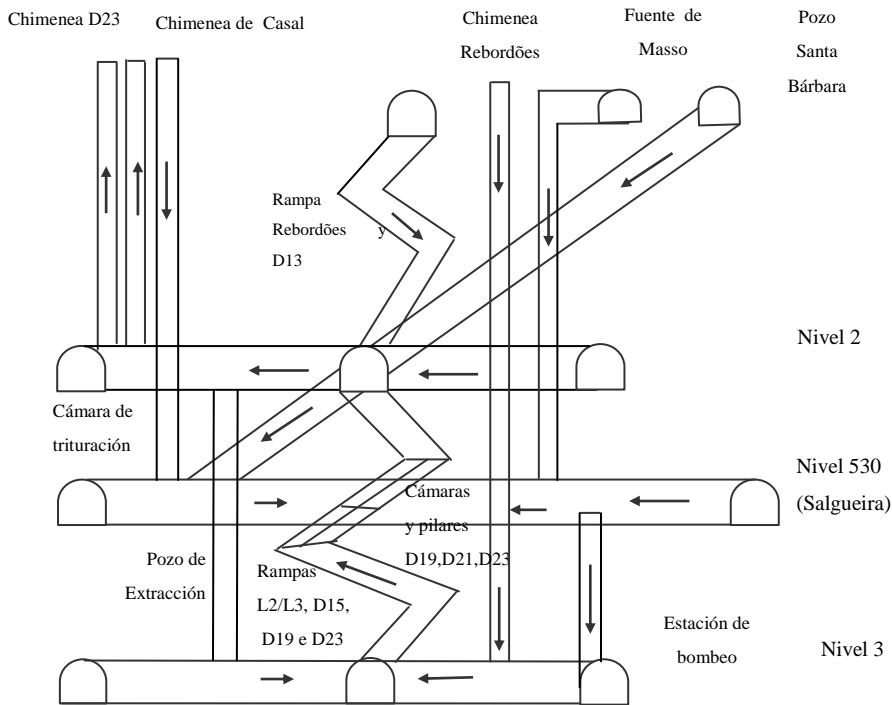


Figura 8.4 Esquema general de las aberturas subterráneas en la mina Panasqueira

Las áreas de interés para el presente estudio son aquellas donde se verifica la presencia del hombre, como son las del nivel 2 y nivel 3, siendo los de mayor interés los frentes de explotación (tajeos) concentrados entre estos dos niveles.

Las aberturas subterráneas en los frentes de explotación son generadas por el proceso productivo realizado mediante el método de cámaras y pilares. Las cámaras son de 5 m de largo y 2,2 m de altura, abiertas con jumbos electrohidráulicos y LHDs diesel, con pilares iniciales de 11 m x 11 m, que se cortan en tres fases hasta lograr pilares de 3 m x 3 m (fig. 8.5).

A los tajeos en la explotación actual se accede por las rampas D19 y D23, denominados AW30, AW31, AW32, AW33, AW34, AW35 y AW36, que están localizados entre el nivel 3 y el nivel 2.

El mineral es removido y transportado hasta las chimeneas verticales (Rs) con LHDs diesel. Estas chimeneas se utilizan como silos, por las cuales el mineral descende hasta las galerías (Ps y Ds) desde el nivel 3 y por acción de la gravedad. En este nivel (por la parte inferior de las chimeneas del mineral) el mineral es descargado con vagones (locomotora *trolley*) y se transporta hasta el pozo de extracción donde, mediante un winche eléctrico se extrae la jaula al nivel 2. En este último nivel el mineral se transporta mediante locomotoras de la batería de silos (P4) que alimentan la cámara de trituración. Finalmente, realizada la trituración primaria, se extrae por la cinta transportadora instalada en el pozo Santa Bárbara hasta la superficie donde se procesa y lava.



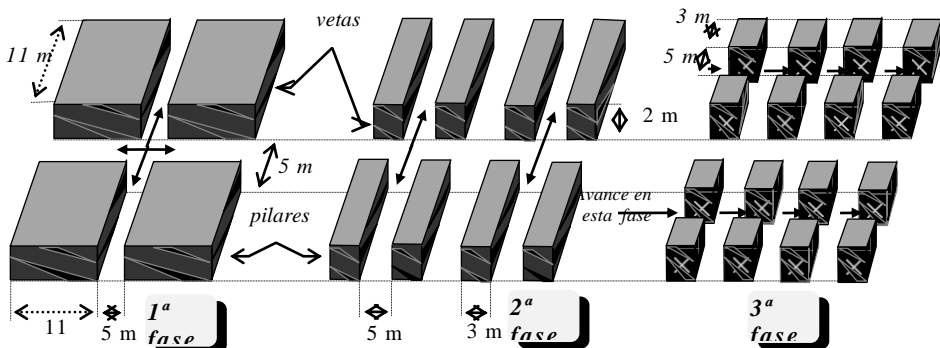


Figura 8.5 Ambiente subterráneo en los frentes de explotación de la mina Panasqueira (Bernardo, P. A. M., 1995)

### 8.3. Evaluación del impacto ambiental en la atmósfera subterránea

#### 8.3.1. Caracterización de la atmósfera subterránea

##### 8.3.1.1. Identificación preliminar de las corrientes de aire

El aire que circula por las aberturas subterráneas de la mina Panasqueira es de origen mixto, o sea de sistema natural y forzado (2 ventiladores de 80 hp cada uno).

Al inicio de los estudios (diciembre 2000), los dos ventiladores trabajaban como extractores a través de la chimenea Casal, con entradas de aire exterior por el pozo Santa Bárbara, por la rampa Rebordões, por la chimenea D1.P2xS (Fuente Masso), por la chimenea L0/L2(P4), por la chimenea Rebordões, por la galería Salgueira y por la chimenea D23W. Por la chimenea D23E existía salida de aire, no existiendo ningún ventilador instalado.

Antes de las mediciones de los parámetros térmicos, dinámicos y volumétricos, se procedió en gabinete a predefinir la dirección del aire, los sitios y nodos de todas las aberturas subterráneas, con base en los mapas existentes e información del área de ventilación de la mina. La fig. 8.6 ilustra, como referencia, las acciones realizadas en el área del pozo de extracción del nivel 2.

Las estaciones de medición fueron definidas en zonas adecuadas de cada trecho y aproximadamente en la mitad de su longitud.

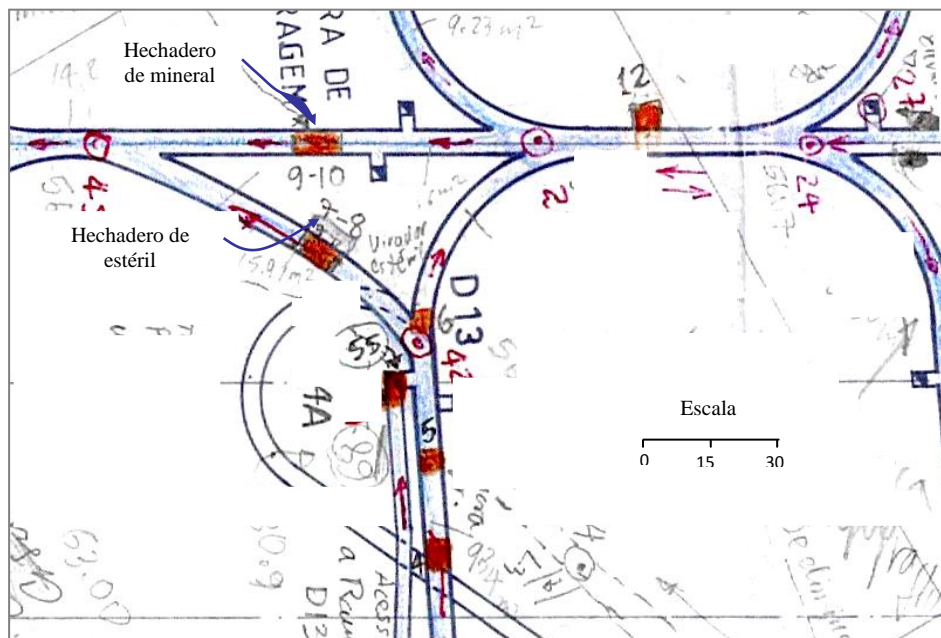


Figura 8.6 Ejemplo de predefinición de la dirección de la corriente de aire, sitios y nodos en el área de los volquetes del mineral y del estéril (galería P4 y D13) del nivel 2.

### 8.3.1.2. Instrumentos utilizados en la metodología de medición

Los instrumentos utilizados fueron los del Laboratorio de Ingeniería del Ambiente Subterráneo L.E.A.S de la Sección de Minas del Instituto Superior Técnico de la Universidad Técnica de Lisboa y fueron los siguientes:

- Un termo/higrómetro Casella London Ltd de temperatura de bulbo seco y húmedo;
- Un anemómetro IRFLOW LCA 6000 digital de lectura discreta para medición de la velocidad del aire.
- Un barómetro AIRFLOW digital de lectura continua para medición de la presión barométrica;
- Una mira topográfica y cinta métrica de acero de 5 metros para mediciones de la sección;
- Una bomba manual de polvo de aluminio para identificar la dirección de la corriente de aire de bajas velocidades;
- Una bomba AUGER GAS TESTER II de MAS para a medición de los gases CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S;
- Tubos detectores PR 820 y PR 822 para CO, PR 817 para CO<sub>2</sub>, PR 803 para SO<sub>2</sub> y PR 826 para H<sub>2</sub>S;
- Un detector de NO<sub>2</sub> de 0 a 100 ppm con sensor electroquímico G816-N;
- Un detector de NO de 0 a 1000 ppm con sensor electroquímico G818;
- Un colector de polvo de alto volumen CAV-A/HF con caudal regulable de 40 a 90 m<sup>3</sup>/h equipado con filtro rectangular;

- Filtros para CAV-A/HF de tipo Wharman GF/A;
- Una calculadora portátil.

Las temperaturas y velocidades del aire fueron medidas en 5 puntos de la sección (fig. 8.7 izquierda), registrándose el valor promedio de las cinco lecturas.

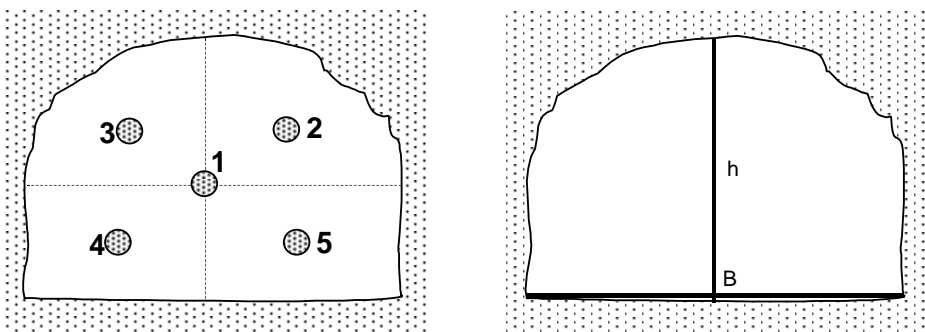


Figura 8.7 Puntos de medición de la velocidad y mediciones para el cálculo de la sección de las aberturas subterráneas

Para la determinación de la sección se midió el ancho (B) y la altura (h) (fig. 3.59 derecha) calculado por la relación simple de  $B \times h$  y, en los casos de secciones con arco en el techo, la sección fue calculada con un factor de 0,95 ( $B \times h$ ), que resultó de la comparación con secciones medidas por el departamento de topografía.

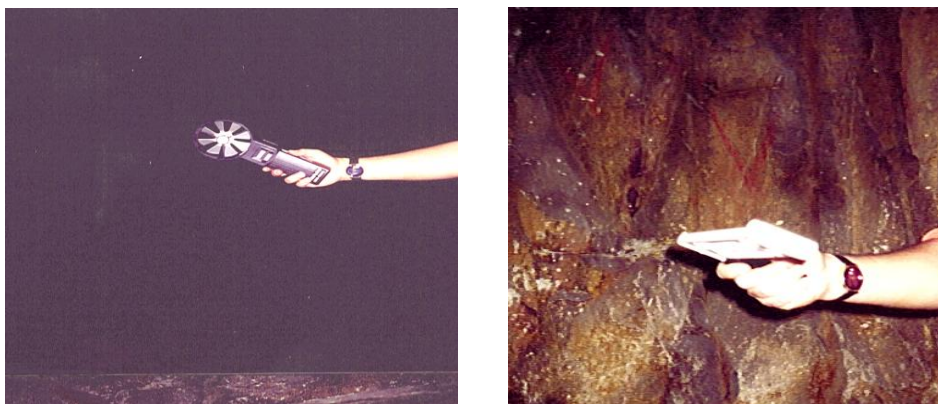


Figura 8.8 Medición de velocidad y temperatura de la atmósfera subterránea

### 8.3.1.3. Medición de los parámetros dinámicos y volumétricos

Las mediciones iniciales de los parámetros dinámicos y volumétricos del aire (fig. 8.8) fueron realizadas en condiciones normales de operación de la mina y con los dos ventiladores principales funcionando.

Las mediciones de velocidad, temperaturas, presión barométrica, de la sección, una caracterización de las irregularidades existentes, del grado de obstrucción, de las sinuosidades de las aberturas, del tipo de roca y del tipo de

soporte o revestimiento de la superficie de las aberturas, fueron realizadas en el mes de diciembre 2000, cuyos resultados se encuentran en el Anexo 8.1 y las corrientes de aire se ilustran en la fig. 8.9.

#### *8.3.1.4. Mediciones de polvos y gases*

El polvo y los gases resultan de las actividades de voladura con uso de explosivo (ANFO), remoción (LHDs), transporte de estéril (volquetes), extracción, transferencia del material de los vagones a los silos de alimentación de la cámara de trituración (volquetes del mineral), del proceso de trituración (trituración primaria en el subsuelo) y de los puntos de transferencia del transporte realizado a través de las correas como el caso de la cabeza de la correa.

La campaña de captación de polvos (fig. 8.10 derecha) se realizó en los sitios con producción de polvos: tajeos, pozo de extracción nivel 2 y nivel 3, echadero de mineral del nivel 2, cámara de trituración y cabeza de correa; utilizando un colector de alto volumen – CAV dotado de un filtro. Las muestras colectadas por el CAV-A/HF se pesaron en el laboratorio de la mina Panasqueira (Anexo 8.2).



Figura 8.10 Medición de gases con AUGER GAS TESTER II y de polvos con CAV-A/HF

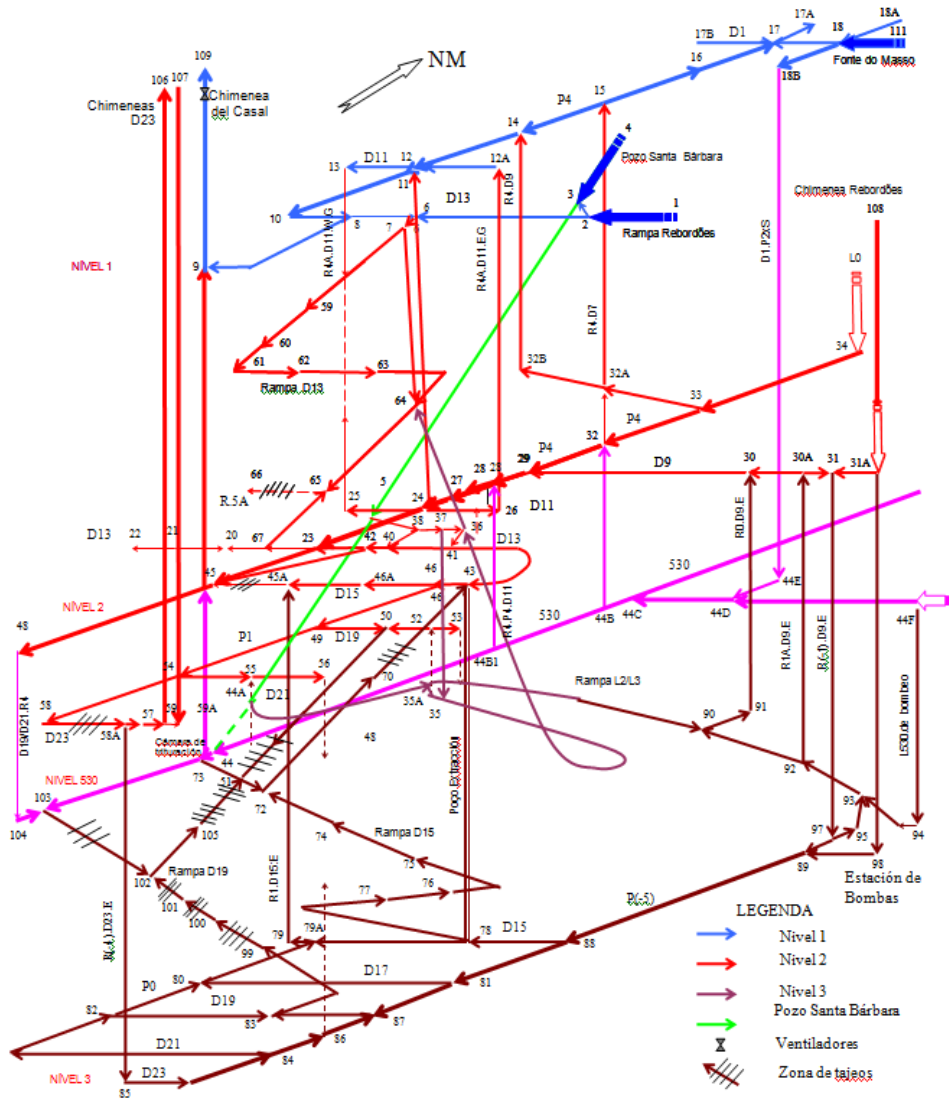


Figura 8.9 Redes del aire (inicial) caracterizada en el mes de diciembre 2000

La muestra que presentó una mayor concentración fue objeto de un análisis químico elemental por espectrometría de fluorescencia de longitud de onda de dispersión de rayos X y un análisis mineralógico por difracción de rayos X, en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de Minas y Georecursos (Cuadro 8.1).

Cuadro 8.1 Resultados del análisis químico elemental por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X y Mineralógica por Difracción de Rayos X (Laboratorio de Ingeniería de Minas y Georecursos del IST, 2001)

Análisis por EFRX (4 espectros)*		Análisis por DRX (1 espectro)**	
Cu, K, Si e Al	muy abundante	Cuarzo (Qz)	muy abundante
As, Zn e Fe	abundante	Moscovita/Ilita (M/I)	presente
W, Ti e Mg	presente	Caulinita/Haloisita (K/H)	trazas
Zr, Y, Sr, Rb, Ni, Mn, Cr, ba, Ca, Sn, S e P	trazas	Fases no cristalizadas y/o materia orgánica	trazas
		Hematita (H)	trazas
		Feldespato (F)	trazas

\* Los elementos Zn, Cu, S, P e Si son trazas en el “blanco” utilizado en el ensayo.

\*\* En la lectura de los valores de 20° se debe tener en cuenta un error +0.2°20 (-0.03°A) para valores de 20° <40°.

Las mediciones de los gases fueron realizadas principalmente en los locales con presencia de hombres y operaciones de los equipos diesel (fig. 3.62 izquierda), cuyo resultado está en el Anexo 8.3. El oxígeno O<sub>2</sub> y otros gases no fueron medidos en esta campaña, pero se consideraron las mediciones efectuadas anteriormente usando el EXOTOX 60, que utiliza un sensor de gas neutrónico incorporado (Cuadro 8.2).

Cuadro 8.2 Oxígeno presente en el ambiente subterráneo (Bernardo, P. A. M. 1999)

Puntos	Localización	O <sub>2</sub> (%)	Cl <sub>2</sub> (ppm)	LEL (%)
1	P4/D17	19,40	0,00	1,00
2	P4/D15	19,50	0,00	1,00
3	P4/D19	19,40	0,00	0,00
4	P1/D17	19,40	0,00	0,00
5	L2 Taller de electricidad y cerrajería	19,40	0,00	0,00
6	Frente de desmonte ya explotado	19,20	0,10	1,00
7	Desmonte con LHD a trabajar	19,20	1,70	1,00
8	Al lado del tambor de extracción	20,00	0,00	0,00

### 8.3.1.5 Síntesis de la caracterización de la situación dinámica y volumétrica

Las variaciones de la velocidad y volumen medidos en el ambiente (espacio) subterráneo se ilustran en las figuras 8.11, 8.12, 8.13, 8.14, 8.15 y 8.16.

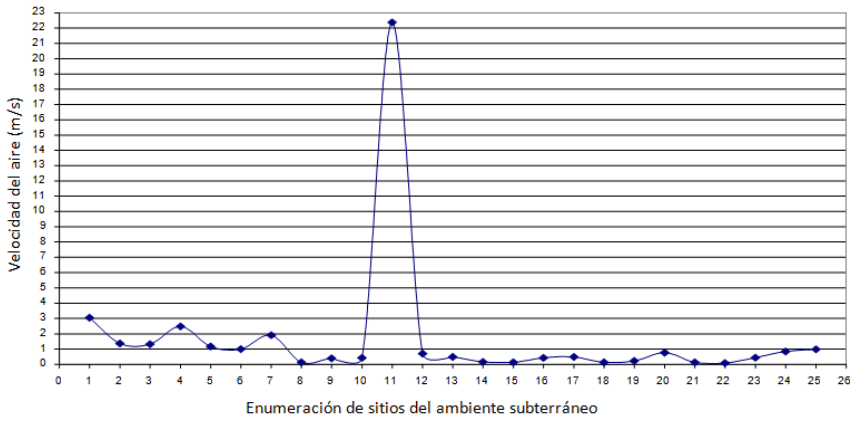


Figura 8.11 Variación de la velocidad del aire en el nivel 1

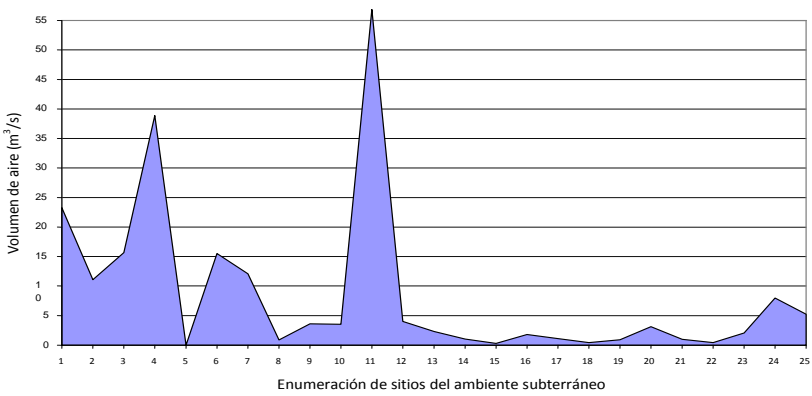


Figura 8.12 Variación del volumen de aire en el nivel 1

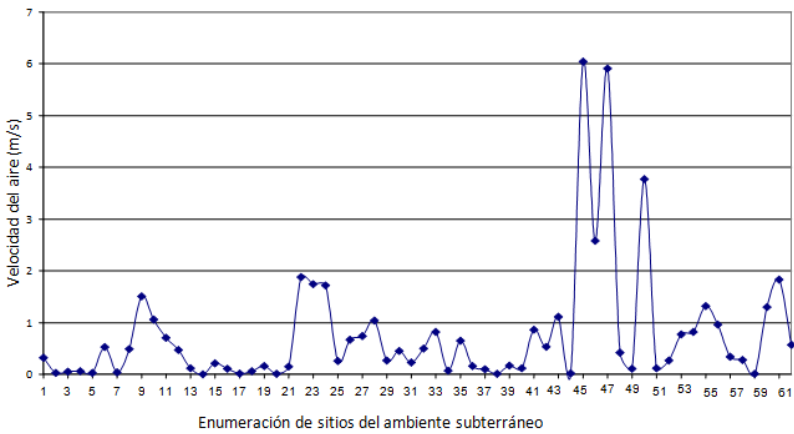


Figura 8.13 Variación de la velocidad del aire en el nivel 2

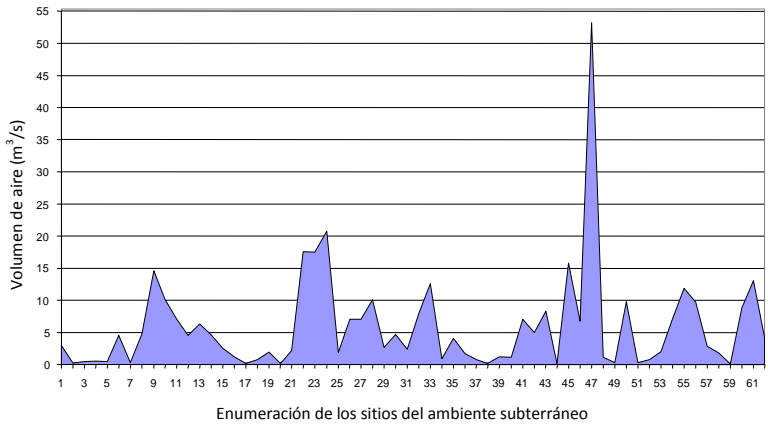


Figura 8.14 Variación del volumen de aire en el nivel 2

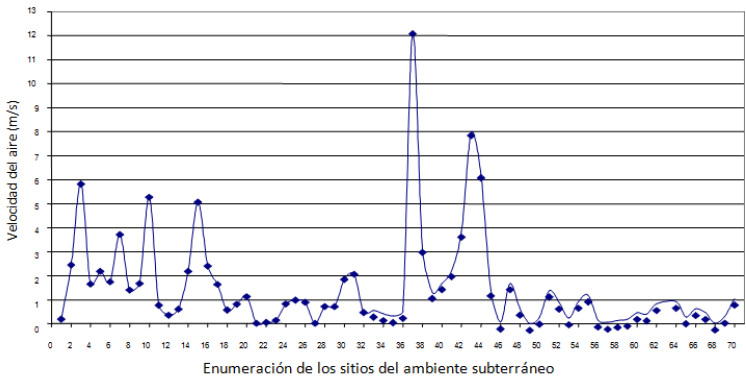


Figura 8.15 Variación de la velocidad y volumen de aire en el nivel 3

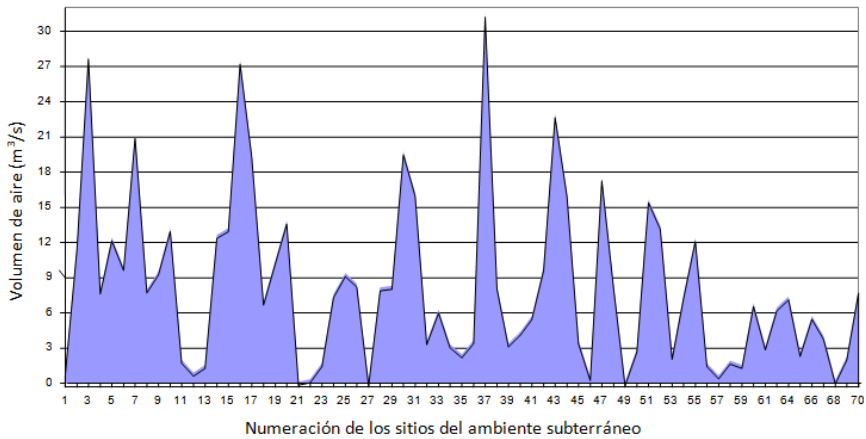


Figura 8.16 Variación del volumen de aire en el nivel 3



a) En el nivel 1 los valores pico de la velocidad y volumen de aire alcanzan 22 m/s y 56 m<sup>3</sup>/s respectivamente, que corresponden a la chimenea Casal la que en el momento de la caracterización (diciembre 2000) constituía una salida de aire por la acción de dos ventiladores instalados en la boca de esta chimenea. Los volúmenes entre 15 a 39 m<sup>3</sup>/s corresponden al pozo Santa Bárbara y a la rampa Rebordões. Existen ambientes con velocidades y volúmenes bajos. La presencia de personal en este nivel se verifica principalmente en la rampa Rebordões, el pozo Santa Bárbara y en la rampa D13.

b) En el nivel 2 las velocidades pico de 6 m/s corresponden a las chimeneas D23 y Casal, siendo el caudal pico de 53 m<sup>3</sup>/s correspondiente a la chimenea Casal. Existen sitios donde las velocidades y el volúmenes son bajos y el riesgo ambiental evidente, porque en este nivel se encuentra la extracción con presencia de personal.

c) En las aberturas subterráneas del nivel 3 se registran las máximas velocidades de 8 a 12 m/s y volúmenes de 23 a 30 m<sup>3</sup>/s que corresponden a las chimenea de Rebordões y Galería L3.P(-5). En estas zonas las velocidades y los volúmenes son muy bajos en algunos sitios, principalmente en los accesos a los tajeos. Siendo los tajeos los sitios de producción del mineral por excelencia, es evidente que en este ambiente exista un mayor riesgo ambiental, por el hecho de trabajar LHDs diesel y estar expuestos una cantidad considerable de trabajadores.

El balance global del aire en el ambiente subterráneo, basado en las mediciones analizadas en diciembre 2000, se encuentra en el Cuadro 8.3, resultando en 73,83 m<sup>3</sup>/s de entrada de aire limpio y 72,50 m<sup>3</sup>/s de salida de aire contaminado, con una diferencia aceptable de 1,79%.

Cuadro 8.3 Balance de aire en diciembre 2000

Entrada		Salida	
Local	Volumen (m <sup>3</sup> /s)	Local	Volumen (m <sup>3</sup> /s)
Pozo Santa Bárbara	15,70	Chimena Casal	56,80
Rampa Rebordões	23,30	Chimenea D23.E	15,70
L0/L2 (P4)	2,00		
Chimenea Rebordões	20,37		
Galería Salgueira	5,76		
Chimenea D23.W	6,70		
Total	73,83	Total	72,50

Estudios realizados (Navarro Torres, V.F., 2001) muestran que en la red primaria de la mina Panasqueira la influencia de la ventilación natural varía entre 50 y 70%.

d) Para caracterizar la velocidad y volumen de aire en los tajeos se realizaron mediciones entre el 6 y el 18 de septiembre 2001, con 2 ventiladores de 80 hp intaalados en las chimeneas D23E y D23W, una dentro de R-4.D23 y otro en la rampa D19.L3. Cuando la temperatura exterior era de 15 °C a 18 °C los tajeos registraban de 17,5 °C a 19 °C.

Los gráficos de las figuras 8.17 y 8.18 representan el resultado de las mediciones efectuadas utilizando los mismos aparatos usados para la ventilación principal, constatándose que en el 50% al 60% de las estaciones de medición, el

equipo no registró la velocidad del aire, lo que indica que la corriente de aire era de una velocidad inferior a 0,01 m/s (capacidad del anemómetro).

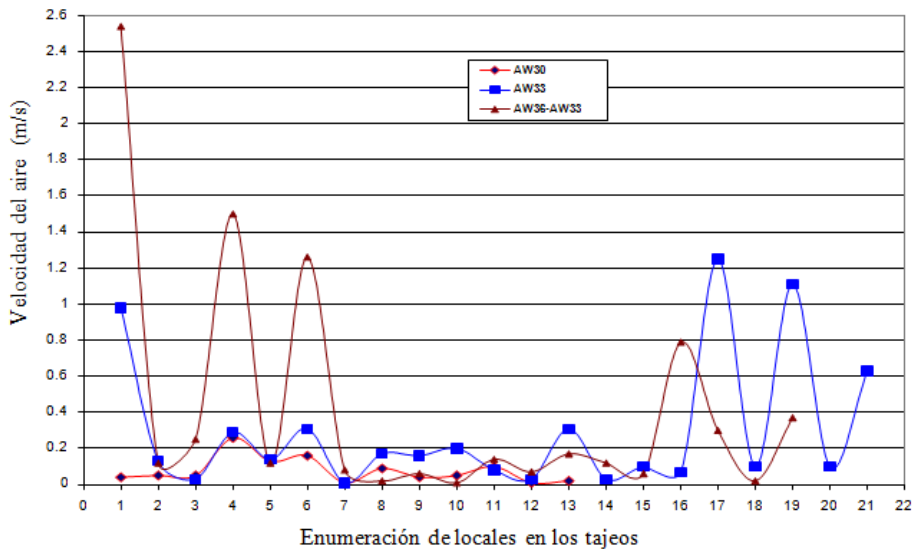


Figura 8.17 Variación de la velocidad del aire en los frentes de explotación (tajeos)

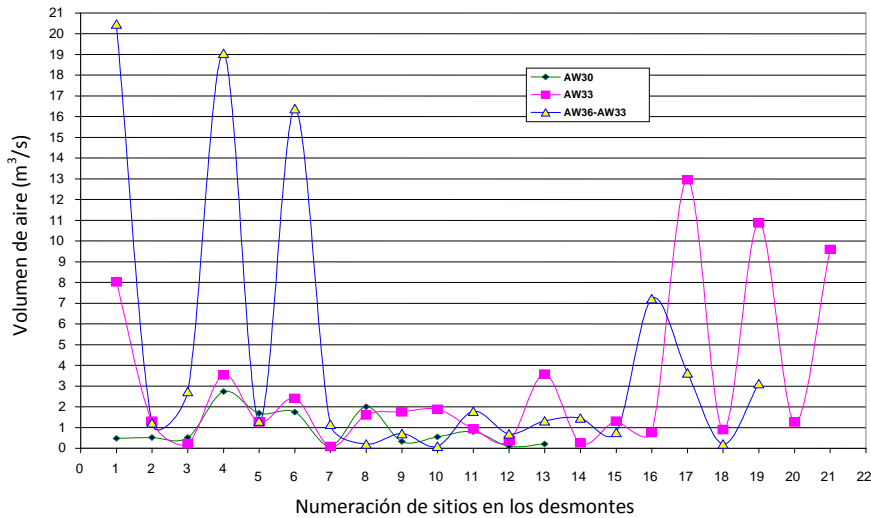


Figura 8.18 Variación del volumen de aire en los frentes de explotación (tajeos)

En los gráficos citados se nota que la velocidad y el volumen presentan una proporción aproximadamente directa, debido al hecho de que las cámaras tienen una abertura relativamente constante cercana a los 12 m<sup>2</sup>. Los valores máximos de la velocidad y volumen (1,2 a 2,4 m/s y 13 a 20 m<sup>3</sup>/s) corresponden a las rampas D19, D15 y D23. En las cámaras o áreas de trabajo de los tajeos (áreas donde no

había sido posible medir), se verificaron bajos valores de 0,20 m/s y 2 m<sup>3</sup>/s para la velocidad y volumen respectivamente.

### 8.3.1.6. Caracterización de la situación de polvos y gases

Los resultados de las mediciones de polvos realizadas (Anexo 8.2 y fig. 8.19) muestran una variación de la concentración de 0,4024 mg/m<sup>3</sup> (402,40 µg/m<sup>3</sup>) a 5,4305 mg/m<sup>3</sup> (5430,5 µg/m<sup>3</sup>).

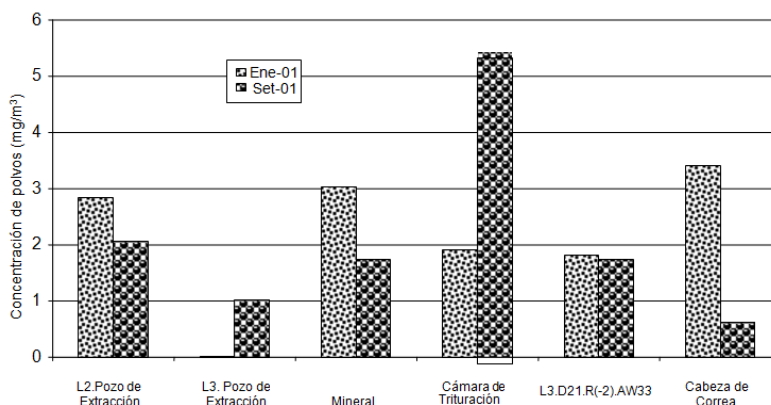


Figura 8.19 Concentración de polvo en el ambiente subterráneo

La presencia de polvos en el aire de la atmósfera subterránea de la mina Panasqueira fue caracterizada en los siguientes términos:

- En el L2.Pozo de extracción, antes de la entrada de aire en la boca del pozo, la concentración de polvos fue de 0,4029 mg/m<sup>3</sup> (402,40 µg/m<sup>3</sup>) y después de la entrada de aire variaba de 2,0162 mg/m<sup>3</sup> (2016,29 µg/m<sup>3</sup>) a 2,8359 mg/m<sup>3</sup> (2835,90 µg/m<sup>3</sup>);
- En el L3. Pozo de extracción, antes de la entrada de aire en la boca del pozo fue de 0,01203 mg/m<sup>3</sup> (12,03 µg/m<sup>3</sup>) y después de la entrada de aire de 1,01214 g/m<sup>3</sup> (1012,14 µg/m<sup>3</sup>);
- En el L2.Volquete de vagones de mineral, la concentración de polvo en el ambiente varía entre 1,7375 g/m<sup>3</sup> (1737,50 µg/m<sup>3</sup>) y 3,0316 g/m<sup>3</sup> (3031,60 µg/m<sup>3</sup>);
- En la cámara de trituración primaria la concentración de polvos varía entre 1,9028 g/m<sup>3</sup> (1902,8 µg/m<sup>3</sup>) y 5,4305 g/m<sup>3</sup> (5430,50 µg/m<sup>3</sup>), correspondiendo la más alta concentración registrada durante la operación de trituración en seco;
- En los tajeos la concentración de las partículas sólidas en suspensión en el aire de la atmósfera subterránea varía entre 1,7341 g/m<sup>3</sup> (1734,10 µg/m<sup>3</sup>) y 1,8109 g/m<sup>3</sup> (1810,90 µg/m<sup>3</sup>);
- En el sitio denominado cabeza de correa, la concentración de polvo varía 0,61211 g/m<sup>3</sup> (612,11 µg/m<sup>3</sup>) a 3,4007 g/m<sup>3</sup> (3400,70 µg/m<sup>3</sup>).

El análisis cualitativo del polvo mostró que están compuestos por grandes concentraciones de sílice libre, Cu, K, Al, por As, Zn, Fe presentes y por trazas de W, Ti, Mg Ba, Zr, Ni, Mn, Cr.

Los gases identificados en los frentes de explotación (tajeos) fueron CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, no estando presente el SO<sub>2</sub> ni el H<sub>2</sub>S. Los resultados de las mediciones de la concentración de gases se encuentran en el Anexo 8.3, ilustrado mediante la fig. 8.20 y resumidos en el Cuadro 8.4.

Cuadro 8.4 Márgenes de variación de gases tóxicos en el ambiente subterráneo

Gases	Tajeos con LHD diesel (ppm)	Tajeos con Jumbo (ppm)	L2. Pozo de extracción (ppm)	Tajeos con uso de ANFO (ppm)
CO	0 – 500	0	0	10
CO <sub>2</sub>	0 – 3000	0 – 2500	0	1000
NO	0 – 1	0,1– 0,4	0,3	0,6 – 2,5
NO <sub>2</sub>	0,7 – 12,4	6,7 – 11	0,8	1,4 – 2,7

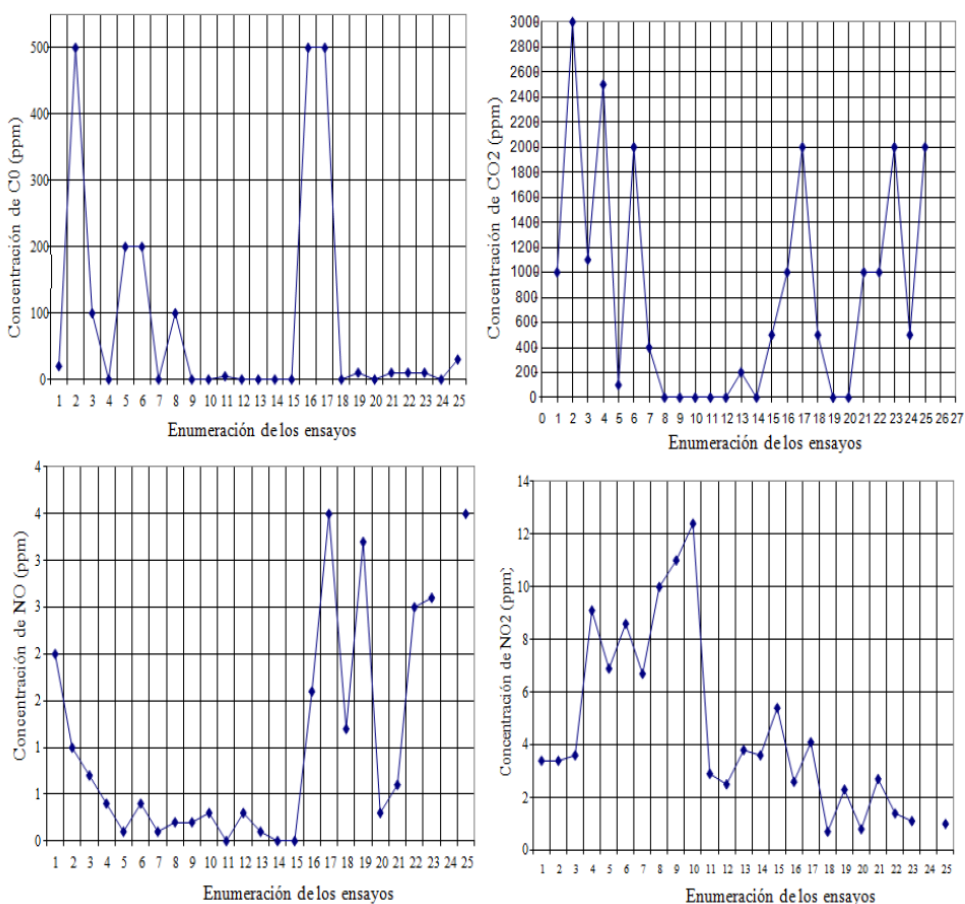


Figura 8.20 Resultados de las mediciones de gases tóxicos en la atmósfera subterránea

### 8.3.2. Identificación del impacto ambiental dinámico y volumétrico

#### 8.3.2.1. Matriz base para la identificación del impacto ambiental

Para la identificación del impacto ambiental dinámico y volumétrico se aplicó la matriz base elaborada en el Cuadro 7.14, para el estudio en la mina Neves Corvo.

El volumen mínimo permitido varía en relación a la cantidad de hombres y la potencia de los equipos con motor diesel que operan en el ambiente de los frentes de trabajo. Así, aplicando la ecuación 3.73 y considerando las condiciones críticas de la operación (Dirección de trabajos subterráneos 2001) los resultados se presentan en el Cuadro 8.5.

Cuadro 8.5 Condiciones críticas de operación y volumen mínimo de aire permitido

Local	Hombre simultáneo*	Equipo simultáneo*	Potencia (hp)	q (m <sup>3</sup> /s)
Tajeos	30	2 LHD Wagner	364	14,24
L2 y L3 Pozo extracción, rampas	10	1 Tractor AGRIA	44	2,04
Rampa L2/L3 e L3.P(-5)	15	1 DUMPER Wagner	182	7,12
Cámara trituración, cabeza de correa y galería	3	-	-	0,15

En los tajeos, el CO oscila entre 0 y 500 ppm, estando las mayores concentraciones en los tajeos donde trabajan los equipos LHDs diesel. El CO<sub>2</sub> varía de 0 a 3000 ppm, con altas concentraciones también en los tajeos donde operan los LHDs diesel. El NO y el NO<sub>2</sub> están presentes en concentraciones máximas de 12,4 ppm en los tajeos y en concentraciones menores hasta 0,1 en otros frentes y, finalmente, el O<sub>2</sub> varía entre 19,2 y 20%.

Para la identificación del impacto ambiental debido a polvos y gases fue necesario elaborar una matriz base para los gases caracterizados en esta mina (Cuadro 8.6) con base en el Cuadro 3.25 y en el Cuadro 3.43.

Cuadro 8.6 Matriz base para evaluación del ambiente subterráneo debido a gases y polvos

Contaminante	Niveles de impacto ambiental (ppm)		
	Leve	Moderado	Alto
O <sub>2</sub>	18500 ≤ O <sub>2</sub> < 190000	170000 ≤ O <sub>2</sub> < 185000	O <sub>2</sub> < 170000
CO <sub>2</sub>	5000 < CO <sub>2</sub> ≤ 6000	6000 < CO <sub>2</sub> ≤ 7000	CO <sub>2</sub> > 7000
CO	50 < CO ≤ 60	60 < CO ≤ 70	CO > 50
NO <sub>x</sub>	3 < NO <sub>2</sub> ≤ 3.5	3.5 < NO <sub>2</sub> ≤ 4	NO <sub>2</sub> > 4
H <sub>2</sub> S	10 < H <sub>2</sub> S ≤ 11	11 < H <sub>2</sub> S ≤ 12	H <sub>2</sub> S > 12
SO <sub>2</sub>	2 < SO <sub>2</sub> ≤ 3	3 < SO <sub>2</sub> ≤ 4	SO <sub>2</sub> > 4
Polvos P (mg/m <sup>3</sup> )	1 ≤ P < 2	2 ≤ P < 5	P ≥ 5

#### 8.3.2.2. Identificación del impacto ambiental térmico y dinámico

Con las matrices específicas elaboradas con base en la Norma Portuguesa (Cuadro 8.6) y con el volumen mínimo de aire para condiciones críticas de operación en esta mina (Cuadro 8.5) se obtiene la matriz de impacto ambiental

dinámico y volumétrico (Cuadro 8.7 y fig. 8.21) y el impacto ambiental debido a la contaminación por polvos y gases (Cuadro 8.8).

La matriz de impacto ambiental muestra que el área con impacto ambiental dinámico y volumétrico de *moderado a alto* se verifica en el nivel 3, en particular en las rampas D15, D19 y L2/L3 y en la galería P(-5). En los tajeos existe un impacto ambiental dinámico y volumétrico *alto*.

La matriz de impacto ambiental ocasionado por gases y polvos (Cuadro 3.45) permite deducir que en los tajeos hay un impacto ambiental *moderado a alto* para el caso de los gases y *leve* para el polvo. En el pozo de extracción (nivel 2), en el echadero de mineral (nivel 2), en la cámara de trituración y en la cabeza de correa, el impacto ambiental debido al polvo es de *moderado a alto*.

La localización de los impactos ambientales constituye una herramienta fundamental en la búsqueda de medidas correctivas para atenuar o mitigar estos riesgos ambientales para la salud de los trabajadores.

Cuadro 8.7 Matriz de impacto ambiental dinámico y volumétrico en el ambiente subterráneo de la mina Panasqueira (diciembre 2000)

Área	Sitios	Ambiente subterráneo	Tipo y niveles de impacto		
			Térm.	Dinám.	Volum.
Nivel 1		No existe ningún impacto			
Nivel 2	42-23	Galería D11		⊗	⊗
	23-45	Galería P4 volquete del mineral		∇	
	49-54	Galería P1		∇	
	49-50	Galería a D19		⊗	◆
	57-58A	Galería D23		◆	
	64-63	Rampa D13		◆	⊗
Nivel 3	82-83	Galería D19		◆	◆
	81-87	Galería P(-5)		◆	◆
	97-89	Galería P(-5)			◆
	97-95	Galería P(-5)			⊗
	81-80	Galería D17		⊗	
	78-79A	Galería D15		◆	◆
	50-51	Rampa D19		◆	◆
	101-102	Rampa D19		◆	◆
	75-74	Rampa D15		◆	◆
	76-75	Rampa D15		⊗	⊗
	77-76	Rampa D15		⊗	⊗
	35 <sup>A</sup> -90	Rampa L2/L3		◆	◆
	92-90	Rampa L2/L3			◆
	Varios	Tajeos (Figura 2.33)		◆	◆

Leyenda: ∇ Leve ⊗ Moderado ◆ Alto

Cuadro 8.8 Matriz de impacto ambiental debido a polvos y gases (enero 2001)

Número de ensayos	Ambiente subterráneo	Tipo de impacto				
		Polvos	CO	CO <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>
1	L3.D21.R-2.AW33(N9)*	∇	∇	◆	⊗	⊗
2	L3.D21.R-2.AW33(E72)	∇	◆	⊗		⊗
3	L3.D21.R-2.AW33(W76)	∇	◆	◆	∇	⊗
4	L3.D19.R1.AW30(N420)			∇		◆
5	L3.D19.R1.AW30(E421)		◆			◆
6	L3.D19.R1.AW32(N59)			◆		◆
7	L3.D19.R1.AW32(E31)					◆
8	L3.D19.R-3.AW30(N280)		◆			◆
9	L3.D19.R-3.AW30(428)					◆
10	L3.D17.R1.AW33(WN6)					
11	L3.D19.R0.AW32(I4N)					∇
12	L3.D19.R5.AW30(E423)					∇
13	L3.D19.R1.AW32(59)					⊗
14	L3.D21.R2.AW33(S72)					⊗
15	L3.D19.R2.AW32(I4S)		◆		⊗	◆
16	L3.D21.R-1.AW33(30)				◆	∇
17	L3.D21.R-1.AW33(E10)		◆	∇		⊗
18	L3.D21.R-1.AW33(43)				◆	
19	L3.D21.R2.AW33.Ac.r.D23(23)					∇
20	L2.Pozo Extracción	⊗				
21	L3.D21.R-2.AW33.Ac.r.D23(20)				∇	∇
22	L3.D21.R-1.AW33(S23)				⊗	
23	L3.D21:R-1.AW33(78)			∇	◆	
24	L2.P4.D13.Raquete				◆	
25	L3.D21.R-1.AW33		∇	∇		
	L3. Pozo extracción	∇				
	L2. Volquete de mineral	⊗				
	Cámara de trituración	◆				
	Cabeza de correa	◆				

\* Los números entre paréntesis indican el punto topográfico (S = Sur, N = Norte, E = Este, W = Oeste)

Legenda: ∇ Leve ⊗ Moderado ◆ Alto

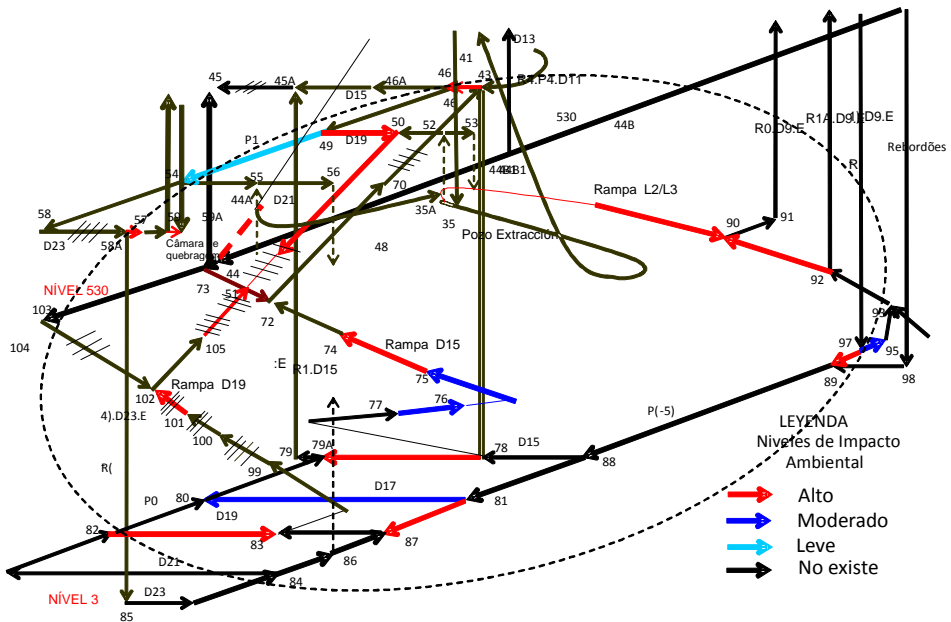


Figura 8.21 Mapa del impacto ambiental en la atmósfera subterránea (diciembre 2000)

### 8.3.3. Medidas correctivas para los impactos ambientales identificados

Aplicando la ecuación 3.54 para  $Q_i$  de  $0,57 \text{ mg/m}^3$ ,  $C_p = 1,8109 \text{ mg/m}^3$  (medido),  $VLA_p = 1 \text{ mg/m}^3$  y  $P = 2222,22 \text{ t}$  (información de la mina), la cantidad de aire limpio requerido para obtener el nivel permitido de concentración de polvo corresponde a un volumen de aire de  $11,67 \text{ m}^3/\text{s}$ , para el total de tajeos. Este volumen es menor al mínimo permitido, calculado considerando la Norma Portuguesa que es de  $14,24 \text{ m}^3/\text{s}$  (Cuadro 3.42), por lo tanto, la medida correctiva deberá garantizar este volumen mínimo.

En la mina Panasqueira las voladuras se hacen en el último turno de cada día de trabajo (1 a 2 horas), con un margen aproximado de 4 horas antes del inicio del turno siguiente (7 horas), por lo que el riesgo producido por los polvos y gases por el uso de explosivos no es significativo, ya que el tiempo es suficientemente grande para su dilución.

#### 8.3.3.1. Medidas correctivas para el impacto ambiental en los tajeos

El método de explotación por cámaras y pilares y las condiciones operativas de la mina Panasqueira requiere, para la obtención de un volumen mínimo de aire requerido en cada frente de trabajo, el uso de un sistema de ventilación con ventiladores auxiliares y mangas (Cuadro 8.9).



Cuadro 8.9 Caudal mínimo de la medida correctiva del impacto ambiental dinámico y volumétrico en los tajeos en diferentes condiciones

	Máquinas diesel	Volumen mínimo permitido (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad para el volumen mínimo (m/s)	Volumen mínimo para velocidad mínima de 0,2 m/s (m <sup>3</sup> /s)
3	1 Jumbo	0,15	0,013	2,40
3	1 LHD de 182 hp	6,52	0,543	6,52
6	Ninguno	0,30	0,025	2,40

Para la obtención de estos volúmenes mínimos se aplica la ecuación (3.64) denominada de longitud máxima ( $L_{max}$ ).

Para el caso de los volúmenes mínimos en los tajeos (Cuadro 8.11), el modelo para ventiladores auxiliares Joy Auxivane Mine Fan (Mine Ventilation Service, Inc), con curvas características de *booster fan* (refuerzo del ventilador), se utiliza para los frentes en operación de perforación (jumbo) la curva 5 y para frentes en operación de remoción (LDH diesel) la curva 2.

Para tales condiciones y para los siguientes parámetros:  $\lambda = 0,0260$ ,  $Q = 6,608$  m<sup>3</sup>/s (LHD diesel),  $Q = 2,832$  m<sup>3</sup>/s (jumbo),  $f = 0,0278$  (Cuadro 3.46),  $P = 14,4$  m,  $S = 12$  m<sup>2</sup> (medición práctica),  $L_e = 9,144$  m (Cuadro 3.47), las ecuaciones de la longitud máxima de manga  $L_{max}$  (m), en función de su diámetro  $D$  (m) se presentan en el Cuadro 8.10, cuya representación gráfica se ilustra en la fig. 8.22.

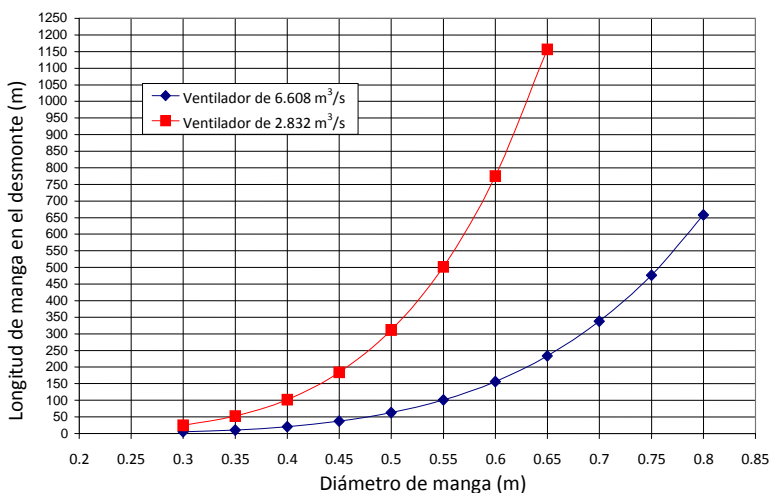


Figura 8.22 Medida correctiva del riesgo ambiental en una atmósfera subterránea de tajeos

Cuadro 8.10 Ecuaciones de longitud máxima del acceso/desmonte

Ventilador	H <sub>máx</sub> (curva)	Ecuación de longitud máxima
Joy (6,6 m <sup>3</sup> /s) Curva 5	2240	$L_{máx} = 51,29676964 / [ (0,02548/D^5) + 0,0002317 ]$
Joy (2,8 m <sup>3</sup> /s) Curva 2	1993	$L_{máx} = 254,209184 / [ (0,02548/D^5) + 0,0000541 ]$

Cuadro 8.11 Actividades y costos para la simplificación del circuito de aire

Alternativa	Cierre de sitios	Cortina de ventilación	Localización de los ventiladores	Costo estimado (€)
1	31	02	Ch.Casal Ch. D23W*	5487
2	35	02	Ch. D23W* Ch. D23E*	5986
3	35	02	Ch. D23W* Ch. D23E*	5861
4	35	01	Ch. D23W* Ch. D23E*	5736
5	34	01	Ch. D23W* Ch. D23E*	31649**
6	35	01	Ch. D23W* Ch. D23E*	5736

\* Instalados en la galería L2.D23 próxima a las chimeneas

\*\* Incluye la construcción y rehabilitación de 100 m de galería en L530.Gal.L2.P2.xS

Aplicando la ecuación 3.76, la potencia de los ventiladores auxiliares en los frentes donde hay operaciones de remoción con LHD diesel es de 21 kW (6,6 m<sup>3</sup>/s) y para los frentes de perforación con jumbo y otros frentes de trabajo es de 8 kW (2,8 m<sup>3</sup>/s). La curva de la medida correctiva permite adaptarse constantemente a diferentes operaciones de explotación en los tajeos.

### 8.3.3.2. Medidas correctivas para el impacto ambiental en una red primaria de aire

En la búsqueda de medidas correctivas para el impacto ambiental dinámico y volumétrico identificado en las redes primarias de aire se utiliza como herramienta principal el programa VnetPC200 de Ventilation Service, Inc de los E.U.A.

Los criterios tomados para la simulación fueron: simplificar el circuito de aire por medio del cierre de frentes antiguos y no útiles (fig. 8.7); considerar puertas y cortinas de ventilación y posibles alternativas de localización de los ventiladores (incluido el sistema de aspiración existente en la chimenea Casal) para obtener un flujo de aire superior al mínimo estimado en los tajeos (rampa D19) y eliminando o reduciendo los niveles permitidos de los impactos ambientales identificados en la red primaria.

Los parámetros de entrada (*input parameters*) para el modelo de ventilación simplificado, incluyen entre 93 y 101 locales caracterizados y de 71 a 76 para las 6 alternativas simuladas. Para cada trecho del ambiente subterráneo fue necesario la sección, el perímetro, la longitud, la longitud equivalente y el factor de fricción (Anexo 8.4). En vista de que no fue posible obtener las curvas características de los

ventiladores existentes en la mina, se procedió a una medición práctica del volumen de aire de los ventiladores cuya potencia es de 80 hp (59,68 kW), resultando un volumen medio de 56,8 m<sup>3</sup>/s, valor considerado como *entrada* del ventilador (*cantidad fija*). Finalmente, el parámetro económico utilizado fue un costo de energía eléctrica de 0,065 €/kW/h (Dirección de trabajos subterráneos de la mina Panasqueira).

En el Cuadro 3.48 se presentaron los trabajos a realizar y los costos de simplificación de los circuitos de ventilación que permiten controlar el sistema y realizar el modelaje.

De las 6 mejores alternativas simuladas (Cuadro 8.12), la que ofrece el mejor resultado es la correspondiente a la instalación de un ventilador en la chimenea D23E y otro en la D23W (fig. 8.23), obteniéndose un volumen total de 113,6 m<sup>3</sup>/s para un costo de operación de 64677,24 € por año.

Cuadro 8.12 Resultados desimulaciones de operación de los ventiladores

Alternativa	Ventiladores	Presión (Pa)	Volumen Total (m <sup>3</sup> /s)	Costo Operación (€/año)
1	A	912,20	113,60	453,84
	B	3017,20		1501,12
2, 3, 4, 5, 6	A	29,80	113,60	14,82
	B	23,70		11,79

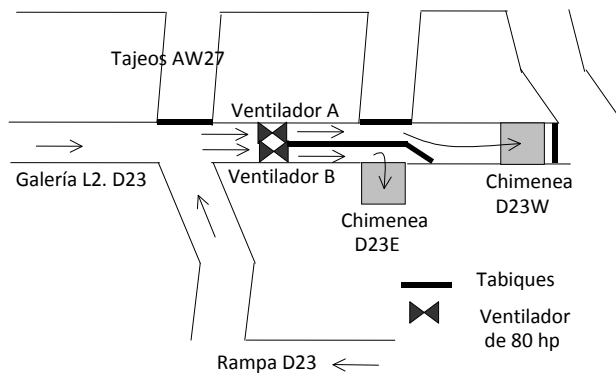


Figura 8.23 Localización de los ventiladores de 80 hp en las chimeneas D23E y D23W

Las 6 alternativas permiten obtener un volumen superior (de 43,81 m<sup>3</sup>/s a 63,06 m<sup>3</sup>/s) al volumen mínimo estimado (14,24 m<sup>3</sup>/s). La alternativa 1 parece ser la mejor, pero tiene un elevado costo de operación y necesita de dos puertas de ventilación y dos cortinas que, operacionalmente, limitan la flexibilidad en la mina. La alternativa 5 representa un costo elevado de simplificación de la red y no consigue un resultado satisfactorio. Las alternativas 2 y 3 requieren entre una y dos cortinas.

Las mejores alternativas son la 4 y la 6, que tienen igual costo de simplificación, necesitan de una cantidad igual de cierres de aberturas (35), una

cortina de ventilación, ninguna puerta de ventilación y obtienen prácticamente el mismo volumen en los tajeos para costos de operación equivalentes.

Al analizar los detalles de estas dos alternativas, se observa que la alternativa 5 considera el acceso de la rampa Rebordões (superficie) cerrado hacia el pozo Santa Bárbara, permitiendo aumentar el volumen y la velocidad por la rampa Rebordões, lo que puede generar cierto malestar en el personal; por lo que la alternativa 6 es la mas recomendable, ya que considera el referido acceso abierto, recomendándose colocar una puerta de rejilla en la entrada de la rampa Rebordões en vez de la puerta totalmente cerrada en uso; por lo tanto, la alternativa 6 es la más viable (resultados de la modelación con VnetPC2000 en Anexo 8.4 y figura 8.24).

Para la simplificación y el control del circuito primario de aire es necesario realizar actividades de cierre (Cuadro 8.13) de los sitios antiguos o de aquellos que no son útiles en la actual situación.

Cuadro 8.13 Cierre de sitios para controlar el sistema de ventilación primaria

Nivel	Locales a ser cerrados
1	L1.Galería paralela a P4, entre D13 y D15 L1.D13.W entre P4 y P3, antes del acceso a la rampa D13 L1.Chimenea R4.D11
2	L2.P4, entre D15 y D17 dejando libre la zona de la chimenea Casal L2.D13W entre P5 y P5A, dejando libre el acceso a la rampa D13 L2.D11W entre P4 y P4A L2.D11E entre P4 y P5A L2.P4, entre D5 y D7 dejando libre R4.D7 L2.D9.E, entre las chimeneas R(-1).D9.E y Rebordões L2.P1, dejando libre D23 L2.Todas las aberturas de tajeos en D23 hasta las chimeneas D23E y D23W L2.Todas las aberturas en P1, entre D15 y D23, excepto galerías D17, D19 y D21 L2.Chimeneas R(-4).D23.E, R1.D15.E, R0.D9.E, R1A.D9.E y R(-1).D9.E L2.Chimenea R4.D7 (cerrar por lo inclinado)
530	L530.P4, dejando libre el acceso a la rampa D19 L530 Acceso a la cámara de trituración (Pozo Santa Bárbara) L530.P4, intersección de P4 y galería Salgueira cerrando al norte

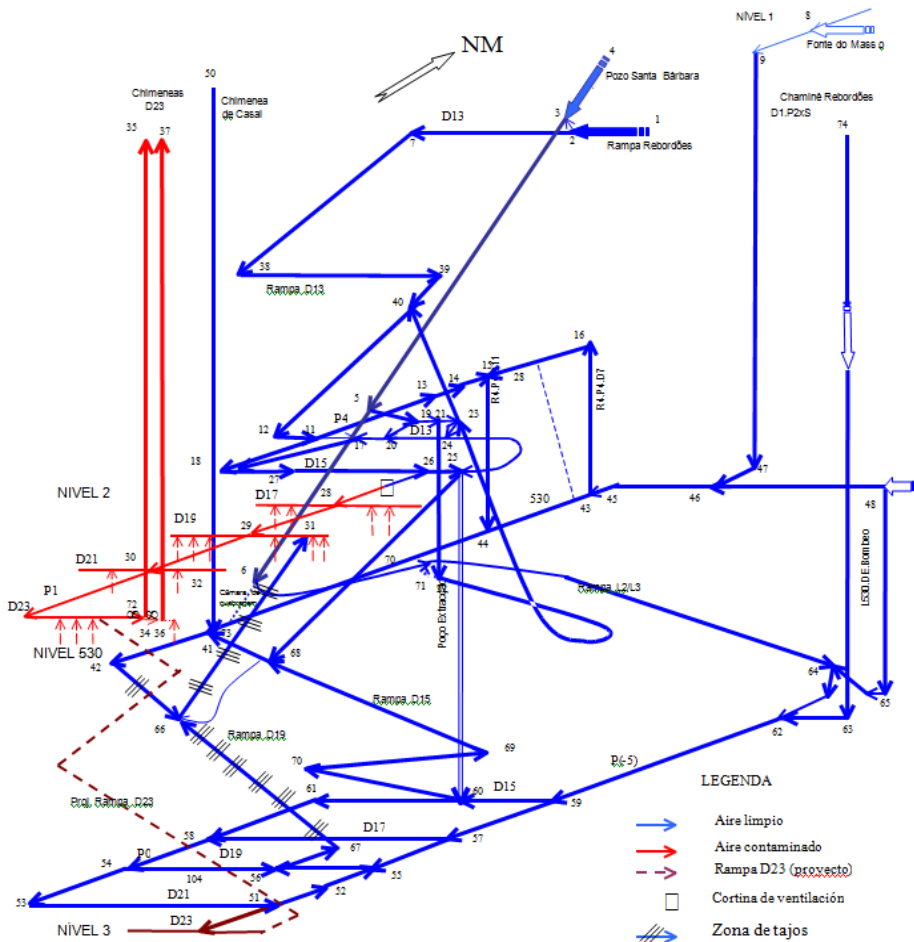


Figura 8.24 Red de aire simplificada para simulación con programa VnetPC2000

Es importante instalar una *cortina de ventilación* en la galería P1, entre D15 y D17, para definir zonas de circulación de aire limpio y aire contaminado. La cortina permite también definir los sitios colectores de aire contaminado que son: D17, D19, D23 (con eje en P1) y P1 (entre D17 y D23).

Como se puede ver, comparativamente la medida correctiva consiste en un cambio total del sistema caracterizado inicialmente en diciembre 2000.

Los resultados presentados en los Cuadros 8.14 y 8.15 y en las figuras 8.25 y 8.26 evidencian que la alternativa 6 resuelve el problema del riesgo ambiental identificado en la red primaria de aire de la atmósfera subterránea de la mina Panasqueira, por obtener velocidades y volúmenes mayores que el mínimo permitido.

Cuadro 8.14 Comparación entre el riesgo ambiental identificado y la medida correctiva

Área	Sitios		Ambiente subterráneo	N.º	Registros en Diciembre 2000		VnetPC2000 Alternativa 6	
	Diciembre 2000	VnetPC 2000			V (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	V (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)
NÍVEL 2	42-23	17-11	Galería D11	1	0,01	0,10	0,58	5,61
	23-45	11-18	Gal.P4 echadero	2	0,15	2,20	0,65	9,46
	49-54	29-30	Galería P1	3	0,16	1,70	6,50	68,68
	49-50	29-31*	Galería D19	4	0,10	0,80	4,74	35,57
	57-58A	33-72*	Galería D23	5	0,02	0,20	12,80	113,00
	64-63	39-40	Rampa D13	6	0,01	0,10	1,31	8,37
NÍVEL 3	82-83	54-56	Galería D19	7	0,01	0,10	1,31	16,07
	81-87	57-55	Galería P(-5)	8	0,05	0,40	2,57	17,96
	97-89	64-62	Galería P(-5)	9	0,46	3,60	2,32	18,32
	97-95	64-62	Galería P(-5)	10	0,55	6,30	1,61	18,32
	81-80	57-58	Galería D17	11	0,14	1,70	0,50	6,01
	78-79A	60-61	Galería D15	12	0,01	0,10	1,55	14,84
	50-51	66-31	Rampa D19	13	0,07	0,54	4,62	35,57
	101-102	56-67	Rampa D19	14	0,01	0,10	4,31	38,32
	75-74	69-68	Rampa D15	15	0,06	0,67	1,54	17,23
	76-75	70-69	Rampa D15	16	0,13	1,93	1,20	17,23
	77-76	70-69	Rampa D15	17	0,18	1,57	2,00	17,23
	35 <sup>A</sup> -90	71-64	Rampa L2/L3	19	0,03	0,25	1,78	16,03
	92-90	71-64	Rampa L2/L3	20	0,31	2,28	2,18	16,03
	Varios	Varios	Tajeos con LHD	21	<0,2	<2,0	>0,54	6,52
	Varios	Varios	Tajeos con jumbo	22	<0,2	<2,0	>0,20	2,40
		Tajeos totales			13,90		43,81	

\* Con el cambio del sistema pasa a ser el colector del aire contaminado

Cuadro 8.15 Comparación de los volúmenes (m<sup>3</sup>/s) de entrada y salida del aire entre lo medido en diciembre 2000 y la alternativa 6 simulada con VnetPC2000

Sitio	Entrada		Local	Salida	
	Diciembre 2000	VnetPC 2000		Diciembre 2000	VnetPC 2000
Pozo Santa Bárbara	15,70	64,26	Chimenea Casal	56,80	-
Rampa Rebordões	23,30	13,57	Chimenea D23E	15,70	56,80
L0/L2 (P4)	2,00	-	Chimenea D23W		56,80
Chim. Rebordões	20,37	13,81			
Salgueira	5,76	2,56			
Chimenea D23.W	6,70	-			
Chimenea Casal		1,39			
L1.P2.Sur F.Masso		7,01			
Total	73,83	113,60	Total	72,50	113,60

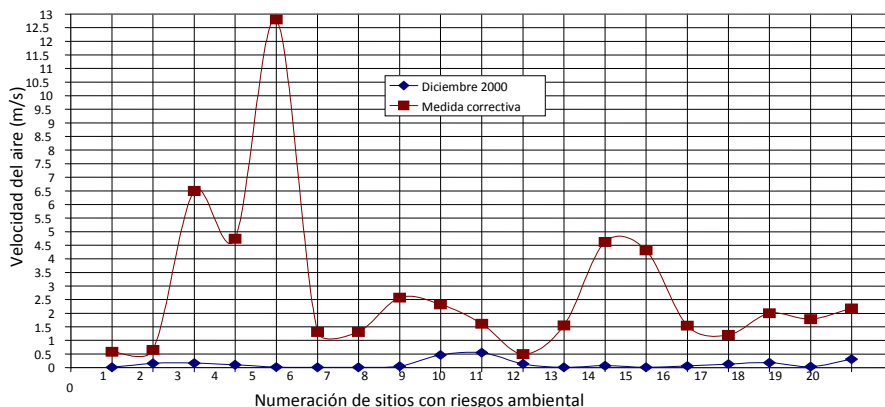


Figura 8.25 Comparación de la velocidad del aire en sitios de riesgo ambiental en relación a la medida correctiva propuesta

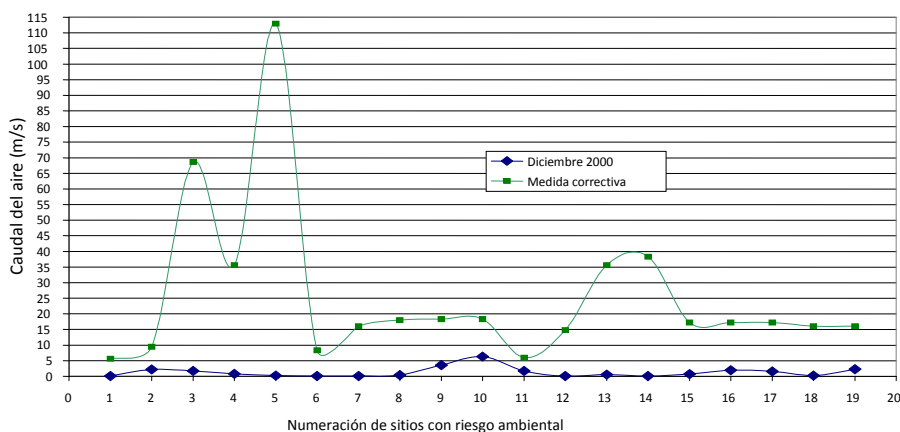


Figura 8.26 Comparación del volumen de aire en sitios con riesgo ambiental en relación a la medida correctiva propuesta

Con un costo de 0,065 €/kW.h, la alternativa 6 tiene un costo menor en 35,86% que las condiciones iniciales caracterizadas en diciembre 2000 (Cuadro 8.16), con un ahorro de 36616,80 €/año, siendo por lo tanto la inversión de 3736,00 € (cierre de aberturas), posible de recuperar en apenas 1,5 meses, siendo viable y favorable técnica y económicamente.

Cuadro 8.16 Costo de operación unitario comparado entre la Alternativa 2 y las condiciones caracterizadas en julio 2000

Condición	Potencia instalada (kW)	Volumen total (m <sup>3</sup> /s)	Costo de operación (m <sup>3</sup> de aire/Euro)
Diciembre 2000	119,36	73,83	34258,04
Alternativa 6	119,36	113,60	52711,89

En conclusión, el riesgo ambiental en la atmósfera subterránea identificado en diciembre 2000, es posible de ser atenuado a los niveles permitidos por la legislación portuguesa con el cambio del sistema de ventilación, o sea, pasando los

dos ventiladores de 80 hp de la chimenea Casal a las chimeneas D23E y D23W y con algunos trabajos de cierre de aberturas y colocación de una cortina de aire en la galería L2.P1.

### 8.3.4. Monitoreo y control

La medida correctiva (alternativa 6) propuesta fue aplicada en los meses de febrero y marzo de 2001, significando un fuerte cambio en el sistema existente.

Después de la aplicación de la medida correctiva se realizó una campaña de monitoreo en mayo, julio y noviembre 2001, la última incluyó la rampa D23 (otra ligada entre el nivel 2 y 3). Se constató que la aplicación del sistema propuesto dio resultados similares a los esperados y con algunos ajustes se consiguió mejorar la calidad del ambiente subterráneo (fig. 8.27).

En diciembre del 2000 se identificó que el flujo de aire limpio en los tajeos (áreas de explotación) era de apenas 13,9 m<sup>3</sup>/s, lo que ocasionaba un alto riesgo. Después de la aplicación de la medida correctiva, un primer monitoreo (mayo 2001) registró un volumen de 39 m<sup>3</sup>/s, en julio de 45,1 m<sup>3</sup>/s y un último monitoreo (noviembre 2001) de 45 m<sup>3</sup>/s; que en todo caso es superior al mínimo estimado (14,24 m<sup>3</sup>/s). La fig. 8.27 muestra la evolución referida, con tendencia a la estabilización.

Una vez resuelto el impacto ambiental negativo en la red primaria, se programó una minuciosa caracterización del aire en los tajeos para el mes de septiembre 2001, cuyo resultado (fig. 8.11) demostró la existencia de una mala distribución del aire, no obstante que la medida correctiva permitía alimentar un volumen superior al mínimo permitido, por lo que se desarrolló la medida correctiva expuesta en el apartado 8.3.3.1.

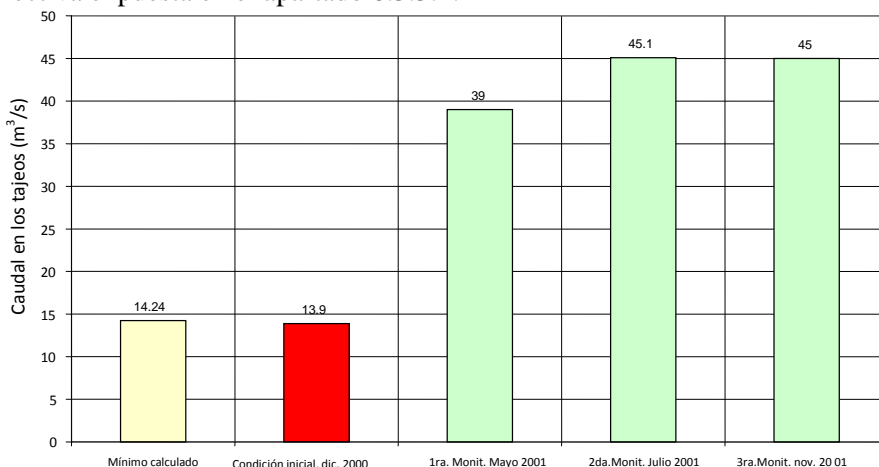


Figura 8.27 Evolución de la entrada de aire limpio en los tajeos después de la aplicación de la medida correctiva (alternativa 6)



## 8.4. Evaluación del riesgo ambiental acústico en el ambiente subterráneo

### 8.4.1. Caracterización de la situación acústica

#### 8.4.1.1. Instrumento utilizado y metodología para la medición del ruido

El instrumento utilizado fue un sonómetro Integrador de Precisión Bruel & Kjaer modelo 2236 de la Sección de Exploración de Minas del Instituto Superior Técnico debidamente calibrado, que mide 6 parámetros sonoros (Cuadro 8.17).

Cuadro 8.17 Parámetros de medición del sonómetro Bruel & Kjaer modelo 2236

Parámetro	Significado	Parámetro	Significado
MaxL	SPL máximo desde el último reajuste	L1	Nivel Sonoro Continuo Equivalente (IEC 804 Impulsiva)
MinL	SPL mínimo desde el último reajuste	SEL	Nivel de Exposición Sonora (IEC 804)
MaxP	Pico máximo del nivel desde el último reajuste	IEL	Nivel de Exposición Sonora (impulsiva)
Peak	Nivel máximo en el intervalo de 1 s	LEPd	Nivel sonoro equivalente
SPL	Nivel RMS máximo en el intervalo de 1s (IEC 651)	L95	Nivel de ruido (RMS) excedido en 95% del tiempo de medición
Leq	Nivel sonoro continuo equivalente (IEC 804)	OVL	Instrumento en sobrecarga (% del tiempo de medición)

Los comandos del aparato permiten almacenar datos de forma automática, calibrar la fecha y hora pico, inicio automático, reajustar un cambio de escala, el contraste, el tiempo de exposición, la interface y los formatos de salida.

El sonómetro permite también imprimir, almacenar, editar y borrar datos; también cuenta con tres tipos de memoria para el almacenamiento, antes de ser transferidos a un computador mediante el uso de un programa.

Como el ruido en el ambiente subterráneo se relaciona con las actividades operacionales (fig. 3.67), instalaciones fijas y móviles (Cuadro 8.18), en cada estación se realizaron mediciones aplicando los estándares de referencia indicados en la fig. 3.74 (segunda parte).

Cuadro 8.18 Locales y fuentes de producción de ruido (equipos)

Fuente de ruido	Tipo de actividad	Local	Equipos
Fija-Móvil	Extracción	L2.D15.Raquete L2. Echadero mineral L3.D15.Galerías base	Guinche de extracción Jaula con vagón Vagones y locomotoras
Fija	Ventilación	L2.Galería D23 L2.Ch.R-4.D23 L3.D19.R-3.AW34.Pto.60	2 Ventiladores de 80 hp 0 Ventilador de 80 hp 1 Ventilador de 7.5 kW
Fija-Móvil	Trituración Primaria	Cámara de trituración	Triturador primario Sistema de transporte
Fija	Perforación	L3.D21.R-2.AW30.Pto.383 L3.D21.R-2.AW30.Pto.382	Jumbo Tamrock H107 (no. 2) Jumbo Tamrock H107 (no. 2)
Móvil	Limpieza	L3.D21.R-2.AW30.Pto.353 L3.D19.R-3.AW34.Pto.80 L3.D19.R-3.AW34.Pto.84	LHD Wager EST-2D (no. 2) LHD Wagner ST-3.5 (no. 15) LHD Wagner ST-3.5 (no. 15)
Móvil	Transporte	L3.Gal.P-5, rampa L2/L3 Rampas Rebordões, L2/L3	Dumper Wagner MT-413 Tractor AGRIA (no.11)
Fija-Móvil	Transporte	Casa Cabeza de Correa	Correa transportadora Tolva de transferencia

El tiempo de medición adoptado fue hasta la estabilización del registro de los valores del nivel sonoro continuo equivalente  $Leq$ , visto que la mayor parte del ruido es continuo.

8.4.1.2. Medición y caracterización del ruido

**a) Pozo de extracción:** para la caracterización del ruido en el pozo de extracción, las mediciones fueron realizadas en el nivel 2 (fig. 8.28 izquierda) y en el nivel 4 (fig. 8.28 derecha).

En el nivel 2, el nivel sonoro continuo equivalente ( $Leq$ ) en el punto 1 (a 1 m del límite del pozo) es máximo, en el área de composición con vagones vacíos (operación de entrada de vagones a la jaula) es mayor y persiste a mayor distancia que en el área de composición con carga (salida de los vagones de la jaula y zona de composición de los vagones con carga).

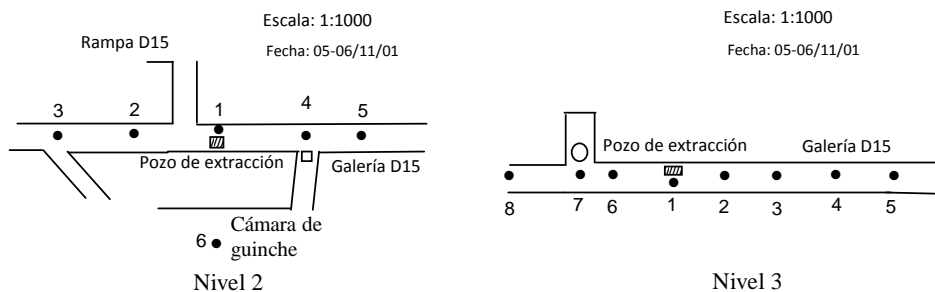


Figura 8.28 Estaciones de medición de ruido en el pozo de extracción

En el Anexo 8.5 se presenta el registro de las mediciones y en la fig. 8.29 se ilustran sus características.

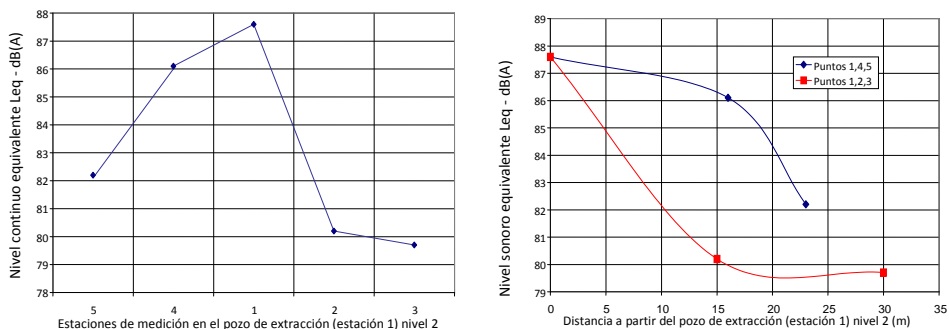


Figura 8.29 Variación del  $Leq$  dB(a) en el pozo de extracción nivel 2

En el nivel 3 la estación 1 también corresponde al pozo, siendo de 1 a 5 en la zona de composición de los vagones con carga y de 1 a 8 en la zona de vagones vacíos. En el Anexo 8.5 se presentan los registros de las mediciones y en la fig. 8.30 se ilustran sus características.

El nivel sonoro continuo equivalente ( $Leq$ ) en la estación 6 es máximo. En la zona de composición de los vagones con carga (operación de entrada de vagones

a la jaula) es mayor y más persistente a corta distancia que en la zona de composición vacía (salida de vagones de la jaula).

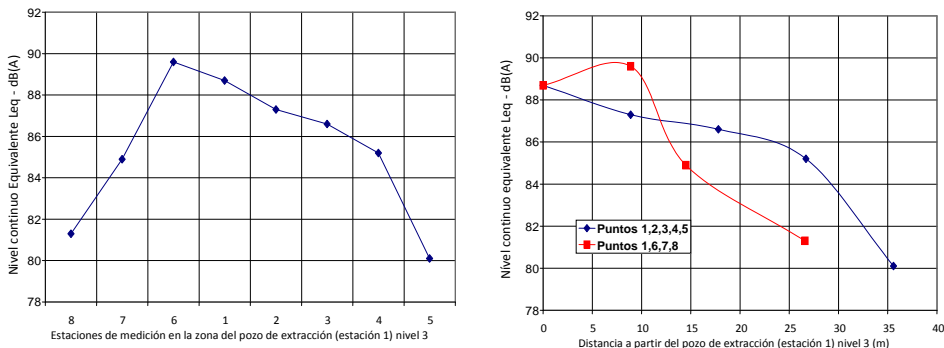


Figura 8.30 Variación del Leq dB en el pozo de extracción nivel 3

En comparación, en el nivel 3 se registra un Leq mayor y persiste a mayor distancia que en el nivel 2.

**b) Ventiladores:** las mediciones se realizaron en un ambiente con influencia del ruido de dos ventiladores principales (80 hp cada uno) instalados en la galería D23 del nivel 2 para extracción del aire contaminado de las chimeneas D23E y D23W. Cercano a estos ventiladores existe otro (80 hp) instalado en la chimenea R-4.D23; en la fig. 8.31 se observan las estaciones de medición, en el Anexo 8.5 los registros y en la fig. 8.33 (a la izquierda) las características.

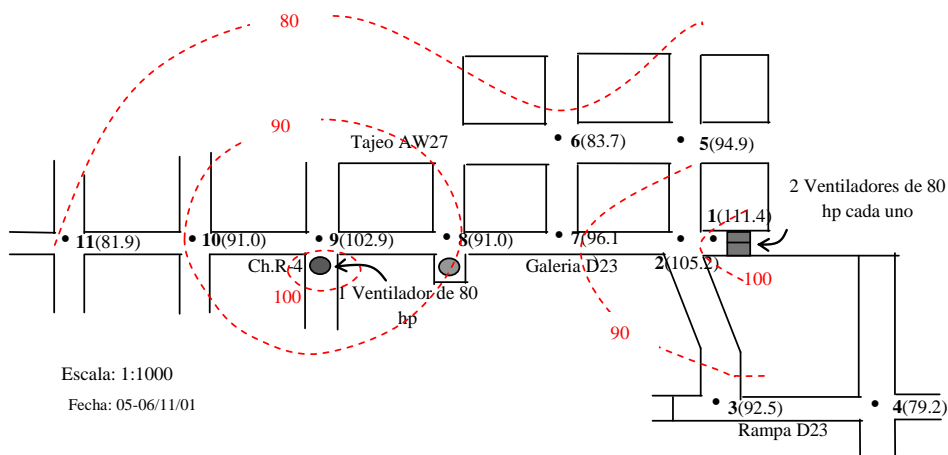


Figura 8.31 Estaciones de medición e isovalores de ruido (dB) en la zona de los ventiladores de 80 hp hasta las chimeneas de extracción D23 y R-4.D23

Las mediciones del ruido generado por los ventiladores auxiliares de 7,5 KW se realizaron en el desmote L3.D19.R-3.AW34.Pto.60 en 7 estaciones (fig. 8.32), cuyos registros están en el Anexo 8.5 y sus características se ilustran mediante la fig. 8.33 (izquierda).

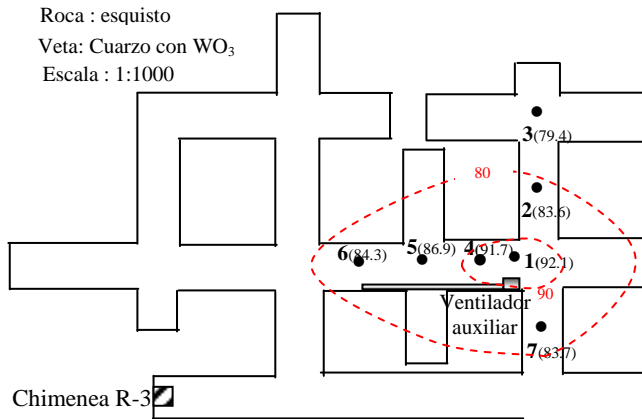


Figura 8.32 Estaciones de medición e isovalores de ruido (dB) producido por un ventilador auxiliar de 7,5 kW en el desmote L3.D19.R-3.AW34.Pto.60

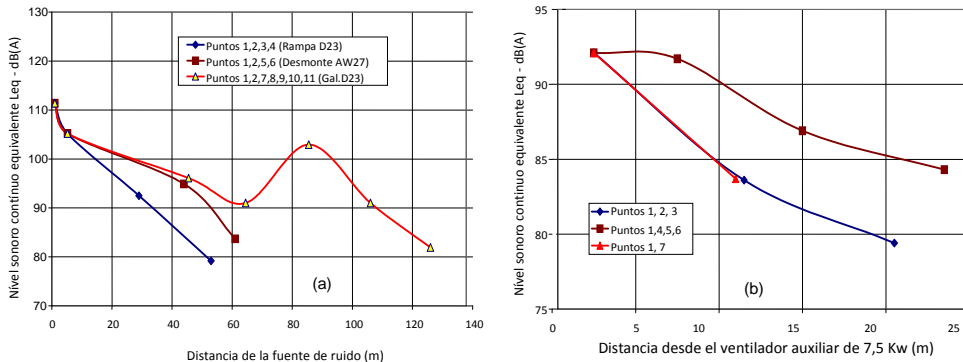


Figura 8.33 Variación del ruido (Leq, dBA) producido por los ventiladores de 80 hp (a) y el ventilador auxiliar de 7,5 kW (b)

Las mediciones muestran que en la rampa D23 existe una rápida disminución influenciada por el macizo rocoso (pilar). En el desmote AW27 es ligeramente mayor pero también con una rápida disminución y en la galería L2.D23, influenciada por el otro ventilador instalado en la chimenea R-4.D23 (estación 9) persiste a larga distancia. Se observa que los dos ventiladores de 80 hp generan un máximo de 111 dB y solo un ventilador cerca de 103 dB.

En la cámara donde estaba instalado el ventilador auxiliar de 7,5 kW con manga de ventilación, el nivel sonoro es mayor y persiste a mayor distancia en relación a lo que sucede en las cámaras laterales.

**c) Trituración primaria:** para la caracterización del ruido generado por la trituración primaria se determinó la localización de las estaciones de medición en el piso del operador y en el panel de control, en el piso del triturador, en el piso de la cámara de trituración y en el pozo Santa Bárbara, tal como se muestra en las fig. 8.34, 8.35 y 8.36. En el Anexo 8.5 se encuentran los resultados de los registros del nivel de ruido y en las figuras 8.37 y 8.38 sus tendencias.

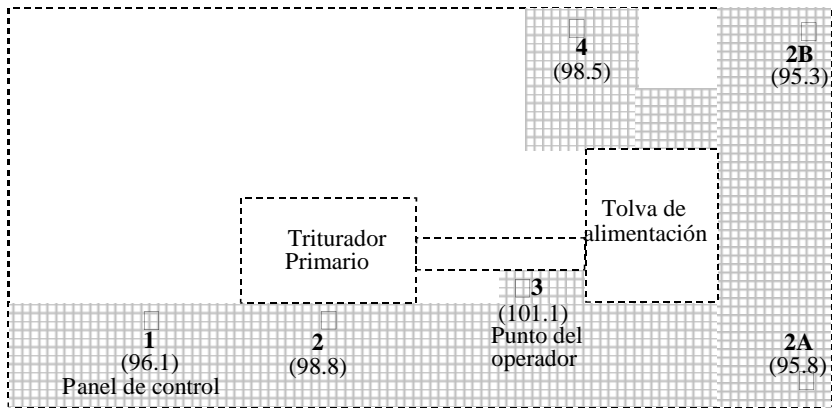


Figura 8.34 Estaciones de medición de ruido (dB) en el 2º piso del triturador primario (operador del panel de control)

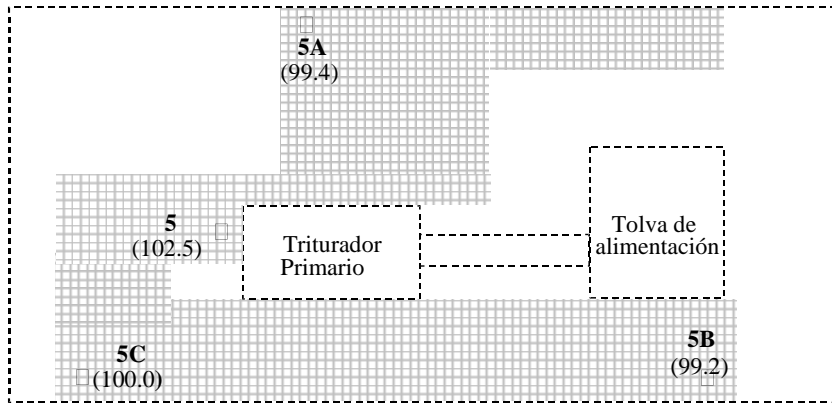


Figura 8.35 Estaciones de medición de ruido (dB) en el 1º piso del triturador primario

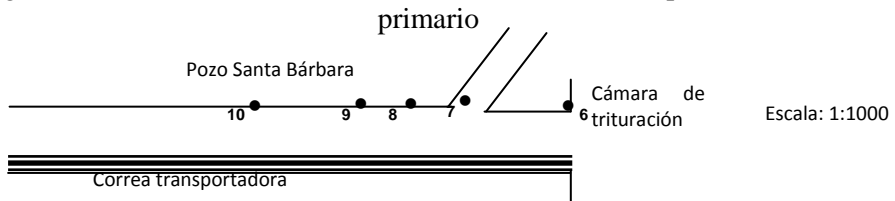


Figura 8.36 Estaciones de medición de ruido (dB) en el pozo Santa Bárbara próximo al triturador primario

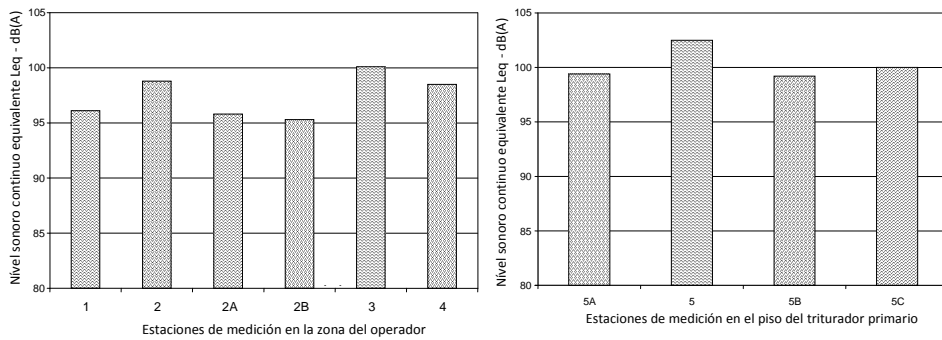


Figura 8.37 Variación del ruido (dB) en el 2º (a) y 1º (b) pisos de la cámara de trituración primaria

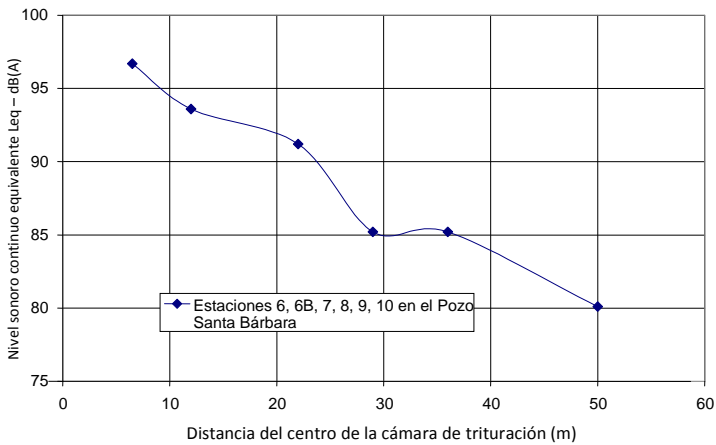


Figura 8.38 Variación del Leq (dB) en el pozo Santa Bárbara

En el piso y en el panel de control del operador el nivel de ruido es mucho mayor, sobre todo donde frecuenta el personal. El piso del triturador primario y todas las áreas frecuentadas por el personal muestran altos valores; finalmente es el piso del triturador primario el que presenta el mayor nivel en comparación con el piso superior. También, existe influencia del ruido producido por el triturador primario en el pozo Santa Bárbara hasta una considerable distancia.

**d) Jumbo para perforación:** para el estudio del impacto del ruido generado por la operación de los jumbos, se seleccionó el tajeo L3.D21.R-2.AW30.Ptos.383-383 donde operaba el jumbo Tamrock monomatic H 107 no.2, las áreas identificadas con las estaciones de medición son ilustradas en la fig. 8.39, cuyos registros de mediciones están en el Anexo 8.5 y las tendencias en la fig. 8.40.

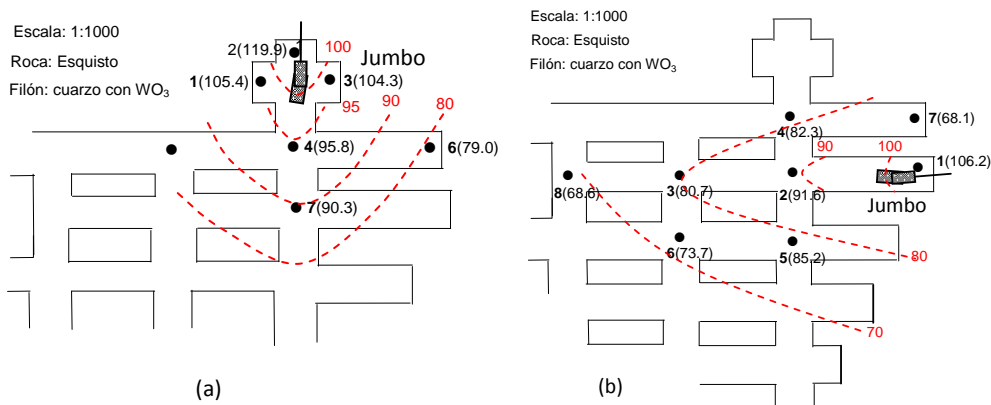


Figura 8.39 Estaciones de medición e isovalores de ruido (dB) teniendo como fuente el Jumbo no. 2 en operación de perforación de dos frentes de desmonte L3.D21.R-2.AW30

La variación del ruido es aproximadamente similar en diferentes posiciones de los frentes, con una rápida disminución en las cámaras protegidas por los pilares. Sin embargo, en las cámaras con acceso directo la variación en función de la distancia es lineal.

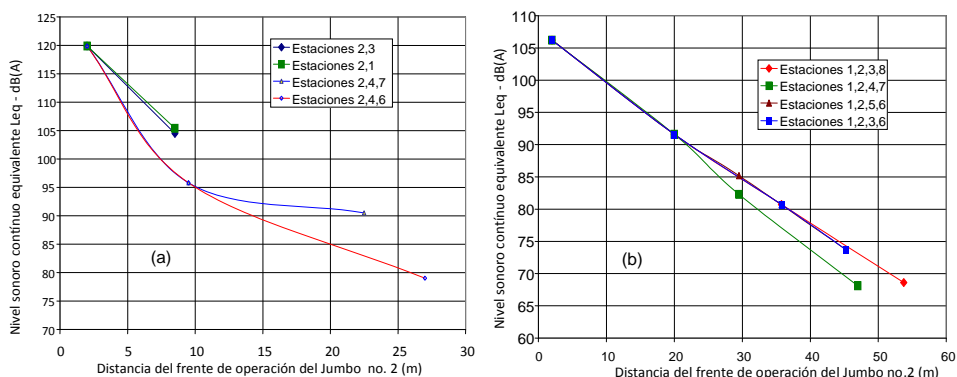


Figura 8.40 Variación del ruido (dB) generado por el Jumbo no. 2 en dos frentes en el tajeo L3.D21.R-2.AW30 (a y b se corresponden con la fig. 8.39)

e) **LHDs eléctricos y diesel:** las mediciones del ruido producido por las palas (LHDs) eléctricas se realizaron en el tajeo L3.D21.R-2. AW30.Pto.353, localizando las estaciones de medición como se ilustra en la fig. 8.41.a, cuyos registros están en el Anexo 8.5 y su tendencia en la fig. 8.41.b.

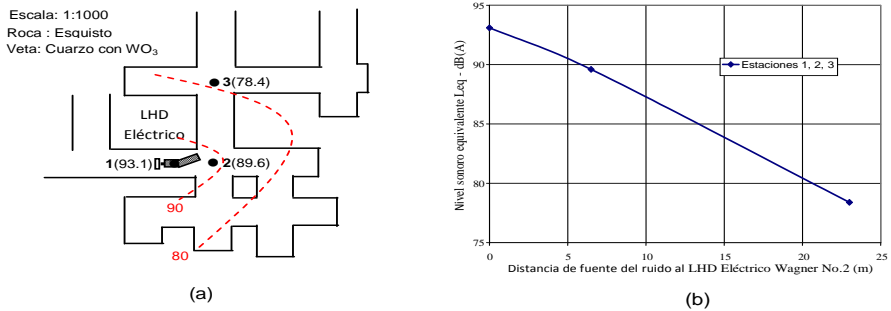


Figura 8.41 Estaciones de medición, isovalores (a) y variación (b) del ruido producido por el LHD Wagner EST-2D no. 2, en el desmote L3.D21.R-2.AW30.Pto.353

Las mediciones del ruido producido por las palas diesel fueron realizadas en los tajeos L3.D19.R-3.AW34.Pto.80 (fig. 8.42.a) y L3.D19.R-3. AW34.Pto.84 (fig. 8.42.b), al momento de la operación del LHD Wagner ST-3.5 (no. 15). Las estaciones de medición están indicadas en la fig. 8.42, los valores medios registrados en el Anexo 8.5 y las tendencias en la fig. 8.43.

El Leq máximo producido por el LHD diesel es de 101,5 dB con persistencia a una distancia considerable.

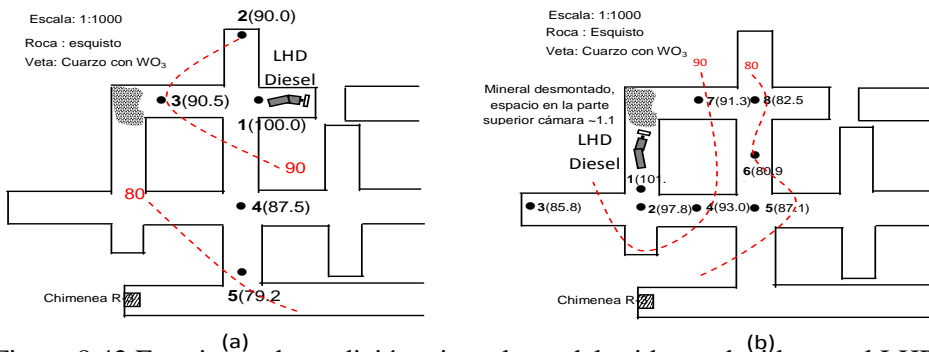


Figura 8.42 Estaciones de medición e isovalores del ruido producido por el LHD Wagner ST-3.5 (no. 15) en el tajeo L3.D19.R-3.AW34.Ptos.80 (a) y 84 (b)

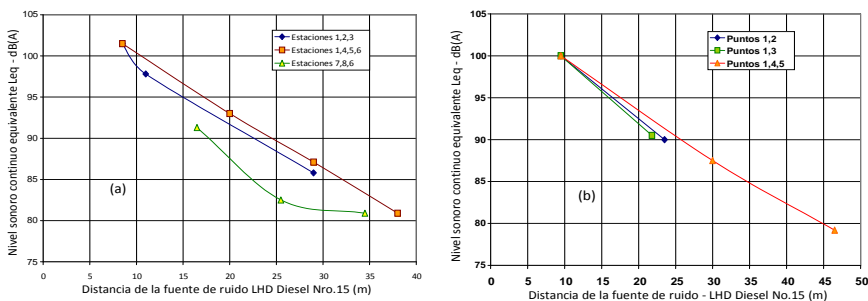


Figura 8.43 Variación del Leq generado por el LHD diesel Wagner ST – 3.5, a partir de 0 m (frente de remoción) indicado como el punto 1 (correspondiente a los tajeos de la figura 8.42)



**f) Cabeza de correa:** para la caracterización de la tendencia del ruido generado por el sistema de la correa transportadora y la transferencia del material al silo en la cabeza de la correa, se determinó la localización de las estaciones de medición en la zona de la casa de la cabeza de correa y del pozo Santa Bárbara, tal como se muestra en la fig. 8.44.a, y la tendencia del nivel de ruido continuo equivalente en la fig. 8.44.b. Los registros obtenidos en las estaciones de medición se presentan en el Anexo 8.5.

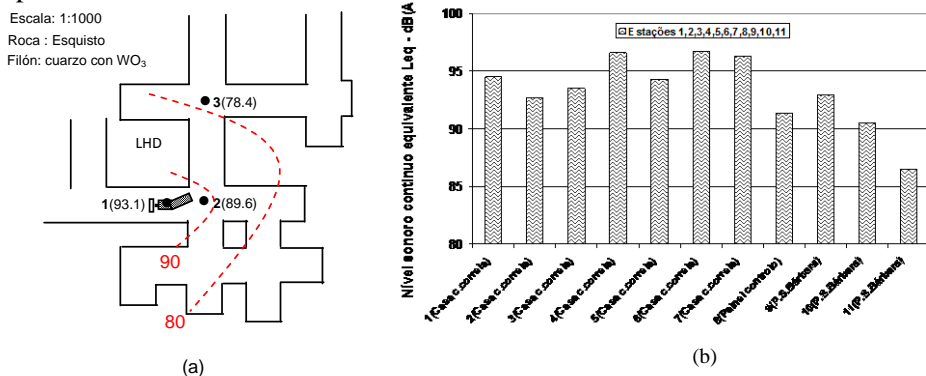


Figura 8.44 Estaciones de medición, isovalores y variación del ruido (Leq) en la cabeza de correa del pozo Santa Bárbara

En la sala de control del sistema de la cabeza de correa, a pesar de estar aislado existe un nivel de ruido de 91,3 dB.

La tendencia del Leq registrada en las estaciones de medición de la casa de cabeza de correa y la parte próxima al pozo Santa Bárbara (fig. 8.44.b) muestra un mayor nivel sonoro en la zona sureste de la casa, mientras que en el pozo Santa Bárbara existe una atenuación gradual hasta el punto 11, que corresponde al inicio de la inclinación mayor de la rampa.

**g) Camiones cargadores y tractor:** los camiones cargadores (Wagner MT-413) realizan la operación de transporte del estéril del nivel 3 al nivel 2 por la galería P-5 (nivel 3) y por la rampa L2/L3 y los tractores AGRIA (no. 11), por la rampa Rebordões, la rampa L2/L3 y otras rampas. Las mediciones fueron hechas para el cargador en la posición del operador y en el caso del tractor en la cabina de transporte del personal. Los resultados se presentan en el Anexo 8.5 y la tendencia del nivel de ruido en la fig. 8.45.a.

Se observa que cuando el camión va cargado para arriba en la rampa, produce un mayor nivel de ruido que cuando va hacia abajo descargado. El nivel sonoro medido en la zona del montacargas en la rampa es menor que los anteriores. El nivel de ruido producido por el tractor en la operación de transporte del personal alcanza valores superiores a los 95 dB.

**h) Locomotoras y volquete de mineral:** el sitio escogido para la medición del ruido fue en una “raquete” del pozo de extracción del nivel 2, con una estación de medición arriba de la máquina y el operador en el área de la batería de la locomotora. En el volquete del mineral la estación se localizó a dos metros del sitio

de descarga de los vagones. Los registros de medición están en el Anexo 8.5 y las tendencias se ilustran en la fig. 8.45.b.

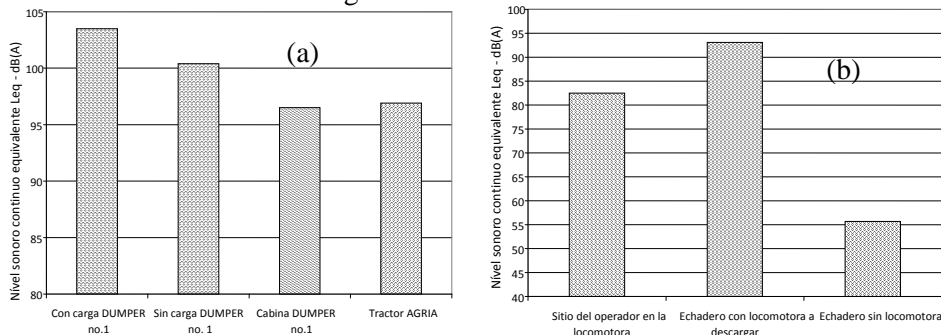


Figura 8.45 Variación del Leq (dB) por la operación del dumper, tractor (a) y locomotora de transporte y descarga (b)

Se observa que en la operación de transporte y descarga de la locomotora el mayor nivel de ruido está en la operación de descarga del volquete.

#### 8.4.2. Identificación del nivel de impacto ambiental acústico

Aplicando la matriz base para la identificación del riesgo ambiental acústico presentada en el Cuadro 3.90 (sección 3.7.5) se procedió a la identificación del nivel de impacto del ruido en el ambiente subterráneo de la mina Panasqueira.

Evaluando con la matriz base los resultados obtenidos en la caracterización se obtiene la matriz de impacto ambiental acústico que se presenta en el Cuadro 8.19, identificándose que existe un impacto ambiental sonoro *alto*, generado por el triturador primario, la cabeza de correa, el cargador Wagner, LHD diesel y el Jumbo Tamrock; un impacto ambiental sonoro *medio* generado por los ventiladores, LHD eléctrico y el tractor AGRIA; y *leve* en el sistema de extracción y composiciones.

#### 8.4.3. Medidas correctivas

La alternativa más viable en este caso fue la protección del oído. El Decreto Reglamentario n.º 9/92 del 28 de abril en su Anexo III da indicaciones para la selección de los protectores de oídos, en función de la atenuación por bandas de octava y atenuación estimada ENR de los protectores, definido por la ISO/DIS 8353.

El primer método está basado en las mediciones en cada puesto de trabajo del nivel de presión sonora continuo equivalente y en cada banda de octava (63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 hertz), después se aplica la ponderación A para cada banda, de manera de conseguir la exposición diaria efectiva.

En el mercado existen muchos fabricantes que proporcionan protectores de oído de tipo tapón y auriculares que, entre las características técnicas que refieren, existe un nivel de protección presumible, por ejemplo para el BILSOM indicados en los Cuadros 8.20 y 8.21.

De la misma manera, existen muchos modelos de protectores con orejera de esta misma marca (Viking, Confort, 717, 727, Economy, 747, Pocket, Impact, etc.),

que pesan desde 135 g hasta 336 g y pueden atenuar (29, 25, 27, 23, 22, 26, 27, 26, 26, etc.) respectivamente.

Cuadro 8.19 Matriz de impacto ambiental acústico en el ambiente subterráneo

Local		Tiempo exposición (horas)	Distancia alcanzada (m)	Hombres	Nivel de impacto acústico
Frente de trabajo	Equipos				
L2.D15.Raquete	Sistema de extracción, winche y vagones	6,5	5 a 18 del pozo	8	∇
L3.D15.Galerías base	Sistema de extracción y vagones	6,5	14 a 27 del pozo	8	∇
L2. Echadero de mineral	Locomotora y vagones (en el echadero)	1,0	-	1	∇
L2.Galería D23 L2.Ch.R-4.D23	2 Ventiladores de 80 hp 1 Ventilador de 80 hp	Eventual	42 a 18 del vent.	Variable	⊗
L3.D19.R-3.AW34.Pto.60	1 Ventilador auxiliar de 7.5 kW	Eventual	9 a 21 del vent.	Variable	⊗
Cámara de trituración	Triturador primario Sistema de correa transportadora	2,05	50 de la cámara	1	◆
L3.D21.R-2.AW30.Pto.383 L3.D21.R-2.AW30.Pto.382	Jumbo Tamrock H107 (no. 2) Jumbo Tamrock H107 (no. 2)	5,6	20 a 30 del frente de fractur.	2	◆
L3.D21.R-2.AW30.Pto.353	LHD Wager EST-2D (no. 2) eléctrico	5,2	13 del LHD	2	⊗
L3.D19.R-3.AW34.Pto.80 L3.D19.R-3.AW34.Pto.84	LHD Wagner ST-3.5 (no. 15) diesel	6,3	22 a 35 LHD	2	◆
L3.Gal.P-5.rampa L2/L3	Cargador Wagner MT-413(no. 1)	6,5	-	1	◆
Rampas Rebordões, L2/L3	Tractor AGRIA (no. 11)	Eventual	-	13	⊗
Casa Cabeza de Correa Pozo S. Bárbara C.Correa	Correa transportadora Silo de transferencia	2,05	Hasta más de 80	1	◆

∇ Leve ⊗ Moderado ◆ Alto

Cuadro 8.20 Características técnicas del protector de oído tapón BILSOM Serie 300

Frecuencia (hertz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Atenuación media (dB)	28,4	37,3	37,9	39,1	36,0	34,6	42,5	46,4
Desviación estandar (dB)	6,4	9,0	9,2	9,7	7,9	4,6	4,9	4,7
Protección presumible (dB)	22,0	28,3	28,7	29,4	28,1	30,0	37,6	41,7

Cuadro 8.21 Características técnicas del protector de oído tapón de silicona BILSOM PERFLEX

Frecuencia (hertz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Atenuación media (dB)		26,2	24,9	25,9	24,0	29,4	33,0	31,4
Desviación estandar (dB)		6,1	6,0	6,6	6,1	3,9	4,5	5,6
Protección presumible (dB)		20,1	18,9	19,3	17,9	25,5	28,5	25,8

Por lo tanto, basado en el protector de oído de esta marca, la medida correctiva se presenta en el Cuadro 8.22.

Cuadro 8.22 Tipos de protector para atenuar el impacto ambiental sonoro

Sitio		Tipo de protector BILSOM
Frete de trabajo	Equipos	
L2.D15.Raquete	Sistema de extracción, winche y vagones	PERPELX
L3.D15.Galerías base	Sistema de extracción y vagones	PERPLEX
L2. Echadero de mineral	Locomotora y vagones (en el echadero)	PERPLEX
L2.Galería D23, L2.Ch.R-4.D23	2 Ventiladores de 80 hp 1 Ventilador de 80 hp	PERPLEX
L3.D19.R-3.AW34.Pto.60	1 Ventilador auxiliar de 7.5 kW	PEPLEX
Cámara de trituración	Triturador primario Sistema de correa transportadora	PERPLEX
L3.D21.R-2.AW30.Pto.383 L3.D21.R-2.AW30.Pto.382	Jumbo Tamrock H107 (no.2) Jumbo Tamrock H107 (no.2)	Serie 300 o Viking
L3.D21.R-2.AW30.Pto.353	LHD Wager EST-2D (no.2) eléctrico	Serie 300 o Viking
L3.D19.R-3.AW34.Pto.80 L3.D19.R-3.AW34.Pto.84	LHD Wagner ST-3.5 (no.15) diesel	Serie 300 o Viking
L3.Gal.P-5, rampa L2/L3	Cargador Wagner MT-413(no.1)	Serie 300 o Viking
Rampas Rebordões, L2/L3	Tractor AGRIA (no.11)	PERPLEX
Cabeza de Correa Pozo S. Bárbara C.Correa	Correa transportadora Tolva de transferencia	Serie 300 o Viking

#### 8.4.4 Monitoreo y control

Aplicada la medida correctiva es necesario acompañarla con un proceso de capacitación del personal, de tal forma que tomen conciencia del riesgo ambiental al que están expuestos y que los dispositivos de protección suministrados sean utilizados efectivamente.

Por otro lado, será necesario implementar una supervisión permanente que permita obtener una real y efectiva aplicación de la medida correctiva.

## 8.5. Evaluación del riesgo ambiental en el dominio ambiental del agua subterránea

### 8.5.1. Caracterización de la situación del agua subterránea

#### 8.5.1.1. Hidrogeología de la zona

La zona donde se localiza la mina tiene una precipitación media de 1602 mm/año, con una variación media mensual indicada en la fig. 8.46 para el año hidrológico de 1998/99 (Instituto Nacional del Agua (INAG) del Ministerio del Ambiente).

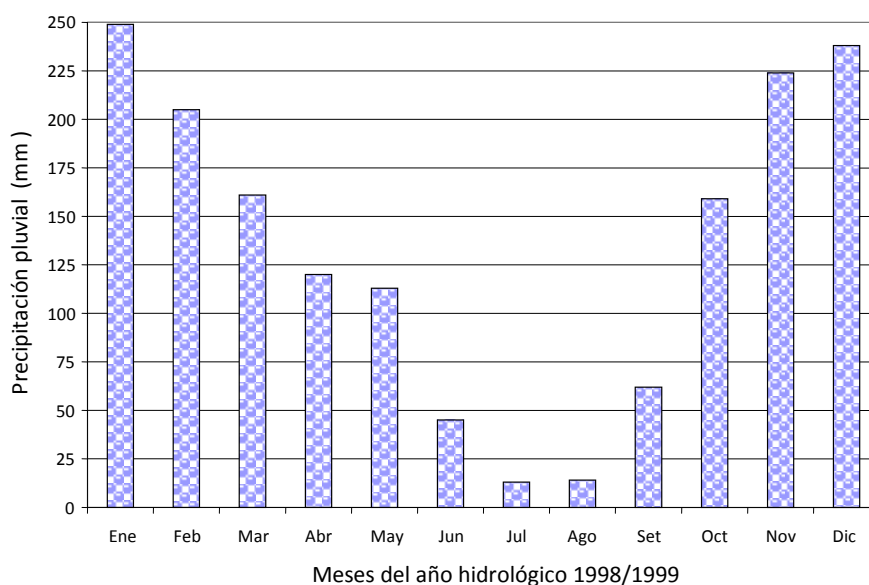


Figura 8.46 Precipitación del año hidrológico 1998/99 (elaborado con registros de la Estación Meteorológica 12L/03 de Covilhã de INAG – DHRH SNIR – Ministerio del Ambiente, 2000 disponible en <http://www.inag.pt/>)

El registro estadístico muestra que el mayor nivel de precipitación pluvial en la zona ocurre en enero. Por lo tanto, las mediciones hechas en el ambiente subterráneo (enero 2001) corresponden a la mayor presencia de agua (caudal) en la mina.

Fisiográfica y topográficamente, el área superficial de las operaciones subterráneas actuales es de carácter montañoso con alturas que varían de 650 a 950 metros. Esta fisiografía concentra 6 líneas de agua perfectamente definidas (fig. 8.47), que confluyen en el río Bodelhão.

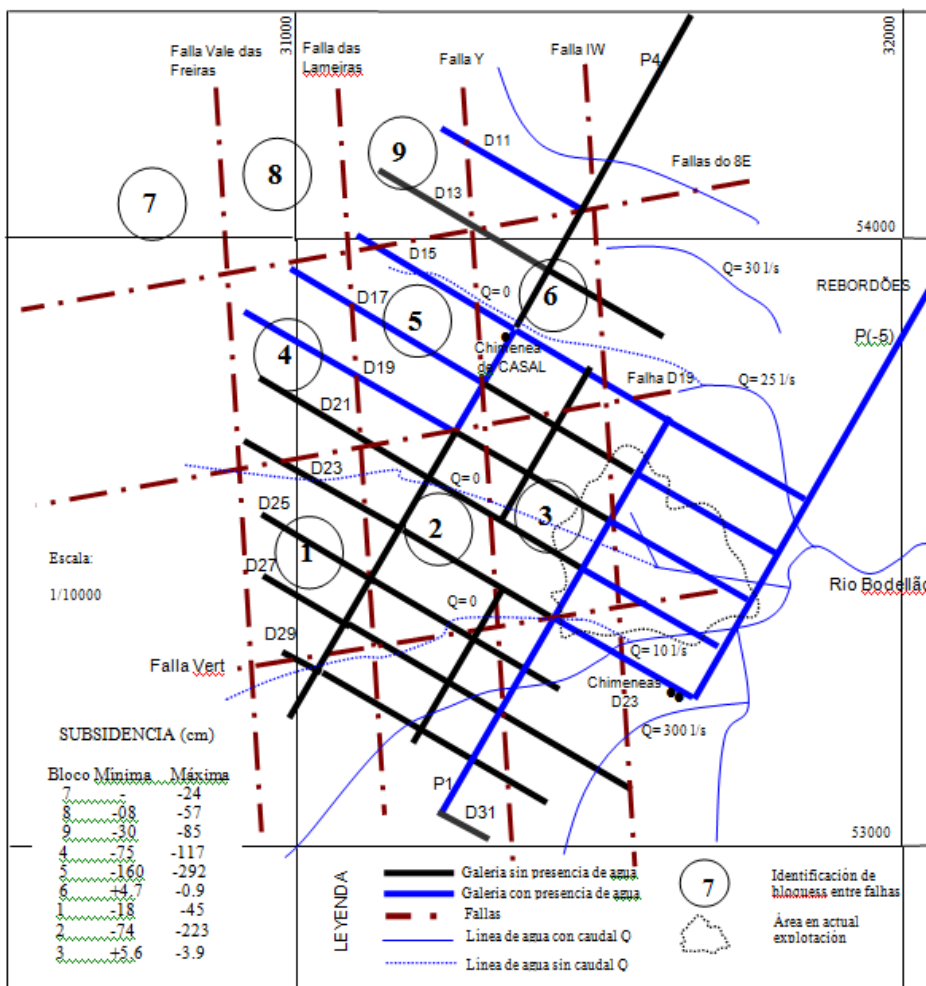


Figura 8.47 Mapa de correlación del agua presente en el subsuelo, líneas de agua superficiales y subsidencia del macizo rocoso (elaborado con base en las mediciones hechas en enero 2001 y estudio realizado por C. Dinis da Gama, 1998)

En la superficie correspondiente al área de explotación existe subsidencia del macizo rocoso, influenciado por las aberturas subterráneas producto de la explotación (fig. 8.5), delimitando bloques rocosos (fig. 8.47) para las cuatro fallas con dirección Norte-Sur e inclinación de 80° a 87° con sentido Este (Valle de Freiras, Lameiras, Y e IW) y tres fallas con rumbo Este-Oeste con inclinación de 63° a 89° en sentido Norte y otra falla al Sur registrada con el nombre *de vert.* en el plano).

La fig. 8.47 permite caracterizar que en el área de la subsidencia y en las líneas naturales de agua superficial, no existe drenaje del agua, lo que indica que existe una filtración para el medio subterráneo, concentrándose en las aberturas subterráneas localizadas bajo el área de esta subsidencia.

### 8.5.1.2 Caracterización cuantitativa del agua subterránea

Para caracterizar la cantidad y calidad del agua subterránea presente en la mina Panasqueira se recolectaron muestras (fig. 8.48) y mediciones del caudal (fig. 8.49) del agua presente en todos los frentes de trabajo comprendidos entre el nivel 1 y el nivel 3 en estaciones identificadas adecuadamente (figura del Anexo 8.6), en fechas comprendidas entre el 12 y el 17 de enero 2001, basados en los procedimientos técnicos desarrollados en el capítulo 3 de la segunda parte y específicamente, cónsono con los estándares referidos en el Cuadro 4.98, cuyos resultados están en el Anexo 8.7.



Figura 8.48 Recolección de agua en las aberturas subterráneas



Figura 8.49 Mediciones de velocidad y caudal de agua subterránea

En el aspecto cuantitativo, el agua presente en el ambiente subterráneo tiene las características que se presentan en los Cuadros 8.23 y 8.24 y en los gráficos ilustrados en la fig. 8.50, y que se pueden resumir en los siguientes términos:

Cuadro 8.23 Caracterización del caudal de aguas subterráneas basado en las mediciones realizadas del 12 al 17 de enero de 2001

Nivel	Fuentes de agua	Caudal (l/s)	Caudal (l/s)	Drena por	Drena para	Drenaje
1	Zona D11.W	3,31	146,6	R4.D5	L530 Salgueira	Gravedad
	Zona D2.W, D1.W, P4, P3	12,99		D1.P2xS	L530 Salgueira	Gravedad
	Zona D2.W, D1.W, P4, P3	91,70		Gal. F. Masso	Fuente Masso	Gravedad
	Pozo Santa Bárbara	30,00		Pozo S.Bárbara	L530 Salgueira	Gravedad
	Rampa Rebordões	8,60		Pozo S.Bárbara	L530 Salgueira	Gravedad
2	Zona P4 Norte	7,53	168,2	R4.D11	L530 Salgueira	Gravedad
	Zona D15.W	100,26		P4 y R4.D15	L530 Salgueira	Gravedad
	Zona D17W	3,10		P4 y Ch. Casal	L530 Salgueira	Gravedad
	Zona D19.W	57,24		P4 y Ch.Casal	L530 Salgueira	Gravedad
	Zona P1 Sul	45,86		D23E P1, D15E	L530 Salgueira	Gravedad
3	Zona AW27 (L2.D23.E)	10,00	125,5	D23.E,P1,D15.E	L530 Salgueira	Bombeo
	Zona AW31(r. D19)	43,97		Ac. Rampa D19	L530 Salgueira	Bombeo
	L3	71,56		Rampa L2/L3	L530 Salgueira	Bombeo

Cuadro 8.24 Balance hídrico de aguas subterráneas con descarga en Salgueira

Fuente del agua	Caudal (l/s)	Porcentaje (%)
L1	146,60	18
L2	168,13	21
L3	125,53	16
L0 y otros*	369,96	45
TOTAL ambiente subterráneo	810,22	100

\* Estimado por diferencia

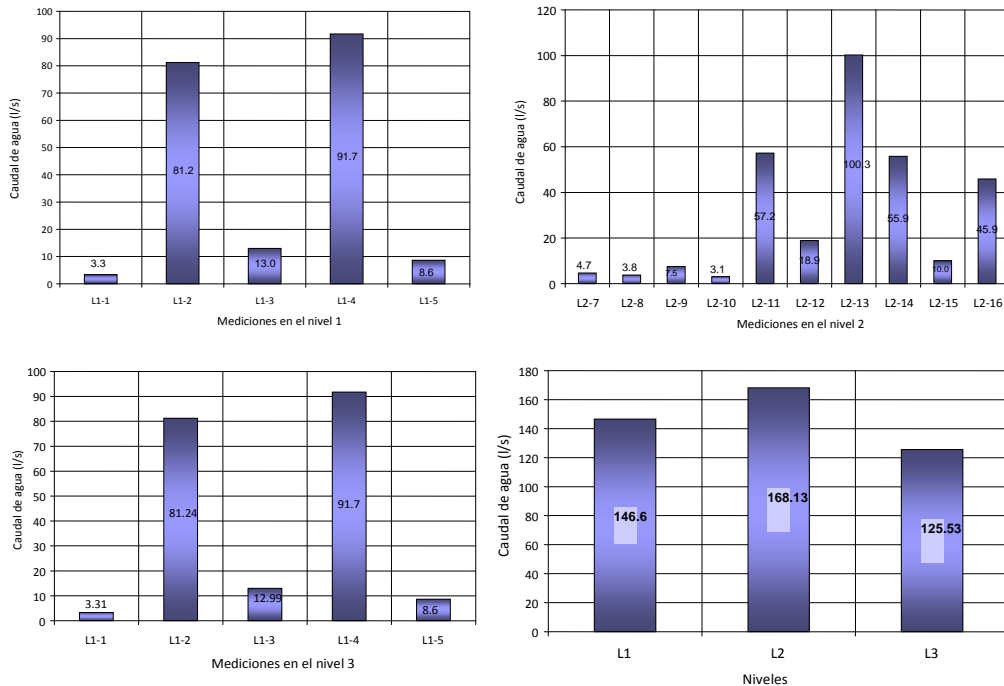


Figura 8.50 Caudal de agua en el ambiente subterráneo en los niveles 1, 2 y 3



El mayor caudal total de agua medido corresponde al nivel 2 (168,13 l/s) y el menor al nivel 3 (125,53 l/s), mientras que en el nivel 1 fluye un caudal intermedio (146,60 l/s). En el nivel 1 la mayor fuente de agua (91,70 l/s) se produce en la zona Norte (D2.W, D1.W, P4 y P3, que drena a las fuentes de Masso y Salgueira). En el nivel 2 las mayores fuentes de agua son las de la zona Oeste que corresponde a D15.W (100,26 l/s), la zona Suroeste que es principalmente la D19.W (57.24 l/s) y al Sureste la D23 y P1 (55.86 l/s). Este caudal de agua drena por el nivel 530 (Salgueira).

El balance hídrico del agua subterránea, considerando el caudal total medido en Salgueira (810,22 l/s) indica que de esta cantidad el 45% proviene de la zona Norte de la galería Salgueira, o sea, de las zonas de explotación antiguas del nivel 0 y, 16% (125,53 l/s) de la zona del nivel 3, que debe ser controlada con sistema de bombeo.

De esta forma, la cantidad de agua que se requiere controlar, mediante un sistema de bombeo, es de un total de 125,53 l/s, del cual 53,97 l/s son controlados mediante bombas sumergidas (tajeos) y 71,56 l/s por la estación de bombeo.

En el macizo rocoso donde se realizan los trabajos de explotación, formado por esquistos algo compactos, la mayor influencia para la presencia de agua en los trabajos subterráneos son las 4 fallas con dirección Norte-Sur y las 3 fallas con dirección Este-Oeste (fig. 8.47), que provocan la subsidencia de los bloques formados entre ellas.

En el Cuadro 8.25 se observa que el área con el mayor caudal de agua (160,6 l/s) está en la parte Oeste del P4 entre el D15 y el D19, que corresponde a la mayor subsidencia existente (117 cm a 292 cm).

Cuadro 8.25 Correlación del agua subterránea, agua superficial y subsidencia del macizo

Nivel	Identificación del agua en el subsuelo			Bloque entre fallas (subsidencia máxima)	Agua superficial	
	Ambiente subterráneo	Caudal (l/s)	pH		Cantidad de líneas de agua	Caudal (l/s)
1	D11.W	3,31	7,43	9 (85 cm)	1	-
2	D15.W	100,26	4,70	9,5(292 cm)	1	0.0
	D17.W	3,10	4,70	4,5(117 cm)	1	0.0
	D19.W	57,24	3,16	4,5(117 cm)	-	-
	P1 Sur	45,86	4,31	3(5.6 cm)	2	0 y 10
3	AW27 (D.23)	10,00	6,20	-	2	0 y 10
	AW31	43,97	3,70	2,3(223 cm)	2	0 y 0
	(r.D19)	71,56	6,72	2,3(223 cm)	3	0, 0, y 10
	P(-5)					

En las áreas afectadas por la subsidencia no existe drenaje de agua en las líneas de agua naturales, con una clara identificación de que toda esta agua drena para las aberturas del ambiente subterráneo.

La presencia de un caudal de 10 l/s y 300 l/s en las líneas naturales en la zona Suroeste, que corresponde a la parte superior de la galería P4 (área definida

para P(-5), P1 y D23, D31) y de la zona Suroeste de P(-5), indica una zona aún sin problemas de subsidencia del macizo rocoso.

El área de explotación actual (entre P1, P(-5) y D17, D23) todavía no tiene gran influencia en la subsidencia del macizo (5,6 cm), aspecto que se verifica con la inexistencia de agua en las líneas de la parte Oeste y aún en presencia de agua en las líneas de la parte Este. Sin embargo, se observó en el subsuelo que en los tajados abandonados como el AW27 ya se está iniciando el abatimiento.

La curva de la correlación entre la subsidencia máxima de los bloques vs el caudal de agua subterránea (fig. 8.51) muestra que la presencia del factor agua contribuye considerablemente en la mayor o menor subsidencia de los bloques, actuando como un medio lubricante en los contactos de las fallas principales.

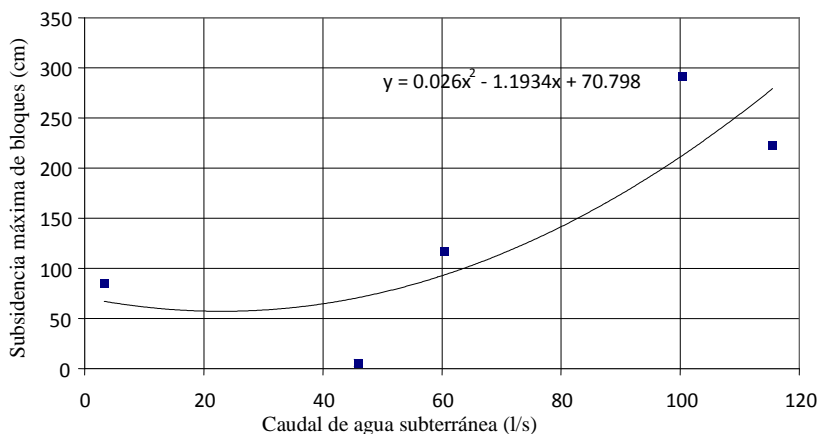


Figura 8.51 Correlación de la subsidencia máxima de los bloques vs caudal de agua subterránea

### 8.5.1.3. Caracterización cualitativa del agua subterránea

Los resultados de los análisis realizados en el laboratorio de la mina Panasqueira a las muestras de agua obtenidas en el ambiente subterráneo aguas arriba y aguas abajo del río *Bodelhão* (descarga por la galería de la Fuente Masso y de Salgueira) se presentan en el Anexo 8.7 y se ilustran en las figuras 8.52, 8.53, 8.54 y 8.55.

El pH del agua en el ambiente subterráneo oscila entre 3,0 y 6,5, presentando un pH de 4 en el punto de descarga al exterior, correspondiendo a un drenaje ácido. El pH del agua del río *Bodelhão* oscila entre 4 y 5, lo cual permite concluir que esta agua también es ácida.

En el ambiente subterráneo del nivel 1, la concentración total de sólidos en suspensión presenta una concentración inferior que en los niveles 2 y 3. Las aguas de los niveles 2 y 3 son más turbias dado que son niveles en operación actualmente. En el río *Bodelhão*, en aguas arriba del punto de vertido de la mina existe una concentración muy baja de sólidos.

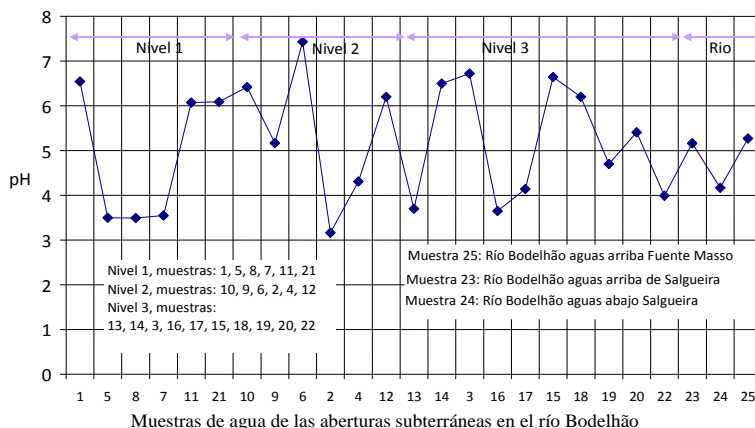


Figura 8.52 pH del agua subterránea que drena en las aberturas subterráneas, en la descarga y aguas arriba y aguas abajo del río Bodelhão

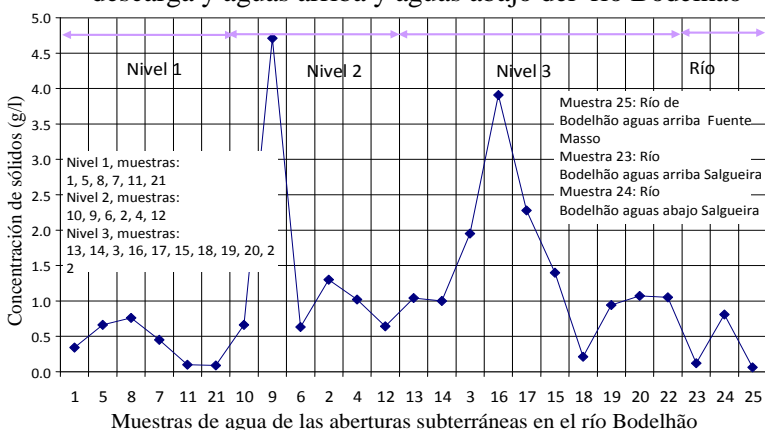


Figura 8.53 Concentración de sólidos en el agua que drena en aberturas subterráneas y en el río Bodelhão

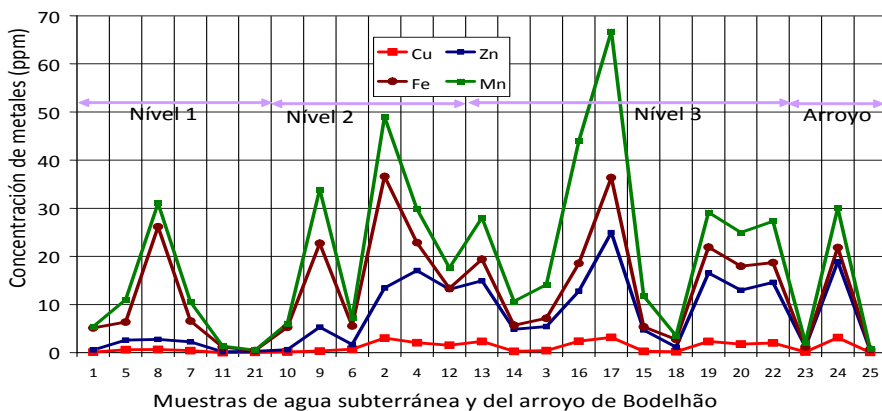


Figura 8.54 Concentración de metales en el agua subterránea que drena en aberturas subterráneas y en la descarga aguas arriba y aguas abajo del río Bodelhão

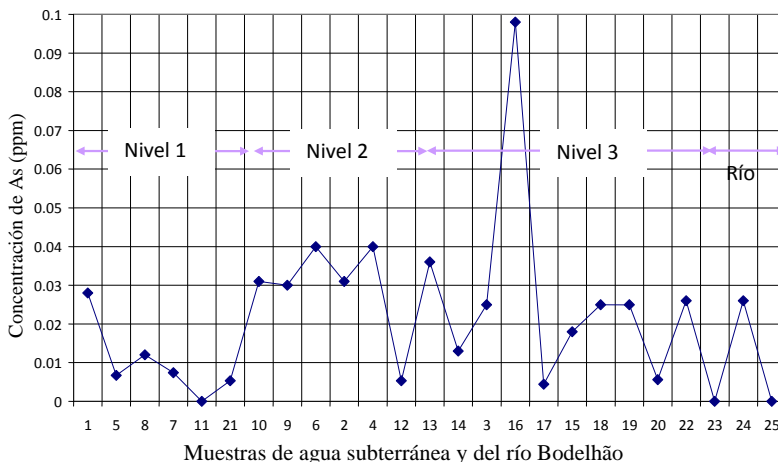


Figura 8.55 Concentración de arsénico en el agua que drena en aberturas subterráneas y en el río Bodelhã

El agua de los niveles 2 y 3 presenta una mayor concentración de metales que la del nivel 1 y del que en el río Bodelhã. En el río Bodelhã, aguas arriba del punto de descarga de la galería Salgueira presenta una menor concentración de metales en relación con la cantidad en la Fuente Masso y aguas abajo de Salgueira.

### 8.5.2 Identificación del impacto ambiental por la acción del agua subterránea

#### 8.5.2.1. Riesgo ambiental debido al caudal

El agua presente en los niveles 1 y 2 drena al exterior por gravedad (Cuadro 3.60), por lo que no presenta riesgo ambiental subterráneo y consecuentemente, el riesgo está centrado en el caudal de agua presente en el nivel 3. Los Cuadros 3.60 y 3.61 indican que la cantidad de agua que drena en el sentido de la estación de bombeo es de 71,56 l/s, lo que representa el máximo valor, pues fue medido en el mes de mayor precipitación pluvial (fig. 8.46) y, aún cuando ocurra una inundación en esta mina ( $Q_{m\acute{a}x}$ ), con riesgo de crecer hasta 125,53 l/s en la hipótesis de aumento de los tajeos AW27 (L2.D23E) y AW31 (rampa D19).

Para la identificación del riesgo ambiental se aplicó la matriz base elaborada con un estándar referencial (Cuadro 4.11) que en este caso es de 71,56 l/s, obteniéndose una matriz base específica para el caso de la mina Panasqueira (Cuadro 8.26).

Cuadro 8.26 Matriz base y evaluación del riesgo ambiental debido al caudal de agua subterránea en la mina Panasqueira

Matriz base		Evaluación del riesgo ambiental	
Nivel de riesgo	$Q_{m\acute{a}x}$ y $Q$ (l/s)	$Q$ (l/s)	Nivel de riesgo
Leve ▽	$71,56 \leq Q \leq 75,14$	125,53	Alto ◆
Moderado ⊗	$75,14 < Q \leq 78,72$		
Alto ◆	$Q > 78,72$		

8.5.2.2. Riesgo ambiental debido a la calidad

A nivel general, el pH de las aguas identificadas en el ambiente subterráneo de la mina Panasqueira es menor que 7, por lo tanto se pueden calificar como aguas ácidas.

Es obvio que no tiene sentido realizar una evaluación del riesgo ambiental de la calidad del agua en el ambiente subterráneo, pero a partir del punto de descarga existe el riesgo, por la acción del agua ácida, de contaminar las aguas superficiales que se descaaragan al río Bodelhão, por lo tanto, la evaluación del riesgo ambiental incluye la cantidad total de las descargas.

La identificación del riesgo ambiental, por la alteración de la calidad del agua superficial, provocada por la descarga del agua de la mina (agua ácida), se hace aplicando la matriz base elaborada en el Capítulo 4 de la segunda parte del presente trabajo, considerando la norma Europea y Portuguesa y en función del uso (riego, consumo humano, piscícola) (Cuadro 4.12) y que, aplicando esta matriz a las condiciones de la calidad del agua del río Bodelhão (aguas abajo de la descarga del agua de mina), resulta la matriz de impacto ambiental que se presenta en el Cuadro 8.27.

Cuadro 8.27 Matriz de impacto ambiental de la calidad del agua subterránea

Localización de las aguas	Nº	Contaminante	Registro C <sub>r</sub> (ppm)	Nivel de riesgo ambiental				
				Para riego		Para consumo humano		Para peces
				C <sub>VLA</sub> (ppm)	Riesgo	C <sub>VLA</sub> (ppm)	Riesgo	Riesgo
Río Bodelhão, aguas arriba de la Fuente Masso (primera descarga de agua ácida)	1	pH	5,27	4,5 – 9,0	-	6,5 – 8,5	∇	∇
		Cu	0,04	5	-	0,10	-	-
		Zn	0,52	10	-	-	-	-
		Fe	0,13	-	-	0,20	-	-
		Mn	0,09	10	-	0,05	◆	-
		As	0,00	10	-	0,05	-	-
Río Bodelhão, aguas arriba de Salgueira (segunda descarga de agua ácida)	2	pH	5,16	4,5 – 9,0	-	6,5 – 8,5	⊗	∇
		Cu	0,15	5	-	0,10	◆	-
		Zn	1,04	10	-	-	-	-
		Fe	0,03	-	-	0,20	-	-
		Mn	0,87	10	-	0,05	◆	-
		As	0,00	10	-	0,05	-	-
Galería Salgueira (descarga de agua subterránea ácida)	3	PH	3,99	4,5 – 9,0	∇	6,5 – 8,5	◆	◆
		Cu	2,01	5	-	0,10	◆	◆
		Zn	12,60	10	◆	-	-	◆
		Fe	4,09	-	-	0,20	◆	-
		Mn	8,60	10	-	0,05	◆	-
		As	0,026	10	-	0,05	-	-
Río Bodelhão, aguas abajo de Salgueira (el agua drena al río Zezere)	4	pH	4,18	4,5 – 9,0	∇	6,5 – 8,5	◆	⊗
		Cu	3,11	5	-	0,10	◆	◆
		Zn	15,80	10	◆	-	-	◆
		Fe	2,91	-	-	0,20	◆	-
		Mn	8,20	10	-	0,05	◆	-
		As	0,026	10	-	0,05	-	-

∇ Leve    ⊗ Moderado    ◆ Alto

La matriz de impacto ambiental y las ilustraciones en las figuras 8.56 y 8.57 muestran que en el momento de las mediciones, el drenaje ácido descargado a través de las galerías de Fuente Masso y Salgueira contamina el agua del río

Bodelhão, en un nivel *moderado para riego* y *alto para consumo humano y piscícola*, pudiéndose concluir también que existe un *alto* riesgo ambiental para los recursos animales en el agua del río. Otra conclusión es que el agua subterránea descargado por la galería Fuente de Masso tiene muy poca influencia en la contaminación del agua de este río.

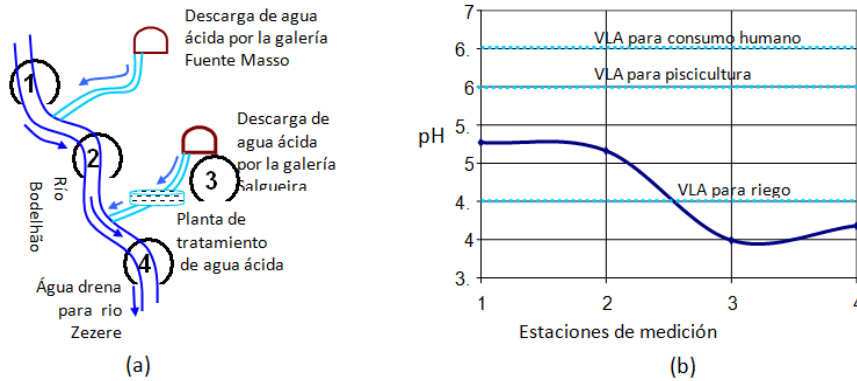


Figura 8.56 Puntos de muestreo del agua (a), acidez y valores límite permitidos (b) en la descarga de agua de mina y agua del río Bodelhão

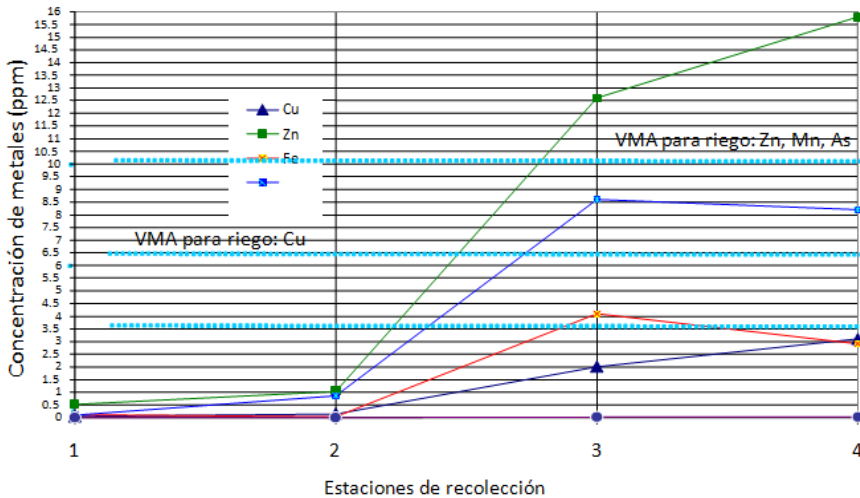


Figura 8.57 Concentración de metales en los puntos de muestreo en el río Bodelhão

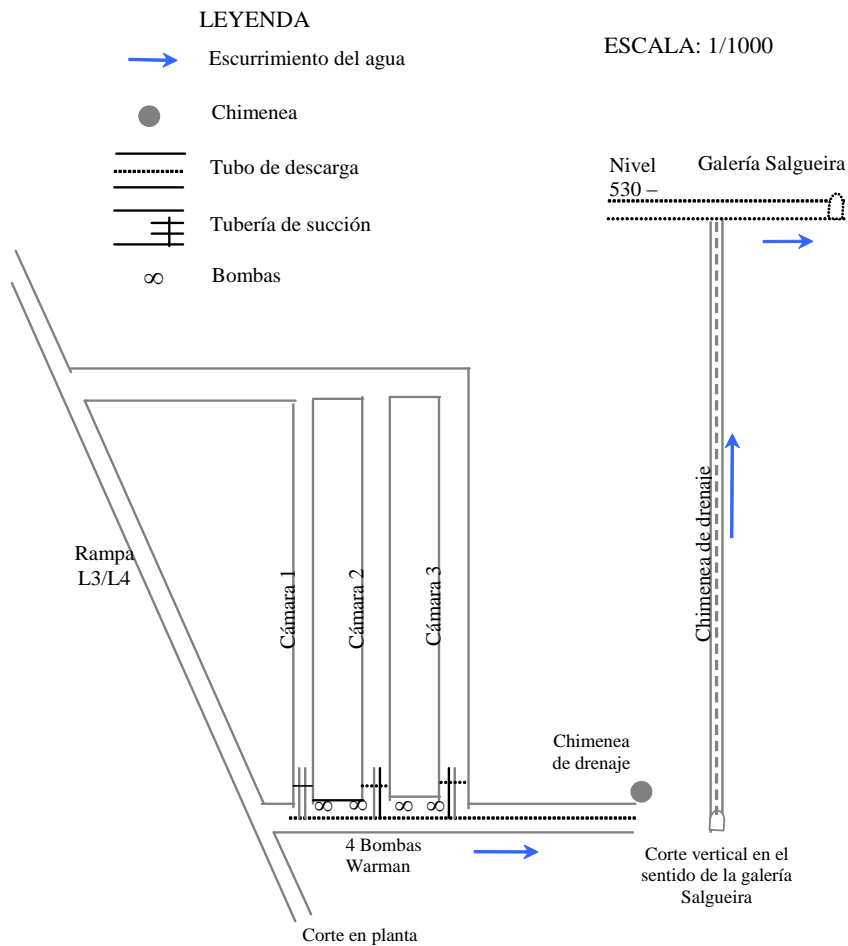
### 8.5.3 Medidas correctivas para atenuar el riesgo ambiental

#### 8.5.3.1. Para el riesgo ambiental debido al caudal de agua

El impacto ambiental del agua subterránea debido al caudal está en relación con el riesgo de inundación del nivel 3, así, la técnica más adecuada es la del bombeo.

Actualmente la estación de bombeo está instalada a una cota de 457,50; está compuesta por 3 cámaras de almacenamiento de agua (1, 2 y 3) excavadas en la

roca con una inclinación negativa en el sentido de la galería de las bombas; tiene instaladas 2 bombas Warman de 150 kW para la cámara 1 y otras dos bombas, también Warman de 100 kW para la cámara 2, no habiendo ninguna instalada en la cámara 3. El agua es bombeada a través de tuberías instaladas en la galería de las bombas y el drenaje en la chimenea que comunica con el nivel 530 (Galería Salgueira), para ser descargada por la boca de la galería Salgueira (fig. 8.58).



CONDICIONES DEL SISTEMA AUXILIAR PARA EL BOMBEO

- Tres cámaras de bombeo
- Tuberías de succión y de descarga de  $\phi = 8''$
- Dos válvulas y dos codos de  $90^\circ$  para cada cámara
- Dos codos de  $90^\circ$  y dos válvulas de retención
- Altura geométrica de bombeo 72,50 metros
- Velocidad de descarga de 4,6 m/s
- Densidad de agua  $1 \text{ t/m}^3$

CONDICIONES DE BOMBEO

- Dos bombas de la misma potencia para cada cámara.
- En caso de bombeo de dos o tres de las cámaras o del sistema y en paralelo, con una bomba para cada cámara.
- Caudal máximo actual: 71.56 l/s.
- Riesgo de caudal a corto o medio plazo: 125.53 l/s.
- Riesgo de caudal a largo plazo: ~ 300 a 350 l/s.
- Eficiencia del sistema 65%

Figura 8.58 Sistema de bombeo del agua del nivel 3 con capacidad instalada de 280l/s

Por las características de la infraestructura subterránea de la estación de bombeo y las condiciones que se muestran a continuación, se procedió a simular la potencia instalada necesaria de las bombas y las alternativas para hacer frente a los riesgos ambientales potenciales, ya caracterizados, aplicando las ecuaciones 4.11 a 4.17.

La aplicación de las referidas ecuaciones considerando que, en caso de sobrepasarse la capacidad de la bomba instalada en la cámara 1 (150 kW), inmediatamente entraría en operación la bomba instalada en la cámara 2 (100 kW), permite obtener las siguientes ecuaciones particulares:

$$PB_1 = 0,875861Q \text{ (Para bombeo de la cámara 1)}$$

$$PB_2 = 0,875861Q - 150 \text{ (Para bombeo de las cámaras 1 y 2)}$$

La simulación con estas ecuaciones utilizando el programa EXCEL (como se ilustra en la fig. 8.59) permite concluir que las bombas de la cámara 1 tienen capacidad para evacuar agua hasta 125,53 l/s y la bomba de la cámara 2 entraría solamente a operar en la hipótesis de sobrepasar un caudal de 179 l/s.

Por lo tanto, la capacidad instalada en la actualidad en la estación de bombeo es suficiente para mitigar el riesgo ambiental existente.

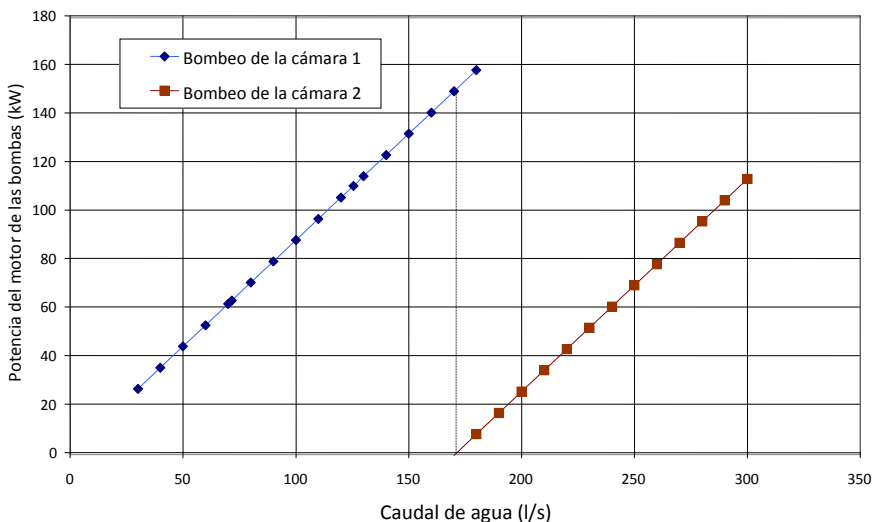


Figura 8.59 Variación del caudal en función de la potencia de la bomba para controlar una inundación en la estación de bombeo

### 8.5.3.2. Para el riesgo ambiental debido al drenaje ácido

Inicialmente se deben realizar pruebas a nivel de laboratorio, para pasar a nivel piloto con los resultados obtenidos y finalmente a escala industrial. Para el caso de la mina Panasqueira se propone aplicar el proceso pasivo anaeróbico (estanque).



**a) A nivel de laboratorio y a nivel piloto:** a nivel de laboratorio el objetivo es encontrar sustratos adecuados y disponibles que puedan ser utilizados como componentes básicos del sistema de tratamiento pasivo, más allá de producir la reducción biológica del sulfato.

Las pruebas de laboratorio del tratamiento de efluentes ácidos se inician con los procesos de biodegradación anaeróbica en recipientes, utilizando 100 g de sustrato y 150 ml de efluente ácido de mina (Figuroa, R., *et al*, 1999). Se establecieron varias combinaciones (aproximadamente 30) con diferentes concentraciones de estos compuestos, realizando mediciones periódicas del contenido de iones metálicos, pH, sulfato y presencia de bacterias sulfato reductoras BSR (determinadas en laboratorio de microbiología).

Los sustratos ideales pueden ser compuestos de estiércol de oveja y sedimentos de la laguna de oxidación, lo que permite obtener una gran concentración de bacterias sulfato-reductoras y también una notoria disminución de la concentración del sulfato presente en la solución (Cuadro 8.28).

Cuadro 8.28 Reacción de sustratos con el ideal de efluentes ácidos de 4 días (Figuroa, R. *et al*, 1999)

pH		Bacterias UFB/ml	Sulfato reductores	Reducción de SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	
Entrada	Salida			Entrada	Salida
3,8	6,9	8 x 10 <sup>8</sup>	++++	1332	370

Los resultados permiten afirmar que hay una gran actividad de las bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio sp.*) que reducen el sulfato en el agua de la mina, para producir sulfuro de hidrógeno y bicarbonato.

La prueba de laboratorio indica que la actividad de las bacterias se produce de acuerdo con las ecuaciones indicadas en la parte c) del punto 4.52 del Capítulo 4 de la segunda parte del trabajo de investigación, proceso este que permite precipitar los metales pesados.

El sustrato puede ser de 150 kg de aserrín de madera, 487 kg de estiércol de oveja para un efluente ácido de 0,018 l/s.

A nivel piloto es necesario experimentar en una abertura hecha en el suelo (fig. 8.60), compactándola y colocando en el piso y paredes una geomembrana para la impermeabilización. A continuación se coloca 0,20 m de arena gruesa y media clasificada para después depositar el sustrato con una altura de 0,50 m y finalmente agua neutra en 0,20 m de altura. El agua ácida se agrega al afluente ácido mediante un tubo de PVC.

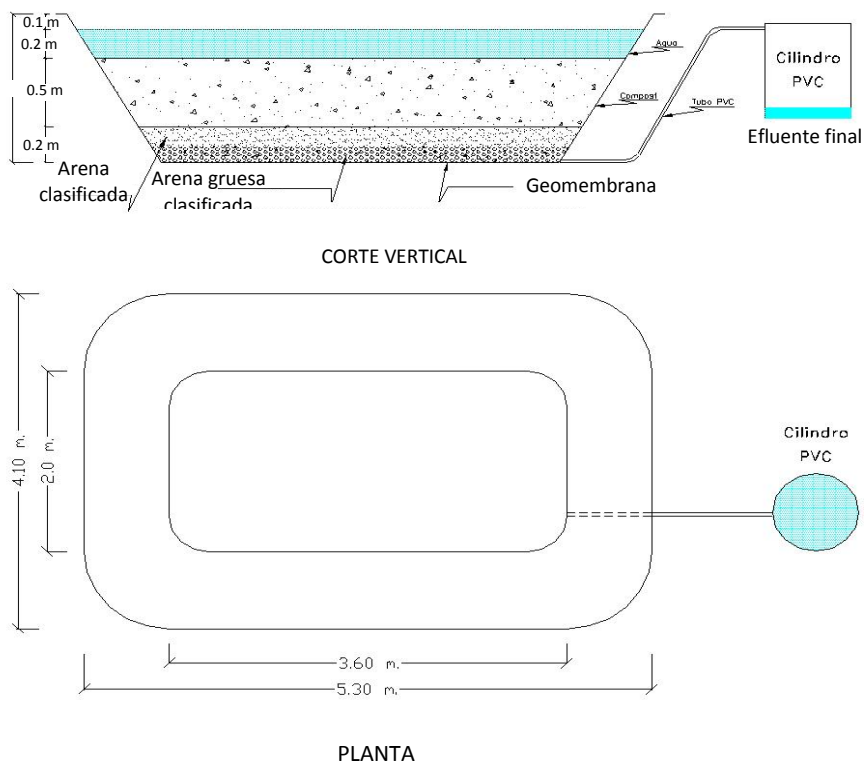


Figura 8.60 Depósito para el tratamiento del agua ácida a escala piloto

**b) Escala industrial:** con los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y piloto se procede a su implementación a escala industrial, diseñándose los elementos del depósito o el tratamiento del sustrato para el flujo de agua ácida existente y establecer un proceso, aplicando la secuencia que se muestra en la fig. 4.17, esperándose la ocurrencia de las ecuaciones indicadas para este proceso.

El agua ácida, con pH de 2,8 se puede elevar hasta 6,7 y precipitar todos los metales debido a su capacidad de neutralización.

Por lo tanto, para mitigar el riesgo ambiental identificado en la mina Panasqueira es necesario evaluar la planta de tratamiento de aguas ácidas existente y realizar el procedimiento experimental indicado para finalmente controlar el proceso.

**8.5.4. Monitoreo y control**

El monitoreo y control se realizan aplicando la norma Portuguesa (Decreto Ley n.º 236/98 del 1 de agosto) en lo que se refiere a las aguas superficiales para fines de riego, consumo humano y piscícola.

El decreto, en su anexo III contempla lo relacionado con los métodos analíticos de referencia para aguas superficiales (Cuadro 8.29).

Cuadro 8.29 Métodos analíticos de referencia para aguas superficiales y para el pH y metales caracterizados (Decreto-ley n.º 236/98 de 1º de Agosto)

Parámetros	Unidad	Precisión (±)	Exactitud (±)	Método analítico
pH	Esc. Sor	0,1	0,2	Electrometría
Fe	mg/l	10%	20%	Espectrometría atómica o de absorción después de la filtración por membrana 0,45 µm
Mn	mg/l	10%	20%	Espectrometría atómica
Cu	mg/l	10%	20%	Espectrometría atómica o de absorción molecular
Zn	mg/l	10%	20%	Espectrometría atómica o de absorción molecular
As	mg/l	20%	20%	Espectrometría atómica

Por el pH y contenido de metales, de acuerdo a la referida Norma, el agua del río Bodelhão corresponde a los grupos G1, G2 y G3, por lo tanto, la frecuencia mínima de muestreo y de análisis es de 4 por año.

Considerando que las aguas del río Bodelhão se utiliza para fines piscícolas la frecuencia mínima de análisis, de acuerdo con la norma legal, es mensual.

### 8.6 Evaluación del riesgo ambiental debido a vibraciones del macizo rocoso

#### 8.6.1 Caracterización del macizo rocoso debido a vibraciones provocadas por explosivo

Para la caracterización de la propagación de la velocidad de las ondas longitudinales (P) en el macizo rocoso (esquisto) se realizaron mediciones de las vibraciones producidas por la detonación de cargas explosivas en los tajeos de la mina Panasqueira.

Las mediciones de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales (P) fueron realizadas utilizando el sismógrafo BlastMate II DS-277 InstanTel (fig. 8.62) de la Sección de Exploración de Minas del IST, en el momento de la voladura de los explosivos en los tajeos, con una carga explosiva distribuida como está indicada en la fig. 8.61.

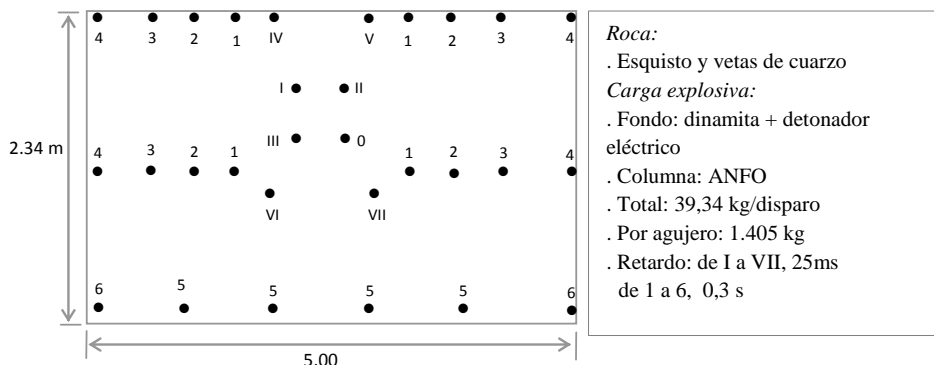


Figura 8.61 Plano de fuego utilizado en los tajeos de la mina Panasqueira



Figura 8.62 Mediciones de la velocidad de propagación de las ondas P por la detonación de explosivos con sismógrafo BlastMate II DS-277 InstanTel, en los tajeos de la mina Panasqueira

Las mediciones fueron realizadas para varias distancias del frente de disparo y diferentes cargas explosivas por retardo (Cuadro 8.30), los datos fueron analizados mediante el método estadístico de mínimos cuadrados utilizando un programa denominado *mcling*, obteniéndose los valores de los coeficientes *a*, *b* y *c* de la ecuación (5.34) y complementado con resultados de ensayos de laboratorio del macizo esquistoso (Cuadro 8.31), caracterizándose de esta forma las vibraciones producidas por la detonación de las cargas explosivas en los tajeos.

Cuadro 8.30 Resultados de las mediciones *in situ* de las vibraciones por detonación de cargas explosivas en los tajeos de la mina Panasqueira usando BlastMate II DS-277 InstanTel

No.	PVS (mm/s)	Distancia (m)	Explosivo (kg/retardo)	Detonación simultánea (4 barrenos/retardo)
1	0,683	300	-	7 a 300 m
2	5,271	30	11,24	2 a 30 m a 6 a 80 m
3	4,366	40	22,48	4 a 40 m a 4 a 65 m
4	10,128	20	11,24	2 a 20 m a 7 a 300 m
5	7,906	30	33,72	6 a 30 m a 1 a 150 m
6	14,097	20	28,10	5 a 20 m a 3 a 100 m
7	2,048	50	5,62	1 a 50 m a 7 a 80 m

Cuadro 8.31 Coeficientes *a*, *b* y *c* y características del macizo esquistoso

Coeficientes			Resultados de los ensayos de laboratorio	
a	b	c	Resistencia a tracción $\sigma$ (Mpa)	7,62 *
			Velocidad de las ondas $P_u$ (m/s)	6220
471,49	0,40	-1,58	Roca (esquisto) densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2860

\* Dinis da Gama, C., *et al.*, 1999

### 8.6.2. Estándar de referencia

Con los parámetros caracterizados (Cuadro 3.68) y aplicando la ecuación (5.33), la velocidad crítica vibratoria para el macizo esquistoso es de 0,51 m/s. Aplicando la ecuación (5.34) los daños provocados en el espesor de la roca que rodea la abertura subterránea ( $D_d$ ), en función de la carga explosiva ( $Q$ ), se encuentran en la fig. 8.63 y por tanto, para las condiciones de operación el estándar de referencia para una carga de 5,62 kg (4 barrenos/retardo) es de cerca de 1,7 m.

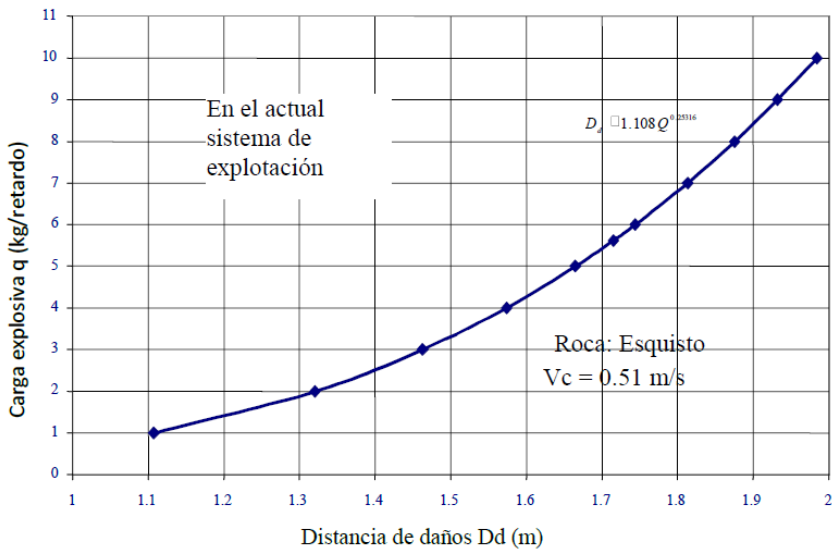


Figura 8.63 Estándar de referencia de los daños causados en el espesor de la roca circundante a la cámara en los tajeos

### 8.6.3 Medición de los daños

Para determinar los daños provocados en los tajeos con explosivos en las cámaras en las operaciones de la mina Panasqueira, se procedió a realizar mediciones *in situ*, utilizando el Sonic Integrity Testing (SIT), una cámara L3.D19.R-3.AW34 (entre los puntos topográficos 31 y 35) de 11 m x 5 m x 2,4 m (fig. 8.65).

El macizo rocoso está constituido por esquistos con vetas de cuarzo y con potencia de 0,24 m a 0,24 m, con intercalaciones de wolframita, pirita, calcopirita y mica, localizándose 12 puntos de medición en los hastiales y 3 puntos en el piso (fig. 8.64).

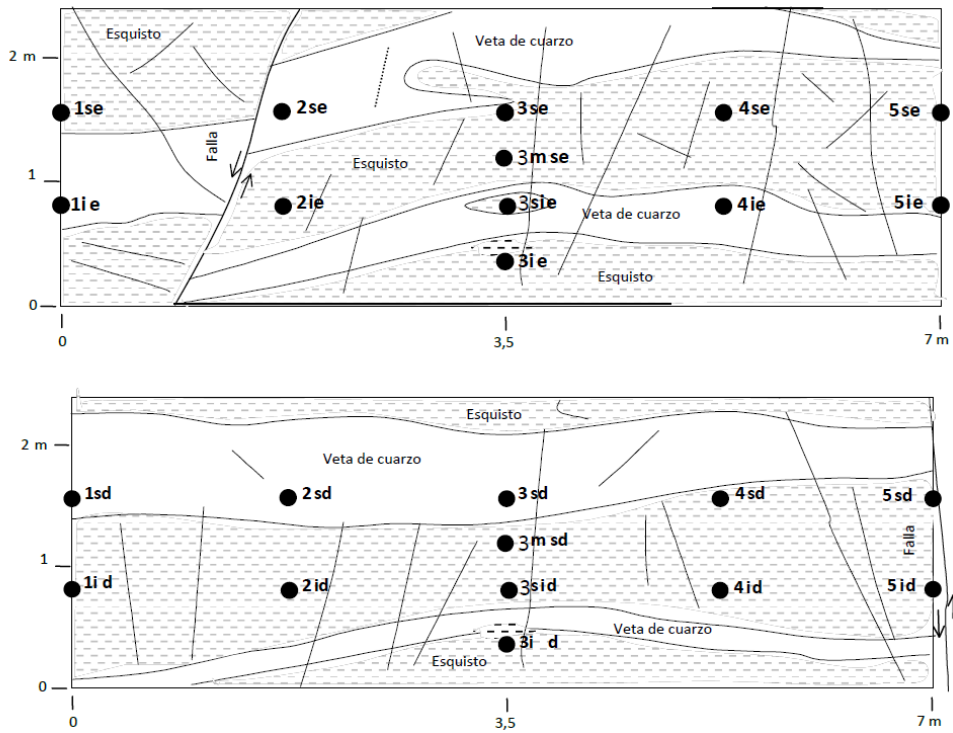


Figura 8.64 Caracterización geoestructural y puntos de medición con Sonic Integrity Testing en los hastiales de la cámara L3.D19.R-3.AW34 (entre los puntos topográfico 31 y 35)



Figura 8.65 Mediciones con *Sonic Integrity Testing* de los daños provocados por el explosivo en los hastiales de la cámara L3.D19.R-3.AW34 (entre los puntos topográfico 31 y 35)

Las pruebas se realizaron con una potencia de entrada del impacto del martillo para una distancia máxima de 5 m y considerando una velocidad de propagación de onda de 5100 m/s (Dinis da Gama, C., *et al.*, 1999).

Los resultados de las 27 pruebas realizadas dieron resultados similares a los mostrados en las figuras 8.66 y 8.67.

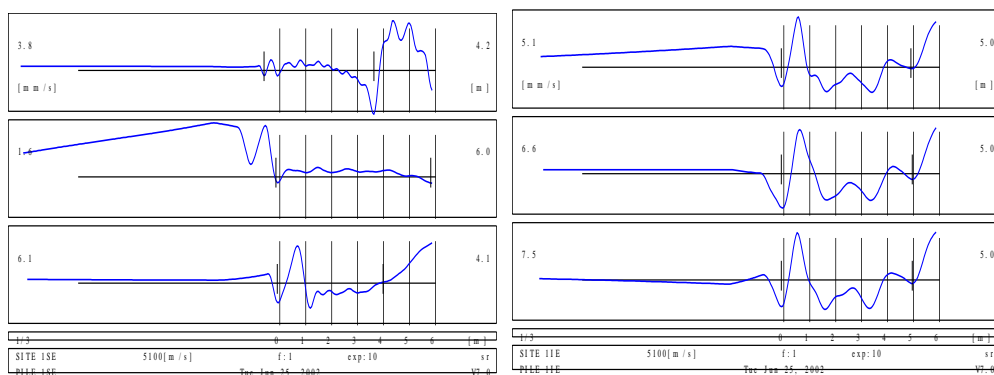


Figura 8.66 Salida SIT medida en el punto *Ise* y en el *Iie* del hastial del lado izquierdo

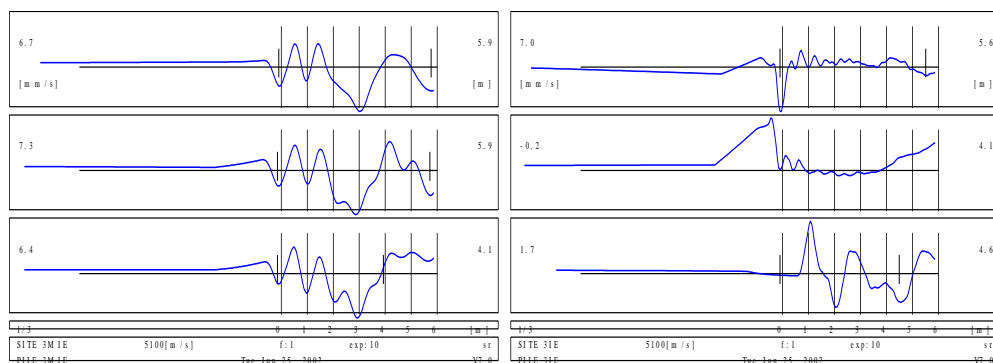


Figura 8.67 Salida SIT medida en el punto *3mie* y en el *3ie* del hastial del lado izquierdo

Los registros muestran que la reflexión de las ondas en la masa que rodea la roca, fueron a la distancia (o espesor) de 1,0 m, 2,0 m, 3,0 m, 3,5 m hasta 4,1 m. Por lo tanto, es probable que las ondas reflectivas de 1,0 a 2,0 m fueran causadas por las fracturas creadas bajo la influencia de la descarga de explosivos y las correspondientes a las distancias de 3,0 a 4,1 m debidas a fracturas geológicas preexistentes.

#### 8.6.4 Identificación del riesgo ambiental geotécnico y medida correctiva

Comparando con un estándar de referencia (1,70 m) y aceptando los resultados obtenidos con la medición, se puede concluir que existen fracturas

atribuidas a los explosivos alcanzando valores de 2,0 m, factor este que indica riesgo ambiental.

La medida correctiva para atenuar estos daños provocados al macizo rocoso circundante a la cámara, es la utilización de una carga explosiva adecuada que, en este caso, debe ser, no mayor de 5,62 kg/retardo, o sea, se debe detonar simultáneamente un número máximo de 4 barrenos.



## Capítulo 9

### APLICACION EN LA MINA SAN RAFAEL

---

#### 9.1. Introducción

La aplicación de la metodología de Ingeniería Ambiental Subterránea (IAS) propuesta en la primera parte (capítulo 2 ítem 2.5 y fig. 2.14) se desarrolla en la segunda parte de este trabajo sobre la mina San Rafael relativa a la contaminación atmosférica subterránea.

La aplicación de la IAS en la mina San Rafael se ha realizado en el aspecto térmico, utilizando la metodología y los modelos matemáticos desarrollados en el ítem 3.1 y fig. 3.25 y, en el aspecto dinámico volumétrico, en el ítem 3.4 y fig. 3.47.

El procedimiento es semejante al utilizado en la mina Neves Corvo y la mina Panasqueira.

Un aspecto particular de la mina San Rafael, en comparación a las dos minas de Portugal está en el hecho de que esta mina está localizada en los Andes montañosos de Perú, con presencia de aguas termales en los niveles más bajos de la mina.

#### 9.2. Definición del ámbito de acción

##### 9.2.1. Localización geográfica y clima

La mina San Rafael, propiedad de la empresa peruana MINSUR S.A., está localizada al Suroeste del nevado de *San Bartolomé de Quenamari* (5299 m), en la cordillera oriental del sur de Perú, distrito de Antauta, Provincia de Melgar y Departamento de Puno, en las coordenadas 70°19' W y 14°14' S (fig. 9.1).

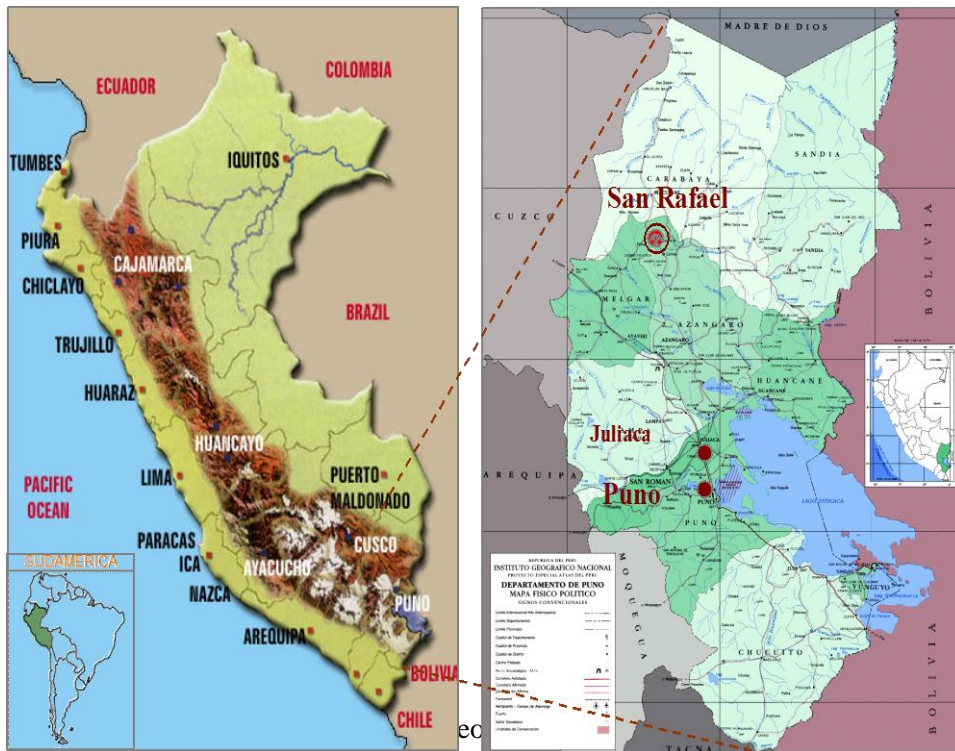
Esta es la única mina productora de estaño del Perú, con una producción de 2500 toneladas por día de mineral como tal con tenor de 5,23% de estaño (Sn), alcanzando las 53600 toneladas acumuladas por año y las 46400 toneladas de concentrado con tenor de 53,86% de Sn con una recuperación mineralúrgica del 89,17% (rendimiento metal).

Es una de las pocas minas subterráneas que tiene el proceso productivo completamente integrado, o sea, explotación, tratamiento mineralúrgico y tratamiento metalúrgico, produciendo por ende, estaño metálico.

##### 9.2.2. Ambiente subterráneo

###### 9.2.2.1. Macizo rocoso y yacimiento

Localmente, las filitas y cuarcitas de la formación *Sandia* fueron intruidos por dos *stocks* graníticos del terciario. En las proximidades se encuentran rocas del paleozoico superior.



Los filones y cuerpos mineralizados se localizan en el intrusivo de San Rafael (fig. 9.2) con un rumbo NE – SW, longitud aproximada de 1000 m, ancho de 300 a 800 m y profundidad máxima de 2000 m. La roca intrusiva es de tipo granítico, con edad que varía de 0,1 a 2,5 millones de años, perteneciente al oligoceno y mioceno inferior (Arenas, M. 1980).

En el distrito minero de San Rafael se encuentra cobre en la parte superior y estaño en profundidad. La mineralización es de origen hidrotermal con filones de relleno y fracturas rellenas y cuerpos de mineral en el intrusivo granítico y metasedimentos. Los filones se ubican en fallas previas a la mineralización con dirección NW – SE.

Los cuerpos de mineral representan el 81% de las reservas y están localizados por debajo del nivel 410 donde existen los siguientes 7 cuerpos de estaño (fig. 9.3): Cuerpo *Rampa*, 150-S, 310-S, Ore *Shoot*, Cuerpo Brecha, cuerpo 250-S y cuerpo *Contacto*. Estos cuerpos poseen una potencia de 4 a 30 m, longitud de 30 a 180 m y alturas de 10 a 640 m. En general son de forma prismática. Los principales minerales son: casiterita, estaño y calcopirita.

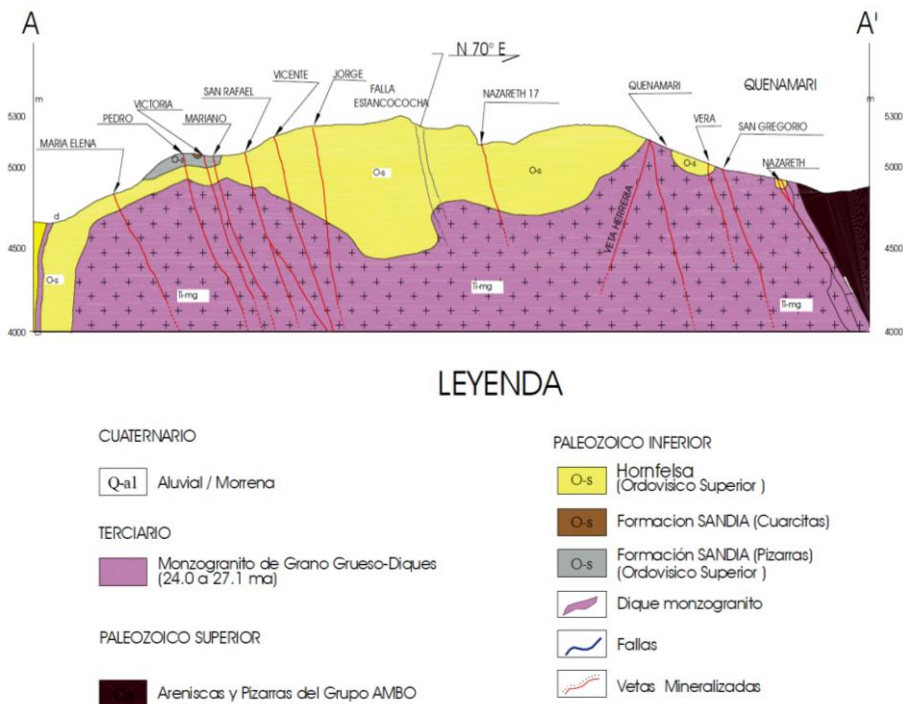


Figura 9.2 Corte geológico y zonas de explotación del yacimiento de San Rafael en dirección N 70° E (Álvarez, J. 2001)

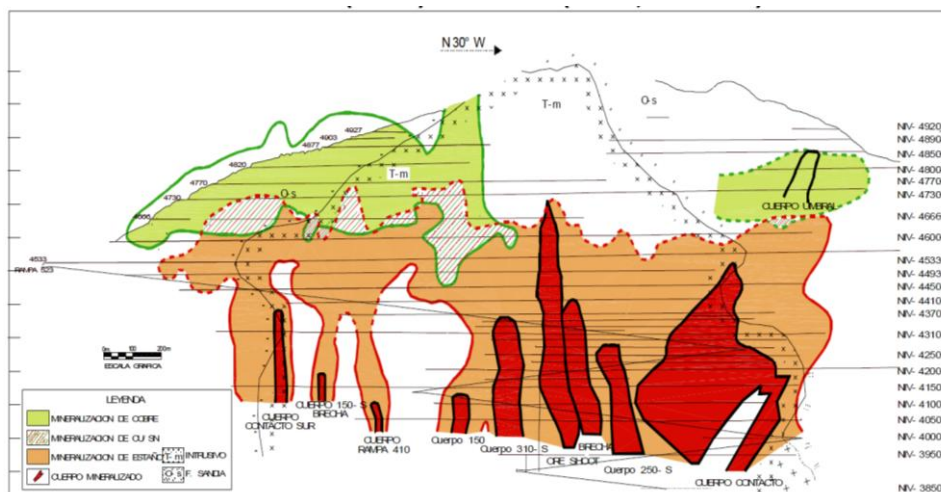


Figura 9.3 Mineralización en la mina de San Rafael, corte en dirección N 30° E (Álvarez, J., 2001)

Las reservas probadas y probables a diciembre de 2000 se pueden ver en el Cuadro 9.1. El mineral de estaño se distribuye en 13,34% en el filón de San Rafael,

75,94% en cuerpos mineralizados y 19,72% en otros filones. La mina trabaja con un *Cut Off* de 2,63% de Sn y 3,41% de Cu.

Cuadro 9.1 Reservas probadas y probables de la mina San Rafael a diciembre de 2000 (Álvarez, J., 2001)

Mineral de	TMS	% Cu	% Sn
Sn	13704655	0,16	5,32
Cu	74450	3,34	0,56
Cu - Sn	109505	2,80	1,49
TOTAL	13888610	0,20	5,27

### 9.2.2.2. Aberturas de infra-estructura subterránea

Son las aberturas subterráneas hechas en el macizo rocoso para explotar el yacimiento mineral, están localizadas entre las cotas 3825 a 5100 m y constituyen el espacio de la atmósfera subterránea. Las principales aberturas están resumidas en el Cuadro 9.2 y en la fig. 9.4.

Cuadro 9.2 Resumen generalizado del ambiente subterráneo (basado en el *Plan de Ventilación Interior Mina San Rafael*, 2001)

Frente de trabajo	Niveles	Sección (m <sup>2</sup> )	Largo (m)	Uso
Rampa 523	4523 a 3825	24,8	7000	Ventilación y transporte
Gal. Nivel 4666	4666	13,06	230	Ent. de aire limpio
Gal. Nivel 4600 (Zap)	4600	8,26	1035	Ent. y salida de aire
Gal. Nivel 4600	4600	11,94	230	Ent. y salida de aire
Gal. Nivel 4533	4533	9,17	1870	Ent. de aire limpio
Galerías ciegas	4493 a 3825	10,00	10000	Ent. y salida de aire
Chimeneas	4666 a 3850	6,80	2000	Ent. y salida de aire
Chimenea Volcán	3900 a 4927	6,00	1300	Pasaje y salida de aire
Chimenea y Gal. Patrón	3825 a 5100	6,00	1250	Pasaje y salida de aire
Ch. EU1, Gal EU2, Ch. EU3	3825 a 492	6,00	1070	Pasaje y salida de aire
Chimenea Alimak	4200 a 4750	12,16	550	Salida de aire

Actualmente el acceso principal desde la superficie es por la rampa 4523 que alcanza la profundidad o nivel 3825, constituyendo la infra-estructura principal para el transporte de mineral y estéril.

Además, en la mina existen estaciones de bombeo de agua, aberturas subterráneas para polvorines, entre otras.

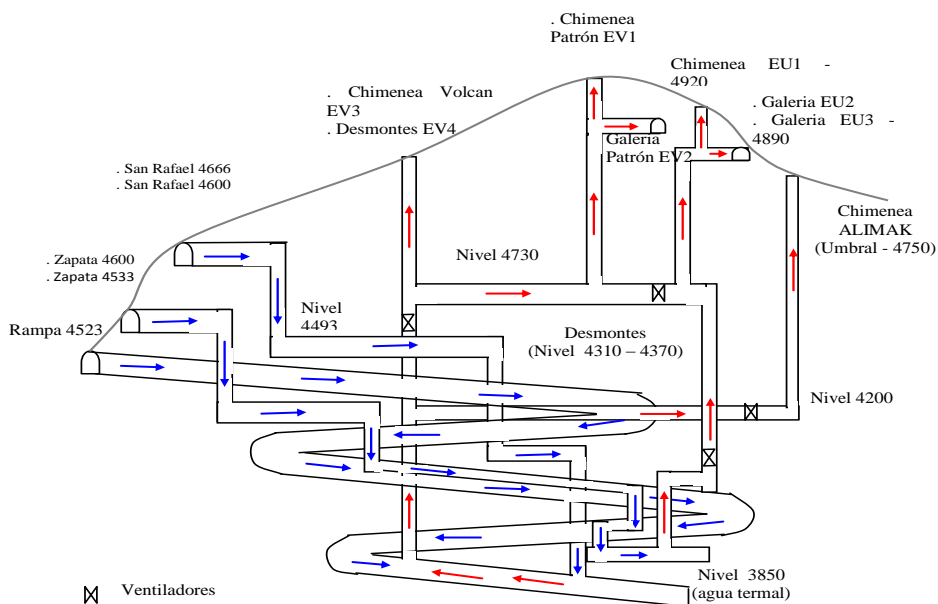


Figura 9.4 Esquema general de las labores subterráneas de la mina de San Rafael

### 9.2.2.3. Aberturas subterráneas generadas por la explotación.

La actual mina San Rafael tuvo un proceso gradual de aumento de la producción en mas de 50 años de operación, acompañado por los progresivos cambios de los métodos de explotación y el consecuente nivel de mecanización, hecho que generó aberturas ya abandonadas y aberturas en actual servicio.

**a) Frentes antiguos de explotación:** Están localizados entre el nivel 4370 y el nivel 4297, son el producto de antiguas explotaciones y el resultado de la aplicación del método de almacenamiento provisional o *shrinkage* convencional y mecanizado, en la casi totalidad de las vetas. Estos espacios tienen forma tabular y, actualmente todavía sirven de pasaje ascendente del aire contaminado proveniente de los frentes de explotación actuales y de los frentes de desarrollo y preparación localizados entre el nivel 3830 y el nivel 4370, con salidas a la superficie por las chimeneas y galerías de la zona sur.

**b) Frentes de explotación actuales:** Son el producto de la explotación correspondiente a la aplicación del método de explotación de *sub level stopping* (fig. 9.5), localizados en los bloques comprendidos entre el nivel 4310 y el 4370.

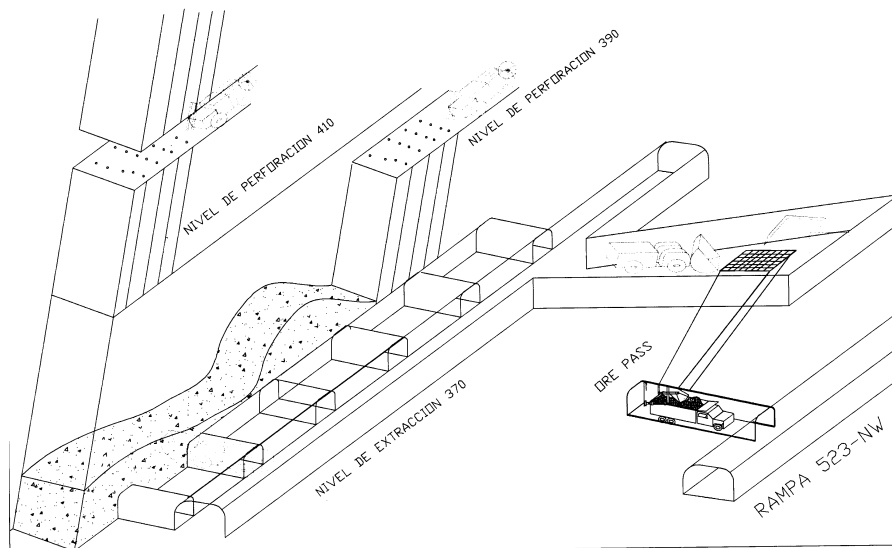


Figura 9.5 Ambiente subterráneo de los frentes de explotación de la mina San Rafael (Guillén, L., 1997)

Para alcanzar una producción de 2500 t/día de mineral con tenor del 5,5% de Sn, la empresa tiene programado extraer el 48,87% del cuerpo *Ore Shoot* y del cuerpo *Brecha*, 23,42 % del cuerpo *Contacto* y el 27,71% de la veta San Rafael.

La perforación se realiza con los siguientes equipos: 1 Simba H-1354 de Atlas Copco, 1 DTH Túnel 60 y 1 DTH Mustang A-32 (fig. 9.6.a). Los barrenos largos son perforados en forma paralela o en abanico, conforme se trate de una veta o de un cuerpo mineralizado, cuya malla es función del diámetro de la broca y la potencia de la estructura mineralizada.

El explosivo utilizado es ANFO (Examón) para taladros secos, *slurry* (*exagel o slurry AP-80*) para taladros con presencia de agua. Los accesorios usados para los tajeos de roca son el detonador Tecnel (Fanel) de 10 a 20 m de largo y retardos cortos, *booster* de 1/3 de libra (BM-150) de 1,5 pulgadas de diámetro, cordón detonante 3P y detonador común nº 6, conectores y, cordón detonante (*igniter cord*). El factor de potencia resultante varía entre 0,16 y 0,20 kg/t.

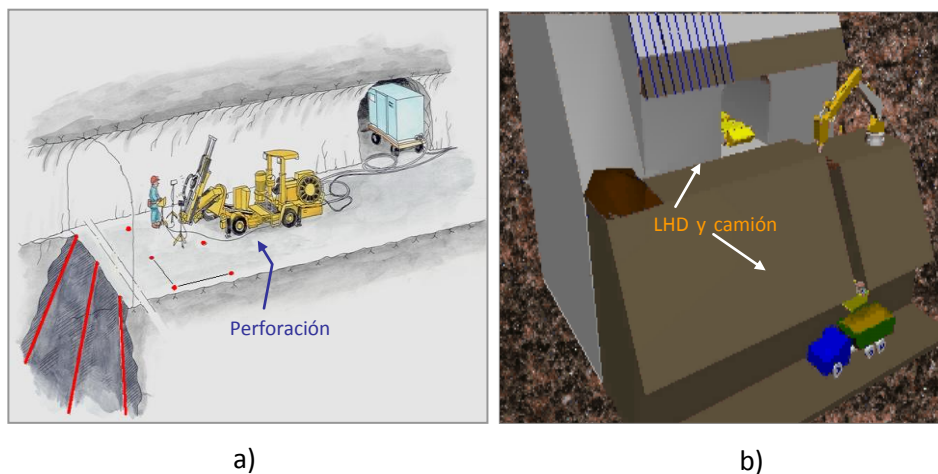


Figura 9.6 Equipos de perforación (izquierda), de remoción y transporte (derecha) usados en los tajeos

Luego de la voladura primaria es necesario realizar la voladura secundaria para lo cual se usa *plastex* o *examón* con dinamita *semexa* 65%.

La remoción del mineral se hace con LHDs diesel y el transporte con camiones Volvo NL-12, también con motor diesel (fig. 9.6.b). La producción de mineral y de estéril se cubren con los equipos indicados en el Cuadro 9.3.

Cuadro 9.3 Equipos utilizados en la mina San Rafael (Medina, Y., *et al.*, 2001)

Operación de mina	Equipos
Desarrollo y prospección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Jumbo Boomer H 282 de Atlas Copco, con 75 HP (55,93 KW)</li> <li>• 2 LHD de 5,5. Yd<sup>3</sup> EJC, con 186,43 KW c/u.</li> </ul>
Perforación con barrenos largos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Simba H-1354 de Atlas Copco, Cop-1838, con 80 HP (59,66 KW)</li> <li>• 1 DTH Tunnel 60, Drillco Tools, Topo 3</li> <li>• 1 DTH Mustang A32 de Atlas Copco, con martillo Cop-34</li> </ul>
Remoción de tajeos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 LHD de 6,5 Yd<sup>3</sup> ST100 Wagner, con 250 HP (186,43 KW) c/u.</li> <li>• 1 LHD de 3,5 Yd<sup>3</sup> Wagner (reserva), con 185 HP (137,9 KW)</li> </ul>
Reducción secundaria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 martillos hidráulicos Kent</li> </ul>
Transporte a superficie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 Camiones Volvo Intercooler NL12, de 15 m<sup>3</sup>, con 410 HP (305,73 KW) cada uno.</li> </ul>
Supervisión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 27 Furgonetas con 89 HP (66,37 KW) c/u.</li> </ul>

Para la meta de la producción establecida (2500 t/día o 70000 t/mes) la producción proviene de 5 tajeos (88,5%) y de los frentes de preparación (11,5%). Los tajeos en producción actual son T310-14N, T310-10S, T310-03S, T310-04N y T310-10S, logrando aproximadamente 3500 t/día-disparo, lo que equivale a 20 disparos/mes.

Para la producción indicada se requiere un total de 142 hombres en subterráneo, de los cuales 82 son de la empresa y 60 contratados. El personal de la empresa está compuesto por 60 para la explotación, 22 para servicios y los que se dedican a la geología, topografía, y supervisión general son 4, 4 y 6 respectivamente, pero sin dedicación exclusiva (Medina, Y., *et al.*, 2001).

La condición crítica de la presencia de personal en los frentes de trabajo (Medina, Y., *et al.*, 2000), tanto en desarrollo como en los tajeos ocurre en función de los trabajos a realizar. En trabajos por método convencional, que se realizan bajo el nivel 4200, la condición crítica se presenta en la operación de perforación con 3 hombres:

- Perforación: 1 perforista, 1 ayudante o 2 perforistas y 1 ayudante;
- Remoción: 1 operador de pala o de LHD;
- Transporte: 1 operador de locomotora y 1 ayudante.

En el trabajo mecanizado, la condición crítica puede suceder en la operación de perforación y carga con 4 hombres:

- Perforación y carga: 1 operador de jumbo y 2 cargadores / disparadores de fuego;
- Remoción: 1 operador del LHD;
- Transporte: 1 operador de camión marca Volvo

Con relación a los costos, la información obtenida del Departamento de Mina es de 1320 €/m para chimenea con 3,8 m de diámetro, 250 €/m para chimenea con 1,5 m de diámetro, 963,95 €/m para galería de 5 m x 4 m, 592,46 €/m para galería con 3,5 m x 3 m, 430,74 €/m para galería con 2,4 m x 2,4 m, 1050 €/m para galería de 6 m x 3,8 m, 320 €/m para chimenea con 2 m x 1,5 m y 40,4 €/m<sup>3</sup> (1US\$ = 1€).

### **9.3. Caracterización térmica y dinámica de la atmósfera subterránea**

#### **9.3.1. Identificación preliminar del ambiente subterráneo**

El aire entra desde la superficie mediante la rampa 523, hasta la galería de nivel 4666 (Zapata), la galería de nivel 4600 (Zapata) y para la galería de nivel 4533 (San Rafael), saliendo (aire contaminado) por la chimenea Volcán (EV3), apertura tajeos (EV4), chimenea Patrón (EV1), galería Patrón (EV2), chimenea EU1, galería EU2, chimenea EU3 y chimenea Alimak (Umbral). La fig. 9.4 muestra el esquema general de las entradas de aire fresco y salidas de aire contaminado.

El aire de la atmósfera subterránea es accionado por sistema mixto (natural y forzado). El sistema forzado usa ventiladores instalados en los frentes subterráneos que son en su mayoría de extracción de aire contaminado. Al momento de las mediciones (septiembre de 2001), la mina contaba con 35 ventiladores cuya potencia total era de 1492 KW (Cuadro 9.4).



Cuadro 9.4 Ventiladores utilizados en la mina San Rafael (Departamento de Ingeniería - Ventilación Mina San Rafael, 2001)

INVENTARIO DE VENTILADORES									
ITEM	CAPACIDAD	MARCA	POTENCIA	PRESION	NIVEL	LABOR	RESPONSABILIDAD	ESTADO	GASTO (\$)
1	100.000	JOY	300	17.2	4200		MINSUR	OPERATIVO	201.098
2	100.000	JOY	200	10.8	4533		MINSUR	OPERATIVO	134.065
3	50.000	JOY	150	10	4370		MINSUR	OPERATIVO	100.549
4	50.000	JOY	150	10	4250		MINSUR	OPERATIVO	100.549
5	50.000	JOY	125	17.2	RPA 523	214	MINSUR	OPERATIVO	83.791
6	50.000	JOY	125	10	4050	N	MINSUR	OPERATIVO	83.791
7	50.000	JOY	125	10	4050	S	MINSUR	OPERATIVO	83.791
8	50.000	JOY	100	10	TALLER		MINSUR	MANTENIM.	
9	50.000	JOY	75	8	4200	N	MINSUR	OPERATIVO	50.274
10	50.000	AIRTEC	60	6			MINSUR	OPERATIVO	40.220
11	50.000	AIRTEC	50	9.5			MINSUR	OPERATIVO	33.516
12	30.000	AIRTEC	50	9.5			AESA	OPERATIVO	33.516
13	30.000	AIRTEC	50	9.5	RPA 523	TOPE	AESA	OPERATIVO	33.516
14	30.000	JOY	30	5.1	4250	S	MINSUR	OPERATIVO	20.110
15	30.000	JOY	30	5.1	4000	N	MINSUR	OPERATIVO	20.110
16	11.000	AIRTEC	24	6.6	RPA 523	215		OPERATIVO	12.066
17	11.000	AIRTEC	24	6.6	4000	N		OPERATIVO	12.066
18	11.000	AIRTEC	24	6.6	4050	JORGE		OPERATIVO	12.066
19	11.000	AIRTEC	24	6.6	TALLER			MANTENIM.	
20	11.000	AIRTEC	24	6.6	4533	VILLAS J		OPERATIVO	12.066
21	11.000	AIRTEC	24	6.6	TALLER		MDH	MANTENIM.	
22	5.000	AIRTEC	15	7	4533	VILLAS J	MDH	OPERATIVO	7.541
23	5.000	AIRTEC	15	7	RPA 523	146	MDH	OPERATIVO	7.541
24	5.000	AIRTEC	15	7	RPA 523	150	MDH	OPERATIVO	7.541
25	5.000	AIRTEC	15	7	4533	S	MDH	OPERATIVO	7.541
26	5.000	AIRTEC	15	7	TALLER		AESA	MANTENIM.	
27	5.000	AIRTEC	15	7	ALMACEN		MDH	STAND BY	
28	6.900	AIRTEC	12	4.6	4200	N-63	AESA	OPERATIVO	6.033
29	6.900	AIRTEC	12	4.6	4310	S	AESA	OPERATIVO	
30	6.900	AIRTEC	12	4.6	TALLER		AESA	MANTENIM.	6.033
31	6.900	AIRTEC	10	4.6	DIAMANTINA		MDH	OPERATIVO	5.027
32	7.500	AIRTEC	10	4	4533	VILLAS J	AESA	OPERATIVO	5.027
33	30.000	ZITRON	30	12	RPA 523	TOPE	MINSUR	OPERATIVO	20.110
34	30.000	ZITRON	30	12	RPA 523	205	MINSUR	OPERATIVO	20.110
35	30.000	ZITRON	30	12	3950	1	MINSUR	OPERATIVO	20.110
	HP		2000						
	KW		1492						
	HRS / año		7488						
	GASTO /año		1.179.773	\$ USA					1.179.773
	GASTO/mes		98.314	\$ USA					98314

PRECIO 1KW/HR

0.12 \$ USA

Antes de las mediciones (*in situ*) de los parámetros térmicos, dinámicos y volumétricos, en gabinete se procedió a la predefinición del sentido de aire, predefinición del sentido del aire, tramos y nodos de todo el ambiente subterráneo de la mina (fig. 9.7), basado en los mapas existentes y con participación de personal experimentado del área de ventilación de minas.

Las estaciones de medición fueron identificadas en zonas adecuadas en cada tramo y aproximadamente en la parte media de su longitud.

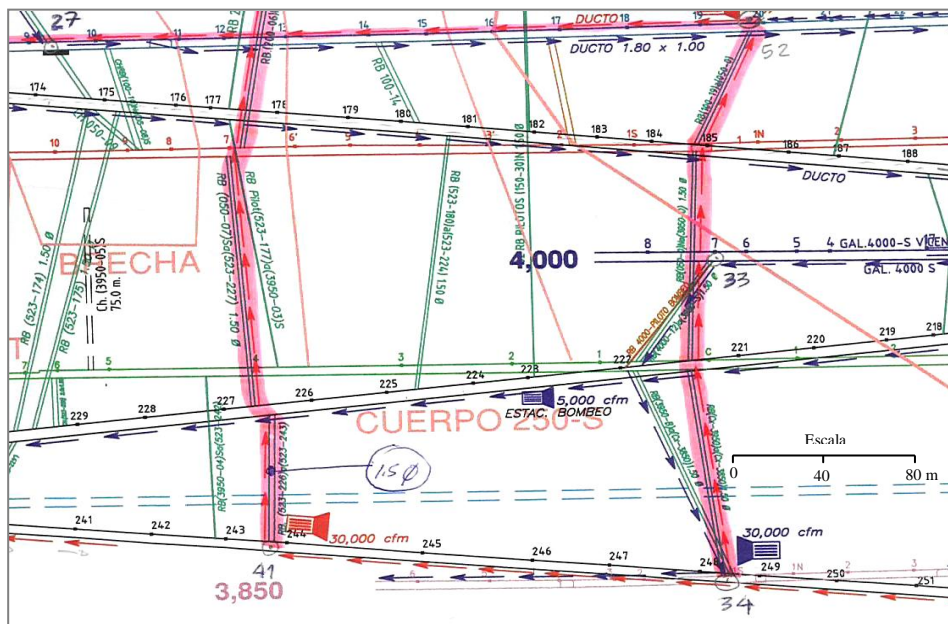


Figura 9.7 Predefinición del sentido del flujo de aire, tramos y nodos en la zona del nivel 3850 en perfil N 30° E

### 9.3.2. Instrumentos utilizados y metodología de medición

La caracterización del ambiente subterráneo de la mina San Rafael se hizo usando los instrumentos del Laboratorio de Ingeniería del Ambiente Subterráneo L.E.A.S. y de la Sección de Explotación de Minas del Instituto Superior Técnico de la Universidad Técnica de Lisboa y consistía en:

- Termo/Higrómetro Casella London Ltd, de temperatura de bulbo seco y húmedo;
- Anemómetro IRFLOW LCA 6000 digital y de lectura discreta, para medición de la velocidad del aire;
- Instrumentos para medición de las secciones de las aberturas, como cinta métrica de acero de 5 metros, entre otros;
- Una calculadora portátil;
- Reloj cronómetro Timex Ironman Triathlon digital.

La metodología utilizada fue la misma de las minas Neves Corvo y Panasqueira, dado que esta mina posee aberturas de grandes dimensiones en la rampa 523 y accesos a los tajeos (similares a los de Neves Corvo) y otras galerías, traviesas y accesos con sección de dimensión media (similares a las de Panasqueira). También en esta mina las mediciones se hicieron en cinco puntos de cada estación para considerar un valor medio, tanto para la velocidad como para la temperatura.

Mediante el procedimiento y los instrumentos indicados, se realizaron las mediciones *in situ* (fig. 9.8) cuyo registro se encuentra en el Anexo 9.1, que constituye el soporte para la caracterización del ambiente subterráneo.



Figura 9.8 Rampa 523 y mediciones de los parámetros aerodinámicos de la atmósfera subterránea de la mina de San Rafael

### 9.3.3. Caracterización térmica

#### 9.3.3.1. Influencia de la temperatura exterior

Para analizar la influencia de la temperatura exterior en el ambiente subterráneo se procedió a la identificación de la variación de la temperatura exterior, con base en los registros meteorológicos de la mina San Rafael (fig. 9.9).

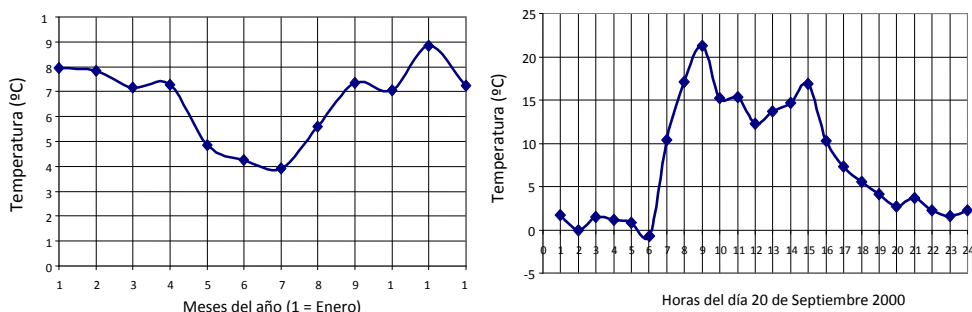


Figura 9.9 Variación de la temperatura exterior (año 2000) y durante un día (20 de Septiembre de 2000) (basado en registros meteorológicos de la mina de San Rafael)

En los registros meteorológicos del año 2000 analizados, fue posible observar temperaturas medias horarias máximas de 26,3 °C en el mes de noviembre y mínimas de -9,2 °C en el mes de julio, con la particularidad de que estos valores altos y bajos son registros momentáneos, o sea, durante tiempos muy cortos. Finalmente la temperatura media anual es de 6,61 °C.

Aplicando la ecuación (3.20) la influencia de la temperatura exterior en el ambiente subterráneo de la mina San Rafael, con un factor de 0,167, resulta una media de 1°C, que es prácticamente insignificante.

9.3.3.2. Variación de la temperatura en el ambiente subterráneo

La temperatura del aire limpio que entra al ambiente subterráneo de la mina de San Rafael, tiene la tendencia de aumentar a medida que profundiza en las aberturas. El aire del ambiente exterior que entra por las galerías 4666, 4600 y por la denominada rampa 523 (cota 4523) alcanza los espacios mas profundos localizados en la cota 3835, descendiendo una profundidad total de 831 m, por lo que la temperatura varía 21,5 °C, a una razón aproximada de 1 °C por cada 40 m de profundidad (fig. 9.10).

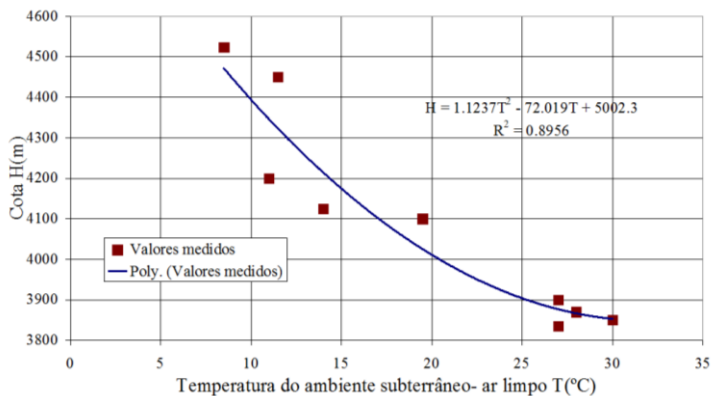


Figura 9.10 Variación de la temperatura del aire en la atmósfera subterránea en el proceso de entrada (basado en mediciones de septiembre de 2001)

En el nivel 3850 la temperatura del aire de la atmósfera subterránea sufre un brusco incremento, influenciado por la presencia de aguas termales, alcanzando en la zona de la rampa un valor de 30 °C.

La disminución de la temperatura en el sentido de la subida (salida) del aire contaminado es de 30 °C (en el nivel 3850) a 14 °C (en el exterior), totalizando 16 °C para una profundidad total de 1150 m (entre la cota 3850 y la 5000) (fig. 9.11).

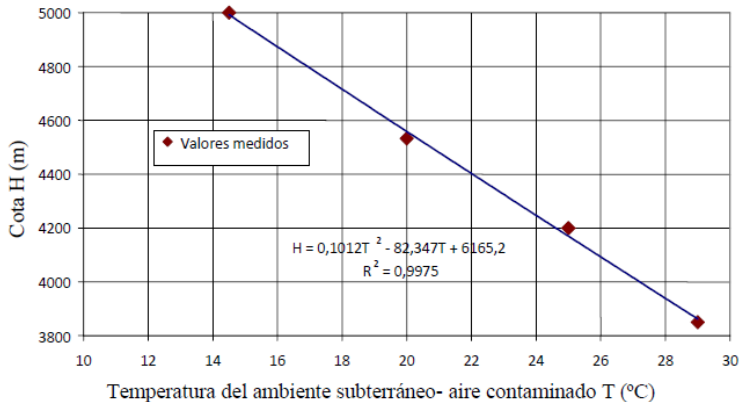


Figura 9.11 Variación de la temperatura del aire en la atmósfera subterránea en el proceso de salida (basado en las mediciones de septiembre de 2001)

9.3.3.3. Temperatura en el nivel 3850 influenciado por agua termal

Con la finalidad de caracterizar la brusca pendiente del incremento de la temperatura del ambiente subterráneo en la zona del nivel 3850, se realizaron mediciones de la temperatura en la rampa 523 en el sentido de la variación de la profundidad (fig. 9.12) y en la galería del nivel 3850 con presencia de agua termal (Cuadro 9.5).

Cuadro 9.5 Mediciones de la temperatura del agua termal en la galería del nivel 3850 (Septiembre 2001)

Local	Condiciones térmicas del ambiente			Canal Ts (°C)	Galería (m x m)	Observaciones
	Ts (°C)	Th (°C)	Hr (%)			
Frente 3850S	33	32,5	96,6	34	3,6 x 4,4	Frente paralizado
Antes del frente 3850S	29	27	85,8	36	3,2 x 5,0	Vent. conectado y agua termal mezclada
Unión Nv. 3850 con rampa 523	32	31,5	96,5			Apertura grande por unión
Antes del frente 3850N	34	33,5	96,6	40	3,1 x 4,6	Vent. apagado

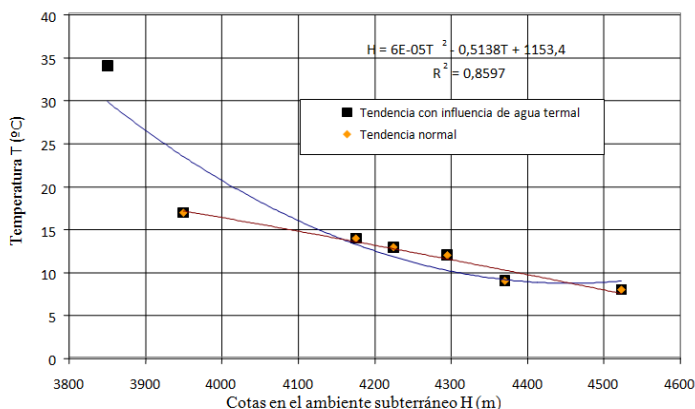


Figura 9.12 Tendencia de la temperatura del ambiente subterráneo (basado en mediciones realizadas en la rampa 523, septiembre 2001)

La fig. 9.12 muestra dos tipos de tendencia: una lineal y otra no lineal. En la tendencia lineal se verifica que en el nivel 3950 y para una profundidad de 580 m, se registra una temperatura de 17 °C, resultando una tasa de incremento de 1,7 °C/100 m. No obstante, en el nivel 3850, para una variación tan solo de 100 m de profundidad, se registra una temperatura de 32 °C, resultando una tasa de incremento de 15 °C/100 m, lo que indica una tendencia anormal, provocada evidentemente por la fuerte influencia local de la temperatura del agua termal.

Una previsión de la temperatura del aire en el nivel 3850 para una tendencia normal libre de la influencia del agua termal y para un caudal de aire de 8 m<sup>3</sup>/s sería aproximadamente de 20 °C y no de 32 °C.

En las mediciones realizadas en los frentes de desarrollo del nivel 3850, se registraron, en el agua termal, temperaturas entre 34 °C y 40 °C, y en el aire de la

atmósfera subterránea (8 m<sup>3</sup>/s y sección de 15 m<sup>2</sup>) se registraron temperaturas entre 29 °C y 34 °C (Cuadro 9.5).

Comparativamente, la temperatura del aire de la atmósfera subterránea en el nivel 3850 para una tendencia normal era previsible estuviera próxima a los 20 °C, pero se registraron temperaturas mayores en un promedio de 12 °C, representando un incremento del 60% en relación a la tendencia normal.

### 9.3.4. Caracterización dinámica

#### 9.3.4.1. Redes de distribución del aire en el ambiente subterráneo

En las mediciones realizadas en septiembre de 2001 se caracterizaron tres redes de circulación de aire limpio bien definidas (fig. 9.13).

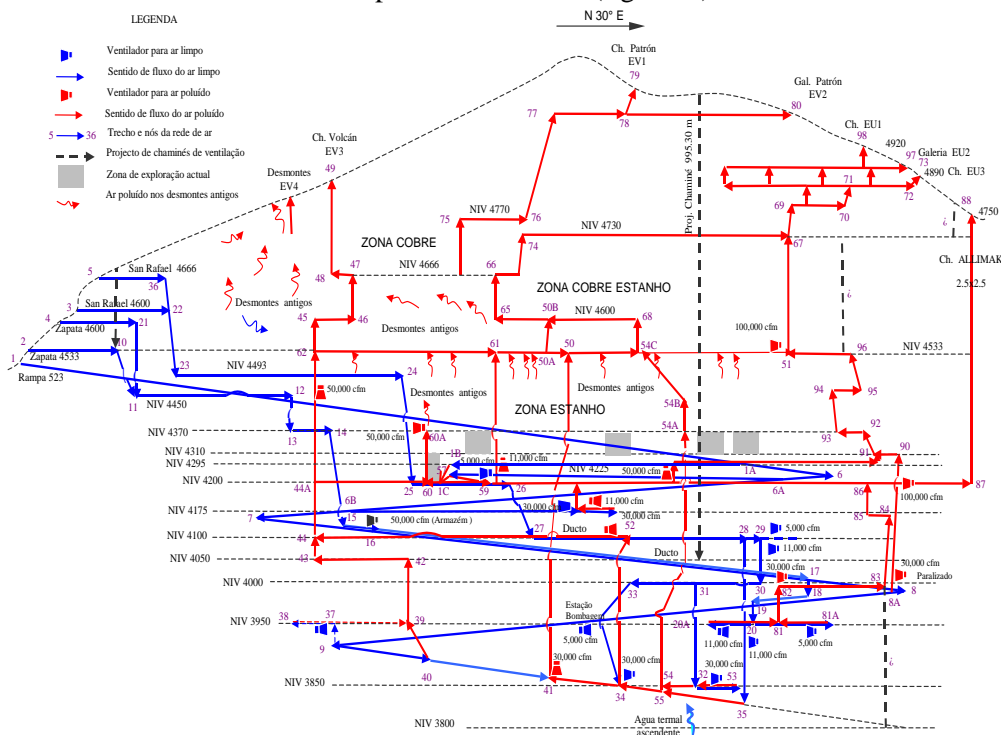


Figura 9.13 Redes de aire en el ambiente subterráneo de la mina San Rafael, caracterizadas en septiembre de 2001

Estas redes, que son las denominadas *Rampa 523*, *Zapata* (4600 y 4533) y *San Rafael* (4600 y 4666), se destinan a ventilar áreas definidas y con salidas de aire contaminado, conforme a lo indicado en el Cuadro 9.6.

Cuadro 9.6 Entradas y salidas de aire en el ambiente subterráneo

Entradas de aire (Redes principales)	Áreas de ventilación	Salida de aire contaminado
Rampa 523	Rampa de transporte (523) hasta el nivel 3900, Tajeos (entre los niveles 4310 a 4370)	Tajeos EV4, Chimeneas EV3, EV1, EU1, EU2, EU3 y Alimak
Zapata (boca de mina 4533 y 4600)	Fondo de la rampa 523 y nivel 3850	Tajeos EV4, Chimeneas EV3, EV1, EU1, EU2, EU3 y Alimak
San Rafael (Bocas de la mina 4600 y 4666)	Frentes de trabajo del nivel 3950	Chimenea Alimak

9.3.4.2. Caracterización de situación dinámica y volumétrica

El comportamiento dinámico (velocidad) y volumétrico (caudal) del aire en el ambiente subterráneo caracterizado al momento de las mediciones (septiembre de 2001) se ilustra en la fig. 9.14 y en la fig. 9.15, donde, en términos generales, no existe mayor riesgo ambiental debido a la velocidad y caudal del aire en relación a lo contemplado por la norma legal peruana.

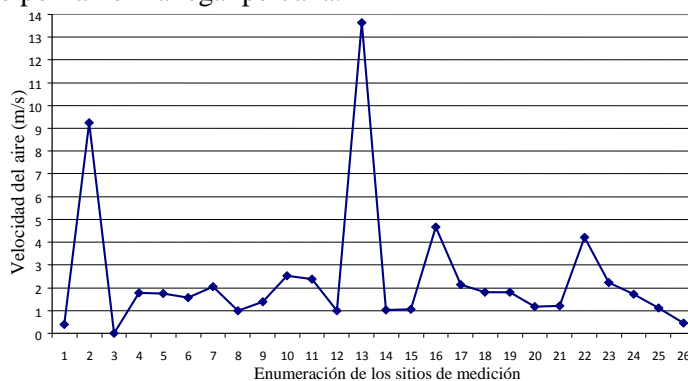


Figura 9.14 Variación de la velocidad del aire en el ambiente subterráneo y límites definidos por la norma peruana (septiembre de 2001)

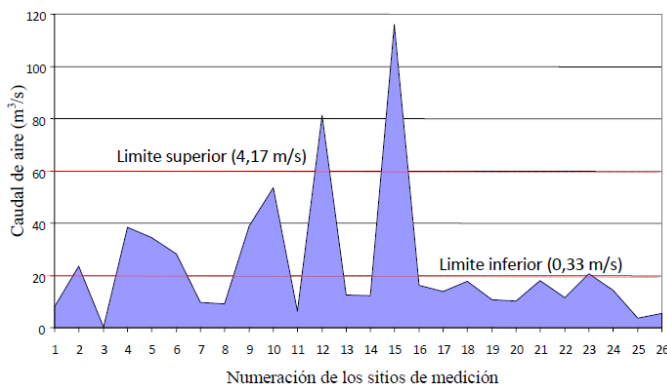


Figura 9.15 Variación del caudal del aire en el ambiente subterráneo (septiembre de 2001)

El balance global del aire en el ambiente subterráneo, basado en las mediciones realizadas en septiembre de 2001 y complementadas con mediciones del departamento de ventilación de minas de la mina de San Rafael, resulta 154,60 m<sup>3</sup>/s de entrada de aire limpio y 142,82 m<sup>3</sup>/s salida de aire contaminado (Cuadro 9.7), esta diferencia es posible debido al hecho de que los caudales de salida son los medidos en el mes de mayo que es una época de bajas temperaturas.

Cuadro 9.7 Balance del aire del ambiente subterráneo en la mina San Rafael

Entrada		Salida	
Local	Caudal (m <sup>3</sup> /s )	Local	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
galería 4666 San Rafael	14,37	Chimenea 4920 EU1	12,17*
galería 4600 San Rafael	20,54	galería 4890 EU2	20,58*
galería 4600 Zapata	3,63	Chimenea 4850 EU3	25,88*
galería 4533 Zapata		Chimenea Alimak EU5	45,46*
Rampa 523	116,06	Chimenea Patrón EV1	3,97*
		galería Patrón EV2	5,48
		Chimenea Volcán EV3	16,22*
		Tajeos antiguos EV4	12,52*
Total	154,60	Total	142,82

\* Registros del Departamento de Ingeniería (Ventilación) Mina San Rafael 30/05/2001

#### 9.3.4.3. Referencia de costos

Los costos de operación, al momento de la caracterización del sistema (Cuadro 9.8), están relacionados con la potencia total de los ventiladores de 2000 HP (1492 KW) y el costo de 0,12 €/kWh (Cuadro 9.4), resultando 0,00028236 € por un (1) m<sup>3</sup> de aire en la atmósfera subterránea.

Cuadro 9.8 Costo de operación y costo unitario del sistema de ventilación

Costo de operación anual (€/ano)	Costo unitario aire de mina (€/m <sup>3</sup> aire)
1179773,00	0,00028236

### 9.4. Identificación del riesgo ambiental térmico, dinámico y volumétrico

#### 9.4.1. Matriz base para la identificación del riesgo ambiental

Aplicando la norma peruana, que define los valores permisibles de temperatura indicados en el ítem 3.2.3 (Cuadro 3.7) y de velocidad y caudal de aire indicadas en el ítem 3.4.4 (Cuadro 3.50), de la segunda parte de la tesis, la matriz base para la identificación del nivel de impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico se encuentra en el Cuadro 9.9.



Cuadro 9.9 Matriz base de los niveles de impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico

TIPO DE IMPACTO	NIVELES DE IMPACTO AMBIENTAL		
	Leve ∇	Moderado ⊗	Alto ◆
Térmico (°C) - Temperatura efectiva $T_e$	$30 < T_e \leq 31$	$31 < T_e \leq 32$	$T_e > 32$
Dinámico (m/s) V	$0,33 > V \geq 0,25$ $4,17 < V \leq 5,17$	$0,25 > V \geq 0,20$ $5,17 < V \leq 6,17$	$V < 0,20$ $V > 6,17$
Volumétrico ( $m^3/s$ ) Q	$q^* > Q \geq 0,9q^*$	$0,9q^* > Q \geq 0,7q^*$	$Q < 0,7q^*$

\* q: volumen de aire permitido por la norma legal

El caudal mínimo,  $q$  ( $m^3/s$ ), indicado en el Cuadro 9.9, se calcula aplicando la ecuación (3.73) en función del valor límite permisible del caudal, el número de hombres y el valor límite permisible para los equipos con motor diesel.

### 9.4.2. Identificación del impacto ambiental

Para identificar el impacto ambiental térmico y dinámico es necesario considerar la identificación de la localización del personal y equipos con motor diesel en los frentes de trabajo subterráneo, considerando las condiciones críticas que se presenta en algunos momentos de la operación diaria, como se indica en el Cuadro 9.10, dando como resultado el requerimiento mínimo permisible presentado en el Cuadro 9.11.

Cuadro 9.10 Condiciones desfavorables momentáneas y simultáneas en la operación minera diaria (Medina E., 2000 Departamento de producción de la mina San Rafael)

Circuito del aire	Condiciones críticas en las operaciones	
	Operarios (incluyendo operadores de los equipos)	Equipos con motor diesel
Rampa 523	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 37 Hombres en frentes</li> <li>• 10 Hombres en otros trabajos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 Camiones Volvo Intercooler NL-12</li> <li>• 5 Furgones para supervisión</li> <li>• 1 LHDs de 6.5 Yd<sup>3</sup></li> </ul>
Zapata	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8 Hombres en frentes (2 frentes en un nivel)</li> <li>• 2 Hombres en otros trabajos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Jumbos Boomer H-282</li> <li>• 1 LHD de 5.5 Yd<sup>3</sup></li> </ul>
San Rafael	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8 Hombres en frentes (2 frentes)</li> <li>• 2 Hombres en otros trabajos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Jumbo Boomer H-282</li> <li>• 1 LHD de 5.5 Yd<sup>3</sup></li> </ul>
Tajeos	4 Hombres	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Simba H-1354</li> <li>• 1 Camión Volvo Intercooler NL-12</li> <li>• 1 LHD de 6.5 Yd<sup>3</sup></li> </ul>

Cuadro 9.11 Caudal mínimo de aire limpio permisible para los circuitos y tajeos (basado en el Cuadro 9.10)

Circuito/desmonte	Hombres		Equipos diesel		q( $m^3/s$ )
	Cantidad de hombres (N)	$q_{VLA} \cdot N$ ( $m^3/s$ )	$P_m$ (HP)	$q_{VLA} \cdot P_m$ ( $m^3/s$ )	
Rampa 523	47	4,70	1925	96,25	100,95
Zapata - Frentes	10	1,0	325	16,25	17,25
San Rafael -Frentes	10	1,0	325	16,25	17,25
Tajeos	4	0,40	740	37,00	37,40

Con estos criterios establecidos y basados en las mediciones realizadas en septiembre 2001 (Anexo 9.1) se elabora la matriz de impacto ambiental térmico, dinámico y volumétrico (Cuadro 9.12).

Cuadro 9.12 Matriz de impacto ambiental de la atmósfera subterránea de la mina de San Rafael

FRENTE	EST	TRECHO			VEL. m/s	CAUDAL m <sup>3</sup> /s	TEMPERATURA			NIVELES DE IMPACTO AMBIENTAL			OBSERVACIONES
		de	a	m <sup>2</sup>			Ts(°C)	Th(°C)	Te(°C)	Térmico	Dinámico	Volumétrico	
523-254	1	35	55	20.8	0.39	8.11	27	22	23.11				Hombres
RB(Cx 3950)	2	34	52	2.54	9.25	23.50	31	30	21.05				Chimenea, no interesa
RB(Cx 3850)	3	33	34	2.54	0	0.00	32	31	31.3				Chimenea, no interesa
523 -243	4	34	41	22.5	0.01	0.23	30	29	29.29	⊕			Hombres(frente)
523-239	5	40	41	21.4	1.79	38.31	28	27	25.51				Hombres (frente)
523-236	6	9	40	19.9	1.74	34.63	27	26	24.56				Hombres(frente)
100-27N	7	27	28	17.84	1.58	28.19	19.5	16.5	15.82				Hombres(frente)
100-27N	8	28	29	4.72	2.05	9.68	18.5	16.5	15.05				Hombres(frente)
Cx-125	9	15	16	9.24	0.98	9.06	14	12.5	11.97				Sin pres. hombres
523-Niv 150 +20m	10	6	7	27.81	1.4	38.93	16.5	15	14.05				Hombres(zonas deserv)
200-S(Cx San Rafael)	11	25	26	10.0	2.54	25.40	11	10.5	8.11				Aire contam, no interesa
200-22-N	12	59	86	22.65	2.37	53.68	24	23.5	21.28				Aire contam, no interesa
200-22-N	13	59A	86	6.51	0.98	6.38	24.5	24	23.17				Aire contam, no interesa
200-3	14	86	87	5.96	13.65	81.35	25	24.5	11				Aire contam, no interesa
450-N	15	11	12	12.5	1.01	12.63	11.5	11	10.14				Hombres(frente)
450-N	16	11	12	11.51	1.06	12.20	6.5	5.5	4.74				Hombres (frente)
523-02	17	1	6	24.8	4.68	116.06	8.5	8	3.47				Hombres (transporte)
533-120-N	18	54C	51	7.57	2.13	16.12	19	18.5	16.52				Aire contam, no interesa
533-125N	19	96	51	7.63	1.81	13.81	20	19.5	17.84				Aire contam, no interesa
533-117N	20	54C	51	9.88	1.81	17.88	19.5	19	17.34				Aire contam, no interesa
533-102N	21	50	54C	9.12	1.17	10.67	20	19.5	18.48				Aire contam, no interesa
533-98N	22	50A	50	8.42	1.21	10.19	20	19.5	18.44				Aire contam, no interesa
533-88N	23	61	50A	4.28	4.22	18.06	20	19.5	15.43				Aire contam, no interesa
533-71N	24	62	61	5.13	2.24	11.49	20	19.5	17.41				Aire contam, no interesa
600 San Rafael	25	4	21	11.94	1.72	20.54	9	7	5.88				Sin pres. hombres
666 San Rafael	26	5	36	13.06	1.1	14.37	9	7	6.5				Sin pres. hombres
Zapata	27	3	22	8.26	0.44	3.63	6.5	6	5.71				Sin pres. hombres
A chaniné está em processo de alargamento						0.00			0				Aire contam, no interesa
Gal. Patron EV2	28				4	1.37	5.48	14.5	14	12.78			Aire contam, no interesa
Ch. Volcan EV3						0.00			0				Aire contam, no interesa
Ch. Patron EV1						0.00			0				Aire contam, no interesa
Ch. Alimak EV2						0.00			0				Aire contam, no interesa
Recom. medir na secção irregular (indirec.)						0.00			0				Aire contam, no interesa
Ch. 4330 EV3						0.00			0				Aire contam, no interesa
Gal. 4330 EV3						0.00			0				Aire contam, no interesa
Ch. 4330 EV3						0.00			0				Aire contam, no interesa

▼ Leve ⊕ Moderado ▼ Alto

La matriz de impacto ambiental indica que, en la atmósfera subterránea de la mina de San Rafael, existe impacto ambiental térmico leve y, el impacto ambiental dinámico y volumétrico son de moderado a alto.

En particular, en el fondo de la rampa 523 existe un alto impacto ambiental dinámico y volumétrico, indicando que los circuitos de Zapata y San Rafael no permiten la entrada de aire limpio en caudal necesario y suficiente.

En las condiciones de operación de Septiembre de 2001, donde la zona de explotación está centrada por encima del nivel 4310, no existe impacto ambiental térmico ni volumétrico en el tramo inicial de la rampa (tramo 1-6 de la fig. 9.13), además la velocidad del aire es ligeramente superior a la admisible por la norma peruana.

Se nota claramente que el caudal de aire que entra por la rampa 523 (116,06 m<sup>3</sup>/s en el tramo 1-6) se reduce drásticamente para los tramos siguientes (38,93 m<sup>3</sup>/s en el tramo 6-7). Este hecho indica que un caudal de 77,13 m<sup>3</sup>/s de aire limpio entra

en los *tajeos actualmente en explotación*, que es superior al mínimo requerido (37,40 m<sup>3</sup>/s), indicando esto que no existe riesgo ambiental en estas áreas de trabajo.

## 9.5. Alternativas de mitigación del riesgo ambiental térmico, dinámico y volumétrico

### 9.5.1. Análisis de la fuente de contaminación térmica

a) *Temperatura del macizo rocoso*: para determinar la influencia de la transferencia de calor del macizo rocoso al aire de la atmósfera subterránea se aplica la ecuación (3.6) para obtener el grado geotérmico ( $g_g$ ), resultando la siguiente ecuación:

$$g_g = \frac{\lambda PL(h_1 - h_{tcn} \pm Lsen\alpha)}{\Delta t_r (\lambda PL + 2000\rho_a C_e Q)}$$

El coeficiente de transferencia de calor  $\lambda$  se calcula con la ecuación (3.8), la relación de Dittus y Boelter  $Nu_d$  con la ecuación (3.9) y el *número de Reynolds* con la ecuación  $Re_d = V.d/\mu$ , cuyos detalles se encuentran en la sección 3.2.2.2 de la segunda parte.

Para determinar el grado geotérmico es necesario conocer el incremento generado por la temperatura de la roca virgen ( $\Delta t_r$ ), que es posible determinar mediante un balance de los incrementos generados por las diferentes fuentes de calor aplicando la ecuación (3.15).

b) *Transferencia de calor producido por los equipos*: aplicando la ecuación (3.10), con un factor combinado de conversión de la energía mecánica y de la utilización del equipo con un valor de 0,032, para los equipos indicados en el Cuadro 9.3, el incremento de la temperatura  $\Delta t_{ed}$  en el aire que fluye por la rampa 523 es de 0,85°C.

c) *Transferencia de calor por la detonación de explosivos*  $\Delta t_{ex}$ , se calcula usando la ecuación (3.11), para un gasto máximo diario de ANFO de 120 kg, resultando un incremento de temperatura de 0,52°C.

d) *Temperatura del agua termal* ( $\Delta t_{at}$ ): la caracterización de la influencia en el aumento de la temperatura del aire en las aberturas subterráneas del nivel 3850 provocadas por agua termal, realizada en septiembre de 2001, permitió expresar este valor correspondiente a 12°C.

La influencia del metabolismo humano en el aumento de la temperatura del aire en el fondo de la mina es insignificante, por el hecho de trabajar en pequeñas cantidades, por lo tanto se considera despreciable.

El análisis de las temperaturas hecho en los ítems b), c) y d) dan un total parcial (sin considerar  $\Delta t_r$ ) de 13,34°C; pero el  $\Delta t_{total}$  es de 26°C (34°C – 8°C) y con la ecuación (3.15) el valor de  $\Delta t_r$  resulta 12,66 °C.

Con este último valor y con los parámetros de las propiedades del aire (Cuadro 3.2) y las siguientes condiciones físicas de las aberturas subterráneas:  $K = 0,0248056 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ ,  $d = 4,5 \text{ m}$ ,  $f = 0,0046 \text{ kg/m}^3$ ,  $V = 0,39 \text{ m/s}$ ,  $\mu = 14,07 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $Pr = 0,710$ ,  $P = 18 \text{ m}$ ,  $L = 7000 \text{ m}$ ,  $h_1 = 30 \text{ m}$ ,  $h_{tcn} = 30\text{m}$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $Q =$

$8,11\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_a = 1,26614 \text{ kg/m}^3$  y  $C_e = 1,0056 \text{ KJ/kg.}^\circ\text{C}$ , aplicando la ecuación deducida de la ecuación (3.6), el grado geotérmico del macizo rocoso resulta:

$$g_g = 65 \text{ m/}^\circ\text{C} \quad \text{o} \quad g_g = 1,54^\circ\text{C}/100\text{m}$$

Con este resultado y con la temperatura exterior media anual de  $6,61^\circ\text{C}$ , la tendencia del grado geotérmico de la mina San Rafael, en el nivel 3850, es de  $16,70^\circ\text{C}$  (fig. 9.16 izquierda) y, comparando con la tendencia de la temperatura registrada en la rampa 523, se observa una semejanza.

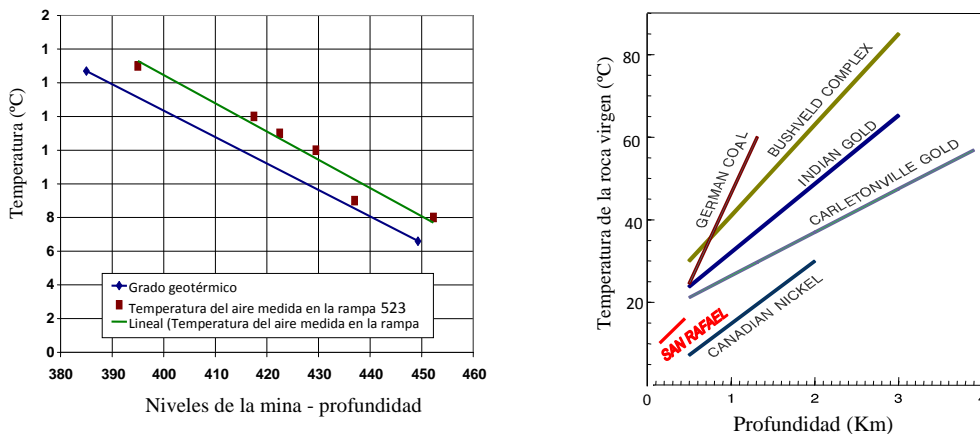


Figura 9.16 Grado geotérmico con respecto a la temperatura sin influencia del agua termal (izquierda) y con respecto a otras minas del mundo (derecha)

El grado geotérmico medido en otras minas del mundo, referidas por Hartman, 1982 (fig. 9.16 derecha) presenta valores semejantes, por lo que el resultado obtenido es confiable.

Con el valor del grado geotérmico determinado y aplicando la ecuación (3.2) la conductividad térmica del macizo rocoso de la mina San Rafael es de  $3,25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

### 9.5.2. Cálculo de la cantidad de aire necesario

Con base en el artículo 204 del Reglamento de Seguridad e Higiene Minera de Perú y las condiciones operacionales de la mina San Rafael, el caudal mínimo resulta como se indica en el Cuadro 9.13.

Cuadro 9.13 Cantidad mínima de aire estimada para el ambiente subterráneo de la mina de San Rafael

Descripción del área	Q mín. (m <sup>3</sup> /s)
a) Rampa 523 hasta el Nivel 4310 · Hombres: máximo 47 hombres (47 x 0,10 = 4,7) · Equipos diesel (polvo y gases): 1925 hp potencia (1925 x 0,05= 96,25)	100,95
b) Fondo de la rampa 523 en el Nivel 3850 (por cada frente de trabajo) · Hombres: máximo 10 hombres (10 x 0,10 = 1,0) · Equipos diesel (polvo y gases): 323 hp potencia (323 x 0,05= 16,15) · Confort térmico calculado en la página siguiente: (=30,00)*	30,00**
c) Tajeos (máximo 3 tajeos simultáneamente en operación) · Hombres: máximo 4 hombres (4 x 0,10 = 0,40) · Equipos diesel (polvo y gases): 740 potencia (740 x 0,05 = 37)	111,12
Total mina	212,02

\* El confort térmico requiere un mayor caudal de hombres más equipos

\*\* El caudal calculado en b) es una fracción del caudal calculado en a)

Basado en la ecuación (3.16) y complementado por las ecuaciones (3.1), (3.6), (3.10), (3.11) y (3.9), el aumento de la temperatura por el calor del agua termal, los parámetros físicos y del aire de la atmósfera subterránea (Cuadro 3.2), la ecuación particular que relaciona la temperatura ambiental  $T_c$  (auto compresión (3.1), roca virgen (3.6), equipos diesel (3.10), explosivo (3.11), agua termal (medida), metabolismo humano (3.12) con caudal de aire limpio expresado en m<sup>3</sup>/s ( $Q_i$ ) para la mina San Rafael, resulta:

$$T_c = 25.31 + \frac{1}{0.053 + 0.00384Q_i} + \frac{27.80}{Q_i}$$

Basado en esta ecuación, se modeló la tendencia de la temperatura del ambiente subterráneo en función del caudal de aire limpio, utilizando el programa EXCEL 2000, por su simplicidad, dando como resultado el ilustrado en la fig. 9.17, donde se ve que la temperatura de confort (20 °C a 29 °C -J.K. Kreide 2000), para la mina de San Rafael, se logra con un caudal de aire limpio mínimo de 10 m<sup>3</sup>/s (29 °C) y con un caudal de 30 m<sup>3</sup>/s (26,5 °C).

Otra conclusión es que en esta mina y en las zonas próximas a la cota 3850 no es necesario pensar en un sistema de enfriamiento posible debido a la presencia del agua termal.

Es interesante observar la tendencia asintótica del resultado de la simulación, por lo que un aumento del caudal de aire en los frentes de la zona del nivel 3850 tiene poca influencia en la disminución de la temperatura del ambiente subterráneo, quedando claro que caudales de 100 m<sup>3</sup>/s permiten obtener una temperatura próxima a 26 °C.

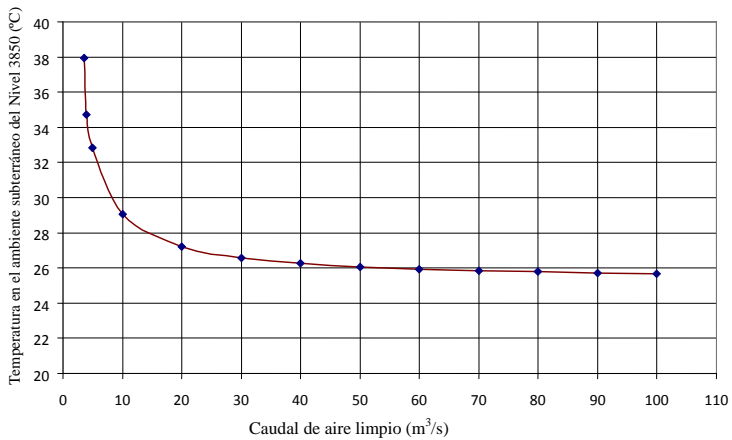


Figura 9.17 Confort térmico en el fondo de la rampa 523 y galería del Nivel 3850 de la mina San Rafael

Por ejemplo, el aumento del caudal de 30 m³/s a 100 m³/s da lugar a una disminución de 26,5 °C, cerca de 26 °C.

Finalmente, la cantidad mínima de aire calculada para esta mina, incluyendo el caudal de aire para obtener el confort ambiental, en el nivel 3850, debido a la temperatura ocasionada por las fuentes analizadas y, en particular, por la presencia de agua termal (Cuadro 9.13), hace un total de 212,02 m³/s.

### 9.5.3. Modelización del sistema de aire en el ambiente subterráneo

El programa utilizado es el VnetPC2000 de Mine Ventilation Services, Inc de E.U.A. Los parámetros de entrada (*input parameters*), para el modelo de ventilación simplificado, incluyen 164 tramos (locales) y 134 nodos, para las alternativas seleccionadas. Para cada tramo del ambiente subterráneo fue necesario conocer la sección, el perímetro, la longitud real, la longitud equivalente (Cuadro 3.47) y el factor de fricción (Cuadro 3.46). Visto que no fue posible obtener las curvas características de los ventiladores existentes en la mina, se consideró como *input* del ventilador el caudal de aire (*fixed quantity*). Finalmente, el parámetro económico utilizado fue el costo de 0,12 €/kWh.

Los criterios considerados fueron:

- Simular el circuito de aire subterráneo para las condiciones físicas, dinámicas y térmicas caracterizadas en el mes de septiembre de 2001, habiéndose obtenido un resultado satisfactorio.
- Basado en esta referencia que representa la condición existente, se procedió a la realización de varias simulaciones para dos condiciones básicas: una sin considerar la integración de la nueva chimenea (995,30 m y 3,82 m de diámetro), y otra integrándola en el circuito de aire. Los resultados de las alternativas que presentan mejores condiciones se muestran en los Cuadros 9.14, 9.15, 9.16 y 9.17 y el resultado de la simulación de la mejor alternativa en el Anexo 9.2.

Cuadro 9.14 Alternativa 1: simulación en las condiciones existentes y con ventilador de 100000 cfm en vez del ventilador de 30000 cfm en el nivel 3850 (no considera una chimenea nueva)

Entrada		Salida	
Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Rampa 523	116,06	Chimenea <i>Alimak</i> EU5	47,20
Boca de la mina <i>Zapata</i> 4533	7,90	Chimenea <i>Volcán</i> EV3	39,84
Boca de la mina <i>Zapata</i> 4600	7,95	Tajeos antiguos EV4	29,98
Boca de la mina <i>San Rafael</i> 4600	41,71	Chimenea <i>Patrón</i> EV1	5,96
Boca de la mina <i>San Rafael</i> 4666	33,81	Galería <i>Patrón</i> EV2	8,73
		Chimenea 4850 EU3	30,56
		Galería 4890 EU2	24,68
		Chimenea 4920 EU1	18,79
Total	207,43	Total	207,43

Cuadro 9.15 Alternativa 2: simulación en las condiciones existentes y con 1 ventilador de 105 m<sup>3</sup>/s (222457,63 cfm) en la galería 4100 en el circuito de San Rafael antes de las chimeneas que conectan 4100 con 3850 y eliminando los 3 ventiladores de 30000 cfm instalados para la zona de 3850 (no considera la chimenea nueva)

Entrada		Salida	
Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Rampa 523	116,06	Chimenea <i>Alimak</i> EU5	47,20
Boca de la mina <i>Zapata</i> 4533	6,21	Chimenea <i>Volcán</i> EV3	47,44
Boca de la mina <i>Zapata</i> 4600	7,95	Tajeos antiguos EV4	35,69
Boca de la mina <i>San Rafael</i> 4600	57,99	Chimenea <i>Patrón</i> EV1	7,12
Boca de la mina <i>San Rafael</i> 4666	47,01	Galería <i>Patrón</i> EV2	10,42
		Chimenea 4850 EU3	36,06
		Galería 4890 EU2	29,12
		Chimenea 4920 EU1	22,17
Total	235,22	Total	235,22

Cuadro 9.16 Alternativa 3: simulación en las condiciones existentes y con ventilador de 100000 cfm en vez del ventilador de 30000 cfm en el nivel 3850 (considera la chimenea nueva)

Entrada		Salida	
Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Rampa 523	116,06	Chimenea <i>Alimak</i> EU5	47,20
Boca de la mina <i>Zapata</i> 4533	6,21	Chimenea <i>Volcán</i> EV3	39,84
Boca de la mina <i>Zapata</i> 4600	7,95	Tajeos antiguos EV4	29,98
Boca de la mina <i>San Rafael</i> 4600	4,78	Chimenea <i>Patrón</i> EV1	5,96
Boca de la mina <i>San Rafael</i> 4666	3,87	Galería <i>Patrón</i> EV2	8,73
Chimenea de desfogue (200-22)N	66,74	Chimenea 4850 EU3	30,56
		Galería 4890 EU2	24,68
		Chimenea 4920 EU1	18,79
Total	205,74	Total	205,74

Cuadro 9.17 Alternativa 4: simulación en las condiciones existentes y con 1 ventilador de 105 m<sup>3</sup>/s (222457,63 cfm) en la galería 4100 en el circuito de San Rafael antes de las chimeneas que conectan 4100 con 3850 y eliminando los 3 ventiladores de 30000 cfm instalados para la zona del 3850 (considera una chimenea nueva)

Entrada		Salida	
Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Rampa 523	116,06	Chimenea Alimak EU5	47,20
Boca de la mina Zapata 4533	6,21	Chimenea Volcán EV3	47,44
Boca de la mina Zapata 4600	7,95	Tajeos antiguos EV4	35,69
Boca de la mina San Rafael 4600	6,64	Chimenea Patrón EV1	7,14
Boca de la mina San Rafael 4666	5,38	Galería Patrón EV2	10,42
Chimenea de desfogue (200-22) N	92,98	Chimenea 4850 EU3	36,06
		Galería 4890 EU2	29,12
		Chimenea 4920 EU1	22,17
Total	235,22	Total	235,22

Las alternativas 1 y 3 cumplen con el aire mínimo requerido (30 m<sup>3</sup>/s) para confort ambiental en el nivel 3850 (47,20 y 47,20 m<sup>3</sup>/s para 30 m<sup>3</sup>/s) pero no consiguen obtener el caudal mínimo total requerido para la mina (205,74 y 207,43 m<sup>3</sup>/s para 212,02 m<sup>3</sup>/s).

Las alternativas 2 y 4 cumplen con el aire mínimo requerido para el confort ambiental en el nivel 3850 (30,51 y 30,71 m<sup>3</sup>/s para 30 m<sup>3</sup>/s) y también con el caudal total mínimo requerido para la mina (235,22 y 235,22 m<sup>3</sup>/s).

Entre la alternativa 2 y la 4, la mejor es la 4 debido a que su costo de operación es menor.

Para la alternativa 4 existen en el mercado ventiladores de diversas marcas, como por ejemplo Zitron ZVN 1-23-360/6.

En cuanto a la viabilidad económica, la alternativa 4 requiere una inversión cercana a los 961139,99 €, calculada con base en las informaciones proporcionadas por el departamento de planificación de la mina San Rafael (Medina, E., 2001), distribuido de la siguiente forma:

- Construcción de la chimenea nueva (995,30 m con diámetro de 3,82 m): 1476169,20 €;
- Costo de 1 ventilador de 105 m<sup>3</sup>/s (222457,63 cfm) (Zitron ZVN 1-23-360/6): 300000,00 €.

En relación a los costos de energía, la alternativa 4 implica la instalación de un ventilador (Zitron ZVN 1-23-360/6) con una potencia de 360 KW y la desinstalación de tres ventiladores de 30000 cfm (14,16 m<sup>3</sup>/s) que corresponden a 150 KW (Cuadro 9.4).

Con estas informaciones la potencia total instalada de los ventiladores es de 1702 KW, calculada con base en el total indicado en el Cuadro 9.4 y con 0,12 €/kWh se obtiene el costo comparativo entre el costo al momento de la caracterización y la mejor alternativa (Cuadro 9.18).



Cuadro 9.18 Costo de operación unitaria comparativa entre la Alternativa 4 y las condiciones caracterizadas en septiembre de 2001

Condición	Potencia instalada (KW)	Caudal total (m <sup>3</sup> /s)	Costo de operación (m <sup>3</sup> de aire/€)
Septiembre 2001	1492	154,60	2736,19
Alternativa 4	1702	235,22	3828,48

La inversión de la alternativa 4 es de 1776169,2 €, pero produce una reducción de los costos operacionales del 27,83% en relación con la condición inicial, aunque la inversión en la construcción de la chimenea sea alta.



## **CUARTA PARTE**

### **APLICACIÓN A NUEVOS PROYECTOS Y SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL SUBTERRÁNEA**

---



## Capítulo 10

### ANÁLISIS DE CASOS ESTUDIADOS

#### 10.1. Introducción

En este capítulo se analizan los resultados de la aplicación, a dos minas portuguesas y una mina peruana de la ingeniería ambiental subterránea (IAS) propuesta en la primera parte y desarrollada en la segunda parte de este libro. El objetivo es realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en cada mina, en el área de los componentes ambientales aire, agua y suelos, esperando obtener conclusiones que constituyan aportes para el desarrollo de nuevos proyectos, relacionados con el ambiente subterráneo.

#### 10.2. Localización e información general de las tres minas

La localización y las características generales de las minas Neves Corvo, Panasqueira y San Rafael, donde fueron realizados los estudios de aplicación, se presentan en el Cuadro 10.1.

#### 10.3. Impacto ambiental térmico

##### 10.3.1. Temperatura exterior

La variación de la temperatura ambiental exterior proveniente de los registros meteorológicos en cada mina (fig. 10.1) muestra que en las minas Neves Corvo y Panasqueira existe una tendencia similar con fuerte variación a lo largo del año (15 °C), no existiendo una marcada diferencia en estas minas a pesar de estar localizadas en diferentes regiones de Portugal y de existir una diferencia de altitud del orden de los 600 metros.

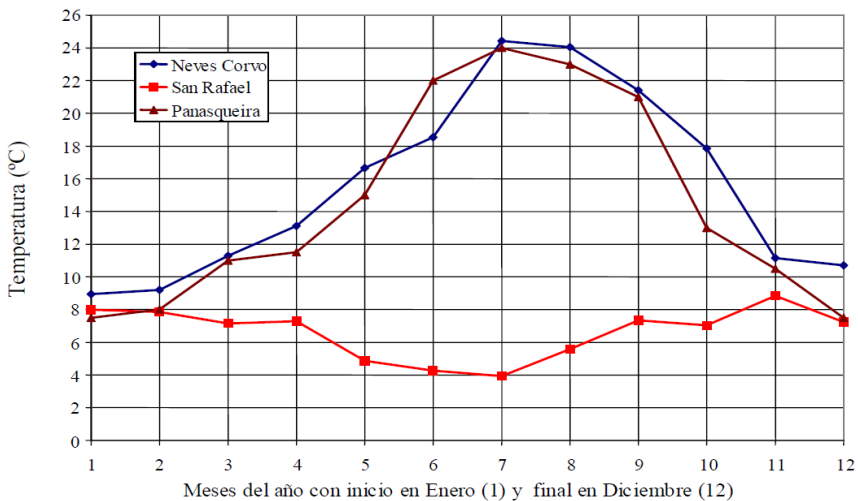


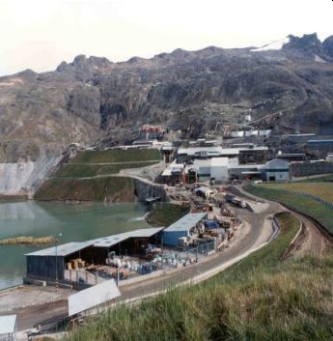


Figura 10.1 Variación de la temperatura media mensual en las minas Neves Corvo, Panasqueira y San Rafael

Cuadro 10.1 Resumen de la información sobre las minas estudiadas

Detalle	Información general	Mina
<b>Mina</b>	<b>NEVES CORVO</b>	
Empresa	Sociedade Mineira de Neves Corvo S. A.	
Continente	Europa (península ibérica)	
País	Portugal	
Localidad	Castro Verde y Almodóvar	
Altitud	200 m	
Área geológica	Oeste de la faja piritosa ibérica	
Yacimiento	Hidrotermal, volcano-sedimentario, cuerpos	
Roca	Esquistos negros arcillosos y carbonatados	
Mina de	Cobre principalmente (estaño y zinc)	
Producción	6500 t/día de mineral	
Explotación	Corte y relleno y banqueo y relleno	
<b>Mina</b>	<b>PANASQUEIRA</b>	
Empresa	Beralt Tin & Wolfram (Portugal) S.A.	
Continente	Europa (península ibérica)	
País	Portugal	
Localidad	Barroca Grande	
Altitud	700 m a 900 m	
Área geológica	Sur de la cordillera Serra da Estrela	
Yacimiento	Hidrotermal volcánico, vetas y filones subhorizontales	
Roca	Fundamentalmente esquistos	
Mina de	Volframio	
Producción	2000 t/día de mineral	
Explotación	Cámaras y pilares	
<b>Mina</b>	<b>SAN RAFAEL</b>	
Empresa	Compañía Minera MINSUR S.A	
Continente	América del Sur	
País	Perú	
Localidad	Antauta	
Altitud	4500 m a 5000 m	
Área geológica	Cordillera Oriental del Sur	
Yacimiento	Hidrotermal volcánico, cuerpos	
Roca	Filitas, cuarcitas y stoks graníticos	
Mina de	Estaño	
Producción	2500 t/día de mineral	
Explotación	Sub Level Stopping	

La variación de la temperatura exterior media mensual en la mina peruana de San Rafael no es grande a lo largo del año (4 °C), constituyendo una característica típica de los Andes peruanos. Mientras tanto, existe una fuerte variación en las minas portuguesas, obediendo este factor a que las minas Neves Corvo y Panasqueira están localizadas en la latitud norte y altitudes de 200 y 700 metros respectivamente, y la mina San Rafael en la latitud sur y una altitud cercana a los 5.000 m; sin embargo, durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, en las tres minas se registran temperaturas medias mensuales con escasa diferencia (8 a 10 °C) que corresponden a las mínimas en las minas portuguesas y las máximas en la mina peruana.

### 10.3.2. Temperatura en el ambiente subterráneo

#### 10.3.2.1. Correlación de la temperatura exterior y de la atmósfera subterránea

La tendencia de las temperaturas registradas en el ambiente subterráneo de la mina Neves Corvo (fig. 10.2 izquierda) y de la mina Panasqueira (fig. 10.2 derecha) muestra que existe influencia de la temperatura exterior en la temperatura de los frentes de trabajo subterráneos. Cuando en el exterior la temperatura es alta en el ambiente subterráneo también es alta y viceversa, por lo tanto puede existir alguna relación entre las dos temperaturas.

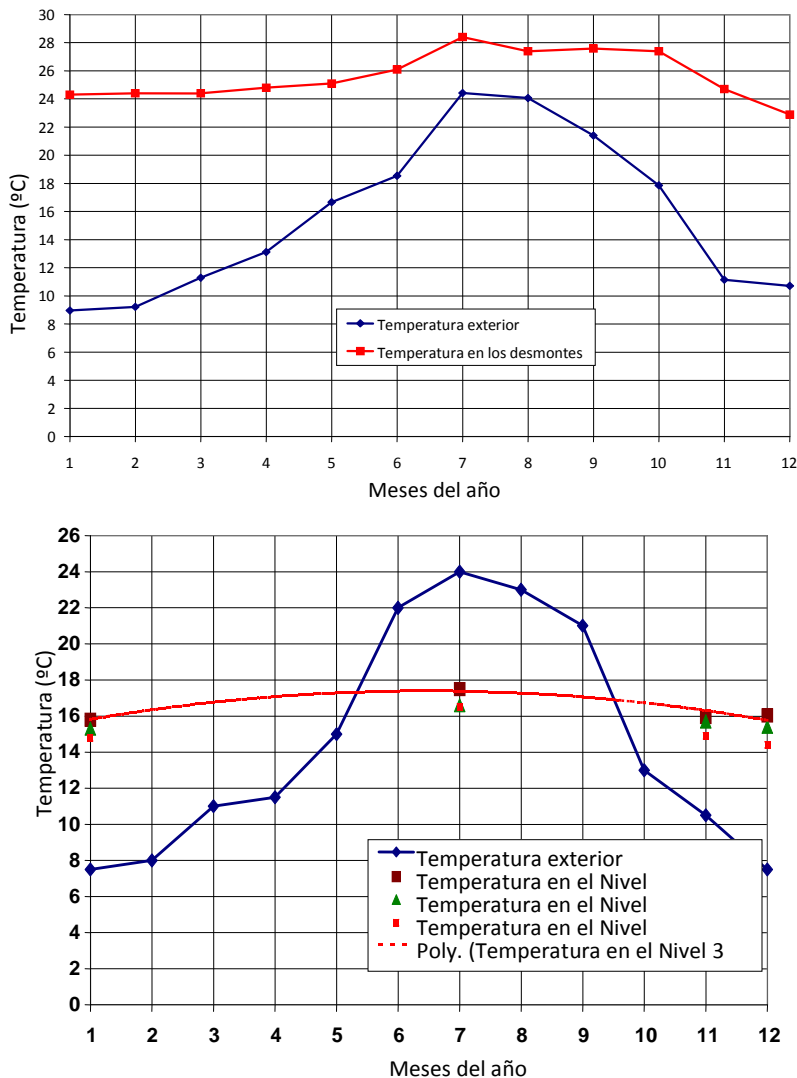


Figura 10.2 Influencia de la temperatura exterior en el ambiente subterráneo de la mina Neves Corvo (izquierda) y la mina Panasqueira (derecha)

Para el análisis de la correlación entre la temperatura exterior y la temperatura en el ambiente subterráneo fueron consideradas dos minas portuguesas, porque en ellas existe una notoria variación de la temperatura en el ambiente subterráneo (figura 10.3). La correlación permite una conclusión de carácter general en el sentido de que la temperatura por debajo de los 6 °C no influye al ambiente subterráneo.

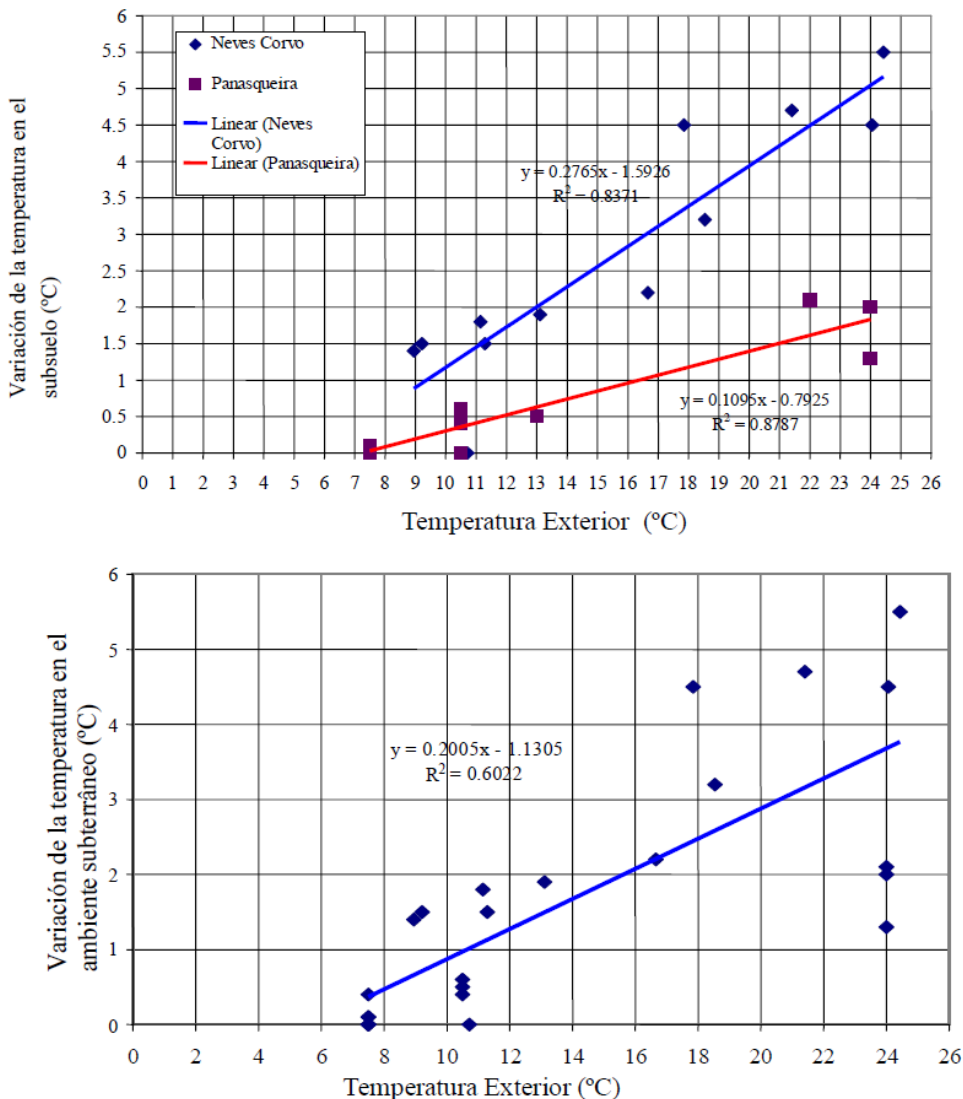


Figura 10.3 Correlación entre la temperatura exterior y la variación de la temperatura en la atmósfera subterránea

El análisis basado en estas minas condujo a una expresión general (ecuación 10.1) que correlaciona la variación de la temperatura de la atmósfera subterránea



VTS (°C) en función de la temperatura del aire exterior TE (°C) para valores iguales o mayores a los 6 °C. Por lo tanto, esta expresión podrá ser de utilidad para minas portuguesas, europeas y minas subterráneas en el mundo, localizadas en zonas con variaciones de temperatura similares a las dos minas estudiadas y a profundidades similares.

$$VTS = 0.2005TE - 1.1305, \text{ para } TE \geq 6 \text{ °C} \quad (10.1)$$

En el caso de la mina San Rafael, la temperatura exterior varía a lo largo del año entre 4 °C y 9 °C, por lo que la influencia en la temperatura de la atmósfera subterránea es prácticamente irrelevante. Esta conclusión es aplicable a minas de condiciones similares.

### 10.3.2.2. Fuentes de calor en el ambiente subterráneo

Los estudios realizados para la determinación de las fuentes de calor fueron, en la mina Neves Corvo, en el desmonte (CO547GAM) a una profundidad de 659,30 m y en la mina San Rafael, en galería (Nivel 3.850) a una profundidad de 683 m, con presencia de agua termal. La cuantificación porcentual de las fuentes de calor en la atmósfera subterránea se muestra en el Cuadro 10.2.

Cuadro 10.2 Resultado comparativo de las fuentes de calor

Fuentes de calor	Neves Corvo (desmonte)		San Rafael (galería)		
Macizo rocoso	20,77 °C	85,1%	12,66 °C	90,4%	48,6%
Detonación de explosivo	1,63 °C	6,7%	0,52 °C	3,8%	3,3%
Equipos diesel	2,0 °C	8,2%	0,82 °C	5,8%	2,0%
Agua termal	-	-	12,0 °C	-	46,1%

Los resultados muestran que el mayor contaminante térmico es la temperatura del macizo rocoso (85% a 90%), seguido del equipamiento diesel (6% a 8%) y finalmente la detonación de explosivos (4% a 7%). Por lo tanto, es importante determinar el grado geotérmico cuando existen problemas ambientales relacionados con la temperatura en minas con operaciones a profundidades en el orden de los 600 m. En el caso de Neves Corvo es de 1°C/30,3 m y en el caso de San Rafael de 1°C/65 m.

### 10.3.2.3. Análisis comparativo de las normas portuguesa y peruana

La norma portuguesa tolera máximos de 31°C, 26°C y 28°C para las temperaturas seca, húmeda y efectiva, respectivamente, mientras que la norma peruana considera solamente la temperatura efectiva con un valor máximo de 30°C (fig. 10.4).

La fig. 10.4 muestra una diferencia no en la tolerancia máxima sino en el criterio para establecer el valor máximo.

Estas diferencias obviamente conducen a tomar diferentes referencias para la identificación del impacto ambiental térmico (Cuadro 10.3) en cada país.

10.3.2.4 Medidas correctivas del impacto ambiental térmico

La búsqueda de medidas correctivas para reducir la temperatura del ambiente subterráneo en los tajeos de la mina Neves Corvo y en las aperturas subterráneas con presencia de agua termal (nivel 3.850) en la mina San Rafael, permitieron sacar interesantes conclusiones relacionadas con la obtención de una temperatura de confort ambiental, cuyo resumen se presenta en el Cuadro 10.4. No se consideró la mina Panasqueira porque no presenta problemas relacionados con la temperatura.

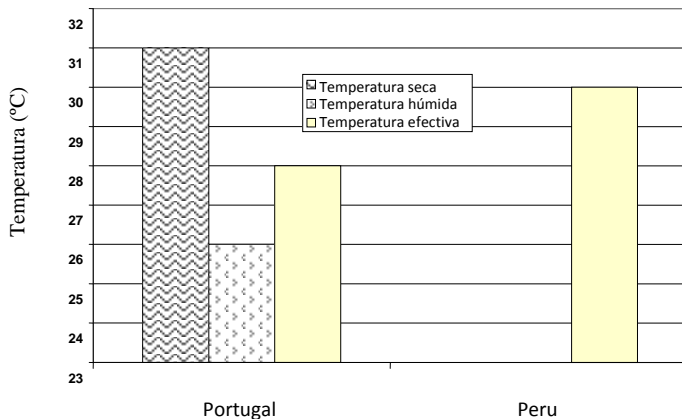


Figura 10.4 Valor máximo permisible de temperatura en Portugal y Perú

Cuadro 10.3 Matriz base para la evaluación del impacto ambiental térmico

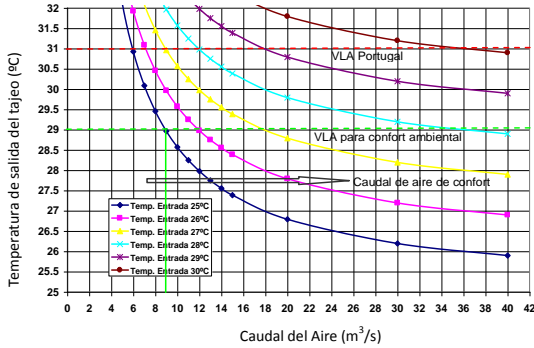
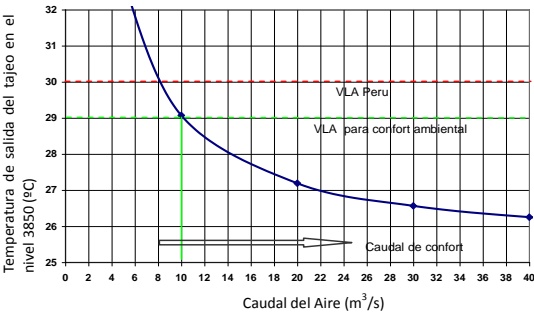
Temperaturas (°C)		Niveles de impacto ambiental		
		Leve ∇	Moderado ⊗	Alto ◆
Portugal I	Seca (ts)	31 < ts ≤ 33	33 < ts ≤ 35	ts > 35
	Húmeda (th)	26 < th ≤ 28	28 < th ≤ 30	th > 30
	Efectiva (te)	28 < te ≤ 29	29 < te ≤ 30	te > 30
Perú	Efectiva (te)	30 < te ≤ 31	31 < te ≤ 32	te > 32

En términos generales, para minas subterráneas a profundidades considerables (~ 600 a 800 m) que utilizan explosivos y equipos diesel, el caudal de aire Q (m<sup>3</sup>/s) que permita obtener una temperatura de confort ambiental subterráneo se puede calcular por la ecuación (10.2), donde T<sub>e</sub> es la temperatura de entrada al ambiente subterráneo y T<sub>s</sub> es la temperatura de salida de este ambiente (°C).

$$T_s = T_e + [20,461 / (1 + 2,97Q)] + 29,025 / Q, \quad \text{para } T_s < 29 \text{ °C} \quad (10.2)$$

Es interesante observar que cuando la temperatura de entrada al ambiente subterráneo sobrepasa los 29°C es imposible conseguir una temperatura de confort ambiental con la utilización de aire, porque se necesitan cantidades exorbitantes de aire (curva asintótica) por lo que, a partir de esta situación, se requiere de un sistema de refrigeración.

Cuadro 10.4 Resultados de las medidas correctivas para la mitigación del impacto ambiental térmico

Resumen	Resultado de las medidas correctivas
<p>a) La temperatura en la entrada de aire no debe superar los 29°C para no sobrepasar el valor límite permisible de la norma portuguesa.</p> <p>b) La temperatura en la entrada no debe ser superior a los 27°C para conseguirse el confort ambiental.</p> <p>c) Cuanto mayor es la temperatura en la entrada de aire mayor caudal de aire es necesario para el confort.</p> <p>d) Cónsono a esta última conclusión, los caudales de confort variarían de 9 m<sup>3</sup>/s hasta el caudal requerido y/o viable económicamente.</p> <p>e) A partir de 36 m<sup>3</sup>/s, un aumento del caudal tiene una reducción insignificante de la temperatura en el ambiente subterráneo.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Neves Corvo</b></p> 
<p>a) La temperatura en la entrada de aire no debe superar los 29°C para no sobrepasar el valor límite permisible de la norma peruana.</p> <p>b) La temperatura en la entrada debe ser menor a los 27°C para conseguirse el confort ambiental.</p> <p>c) El caudal mínimo de aire de confort es de 10 m<sup>3</sup>/s.</p> <p>d) A partir de 35 m<sup>3</sup>/s, un aumento del caudal tiene una reducción insignificante de la temperatura en el ambiente subterráneo.</p>	<p style="text-align: center;"><b>San Rafael</b></p> 

## 10.4. Impacto ambiental dinámico y volumétrico del aire

### 10.4.1. Ambiente subterráneo y caudal de aire

El ambiente subterráneo considerado para el estudio abarca cerca de 130 km en las tres minas, con secciones medias que varían de 9 m<sup>2</sup> a 20 m<sup>2</sup> y profundidades de 210 a 1.200 metros (Cuadro 10.5).

Cuadro 10.5 Dimensión y profundidad máxima del ambiente subterráneo en las minas estudiadas

Mina	Variación de la sección (m <sup>2</sup> )	Sección media (m <sup>2</sup> )	Longitud total (km)	Profundidad (m)
Neves Corvo	9,16 – 30,48	20	80	750 - 770
San Rafael	5,95 – 22,50	16	30	680 – 1200
Panasqueira	2,30 – 20,30	9	20	210 - 400

El caudal de aire caracterizado en las aberturas subterráneas, en relación al caudal requerido para las condiciones operacionales de cada mina (Cuadro 10.6) es menor en 30 a 35%, ocasionando problemas de impacto ambiental de alto nivel en algunos sitios.

Cuadro 10.6 Caudal caracterizado, requerido y producción de mineral

Neves Corvo			San Rafael			Panasqueira		
Caudal de aire		Producción (t/día)	Caudal de aire		Producción (t/día)	Caudal de aire		Producción (t/día)
Medido (m <sup>3</sup> /s)	Requerido (m <sup>3</sup> /s)		Medido (m <sup>3</sup> /s)	Requerido (m <sup>3</sup> /s)		Medido (m <sup>3</sup> /s)	Requerido (m <sup>3</sup> /s)	
647,00	836,72	6500	154,60	235,22	2500	73,83	113,60	2000

La fig. 10.5 (izquierda) muestra la relación directa entre el caudal de aire y la producción de mineral en las tres minas estudiadas, es decir, cuanto mayor es la producción mayor el caudal de aire.

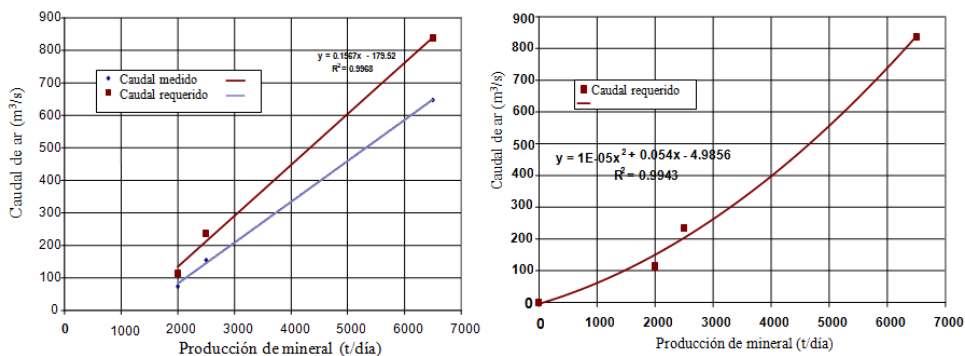


Figura 10.5 Variación del caudal de aire en relación a la producción diaria

En realidad, puede suceder que para un caudal cero (0) es imposible obtener una producción de mineral, por lo que también la producción sería cero (0). Por lo tanto, la tendencia pasa por un punto de origen tomando una evolución tal como se ilustra en la figura 10.5 (derecha) cuya ecuación es la (10.3) con un coeficiente de correlación de R<sup>2</sup> de 0,99, donde Q es el caudal de aire (m<sup>3</sup>/s) y P es la producción diaria de mineral (t/día).

$$Q = 0,00005P^2 + 0,054P - 4,9856, \text{ para } Q > 4,9856 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10.3)$$

Esta ecuación se obtiene considerando una cantidad de hombres y equipos diesel utilizados en las operaciones y para la norma portuguesa y peruana.

Del Cuadro 10.6 se puede deducir también que el volumen de aire requerido para producir una tonelada de mineral en la mina Neves Corvo es de 11122 m<sup>3</sup>/t, en la mina San Rafael de 8.129 m<sup>3</sup>/t y en Panasqueira de 4.908 m<sup>3</sup>/t. Estos resultados muestran que cuanto mayor es la producción, mayor es el volumen de aire necesario.

#### 10.4.2. Polvos y gases

Para efectos del análisis comparativo (fig. 10.6) se consideraron los estudios realizados en la mina Panasqueira y en la mina Neves Corvo en 1992 y

1996 (Instituto Geológico Minero – IGM), Cuadro 10.7, y las mediciones de gases, efectuadas en esta última mina por su Departamento de Ventilación, entre los meses de junio y julio de 2000, habiéndose identificado una concentración de NO que varía de 0 a 6 ppm, NO<sub>2</sub> de 0 a 0,4 ppm y de O<sub>2</sub> de 20,3 a 20,9%.

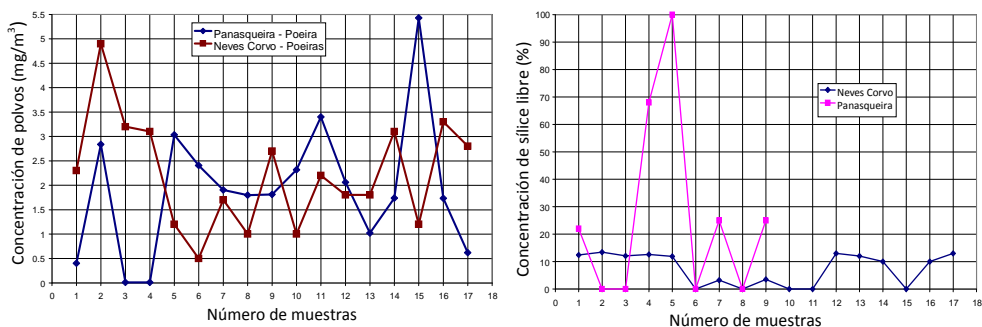


Figura 10.6 Concentración de polvos (izquierda) y sílice libre (derecha) en las minas de Neves Corvo y Panasqueira

Cuadro 10.7 Concentración de polvos y sílice libre en los tajeos de la mina Neves Corvo (IGM, 1992 y 1996)

Contaminante	Concentración de polvos (mg/m <sup>3</sup> ) – Sílice libre (%)
Polvo	2.3, 4.9, 3.2, 3.1, 1.2, 0.5, 1.7, 1.0, 2.7, 1.0, 2.2, 1.8, 1.8, 3.1, 1.2, 3.3, 2.8
Sílice libre	12.4, 13.4, 12.1, 12.6, 11.9, 0.0, 3.2, 0.0, 3.5, 0.0, 0.0, 13.0, 12.0, 10.0, 0.0, 10.0, 13.0

El tenor de sílice libre en el ambiente subterráneo de la mina Panasqueira fue caracterizado por el IGM en el año 1988 (Cuadro 10.8).

Cuadro 10.8 Concentración de polvos y sílice libre en los frentes de trabajo y tajeos de la mina Panasqueira (IGM, 1988)

Contaminante	Concentración de polvos (mg/m <sup>3</sup> ) – Sílice libre (%)
Polvo	4.41, 1.05, 1.93, 2.58, 1.01, 0.48, 0.98, 0.96, 1.87
Sílice libre	22.0, 0.0, 0.0, 68.0, 100.0, 0.0, 25.0, 0.0, 25.0

En algunas zonas de la mina Panasqueira se observa una muy alta concentración de sílice libre, específicamente en las zonas de operación de remoción con equipos LHD y en la cámara de trituración. Comparativamente, hay una mayor presencia de sílice en la mina Panasqueira porque la explotación está orientada a las vetas de cuarzo con intercalaciones de WO<sub>3</sub> encajados en los esquistos, mientras que en la mina Neves Corvo son cuerpos mineralizados de cobre (principalmente) en roca esquistosa.

Los resultados finales se presentan en el Cuadro 10.9, con los valores más bajos y más altos y un valor denominado mas frecuente que indica las concentraciones identificadas con mayor frecuencia.

Cuadro 10.9 Resultado de la concentración de polvos, sílice libre y gases

Nivel de concentración	Polvo (mg/m <sup>3</sup> )	Sílice libre (%)	Gases identificados				
			CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	NO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	O <sub>2</sub> (%)
Baja	0	0	0	0	0	0	19,2
Más frecuente	2,0	12 - 20	10	1000	2,0	4,0	19,4 - 20,5
Alta	5,0	13,4 - 100	500	3000	6,0	12	20,9

### 10.4.3 Análisis comparativo de las normas portuguesa y peruana

Entre la norma portuguesa (Decreto Ley n° 162/90) y la peruana (Reglamento de Seguridad e Higiene) existen marcadas diferencias (figuras 10.7 y 10.8).

La velocidad mínima permisible en Portugal es de 0,20 m/s y en Perú es de 0,33 m/s, siendo la máxima de 8 m/s en Portugal y de 4,17 m/s en Perú. El caudal mínimo de aire por cada HP de potencia de motor diesel en Portugal es de 0,035 m<sup>3</sup>/s y en Perú de 0,05 m<sup>3</sup>/s.

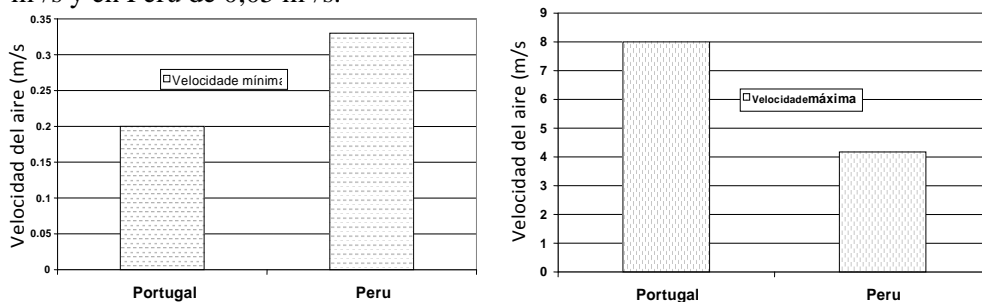


Figura 10.7 Valores de la velocidad de aire mínima (izquierda) y máxima (derecha) permisibles por las normas portuguesa y peruana

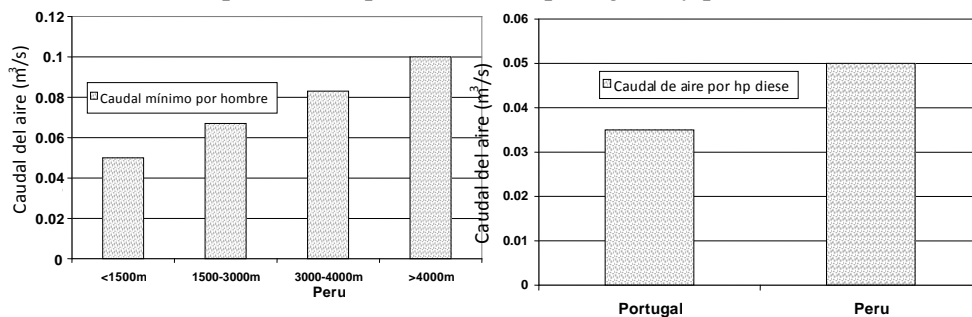


Figura 10.8 Valores del caudal de aire mínimo permisible por cada hombre (izquierda) y por cada HP de potencia de motor diesel (derecha) para las normas portuguesa y peruana

El caudal mínimo para cada hombre en Perú varía en relación a la altura sobre el nivel del mar. En relación a los gases la norma portuguesa no especifica los límites máximos permisibles y la norma peruana considera 19,5% para O<sub>2</sub>, 0,5% (5000 ppm) para CO<sub>2</sub>, 0,005% (50 ppm) para el CO, 0,0005% (5 ppm) para el NO<sub>x</sub>,

0,002% (2 ppm) para el SO<sub>2</sub>, 0,5% (5000 ppm) para CH<sub>4</sub> y 0,5% (5000 ppm) para el H<sub>2</sub>.

En relación a los gases y polvos en el ambiente subterráneo, la regulación portuguesa define los valores límites permisibles para polvos pero no para gases, y la peruana define para ambos contaminantes, por lo tanto en este aspecto existen algunas divergencias.

#### 10.4.4. Caudales de aire para condiciones críticas de operación

El caudal mínimo permisible en las minas Neves Corvo y Panasqueira (Portugal) son menores a los de la mina San Rafael (Perú), de hecho la norma peruana considera el caudal mínimo permisible en función de la altitud y estando esta por encima de los 4.000 m, el caudal es prácticamente el doble del requerido en las minas portuguesas. De igual forma, el caudal mínimo permisible para la mina peruana es mayor, porque la norma peruana considera un caudal mayor que la portuguesa por cada HP de motor diesel (Cuadro 10.10 y fig. 10.9).

Cuadro 10.10 Caudal mínimo permisible en las minas Neves Corvo y Panasqueira de Portugal y San Rafael de Perú

Mina	Sitio	Hombres	Potencia diesel (hp)	Caudal mínimo q (m <sup>3</sup> /s)		
				Hombres	Máq.	Total
Panasqueira	Tajeos totales	30	364	1,50	12,74	14,24
	L2 y L3 del pozo extracción y rampas	10	44	0,50	1,54	2,04
	Rampa L2/L3 y L3.P(-5)	15	182	0,75	6,37	7,12
	Cám.Queb., Cabeza de correa, Galería	03	0	0,15	0	0,15
Neves Corvo	Tajeos	03	224	0,15	10,52	10,67
	Oficinas de mantenimiento	12	224	0,60	11,60	11,12
	Nivel del transporte	04	706	0,20	18,40	18,60
	Galerías y rampas	15	136	0,75	4,76	5,51
San Rafael	Rampa 523	47	1925	4,70	96,25	100,95
	Zapata – Frentes	10	325	1,00	16,25	17,25
	San Rafael- Frentes	10	325	1,00	16,25	17,25
	Tajeos	4	740	0,40	37,00	37,40

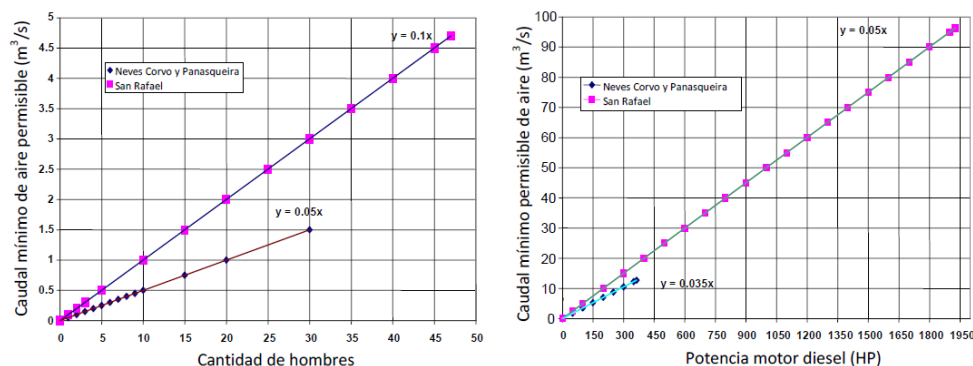


Figura 10.9 Caudal mínimo permisible por la cantidad de hombres (izquierda) y la potencia del motor diesel (derecha) en minas portuguesas y peruanas

En condiciones extremas, el caudal mínimo requerido para cada trabajador representa apenas un 4,5% del requerido por la utilización de equipos diesel. Por lo tanto, la importancia del caudal mínimo de aire para los hombres es fundamentalmente cuando no hay presencia de equipos con motores diesel.

La gran diferencia de la potencia de motor diesel utilizada en la mina San Rafael es porque el principal sistema de transporte se realiza mediante camiones con motores diesel hasta el exterior, o sea, el sistema utilizado es casi en un 100% minería sin caminos, pero en las minas Neves Corvo y Panasqueira es por sistema de extracción en pozos verticales e inclinados.

**10.4.5. Medidas correctivas del impacto dinámico y volumétrico**

La fig. 10.10 muestra que las minas Neves Corvo y San Rafael presentan impacto ambiental para velocidades hasta 1 m/s y caudal hasta 16 m<sup>3</sup>/s, mientras que en la mina Panasqueira este problema ambiental ocurre para velocidades hasta de 0,5 m/s y caudales hasta 7 m<sup>3</sup>/s.

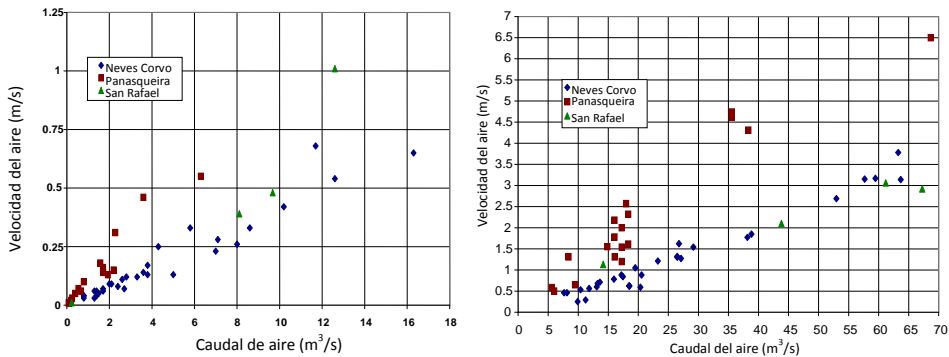


Figura 10.10 Velocidad y caudal de impacto ambiental negativo identificados (izquierda) y de la mejor alternativa de medida correctiva aplicada (derecha) en las tres minas en estudio

Las medidas correctivas aplicadas están comprendidas desde aproximadamente 0,20 m/s para Panasqueira y Neves Corvo y desde 1,0 m/s para la mina San Rafael, reflejando estos resultados la diferencia de normas y condiciones en cada país.

El declive de las tendencias confirma la influencia de la sección de las aperturas subterráneas, o sea, a menor sección corresponde una mayor pendiente y viceversa.

Los resultados comparativos permiten expresar que la velocidad mínima del aire para obtener una buena calidad está entre 0,5 y 0,8 m/s (velocidad crítica).

**10.4.6. Análisis comparativo de costos**

Los costos relacionados con el estudio del impacto ambiental en la atmósfera subterránea son analizados en las tres minas, considerando los costos en la caracterización inicial (marco de referencia) y los costos de la medida correctiva adoptada. El Cuadro 10.11 compara los resultados.



Cuadro 10.11 Costos del aire subterráneo en las minas Neves Corvo, Panasqueira y San Rafael

Parámetro	Neves Corvo		Panasqueira		San Rafael	
	Marco de referencia	Medida correctiva	Marco de referencia	Medida correctiva	Marco de referencia	Medida correctiva
Potencia (kW)	2046	2563	120	120	1492	1702
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	647	837	74	114	155	235
Costo (€/m <sup>3</sup> )	0,0000791	0,0000766	0,0000292	0,0000190	0,0003655	0,0002612

El análisis de los resultados presentados en el cuadro, indica que los costos por m<sup>3</sup> de aire en la atmósfera subterránea de la mina San Rafael son 3,5 veces y 14 veces mayores que en Neves Corvo y Panasqueira respectivamente, y los costos en Neves Corvo son 4 veces mayores que en Panasqueira.

Estas diferencias de costos están relacionadas básicamente con el sistema de ventilación (natural, forzado o mixto), con la sección y longitud total de las aperturas subterráneas, con la potencia de los motores diesel utilizados y la altitud en relación al nivel del mar (Cuadro 10.12).

Cuadro 10.12 Condiciones de operación en las minas Neves Corvo, Panasqueira y San Rafael

Minas	Tipo de ventilación	Sección media	Longitud total (km)	Pot. de motor diesel (HP)	Altitud (m)
Neves Corvo	Forzada	20	80	1290	200
Panasqueira	Mixta	16	30	590	750
San Rafael	Mixta	09	20	3315	4530

### 10.5. Impacto ambiental acústico

El estudio de impacto ambiental acústico fue realizado con detalle en la mina Panasqueira y para efectos de comparación se consideraron los estudios realizados en la mina Neves Corvo por el IGM en el año 1992 (Cuadro 10.13).

Los resultados no incluyen la especificación del tipo o tamaño de los equipos que producen contaminación acústica, ni la distancia hasta la cual existe la influencia del impacto ambiental acústico.

Cuadro 10.13 Nivel sonoro continuo equivalente máximo de ruido registrado en el ambiente subterráneo de la mina Neves Corvo (IGM, 1992)

Nº	Puesto de trabajo	Equipos	Exposición efectiva (h)	Leq dB (A)	Nº de trabajadores
1	Desmante Gracia 09	LHD	25	96	1
2	Desmante 816F22 J.F.11	Jumbo	25	105	1
3	Rampa acceso Gracia	Ventilador	25	97	Varios
4	Galería muro Sur 7407B	Ventilador	25	90	Varios
5	Transporte 700	LHD	25	91	2
6	Desmante CO752G401	Jumbo	25	93	2
7	Desmante CO7362B	LHD	25	91	1
8	Galería 900GAM	LHD	25	95	1
9	Galería 900GAM	Jumbo	25	103	2
10	Cabina Cámara chancado	-	25	73	1

**10.5.1. Análisis de la tendencia del ruido en el ambiente subterráneo**

El nivel sonoro continuo equivalente Leq máximo caracterizado en la mina Panasqueira (Cuadro 10.14) varía desde 92 dB (A) hasta 120 dB (A) y se corresponden con las fuentes de los ruidos.

Cuadro 10.14 Nivel sonoro continuo equivalente máximo de ruido registrado en el ambiente subterráneo de la mina Panasqueira

Nº	Puesto de trabajo	Equipos	Exposición efectiva (h/día)	Leq dB (A)	Nº de hombres
1	Tajeos	LHD Wagner Diesel ST-3.5	6,3	102	2
2	Tajeos	LHD eléctrico EST-2D	5,2	93	2
3	Tajeos	Jumbo Tamrock H107	5,6	120	2
4	GalP-5, rampa L2/L2	Dumper Wagner MT 412	6,5	104	1
5	Gal., ramp. Desmon.	Tractor AGRIA	Eventual	97	13
6	Pozo extracción	Sistema Jaula - Vagones	6,5	89	8
7	Galería D23:L2	2 Ventiladores de 80 hp	Eventual	111	Variable
8	Galería D23.L2	1 Ventilador de 80 hp	Eventual	102	Variable
9	Tajeos	1 Ventilador de 7.5 kW	Eventual	92	Variable
10	Cámara trituración	Trituradora primaria	2,05	103	1
11	Cabeza de la correa	Correa transp.tolvas	2,05	97	1
12	Volquetes	Descarga vagones	Eventual	93	1

Comparativamente con los registros de las mediciones en Neves Corvo el nivel sonoro continuo equivalente en el ambiente subterráneo de Panasqueira es mayor. Por ejemplo, en el caso del LHD diesel en Panasqueira es mayor en 6 dB (A), en los jumbos de perforación es mayor en 15 dB (A) y en los ventiladores es mayor en 14 dB (A). Esta diferencia podría ser provocada por la menor sección de excavación subterránea y la distancia donde fue medida.

El impacto ambiental sonoro no solo está en la fuente, pero se atenúa a medida que se aleja de ella, por lo que a continuación se analiza este aspecto.

La caracterización acústica de las operaciones de extracción por el pozo entre el nivel 3 y 2 fue hecha con registros del ruido en la galería D15, donde hay la presencia de hombres. La sección de la galería D15 en el nivel 3 es de 9,60 m<sup>2</sup> y en el nivel 2 de 9,70 m<sup>2</sup>, siendo la media de 9,65 m<sup>2</sup> en la excavada con explosivos en esquistos.

Las operaciones de extracción incluyen dos partes bien definidas, la entrada de vagones (vacíos en el nivel 2 y cargados en el nivel 3) y la salida de estos vagones (vacíos en el nivel 3 y cargados en el nivel 2), accionados de forma automática, siendo este proceso el que produce el ruido.

Las mediciones registraron un valor máximo de 89 dB (A) en la estación próxima al pozo, a partir del cual se atenúa en función de la distancia (fig. 10.11), y para este se aplican las ecuaciones indicadas en el Cuadro 10.15, donde LeqD es el Leq a la distancia D (m) y Leqmáx es el Leq caracterizado en la fuente.

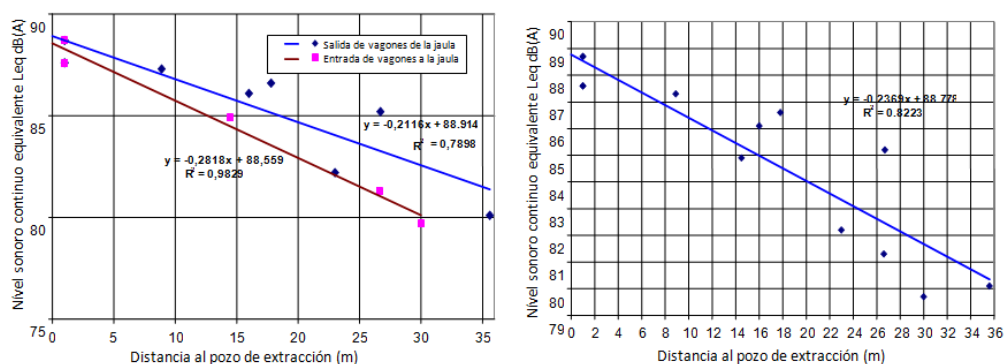


Figura 10.11 Atenuación del ruido en la galería D15 en ambos lados del pozo (izquierda) y general (derecha) en la operación en el pozo de extracción de la mina Panasqueira

En términos generales, y para ambos trechos de la galería de 9,65 m<sup>2</sup> excavada en esquisto, resulta la ecuación (10.4), reflejando la atenuación por la distancia.

$$LeqD = Leq_{m\acute{a}x} - 0,2369D \tag{10.4}$$

Cuadro 10.15 Ecuaciones de atenuación del ruido producido por la operación de extracción con la distancia y superficie de excavación en esquisto en la galería de 9,65 m<sup>2</sup> de sección (Mina Panasqueira)

Trecho de galería	Ambiente próximo al pozo de extracción (fig. 4.7 izquierda)	General para galería de 9,65 m <sup>2</sup> de sección excavado en esquisto
Entrada de vagones	$y = -0,2818x + 88,559$ $R^2 = 0,9829$	$LeqD = -0,2818D + Leq_{m\acute{a}x}$
Salida de vagones	$y = -0,2116x + 88,914$ $R^2 = 0,7898$	$LeqD = -0,2116D + Leq_{m\acute{a}x}$

Como ya fue indicado, el método de explotación en la mina Panasqueira es por cámaras y pilares con cámaras de 5,0 m de largo y 2,2 m de altura (11,10 m<sup>2</sup>) y pilares de 3,0 m a 11,0 m. En el sentido de orientación de estas cámaras la atenuación del ruido debido a la distancia es ligeramente diferente que en el sentido lateral (fig. 10.12).

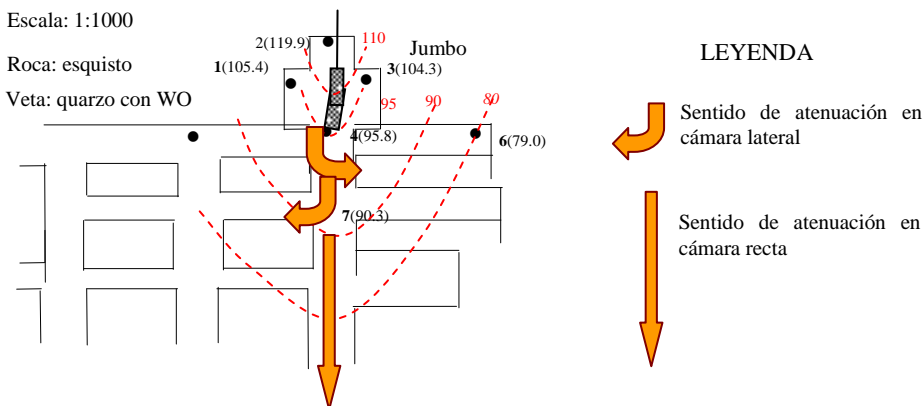


Figura 10.12 Sentido de la propagación de las ondas sonoras en los tajeos de cámaras y pilares

La tendencia de atenuación del ruido en función de la distancia a la fuente fija, como es el caso de los ventiladores (fig. 10.13) se expresa por la ecuación (10.5) tanto en el sentido de las cámaras como en el sentido lateral.

$$LeqD = Leq_{m\acute{a}x} - 0.49454D \tag{10.5}$$

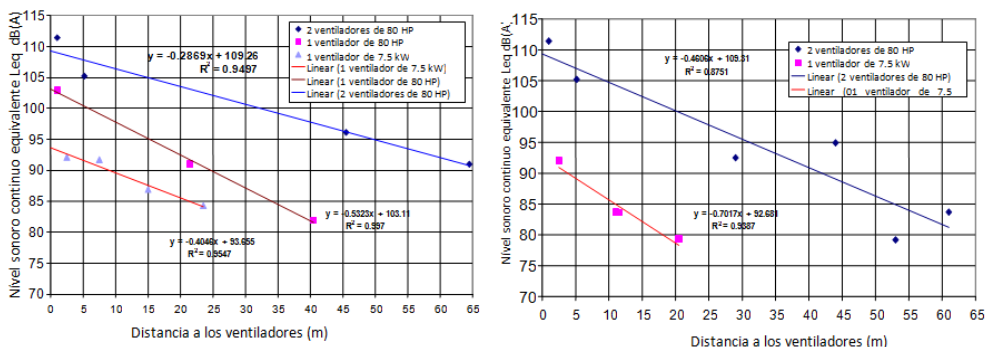


Figura 10.13 Atenuación del ruido producido por los ventiladores en los tajeos del tipo cámaras y pilares

Esta tendencia para el caso del jumbo Tamrock H107 y el LHD Diesel Wagner ST-3.5 de Atlas Coco (figura 10.14) está expresado en la ecuación (10.6) tanto en el sentido paralelo como en el lateral de las cámaras.

$$LeqD = Leq_{m\acute{a}x} - 0.8056D \tag{10.6}$$

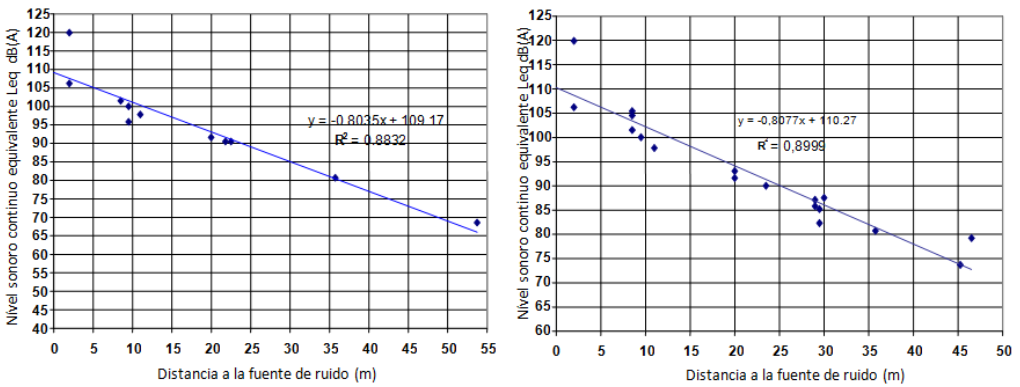


Figura 10.14 Atenuación por la distancia del ruido producido por el jumbo Tamrock H107 y el LHD Diesel ST-3.5 en los tajeos del tipo cámaras y pilares

En términos generales, la tendencia de atenuación del ruido por la distancia para todas las fuentes importantes identificadas está señalada en la fig. 10.15 que corresponde a la ecuación (10.7).

$$LeqD = Leq_{m\acute{a}x} - 0.4345D \tag{10.7}$$

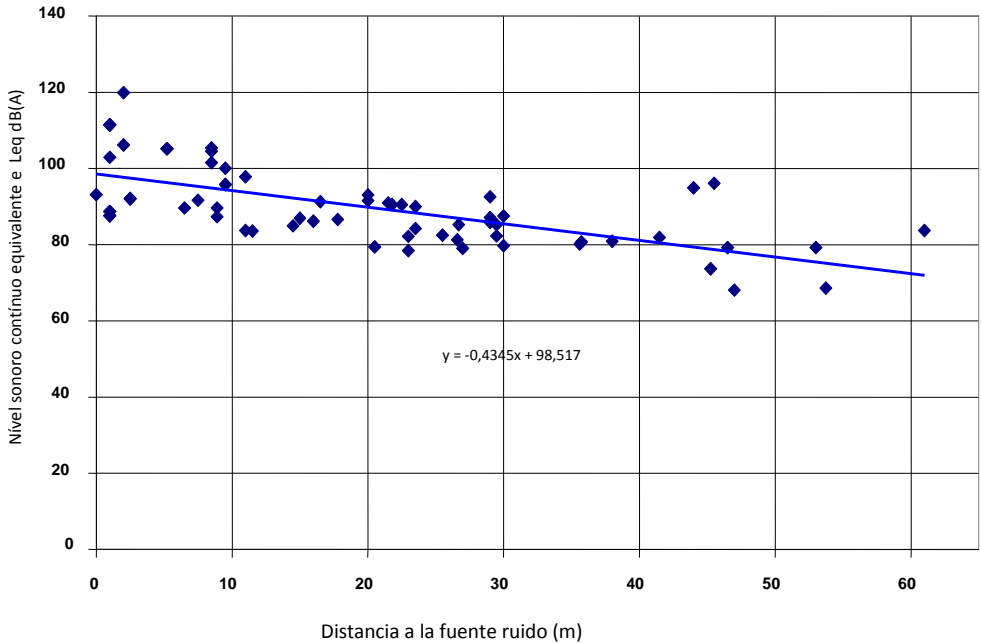


Figura 10.15 Tendencia de la atenuación del ruido por la distancia en el ambiente subterráneo de la mina Panasqueira

### 10.5.2. Medidas correctivas del impacto ambiental

En el marco de la norma relacionada con el ruido también existen ciertas diferencias en el tratamiento del problema ambiental.

En relación a las medidas correctivas del impacto ambiental sonoro las más recomendables son las medidas de protección colectiva, las medidas de organización del trabajo y las medidas de protección individual.

Las medidas de protección colectiva son formas de intervención a nivel estructural tales como: actuación sobre la fuente productora del ruido y sobre las vías de propagación, como es el caso del aislamiento anti-vibratorio, el tratamiento acústico de las superficies y cabinas.

La medida de organización está relacionada con la disminución del tiempo de exposición del hombre, lo que es posible conseguir, por ejemplo, con la rotación del personal.

## 10.6. Agua subterránea e impacto ambiental

### 10.6.1. Análisis de las características cuantitativas y cualitativas

Estudios sobre el problema ambiental del agua en el ambiente subterráneo también fueron realizados en la mina Panasqueira, por lo tanto el análisis está basado fundamentalmente en estos resultados, mas se considera importante referir los resultados de estudios realizados en la mina Neves Corvo (Fernández Rubio et al, 1990).

En Neves Corvo fueron identificados tres tipos de agua subterránea: agua salada fósil confinada en el complejo mineralizado, agua en las discontinuidades subverticales en el complejo intermedio y agua de infiltración producto de la lluvia y del río Oeiras. Intensos estudios realizados en la etapa de sondeos y construcción de la rampa Castro, del pozo de extracción y las chimeneas, permitieron determinar las características físico-químicas de las aguas (Cuadro 10.16).

Cuadro 10.16 Características físico-químicas de las aguas subterráneas en la mina Neves Corvo (Fernández Rubio et al, 1990)

Parámetro	Caudal (l/s)	Variación de temperatura	Aumento de la conductividad ( $\mu\Omega/cm/m$ prof.)	Aumento de la concentración cada 100 m prof.
Cantidad	>72,00	1°C/30,3 m	4,00	Cl: 150 mg/l, Na: 141 mg/l K: 130 mg/l, Li : 0,1 mg/l
Iones	Cl-, SO <sub>4-2</sub> , HC O <sub>3-</sub> , CO <sub>3-2</sub> , NO <sub>3-1</sub> , Mg <sub>2+</sub> , Ca <sub>2+</sub> , Na+, K+, NH <sub>4+</sub> , Li+, B, P2 O <sub>5</sub> , Si O <sub>2</sub>			

La litología y mineralización de las áreas de explotación de Neves Corvo y Panasqueira (Cuadro 10.17) tienen algunas semejanzas y marcadas diferencias en el tipo de yacimiento.

Cuadro 10.17 Características litológicas y mineralógicas de las minas Neves Corvo y Panasqueira

Mina	Litología	Yacimiento mineral	Mineralogía
Neves Corvo	Volcano-sedimentaria Esquistos negros arcillosos y carbonatados, cuarcitas y silitas	Cuerpos mineralizados con sulfuro masivo de cobre, plomo, zinc y estaño, principalmente	Pirita, Calcopirita, Esfalerita, Tetraedrita, Galena, Casiterita. Como accesorio: Arsenopirita, Bornita, Cobaltita, etc.
Panasqueira	Esquistos con diferentes grados de metamorfismo por intrusión granítica	Vetas cuarzosas, sub-horizontales, con impregnaciones de Volframita	Volframita, Pirita, Casiterita, Calcopirita, Blenda, Topacio, Apatita, Fluorita, Mica y Marcasita.

El caudal de agua subterránea medido en la mina Panasqueira fue de 810,22 l/s (enero de 2001), que corresponde a la época de mayor precipitación pluvial.

La gran diferencia de caudal del agua subterránea entre ambas minas permite señalar que obedecen a las condiciones hidrogeológicas y operacionales de cada mina (Cuadro 10.18).

Cuadro 10.18 Condiciones hidrogeológicas y operacionales que explican la diferencia de caudales de agua subterránea en las minas Neves Corvo y Panasqueira

Mina	Condiciones hidrogeológicas	Medidas de control
Neves Corvo	Proceso volcano marino, discontinuidades, fallas y localización del río Oeiras en la parte superior de las aperturas subterráneas	Impermeabilización del lecho del río Oeiras y bombeo
Panasqueira	Fundamentalmente presencia de fallas que delimitan bloques que al producir vacíos con las explotaciones provocaron subsidencia y la infiltración directa de agua superficial	Drenaje por gravedad y bombeo

Como los estudios realizados en la mina Panasqueira fueron a partir de muestras en la etapa de operación, es notorio que el agua es ácida y con altas concentraciones de metales (figura 8.54), y al ser descargadas en el río Bodelhão provocan una marcada alteración de sus condiciones naturales (fig. 8.55).

Comparando los resultados de la caracterización química de la mina Panasqueira (Cuadro 10.19) y los datos obtenidos de la mina Neves Corvo es posible señalar que la marcada presencia de metales en las aguas subterráneas en la mina Panasqueira son debidas a las aguas ácidas, producto de la exposición de grandes superficies rocosas formadas por la explotación y consecuente intensa interacción agua/roca/agua, generando problemas de contaminación ambiental en las aguas del río Bodelhão (Cuadro 10.20).

Contrariamente, en las aguas de la mina Neves Corvo no fueron registrados estos iones metálicos, debido al hecho de que los estudios fueron realizados en la etapa de sondeos y construcción de las aperturas subterráneas iniciales, por lo tanto corresponden a la composición química del agua aun no alterada por la explotación.

Cuadro 10.19 Nivel de concentración de contaminantes en las aguas del ambiente subterráneo de la mina Panasqueira

Nivel	pH	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	As (ppm)
Mínimo	3,49	0,02	0,15	0,16	0,05	0,000
Medio	5,16	1,08	6,45	6,15	7,10	0,023
Máximo	7,43	3,16	21,80	23,20	30,40	0,100

Cuadro 10.20 Concentración de contaminantes caracterizados en las aguas del río Bodelhão

Local Contaminantes	Aguas arriba de la descarga de la galería Fuente de Masso	Aguas arriba de la descarga de la galería Fuente de Masso y aguas debajo de la descarga de la galería Salgueira	Aguas abajo de la descarga de la galería Salgueira
PH	5,27	5,16	4,18
Cu	0,04	0,15	3,11
Zn	0,52	1,04	15,80
Fe	0,13	0,03	2,91
Mn	0,09	0,87	8,20
As	0,00	0,00	0,026

**10.6.2. Análisis de la norma portuguesa y la peruana**

En Perú existen normas de nivel nacional que son el Decreto-Ley n° 613 – Código del Medio Ambiente y la Ley General de Minería aprobada por el Decreto Supremo n° 014-92-EM, cuya norma específica sectorial es la Resolución Ministerial n° 011-96/EM/VMM del 13 de enero de 1996 mediante el cual se definen los niveles máximos permisibles para efluentes de las actividades minero-metalúrgicas (Cuadro 10.21).

Cuadro 10.21 Nivel máximo permisible para efluentes de las actividades minero metalúrgicas

Contaminante	Valor en cualquier momento	Valor medio anual
Sólidos en suspensión (mg/l)	100	50
Plomo (mg/l)	1	0,5
Cobre (mg/l)	2	1
Zinc (mg/l)	6	3
Hierro (mg/l)	5	2
Arsénico (mg/l)	1	0,5
Cianuro total (mg/l)	2	1
pH	6 - 9	6 - 9

En el caso de Portugal, la norma que trata de la calidad de las aguas es el Decreto-Ley n° 236/98 del 1 de agosto que, en relación a los contaminantes considerados por la norma peruana, específica para consumo humano, piscícola y riego (Cuadro 10.22), con variaciones de valores en función del tipo de tratamiento físico o químico para el caso del agua para consumo humano. También en las



normas portuguesas y peruanas existen diferencias, en cuanto a la forma de especificación y los valores límites.

Cuadro 10.22 Valor máximo permisible por la norma portuguesa (Decreto Ley nº 236/98 del 1 de agosto, Portugal)

Contaminante	Consumo humano	Piscicultura	Riego
Sólidos en suspensión (mg/l)	10	25,0	60
Plomo (mg/l)	0,05	---	20,0
Cobre (mg/l)	0,02 – 1,0	---	5,0
Zinc (mg/l)	0,5 - 5	0,3 – 1,0	10,0
Hierro (mg/l)	0,1 – 0,3	---	5,0
Arsénico (mg/l)	0,01 – 0,05	---	10,0
Cianuro total (mg/l)	----	---	---
pH	5,5 a 9,0	6,0 a 9,0	4,5 a 9,0

Para la determinación del nivel del impacto ambiental se consideran como base los valores límites permisibles de las normas, que para este caso están indicados en los Cuadros 4.16 y 4.17.

### 10.6.3. Medidas correctivas del impacto ambiental

Las medidas correctivas para mitigar el impacto ambiental debido al caudal de agua subterránea son generalmente sistemas mixtos de bombeo, drenaje por gravedad e impermeabilización u otras técnicas. En el caso de la mina Neves Corvo se utiliza la gravedad, el bombeo y la impermeabilización del lecho del río Oeiras.

La medida correctiva para la mitigación del impacto ambiental por la presencia de metales y el pH puede ser por procesos químicos y/o biológicos, donde los últimos representan menores costos.

## 10.7. Inestabilidad y deslizamiento de rocas

### 10.7.1. Caracterización geotécnica del macizo rocoso

Las rocas presentes en las áreas de estudio en la mina Neves Corvo fueron observadas en la rampa CRAM03 y en los tajeos Bench and fill del área Neves Norte y son principalmente del grupo filita-cuarcita (PQ) y del complejo vulcano-sedimentario (CVS).

En la mina Panasqueira el macizo rocoso está constituido, fundamentalmente, por esquistos, los cuales presentan diferentes grados de metamorfismo, originados por una intrusión granítica subyacente y por vetas cuarzosas.

En el Cuadro 10.23 se presentan las características geotécnicas generales del macizo rocoso en estudio de las minas Neves Corvo y Panasqueira.

Cuadro 10.23 Características geotécnicas generales del macizo rocoso (Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil LNEC en 1987, Geomecánica de la mina Panasqueira, C. Dinis da Gama 1992 y cálculos realizados)

Parámetro	Neves Corvo	Panasqueira
Resistencia a la compresión uniaxial RCU (Mpa)	Rocas grupo PQ 70 – 100 Rocas grupo CVS 160 - 200	Esquisto 75 - 125
Densidad (t/m <sup>3</sup> )	3,20	2,70
Rock Mass Ratio (RMR)	70	81*
Tunneling Quality Index (Q)	14,5**	40**
Coefficiente de Poisson	0,15 – 0,30	-
Módulo de Young (Mpa)	31,60 – 40,00	62 ***

Determinados aplicando las ecuaciones: \* (5.7); \*\* (5.5); \*\*\* (5.21)

Las características geotécnicas del macizo rocoso de las áreas de estudio en la mina Neves Corvo se resumen en el Cuadro 10.24 para el área de la rampa CRAM03 y en el Cuadro 10.25 para el área del desmonte Bench and Fill Neves Norte.

Cuadro 10.24 Índices geotécnicos del macizo rocoso huésped de la rampa CRAM03 en la mina Neves Corvo

Grupo de roca	RQD	Q	RMR	ECU	RMS
PQ	28 – 90	7 – 22.5	66,2 – 74,7	50 – 170	66,8 – 96,4
CVS	30 - 85	2,5 – 7,1	51,6 – 62,6	70 - 100	30,5 – 45,4

Cuadro 10.25 Características geotécnicas del macizo rocoso huésped del desmonte Bench and Fill Neves Norte de la mina Neves Corvo (intervalos de valores)

Mineral	Longitud L(m)	Altura H(m)	L/H	Carga/ ECU	ECU (MPa)	Resit Pilar (MPa)	FS
Sm	3 – 10	5	0,6 – 2,0	0,24 – 0,58	200	47 – 117	1,3 – 3,3
Mf	2 - 10	5 - 18	0,2 – 2,0	0,10 – 0,58	160	17 - 94	0,5 – 3,3

Los tipos de rocas huéspedes de las aperturas en los tajeos de Neves Corvo son principalmente dos: tufos volcánicos con mineral fisural y sulfuros (Mf) y sulfuros macizos (Sm). Las rocas Sm características están localizadas en las cotas de 790 a 810 y en el macizo del tipo Mf de 760 a 790.

### 10.7.2. Metodología de evaluación del impacto ambiental subterráneo

En el caso de la evaluación del impacto ambiental subterráneo debido al desprendimiento e inestabilidad de las rocas, por su naturaleza extremadamente compleja no existe una norma y por lo tanto la forma mas recomendable de realizar esta evaluación es procurando estandarizar los parámetros geotécnicos del macizo en un sitio determinado.

En el caso de la mina Neves Corvo en el área de la rampa CRAM03 fueron identificadas zonas sin impacto ambiental y en otras áreas de leve a moderado, con presencia de un solo tramo con alto impacto ambiental.

### **10.7.3. Medidas correctivas**

Las medidas correctivas adoptadas se hicieron con base en la metodología propuesta por Barton y Grimstad.

Para el impacto ambiental de alto nivel identificado en la rampa CRAM03, se consideró recomendable aplicar empernado de rocas o cabos de 20 a 25 mm de diámetro y 3,7 m de longitud, espaciados a 2,5 m, con uso ocasional de malla y concreto proyectado de 3 cm de espesor.

El análisis de los resultados de la aplicación de la metodología del estudio ambiental subterráneo propuesto en el capítulo 2 de la parte 1, permite obtener las siguientes conclusiones:

a) Los resultados mostraron la plena aplicabilidad de la metodología de los estudios de impacto ambiental existentes para los ambientes subterráneos. Esta metodología considera para las minas en operación los siguientes pasos principales.

- Definición del ámbito de acción
- Caracterización de la situación del ambiente
- Identificación de los niveles de impacto ambiental
- Búsqueda y aplicación de las medidas correctivas
- Monitoreo y control

b) La aplicación de esta metodología no es solo para ambientes de minas subterráneas, puede también ser aplicada a túneles y aperturas subterráneas para cualquier otro fin.

c) Las normas existentes para los ambientes subterráneos son fundamentalmente relativas a la seguridad e higiene en el trabajo y no son de carácter ambiental. Existen importantes diferencias entre los dos países, este hecho es un indicativo de la existencia de abordajes diferentes en la definición de los valores límites permisibles de un país a otro.

d) Si esta metodología es aplicable a proyectos mineros en construcción y/o en operación, también es posible su aplicación en la preparación de nuevos proyectos mineros.







## Capítulo 11

### APLICACIÓN A NUEVOS PROYECTOS

---

#### 11.1. Introducción

El estado del ambiente depende de la influencia conjunta de la atmósfera, clima, procesos químicos y biológicos, suelos y cobertura vegetal, la fauna y los seres humanos. Estos últimos actúan, con creciente intensidad, en los procesos geológicos, geofísicos, químicos y bioquímicos que tienen lugar en los suelos, las rocas, las aguas superficiales y subterráneas y el aire, a veces poniendo en peligro su integridad y por lo tanto, poniendo en riesgo la calidad de vida actual y de las futuras generaciones.

Estos efectos nocivos poseen características en el tiempo y en el espacio, que Ehrlich (1995) propuso cuantificar con la relación:

$$I = PAT$$

En donde la  $I$  representa la magnitud de estos impactos en una determinada región de la Tierra,  $P$  es la población en ella existente,  $A$  es el consumo medio de recursos por persona y  $T$  corresponde al uso de tecnología perjudicial, no limpia.

En el pasado era aceptable proyectar obras de ingeniería, incluyendo la explotación de georrecursos, apenas con base en criterios técnicos y económicos, sin considerar las consecuencias ambientales de los resultados. Esta actitud está cambiando cada día y los criterios propios para la toma de decisiones, como la relación costo-beneficio, pasan a integrar variables y parámetros antes considerados intangibles, como los de tipo ambiental, estableciéndose así un nuevo paradigma, que va ganando cada vez mas aceptación en la opinión pública y, en consecuencia, en el poder político (Dinis da Gama, C., 2000).

Por lo tanto, es inevitable su influencia en las metodologías y prácticas que caracterizan las muchas ramas de la ciencia y la tecnología y, la explotación de yacimientos minerales mediante métodos subterráneos no parece ser la excepción.

Las normas ambientales existentes consideran que un estudio de impacto ambiental, realizado por la ejecución de un proyecto, obra o actividad, debe comprender la determinación de los aspectos sobre la vida humana, la fauna, la flora, los suelos, el geoambiente, el agua, el aire, el clima, el paisaje y la estructura o función de los ecosistemas presentes en el área susceptible de ser afectada. El estudio también debe considerar las acciones del proyecto, obra o actividad sobre el patrimonio histórico, sobre las relaciones sociales y las condiciones de tranquilidad pública, tales como el ruido, vibraciones, olores y emisiones luminosas y de cualquier otra incidencia ambiental derivada de su realización.

Por lo tanto, los objetivos del estudio de impacto ambiental serán los de diagnosticar y evaluar las consecuencias que la realización de estas actividades pueden ocasionar en el contexto o medio ambiente.

Se pretende también que la identificación y evaluación de los impactos sirva para señalar las posibles medidas correctivas o de atenuación de sus efectos (ya que prácticamente es imposible eliminar completamente un impacto negativo).

Toda evaluación de impactos ambientales se debe adaptar a las normas legales existentes, lo que incluye leyes de nivel general (comunitarias, en el caso de la Unión Europea), nacionales (países) y regionales.

En caso que no existan normas legales relacionadas con algún descriptor o en el campo ambiental, como para el geoambiente (rocas), es recomendable tomar como referencia pautas que ofrezcan precisión, calidad y fiabilidad.

El estudio de impacto ambiental subterráneo (EIAS) debe, asimismo, comprender las posibles alteraciones en el ambiente subterráneo ocasionadas por la realización del proyecto de explotación minera, determinándose los límites de los valores de las variables que entran en juego, bien de forma cualitativa como cuantitativa (fig. 11.1).

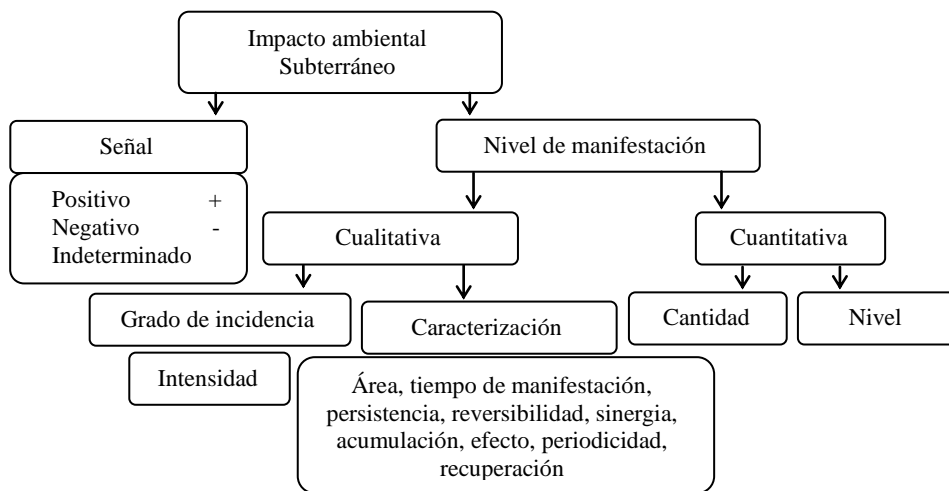


Figura 11.1 Indicadores que caracterizan el impacto ambiental subterráneo

El estudio deberá contemplar información de los impactos sobre el ambiente subterráneo, para aplicar modelos matemáticos de evaluación, con el objetivo de procurar la disminución o atenuación de los efectos negativos, logrando de esta manera una integración armoniosa del proyecto con el ambiente.

Así pues, el estudio de impacto ambiental en el ambiente subterráneo (EIAS) es un proceso de análisis para identificar, predecir, interpretar, valorar y comunicar los efectos de un plan o proyecto de explotación subterránea, interpretado en términos de salud y bienestar humano.

### 11.2. Metodología propuesta

La metodología de estudio propuesta para proyectos nuevos es basada en la ingeniería ambiental subterránea desarrollada en la Primera Parte del Capítulo 2, Tercera Parte y los resultados obtenidos en la aplicación en dos minas portuguesas y



una peruana, que ha demostrado una excelente aplicabilidad y resultados satisfactorios.

Como el EIAS debe estar destinado a predecir, valorar y corregir las consecuencias o efectos ambientales que ciertas acciones humanas pueden ocasionar, este es un documento que debe identificar al titular del proyecto y la base sobre la cual es posible obtener una declaración o evaluación del impacto ambiental. Por lo tanto, el estudio debe identificar, describir y valorar de forma apropiada y en función de las particularidades de cada caso específico, los principales efectos previsibles que la realización del proyecto de explotación subterránea produciría sobre las diferentes áreas del ambiente.

La fig. 11.2 ilustra una propuesta de estructura general de la metodología y el estudio del EIAS para proyectos nuevos de explotación subterránea y comprende las siguientes etapas:

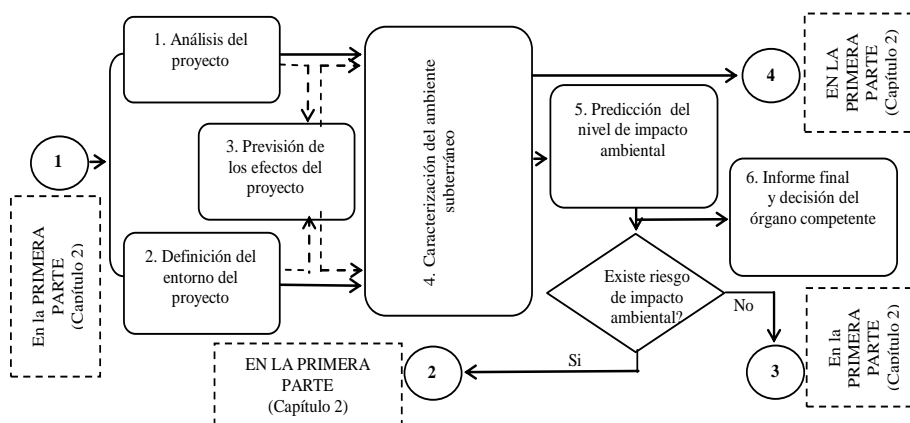


Figura 11.2 Estructura general de los EIAS aplicados a nuevos proyectos, integrada en la Figura 2.14

a) *Análisis del proyecto de explotación subterránea*, con el objetivo de conocer en profundidad los detalles relacionados con la geología, la mineralogía, las aberturas subterráneas para operaciones auxiliares (servicios, extracción, transporte, trituración primaria, mantenimiento de equipos, etc.), de desarrollo, diseño, trabajo, preparación y explotación (rampas, pozos, chimeneas, galerías, traviesas, accesos, métodos de explotación y equipos);

b) *Definición del área de influencia*, que considera la delimitación del entorno del proyecto en el medio subterráneo y exterior, que tenga relación con los factores ambientales, debiéndose en esta fase obtener la información necesaria y suficiente para comprender el funcionamiento del medio y su previsible evolución sin la ejecución del proyecto.

c) *Estimación de los efectos que el proyecto generará sobre la calidad de vida, salud y bienestar humano*, que consiste en la determinación de los efectos causados por la alteración de las condiciones naturales de la atmósfera subterránea, agua subterránea y macizo rocoso;

d) *Caracterización ambiental*, etapa que comprende la identificación de las acciones del proyecto potencialmente impactantes (uso de equipos con motor diesel, perforación y voladura, excavaciones en roca y alteración de las condiciones naturales del macizo rocoso y agua subterránea), identificación de los factores potencialmente impactados (atmósfera subterránea, agua subterránea y macizo rocoso) e identificación de las relaciones causa-efecto entre las acciones y los factores del proyecto;

e) *Predicción de la dimensión cuantitativa del Impacto Ambiental Subterráneo (IAS)*, esta fase contempla la predicción de los posibles niveles de impacto ambiental que la realización del proyecto ocasionará en los diferentes factores, sobre la base de las normas o estándares existentes;

f) *Definición de las medidas correctivas*, consiste en la búsqueda de los procedimientos tecnológicos mas adecuados para atenuar los impactos ambientales previstos que sean económicamente factibles de aplicar;

g) *Monitoreo y control*, son las etapas que permitirán una sistemática evaluación de las posibles alteraciones ambientales y la efectividad de aplicación de la medida correctiva.

h) *Publicación del informe final y decisión del órgano competente*;

i) *Preparación de un informe no técnico destinado al público y las entidades oficiales*.

### **11.3. Análisis del proyecto de explotación subterránea**

#### ***11.3.1. Estructura política, legal y administrativa***

En esta sección se deben incluir los aspectos políticos, legales y administrativos relacionados con las normas aplicables al proyecto. También es de interés indicar la situación legal del proyecto minero, los derechos de agua y de superficie aplicables y explicar el proceso de obtención de autorizaciones para su realización.

#### ***11.3.2. Proyecto de explotación subterránea***

En este punto se presentará una visión general del proyecto, relacionándolo de forma interactiva con el ambiente, y por lo tanto, en términos de su utilización racional y los efectos sobre el ambiente.

El proyecto de explotación subterránea de yacimientos mineros se inicia desde la prospección y descubrimiento, pasando por la investigación y determinación de reservas, desarrollo, diseño, preparación, explotación (producción), abandono y finaliza con el cierre de la mina (Figura 11.3). Este estudio abarca las etapas de desarrollo, diseño, preparación y explotación, debido a que estas actividades tienen relación con las excavaciones subterráneas.

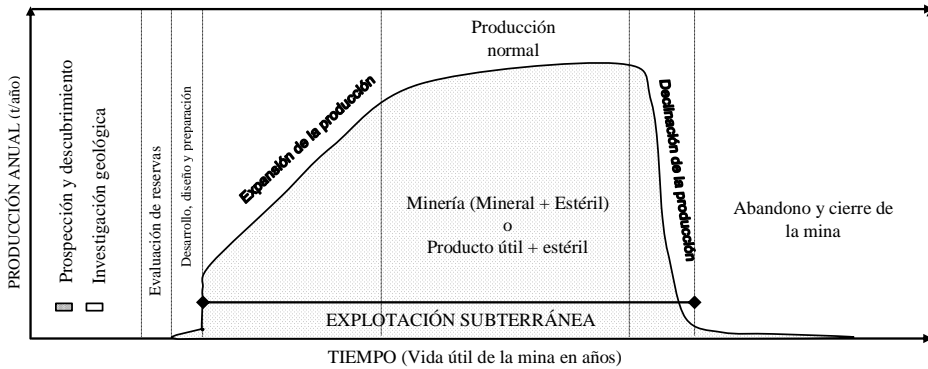


Figura 11.3 Etapas de un proyecto minero de explotación subterránea (basado en Lacy, W.C., 1992)

La vida útil de una mina comienza con una mínima producción (desarrollo, diseño y preparación), para después expandir la producción hasta los valores normales, hasta finalmente declinar y cerrar la mina. Por ello, es útil e importante detallar los eventos operacionales durante la vida útil de la mina, ya que permite realizar un análisis detallado de las modificaciones en el ambiente circundante en cada fase del proyecto, de manera que sirva para establecer medidas correctivas preventivas y aplicar y llevar a cabo su monitoreo y control.

Es conveniente incluir de forma resumida el historial de la empresa o entidad promotora, indicando las actividades a que se dedica y el producto que se pretende obtener. Esta descripción debe incluir las empresas contratistas y subcontratistas que llevarán a cabo el proyecto.

También debe incluir la definición de las áreas afectadas, tanto negativa como positivamente, las alternativas consideradas para la selección del método de explotación, localización geográfica, proceso productivo (ciclo operacional, extracción y/o transporte), nivel de producción (toneladas o  $m^3$  por día, mes o año), costos (desarrollo, diseño, preparación y explotación), plan de trabajo (corto, mediano y largo plazo), creación de puestos de trabajo en las diferentes etapas y nivel de aceptación pública.

Es importante incorporar la cartografía detallada de la localización del proyecto, indicando poblaciones, recursos vegetales y biológicos existentes en las áreas cercanas, vías de acceso, servicios de energía eléctrica y las vías de comunicación de los alrededores potencialmente afectables.

También es de mucha importancia describir el tipo de mineral y producto a obtener, los tipos de materiales y equipos a utilizar, tanto para la etapa de desarrollo, diseño y preparación como para la etapa de explotación, así como los riesgos de accidentes, de contaminación y otros parámetros de interés.

Esta parte debe incluir los estudios sobre los niveles de consumo de agua, de materias primas, bienes de consumo, etc, y su relación con la zona, especialmente en cuanto al origen y generación de efectos secundarios: productos intermedios finales y subproductos, así como su probable destino; tipo y cantidad de

emisiones y residuos, así como también las previsiones de ampliación/reducción a medio y largo plazo y, finalmente, el abandono y cierre de la mina.

### 11.3.3. Operaciones y autorizaciones existentes

En el caso de que el proyecto sea una ampliación o extensión de una operación existente, a continuación se debe incluir una descripción de las instalaciones actuales, así como el historial de las operaciones y de las autorizaciones aplicables en la actualidad y las autorizaciones legales para la futura operación. La descripción debe considerar dos aspectos fundamentales:

- a) Establecer el aspecto legal que existía cuando la operación del proyecto comenzó;
- b) Establecer claramente los requerimientos legales para la autorización de las nuevas actividades producto de la ampliación de la producción.

### 11.4. Definición del área de influencia del proyecto

En superficie comprende las zonas más cercanas a los accesos principales al ambiente subterráneo y las zonas de descarga de los contaminantes ambientales, como el drenaje de aguas ácidas, aire contaminado y el hundimiento o colapso del macizo rocoso que puede llegar a la superficie.

El ambiente subterráneo del proyecto de explotación (Figura 11.4) abarca las áreas de la atmósfera subterránea (aire por ventilación natural o artificial), la litósfera (macizo rocoso), la hidrósfera (agua subterránea) y la biósfera (el hombre principalmente).

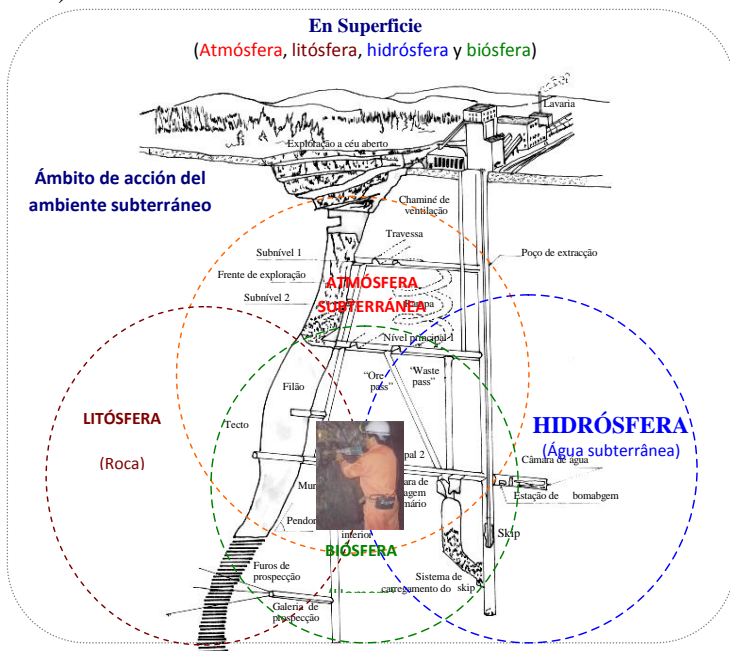


Figura 11.4 Área de influencia del estudio de impacto ambiental subterráneo (basado en O. Llanque, V. Navarro, et al 1999 y Dinis da Gama, C., 2000)

## 11.5. Caracterización del ambiente subterráneo

La descripción general del medio tiene la finalidad de definir el estado de referencia o condición pre-operacional que permita determinar las potenciales alteraciones que provocará la realización del proyecto y sirve como base de datos inicial. Por ello, debe incluir el medio físico tanto *inerte* (aire, clima, agua superficial y subterránea y el macizo rocoso), como biológico (fundamentalmente el hombre), también debe incluir el ecosistema biológico exterior que puede verse afectado por la descarga de aguas ácidas de mina, los escombros o la subsidencia.

Con base en estos datos es posible determinar la capacidad del ambiente para soportar las acciones que tendrán lugar como consecuencia de la realización del proyecto de explotación subterránea.

### 11.5.1. Ambiente físico

La descripción del medio físico en el área de influencia del proyecto se debe realizar en términos de:

a) *Localización y topografía superficial*: se debe considerar la información necesaria y suficiente (fig. 11.5) para localizar el proyecto y definir la posible influencia de la topografía en los factores del ambiente subterráneo y la posible influencia de las alteraciones de los factores ambientales del medio subterráneo en el ambiente exterior próximo.



Figura 11.5 Información para la localización y topografía superficial del proyecto

b) *Clima y meteorología*: la información del clima y la meteorología del área del proyecto son importantes para la evaluación del impacto sobre el ambiente subterráneo en la parte relativa al entorno físico, el aire presente en la atmósfera subterránea, debido a los factores que tienen influencia en los cambios de temperatura, velocidad y flujo (fig. 11.6).

Estos datos serán de utilidad como condición de referencia, para definir la carga hídrica, el efecto de las condiciones críticas o extremas, para identificar el impacto sobre el ambiente subterráneo y buscar medidas correctivas.

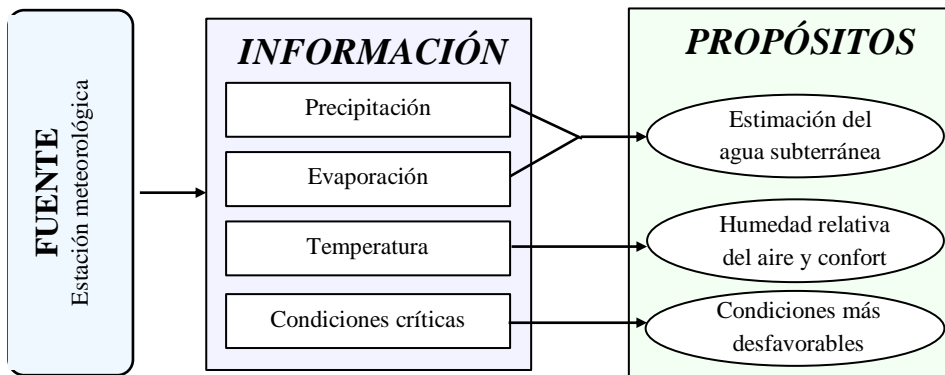


Figura 11.6 Información para el clima y meteorología del área del proyecto

c) *Calidad del aire*: la información sobre la calidad del aire (fig. 11.7) está relacionada con posibles partículas transportadas por el aire, como por ejemplo la erosión eólica y las emisiones gaseosas provenientes de alguna fuente (vehículos con motores diesel, refinerías existentes, etc.).

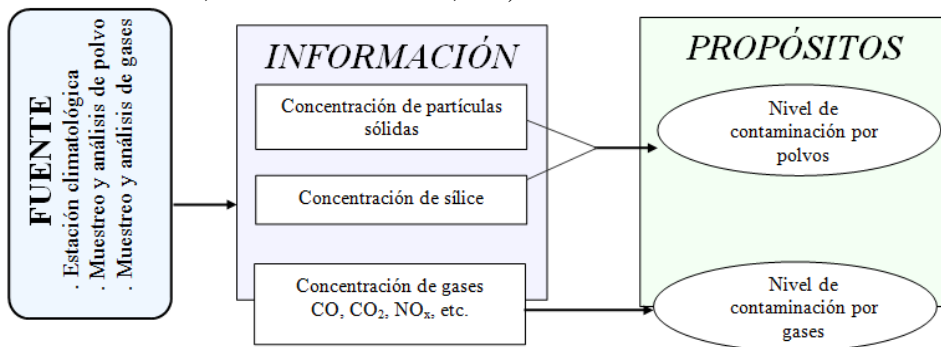


Figura 11.7 Información para la caracterización de referencia del aire en la zona de las entradas de aire al ambiente subterráneo

En el caso de proyectos de ampliación, las partículas transportadas por el viento pueden tener su origen en las excavaciones, disparos con explosivos, remoción, transporte, transferencia del material y las emisiones gaseosas producto de la combustión de los equipos diesel.

Para los nuevos proyectos, será necesario el muestreo y análisis respectivo, mas para los proyectos de ampliación es probable que ya exista la información buscada.

d) *Geología y aspectos sísmicos*: en relación a la geología, el EIAS debe incluir la geología regional, geología local, geotecnia y geomecánica del macizo rocoso y del yacimiento mineral además de la información relacionada con el depósito mineral (Figura 11.8). Debe contener un mapa geológico regional y local con los detalles relacionados con el macizo rocoso, el yacimiento mineral y la geología estructural.

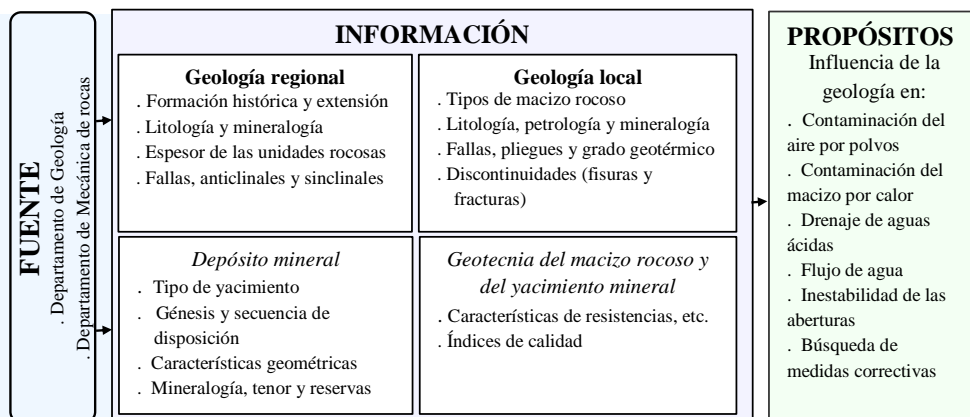


Figura 11.8 Información para la determinación de las condiciones de referencia del macizo rocoso

e) *Agua superficial y subterránea*: el agua constituye un campo ambiental complejo y dinámico, por lo que, para establecer las condiciones de referencia se requiere tener información de la superficie y del medio subterráneo, tanto de los aspectos cuantitativos como cualitativos (fig. 11.9).

El agua subterránea puede estar localizada a poca profundidad y en este caso existirá una significativa interacción con el agua superficial, pero cuando se encuentra a mayor profundidad podría tener una mínima o ninguna interacción. Los problemas de impacto ambiental debidos al agua están relacionados con el potencial de inundaciones y contaminación de las aguas superficiales, por la descarga de aguas ácidas.

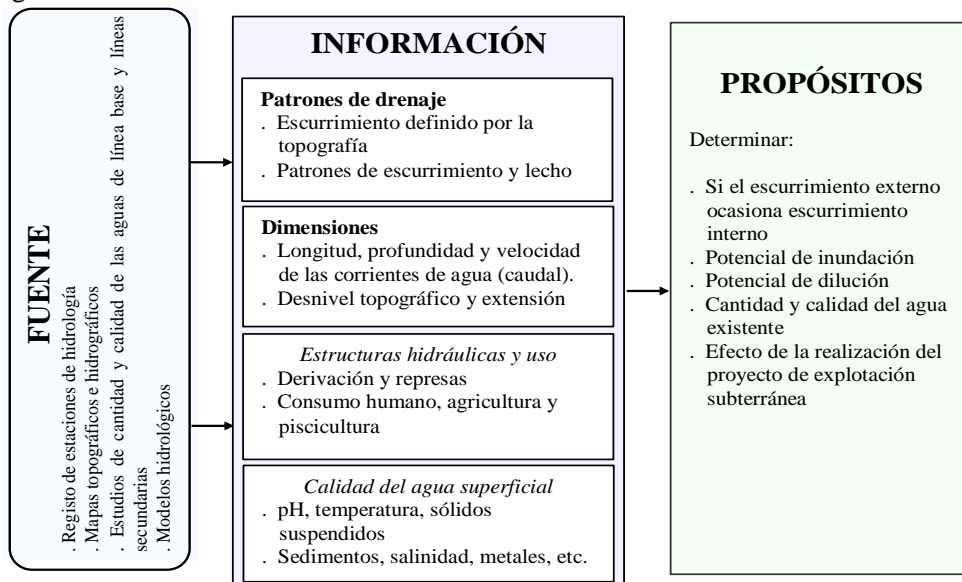


Figura 11.9 Información para la caracterización de las condiciones de referencia del agua superficial

Tanto en el caso de las aguas superficiales como subterráneas, los potenciales parámetros de calidad del agua a caracterizar (Cuadro 11.1) están relacionados con las características físicas y químicas.

Cuadro 11.1 Parámetros potenciales en la caracterización de la calidad del agua

Constituyente principal		Metales (totales y disueltos)	
pH	Sodio (Na)	Aluminio (Al)	Manganeso (Mn)
Sólidos totales	Potasio (K)	Antimonio (Sb)	Mercurio (Hg)
disueltos	Cloruro (Cl)	Arsénico (As)	Níquel (Ni)
Olor	Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	Bario (Ba)	Selenio (Se)
Alcalinidad	Fluoruro (F)	Cadmio (Cd)	Plata (Ag)
Calcio (Ca)	Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Cobre (Cu)	Talio (Tl)
Magnesio (Mg)	Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )	Hierro (Fe)	Zinc (Zn)
	Cianuro (CN <sup>-</sup> )	Plomo (Pb)	

La información necesaria relacionada con las aguas subterráneas (fig. 11.10) para la definición de la situación de referencia está orientada fundamentalmente a la cantidad y calidad.

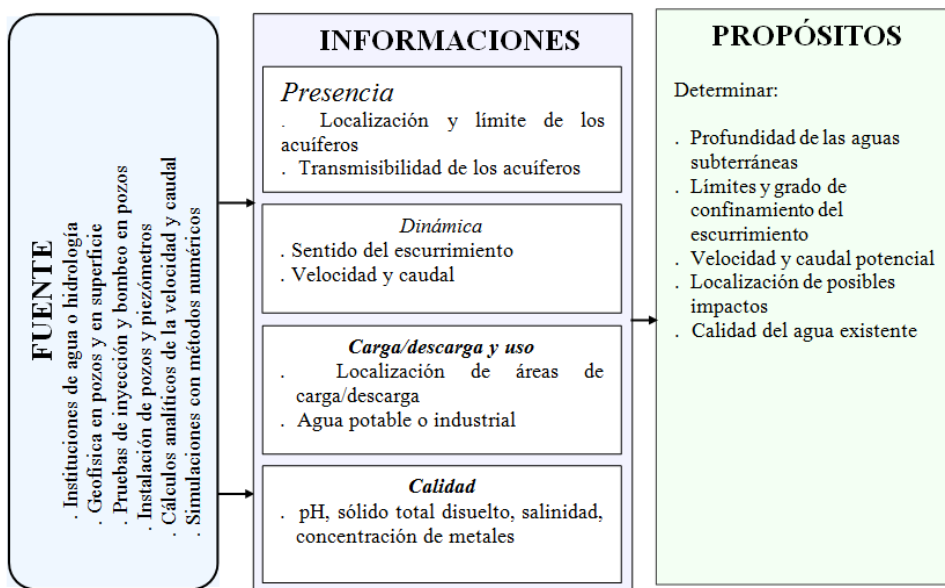


Figura 11.10 Información para la caracterización de la situación de referencia del agua subterránea

f) *Características de las excavaciones subterráneas*: la apertura de espacios vacíos en el macizo rocoso es la principal causa que ocasiona la alteración del área ambiental en el medio subterráneo. Los espacios abiertos son producto de la abertura de pozos, chimeneas, rampas, galerías, traviesas, accesos y tajeos para la explotación del depósito mineral, por lo que tiene que ver con el método de explotación a utilizar. Por lo tanto, es sumamente importante detallar las



características geométricas y físicas de estas aberturas, considerando también la comunicación entre ellas y su ubicación (fig. 11.11).

### 11.5.2. Ambiente biológico

El principal dominio biológico presente en el ambiente subterráneo es el hombre, cuando procede a la realización del proyecto de explotación subterránea, por lo tanto es sumamente importante considerar el programa para la distribución del personal en los frentes de trabajo, para todas las etapas del proyecto y las actividades que el personal realizará, así como el tiempo de permanencia (fig. 11.12).

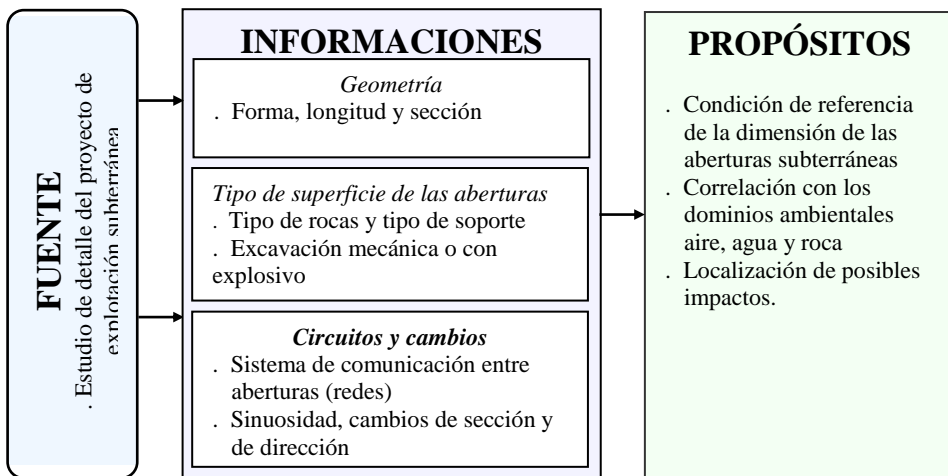


Figura 11.11 Información para la caracterización de las aberturas subterráneas

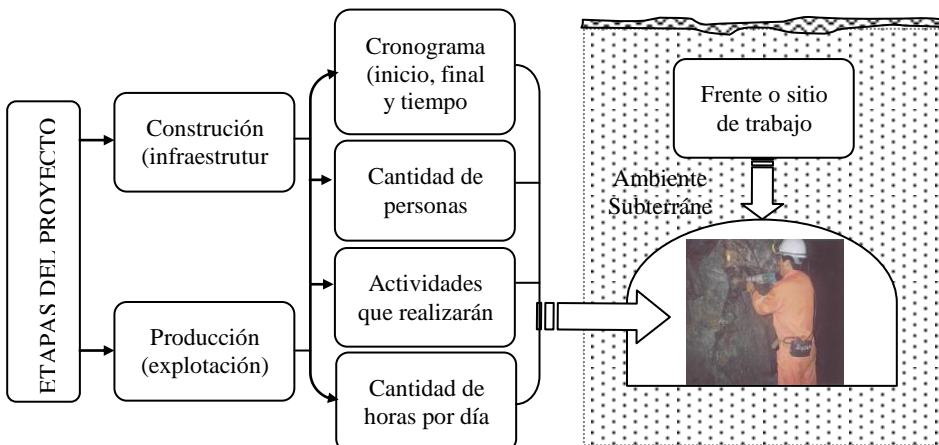


Figura 11.12 Condiciones de referencia del hombre en el ambiente subterráneo

Los dominios ambientales físicos en el ambiente subterráneo que son: el aire, el agua y la roca; pueden alterar el ecosistema del ambiente exterior en las zonas próximas de la descarga (aire contaminado y agua ácida) y en el área superior

superficial del macizo rocoso (subsistencia). Por ello es esencial caracterizar el ecosistema terrestre y acuático (fig.11.13).

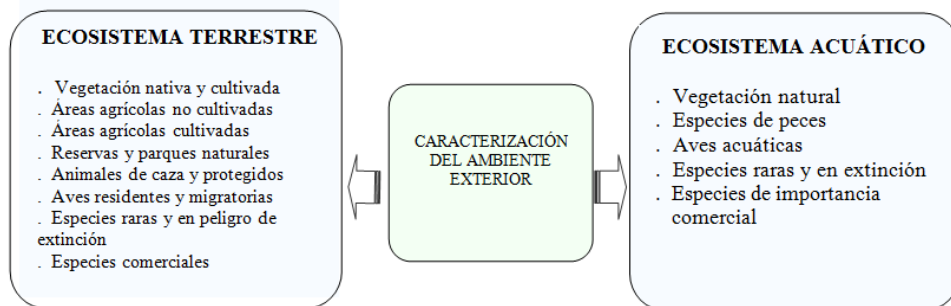


Figura 11.13 Condiciones de referencia del ambiente exterior próximo a la descarga de los dominios ambientales contaminados y áreas superficiales por encima de los trabajos subterráneos

### 11.5.3. Matriz de impactos

#### 11.5.3.1. Identificación de las acciones que pueden causar impactos

El ámbito del proyecto de explotación subterránea, está constituido por elementos y procesos interrelacionados, que pertenecen al sistema físico (aire en la atmósfera subterránea, agua subterránea y macizo rocoso) y biológico (hombre). En el medio biológico también se deben considerar los animales y las plantas en la zona de descarga de los dominios ambientales contaminados (agua ácida, aire contaminado, subsistencia).

Las acciones y efectos están determinados por su *intensidad, extensión, duración, reversibilidad, recuperación y el momento* en el que participen en el proceso.

Entre las muchas acciones susceptibles de producir impactos (figuras 11.14, 11.15, 11.16 y 11.17), se deben establecer dos relaciones definitivas, una para cada etapa del proyecto, o sea, acciones que pueden provocar impactos en la etapa de construcción o instalación y acciones que pueden provocar impactos durante la etapa de explotación o producción. Para la evaluación del impacto en algunos dominios ambientales, como en el caso del drenaje de aguas ácidas, es indispensable considerar la relación correspondiente a la etapa de abandono y cierre de mina.

Las figuras muestran las acciones que provocan impacto y los efectos ambientales tanto para el dominio físico del ambiente como para el dominio biológico en el medio subterráneo (hombre) o bien para el dominio biológico en el medio exterior (hombre, animales y áreas agrícolas).

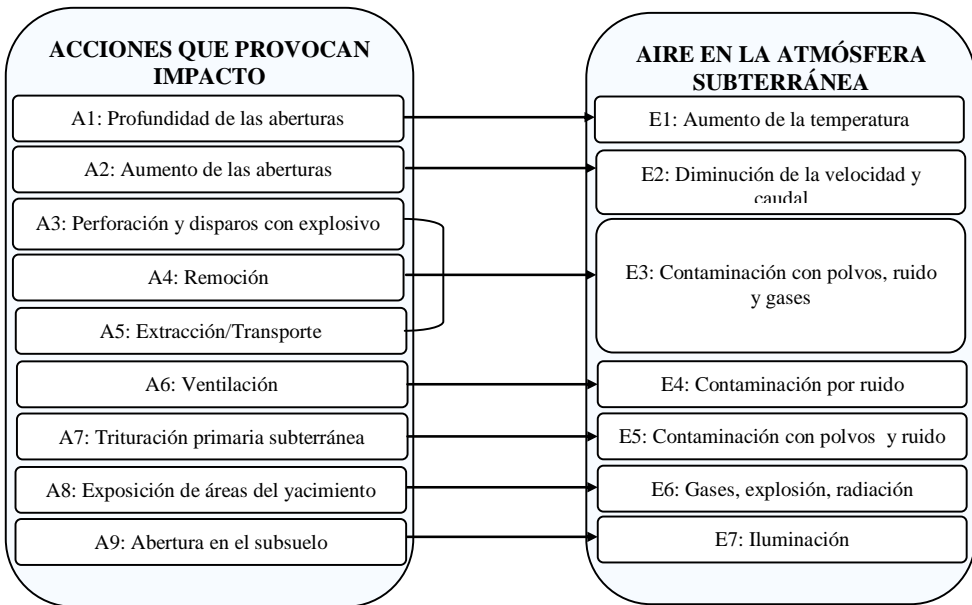


Figura 11.14 Acciones que provocan impacto ambiental en el aire de la atmósfera subterránea

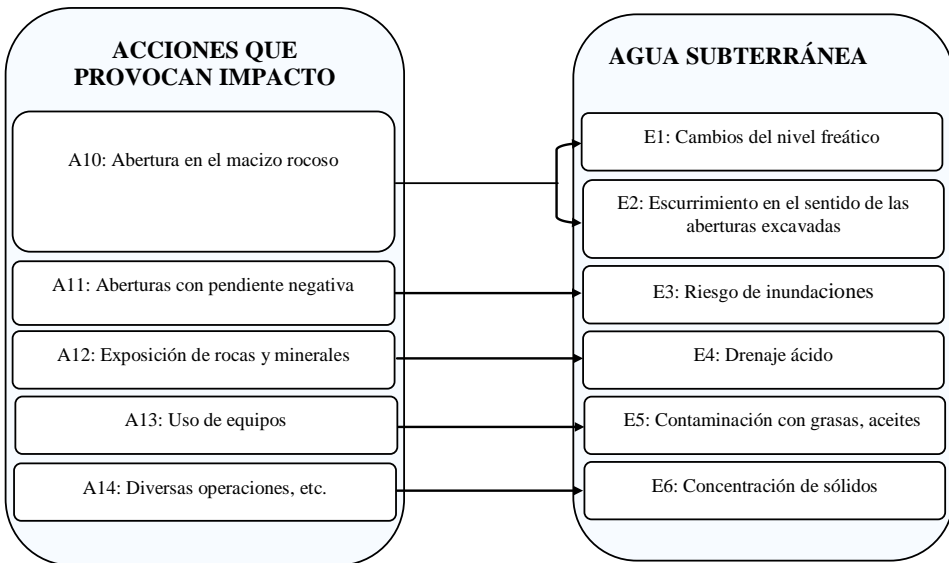


Figura 11.15 Acciones que provocan impacto ambiental en el agua subterránea

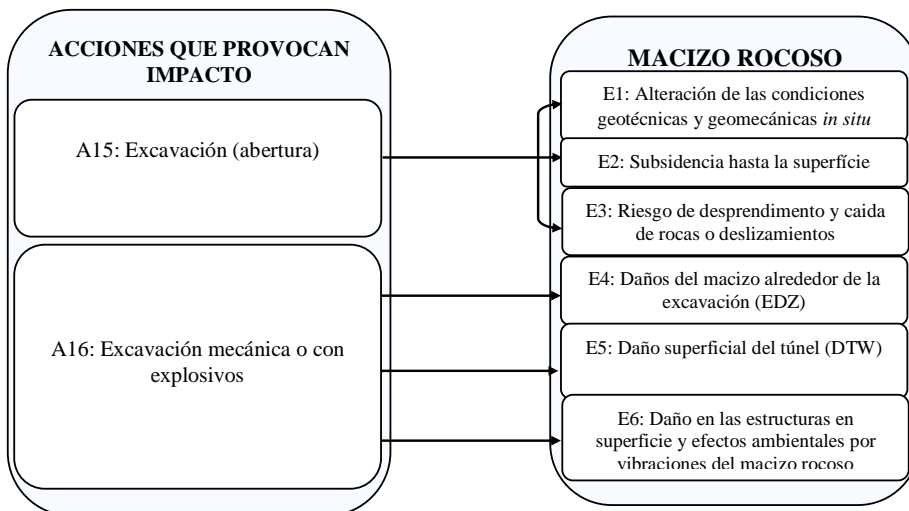


Figura 11.16 Acciones que provocan impacto ambiental en el macizo rocoso

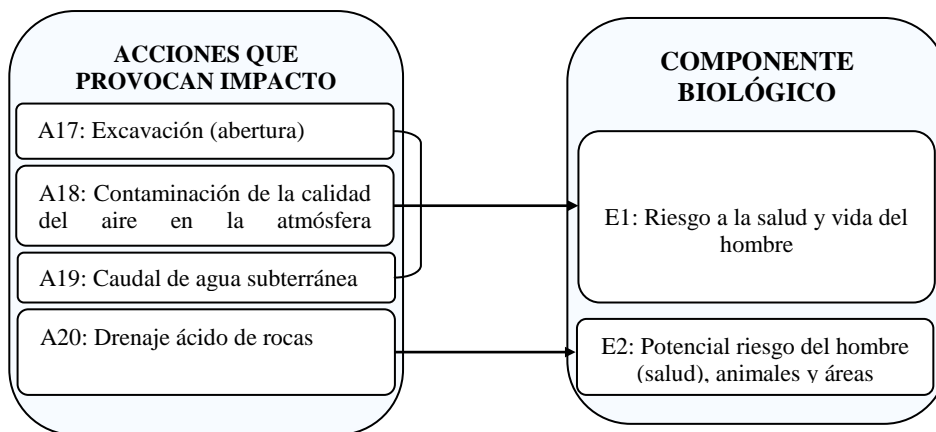


Figura 11.17 Acciones que provocan impacto ambiental en el dominio biológico

Como se puede observar, existen varias acciones que pueden provocar un único efecto o una acción que puede provocar varios efectos en el medio físico o biológico, o una acción que provoca un impacto ambiental bien en el medio físico bien en el medio biológico.

El establecimiento de las acciones y efectos permite elaborar una matriz de impacto ambiental y, basado en esta matriz, cuantificar el nivel de los posibles impactos ambientales esperados.

### 11.5.3.2. Matriz de impactos ambientales

La matriz de impactos de tipo causa/efecto es un cuadro de doble entrada, con las acciones que provocan impactos en la columna y dispuestos en línea los factores susceptibles de recibir impactos (Cuadro 11.2). La matriz permite

identificar, prevenir y comunicar los efectos del proyecto en el ambiente subterráneo, para a continuación obtener sus valores correspondientes.

Cuadro 11.2 Matriz para la identificación del impacto ambiental subterráneo para las etapas de construcción o instalación y producción o explotación

FACTORES IMPACTADOS (i)	(ii) ACCIONES QUE PROVOCAN IMPACTO AMBIENTAL SUBTERRÁNEO (*)																						
	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A 8	A 9	A 10	A 11	A 12	A 13	A 14	A 15	A 16	A 17	A 18	A 19	A 20			
COMPONENTE FÍSICO	AT. SUBT. (Aire)	E1	⊗																				
		E2	⊗																				
		E3			⊗	⊗	⊗																
		E4						⊗															
		E5							⊗														
		E6								⊗													
		E7									⊗												
	AGUA SUBT.	E1									⊗												
		E2									⊗												
		E3										⊗											
		E4											⊗										
		E5												⊗									
		E6													⊗								
	ROCA	E1														⊗							
		E2															⊗						
		E3																⊗					
		E4																	⊗				
		E5																		⊗			
E6																				⊗			
BIO.**	BIO.*	E1																⊗		⊗			
		E2																				⊗	

⊗ Identificación de causa y efecto, BIO. = Componente biológico, \* Acciones identificadas en la sección 11.5.3.1

Una vez identificados los factores del ambiente susceptibles de recibir impactos es conveniente conocer su estado actual, antes de realizarse el proyecto, es decir, la calidad del ambiente que puede ser alterado. Las medidas de esta calidad ambiental se conocen como *valor ambiental*.

La evaluación de los efectos en un instante considerado (antes o después del impacto) da una idea del grado de nivel que presenta el ambiente, tanto cualitativa como cuantitativamente.

Los efectos de los factores ambientales son evaluados sobre la base de su posibilidad de medición y se clasifican conforme se indica en el Cuadro 11.3.

Cuadro 11.3 Clasificación de los efectos sobre los factores del medio con base en su posibilidad de ser medidos

EFECTOS SOBRE FACTORES DEL MEDIO	DESPRECIABLES			MEDIBLES	
	CUANTIFICABLES	Directamente			
		Mediante un índice o modelo			
	CUALITATIVOS	Criterios objetivos de cuantificación	Escalas proporcionales		
			Escalas jerárquicas		
Criterios subjetivos		Escala de preferencias			
Estrictamente cualitativos	Parte no medible				

En la cuantificación directa, la evaluación no ofrece problemas, sin embargo para el uso de un índice o indicador se requiere un proceso que ofrece

cierta dificultad en la determinación de la unidad de medida (Cuadro 11.4). Para la cuantificación de los parámetros en los dominios ambientales del medio subterráneo existen en el mercado instrumentos de medición de alta precisión.

Con base en mediciones bien *in situ* bien en laboratorio, es posible cuantificar directamente el parámetro deseado o mediante esta información, utilizándose algún modelo matemático. La cuantificación es la forma más recomendable de evaluar los efectos de los factores ambientales.

En la evaluación cualitativa se usan criterios objetivos y subjetivos basados en el grado de manifestación cualitativa del efecto, que se denomina *importancia del impacto*.

Este aspecto puede ser representado mediante una relación que exprese cualitativamente el impacto ambiental en función del nivel de incidencia o intensidad de la alteración producida además de la caracterización del efecto, que corresponde a una serie de atributos de tipo cualitativo tales como: tipo de efecto, tiempo de manifestación, duración, reversibilidad, recuperabilidad, sinergia, acumulación y periodicidad, cuya interpretación se debe hacer en términos de salud y bienestar humano.

Otra forma de evaluación es con base en *unidades de importancia* (UIP) que consideran un valor predeterminado de 1000 unidades para las condiciones de referencia del ambiente.

La importancia del impacto ambiental (IIA) toma valores entre 13 y 100 y permite establecer niveles cualitativos (Cuadro 11.5).

Cuadro 11.4 Evaluación cuantitativa de los parámetros del ambiente subterráneo

Dominio ambiental	Parámetros ambientales	Directamente	Mediante un índice
Atmósfera subterránea	Velocidad del aire	m/s	Índice de confort
	Temperatura seca y húmeda	°C	
	Humedad relativa	%	
	Concentración de polvos	mg/m <sup>3</sup>	Índice de la calidad del aire
	Gases (% o ppm)	%, ppm, µg/m <sup>3</sup>	Índice de la calidad del aire
	Ruido	dB(A)	Nivel sonoro continuos equivalente
	Explosión	-	Índice de riesgo
	Incendio	-	Índice de riesgo
	Radiación	pCi/m <sup>2</sup> s	WL (Nivel de trabajo)
Iluminación	Lux (lm/m <sup>2</sup> )	-	
Agua subterránea	Velocidad	m/s	-
	Concentración de sólidos	mg/m <sup>3</sup>	-
	Acidez	pH	-
	Alcalinidad	-	Índice de alcalinidad
	Conductividad	µSiemens/cm	-
	Concentración de metales	ppm, µg/m <sup>3</sup>	-
Macizo rocoso	Tensión <i>in situ</i>	σ <sub>1</sub> , σ <sub>2</sub> , σ <sub>3</sub> (Mpa)	-
	Resistencia a compresión	MPa	-
	Resistencia a tracción	MPa	-
	Deformación <i>in situ</i>	GPa	Módulo de Young
	Velocidad sísmica	(m/s)	-
	Calidad de la roca	-	RQD, Q, RMR, RMS,
	Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	-
	Velocidad crítica vibratoria	m/s	-

Cuadro 11.5 Niveles de impacto ambiental subterráneo con base en la importancia

Importancia del impacto ambiental IIA	Niveles de impacto ambiental
IIA <25	Compatibles o bajos
25 ≤ IIA ≤ 50	Moderados
50 <IIA ≤ 70	Severos
IIA > 70	Críticos

Los atributos considerados para determinar la importancia del impacto ambiental (Cuadro 11.6) corresponde a las normas relacionadas con la evaluación del impacto ambiental exterior.

Cuadro 11.6 Importancia del impacto ambiental (basado en Conesa, V., 1997)

<p>NATURALEZA</p> <p>. Impacto favorable +</p> <p>. Impacto perjudicial -</p>	<p>INTENSIDAD (INT) (Grado de destrucción)</p> <p>. Baja 1</p> <p>. Media 2</p> <p>. Alta 4</p> <p>. Muy alta 8</p> <p>. Total 12</p>
<p>EXTENSIÓN (EXT) (Área de influencia)</p> <p>. Puntual 1</p> <p>. Parcial 2</p> <p>. Extenso 4</p> <p>. Total 8</p> <p>. Crítica (+4)</p>	<p>MOMENTO (MOM) (Plazo de manifestación)</p> <p>. Largo plazo 1</p> <p>. Mediano plazo 2</p> <p>. Corto plazo 4</p> <p>. Crítico (+4)</p>
<p>PERSISTENCIA (PER) (Permanencia del efecto)</p> <p>. Fugaz 1</p> <p>. Temporal 2</p> <p>. Permanente 4</p>	<p>REVERSIBILIDAD (REV) (Reconstrucción del factor afectado)</p> <p>. Corto plazo 1</p> <p>. Mediano plazo 2</p> <p>. Irreversible 4</p>
<p>SINERGIA (SIN) (Regularidad de la manifestación)</p> <p>. Sin sinergismo (simple) 1</p> <p>. Sinérgico 2</p> <p>. Muy sinérgico 4</p>	<p>ACUMULACIÓN (ACM) (Aumento progresivo)</p> <p>. Simple 1</p> <p>. Acumulativo 4</p>
<p>EFEECTO (EFE) (Relación causa – efecto)</p> <p>. Indirecto (secundario) 1</p> <p>. Directo 4</p>	<p>PERIODICIDAD (PER) (Regularidad de la manifestación)</p> <p>. Irregular o discontinuo 1</p> <p>. Periódico 2</p> <p>. Continuo 4</p>
<p>RECUPERABILIDAD (REC) (Reconstrucción por medios humanos)</p> <p>. Recuperable de forma inmediata 1</p> <p>. Recuperable a mediano plazo 2</p> <p>. Mitigable 4</p> <p>. Irrecuperable 8</p>	<p>IMPORTANCIA DEL IMPACTO AMBIENTAL (IIA)</p> <p>IIA = ± (3INT + 2EXT + PER + SIN + EFE + REC + MOM + REV + ACM + PER)</p>

## 11.6. Predicción del impacto ambiental

En esta parte del EIAS se deben identificar todos los impactos ambientales potenciales asociados con las actividades del proyecto, expresándolos en escalas o niveles de impacto en relación con cada uno de los dominios ambientales.

El impacto del proyecto sobre el ambiente es la diferencia entre la situación del medio futuro modificado y la situación de referencia, como consecuencia de la

realización del proyecto. Sin embargo, no basta conocer la posible modificación, lo más importante es determinar el margen de tolerancia de esta alteración ambiental, determinando el grado o nivel del impacto provocado, lo que definirá el riesgo a provocarse para la salud y bienestar humanos.

Por lo tanto, es imprescindible tener un marco de referencia de los valores máximos permisibles que están constituidos por las normas legales y estándares existentes. Los estándares deben tener un soporte técnico/científico que ofrezca confianza, pudiendo tener para algunos parámetros carácter internacional.

**11.6.1. Predicción del impacto ambiental en la atmósfera subterránea**

**11.6.1.1. Impacto ambiental térmico**

La predicción del impacto ambiental térmico está relacionada con la temperatura exterior, de auto compresión, el grado térmico del macizo rocoso, la emisión de calor de los equipos diesel, la detonación de explosivos y de las aguas termales y del calor del metabolismo humano.

Es necesario realizar esta evaluación cuando existe alguna de las siguientes situaciones: en minas poco profundas con presencia de agua termal que eleve la temperatura de la atmósfera subterránea a niveles inadmisibles y en minas profundas con o sin presencia de agua termal.

Desde el punto de vista térmico, las minas poco profundas y profundas pueden ser definidas según se muestra en el Cuadro 11.7, que se basa en la temperatura máxima de confort humano (29 °C en el Cuadro 3.9), de los resultados obtenidos en la mina de Neves Corvo y San Rafael (Cuadro 10.4) y del grado térmico de diversas minas en el mundo (Cuadro 3.1), incluyendo Neves Corvo (3,3 °C/100 m) y San Rafael (1,53 °C/100 m).

Cuadro 11.7 Tipificación de la profundidad de una mina según la temperatura de la atmósfera subterránea influenciada por las propiedades térmicas del macizo rocoso

Tipo de mina	Temperatura seca (T <sub>s</sub> )*	Profundidad (m)	
		Rocas	Roca + equipo diesel + otro
Poco profunda	T <sub>s</sub> < 29°C	< 850 a 1600 m o mas	< 750/1500 m
Profunda	T <sub>s</sub> ≥ 29°C	> 850 a 1600 m o mas	>750/1500 m

\* Temperatura seca del ambiente del aire con velocidad crítica (0,5 a 0,8 m/s)

En los estudios realizados fue posible cuantificar que la influencia del grado térmico en la temperatura de la atmósfera subterránea varía de 85,1% a 90,4% (Cuadro 10.2) para las minas estudiadas, pudiendo clasificarlas como minas poco profundas.

En la propuesta de clasificación de las minas, las profundidades varían de una mina a otra por el hecho de la variación del grado térmico de cada zona.

Con relación a la temperatura exterior, basado en estudios experimentales realizados, se puede definir en el siguiente sentido:

- a) Para minas localizadas en zonas donde la temperatura media mensual es ≤ 6 °C no es necesario considerar este parámetro, porque su influencia en el ambiente subterráneo es nula o insignificante;



b) Para minas localizadas en zonas donde la temperatura media mensual es  $> 6\text{ }^{\circ}\text{C}$  se debe considerar este parámetro en la predicción del impacto ambiental térmico usando la ecuación 10.1, que se basa en una temperatura seca.

Para el cálculo de la temperatura total en el ambiente subterráneo de la sección 3.1 del Capítulo 3 de la Segunda Parte del presente estudio, fue desarrollado el modelo matemático correspondiente, cuyas ecuaciones finales permiten determinar el aumento de la temperatura por diversas fuentes (Cuadro 11.8).

Cuadro 11.8 Ecuaciones que permiten calcular el aumento (alteración) de la temperatura en el ambiente subterráneo

Fuente de calor	Ecuación	Número
Temperatura exterior	$VTS = 0.2005TE - 1.1305$ , para $TE \geq 6\text{ }^{\circ}\text{C}$	10.1
Autocompresión	$\Delta t_{ha} = 0.0098.L.sen\alpha$	3.1
Grado geotérmico de la roca virgen	$\Delta t_r = t_2 - t_1 = \frac{\lambda.P.L.(h_1 - h_{1cn} \pm L.sen\alpha)}{g_g (\lambda.P.L + 2000.\rho_a.C_e.Q)}$	3.6
Equipos con motor diesel	$\Delta t_{ed} = \frac{f_m.f_t.q_d.P_d}{\rho_a.C_e.Q}$	3.10
Detonación de explosivo	$\Delta t_{ex} = \frac{c_e.e_u}{86400.\rho_a.C_e.Q}$	3.11
Metabolismo humano	$\Delta t_{he} = \frac{q_h.n}{\rho_a.C_e.Q}$	3.12
Água termal	Medición <i>in situ</i>	-
Aumento total	$\Delta t_{total} = \Delta t_{ha} + \Delta t_r + \Delta t_{ed} + \Delta t_{ex} + \Delta t_{he} + \Delta t_t$	3.15

En esta parte del estudio, también fue desarrollado un modelo matemático para determinar la temperatura en las diversas condiciones de redes de aire en las aberturas subterráneas (Cuadro 11.8 y Cuadro 11.9). Para mayor detalle de los parámetros que intervienen se recomienda ver la sección 3.1 del Capítulo 3.

Cuadro 11.9 Ecuaciones para calcular la temperatura en las redes de aire del ambiente subterráneo

Tipo de red de aire en las aberturas	Ecuación	Número
Cruzado	$t_f = \left(\frac{R_{eq}}{R_{i-f}}\right)^{0.5} (t_i + \Delta t_{i-f}) + \left(\frac{R_{eq}}{R_{i1-f}}\right)^{0.5} (t_{i1} + \Delta t_{i1-f})$	3.14
Recto	$t_f = t_i + \Delta t_{i-f}$	3.16
Separado	$t_f = t_i - \Delta t_{i-f1} \left(\frac{R_{i-f}}{R_{i-f1}}\right)^{0.5}$ e $t_{f1} = t_i - \Delta t_{i-f} \left(\frac{R_{i-f1}}{R_{i-f}}\right)^{0.5}$	3.18 y 3.19

Las ecuaciones muestran una alta complejidad en el proceso de cálculo, que mediante procedimiento convencional se torna tedioso, por lo tanto, es necesario desarrollar un programa de computación que facilite el cálculo. En este programa es recomendable incluir no solo la predicción del impacto ambiental térmico sino

también las medidas correctivas y el monitoreo y control. El objetivo del presente trabajo de investigación no es precisamente este, sin embargo, en la fig. 11.18 se propone el siguiente diagrama base.

Una vez estimada la temperatura del aire de la atmósfera subterránea, es necesario predecir el posible nivel de impacto ambiental térmico, utilizando a este fin la matriz base elaborada presentada en el Cuadro 3.10, con algunas modificaciones dependiendo de la norma o estándar a utilizar.

11.6.1.2. Impacto ambiental volumétrico y dinámico

La predicción de este impacto está relacionada con el caudal y la velocidad del aire en la atmósfera subterránea.

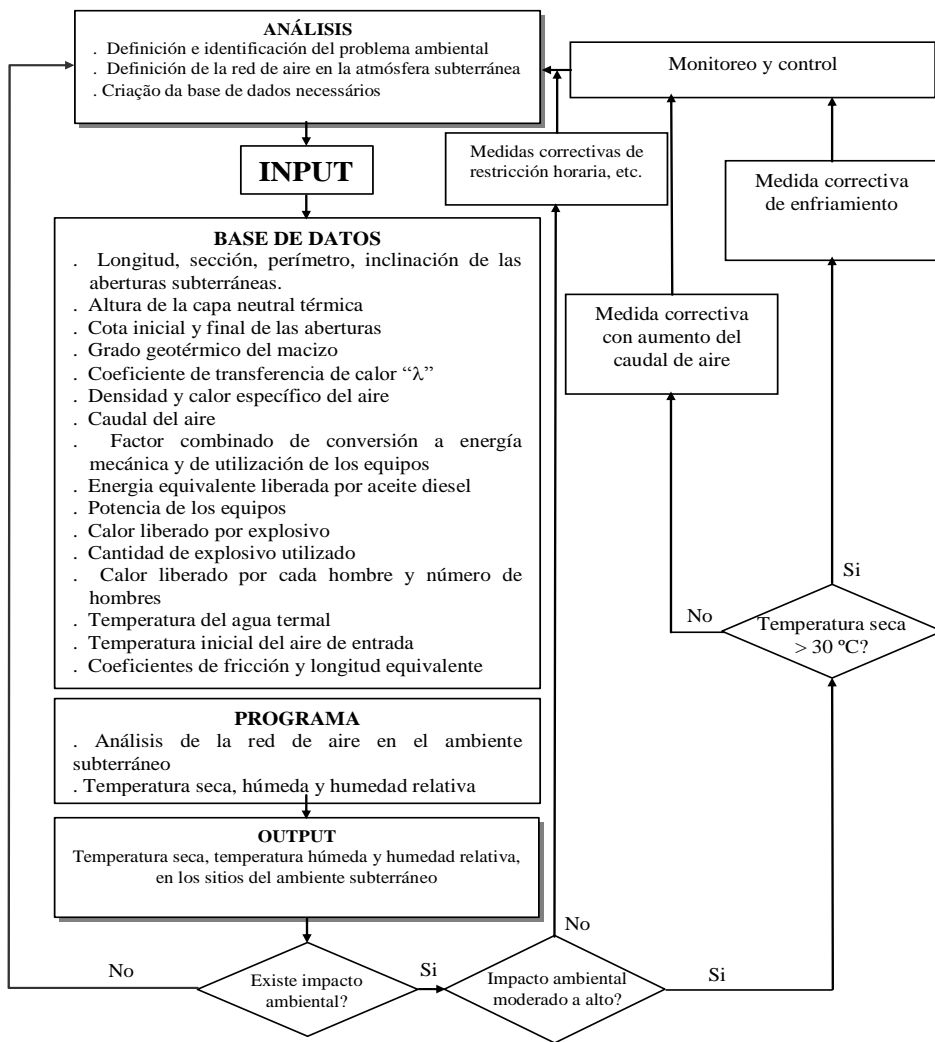


Figura 11.18 Propuesta del diagrama general del programa para la prevención del impacto ambiental térmico, medidas correctivas, monitoreo y control

El caudal total mínimo de aire requerido para la realización de un proyecto de explotación subterránea debe ser calculado considerando el caudal mínimo en cada sitio de trabajo (fig. 11.19).

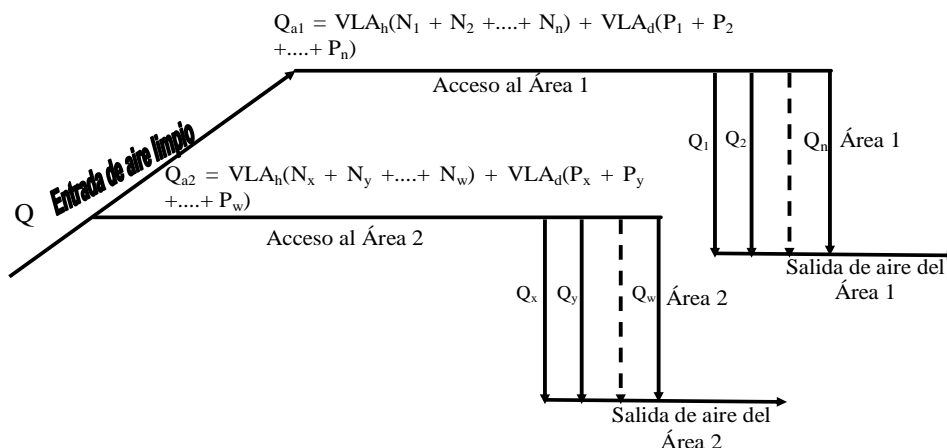


Figura 11.19 Caudal mínimo total de aire y caudales mínimos en los distintos sitios del ambiente subterráneo

El caudal mínimo debe ser calculado aplicando la ecuación (3.73) (de acuerdo a la norma vigente o aplicando la ecuación (3.58) según el estándar de calidad del aire.

Para el modelo genérico se considera la aplicación de la ecuación (3.73), por lo tanto, en la red de aire  $Q_{a1}$  es el caudal mínimo total necesario para el área de trabajo 1 y  $Q_{a2}$  para el área de trabajo 2,  $VLA_h$  es la cantidad mínima de aire para cada hombre definido por la norma legal ( $m^3/s.hombre$ ),  $N_1, N_2, \dots, N_n, N_x, N_y, \dots, N_w$  es el número de hombres presente en cada sitio de trabajo,  $VLA_d$  es la cantidad mínima de aire por cada hp de motor diesel utilizado, definido también por la norma legal ( $m^3/s.hp$ ) y  $P_1, P_2, \dots, P_n, P_x, P_y, \dots, P_w$  son las potencias (hp) de motor diesel utilizado en cada sitio de trabajo.

Siendo  $N$  el número máximo total de hombres requeridos y  $P$  el total de hp de potencia de los motores diesel a utilizar en el proyecto. Los caudales mínimos requeridos en los distintos sitios para la realización del proyecto se pueden determinar por las ecuaciones indicadas en el Cuadro 11.10 para el diagrama ejemplificado.

Los valores de los factores  $VLA_h$  e  $VLA_d$  tienen una cierta variación en función de la localización del proyecto, influenciado fundamentalmente por la altitud y también en función de la norma legal del país o región (Cuadro 3.50).

La predicción del impacto ambiental se puede realizar considerando los caudales mínimos calculados mediante las ecuaciones indicadas en el Cuadro 11.10 y las posibles variaciones que puedan ocurrir en la práctica, debido a los siguientes aspectos:

Cuadro 11.10 Ecuaciones para el cálculo de caudales mínimos de aire para un proyecto de explotación subterránea para el modelo indicado en la figura 11.19

Caudal mínimo total (m <sup>3</sup> /s)	Caudal mínimo total en los accesos de las áreas 1 y 2 (m <sup>3</sup> /s)	Caudal mínimo para las áreas de trabajo 1 y 2 (m <sup>3</sup> /s)
Q = f.N + K.P	Acceso al área 1 Q <sub>a1</sub> = f(N <sub>1</sub> + N <sub>2</sub> + ..... + N <sub>n</sub> ) + K(P <sub>1</sub> + P <sub>2</sub> + ..... + P <sub>n</sub> )	Q <sub>1</sub> = f.N <sub>1</sub> + k.P <sub>1</sub>
		Q <sub>2</sub> = f.N <sub>2</sub> + k.P <sub>2</sub>
		.....
		Q <sub>n</sub> = f.N <sub>n</sub> + k.P <sub>n</sub>
	Acceso al área 2 Q <sub>a2</sub> = f(N <sub>x</sub> + N <sub>y</sub> + ..... + N <sub>w</sub> ) + K(P <sub>x</sub> + P <sub>y</sub> + ..... + P <sub>w</sub> )	Q <sub>x</sub> = f.N <sub>x</sub> + k.P <sub>x</sub>
		Q <sub>y</sub> = f.N <sub>y</sub> + k.P <sub>y</sub>
		.....
		Q <sub>w</sub> = f.N <sub>w</sub> + k.P <sub>w</sub>

- Variación de la *resistencia total* en las aberturas subterráneas para la red de aire principal y en las mangas de ventilación de los sistemas de ventilación auxiliar. Este parámetro es función del coeficiente de fricción y de las dimensiones geométricas de la abertura subterránea, siendo directamente proporcional a la longitud (ecuación 3.62). También es sabido que la realización del proyecto no siempre es igual al dimensionado y que las operaciones mineras son dinámicas, por lo tanto existe un aumento frecuente de la longitud de las aberturas por donde circula el aire, resultando un potencial impacto ambiental por este hecho;
- Variación de la potencia total de los equipos con *motores diesel* en los sitios de trabajo. Esto puede suceder por causa de las propias situaciones de las operaciones productivas o por las decisiones de aumento de la producción;
- Variación en la *cantidad de hombres*, puede decirse que en las actuales condiciones en las que todas las minas subterráneas tienen tendencia a la mecanización, no es normal un aumento significativo de personal en las operaciones mineras y las pequeñas variaciones no tienen marcada influencia en el impacto ambiental, ya que el hombre requiere pequeñas cantidades (0,05 m<sup>3</sup>/s) comparadas con los equipos diesel. Por ejemplo, un LHD con 180 hp de potencia requiere por lo menos 6,30 m<sup>3</sup>/s, es decir, 126 veces más que lo requerido para un hombre (fig.11.20).

La predicción del impacto ambiental dinámico y volumétrico se debe expresar en distintos niveles (leve, moderado y alto) utilizando la matriz base elaborada y presentada en el Cuadro 3.52, con las modificaciones de conformidad con las normas legales a considerar.

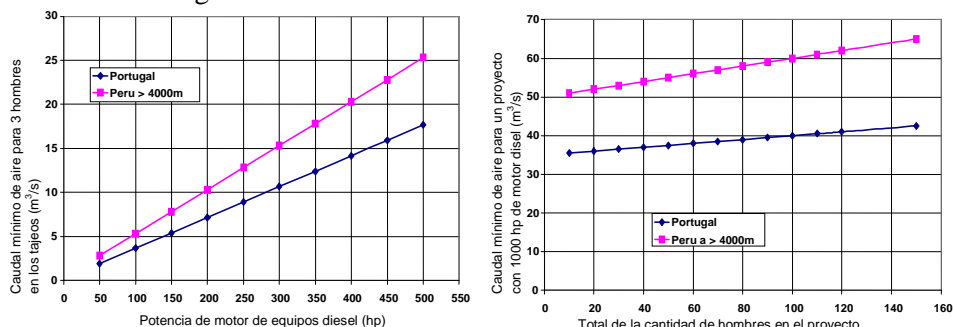


Figura 11.20 Influencia de la cantidad de hombres y máquinas con motor diesel en el caudal mínimo de aire en el ambiente subterráneo

Para el cálculo de los caudales y velocidad de referencia en la predicción del impacto ambiental es recomendable utilizar los programas existentes en el mercado para fines de ventilación de minas, como son VnetPC2000 de Ventilation Service Inc. US, VENTSIM 3.4.3 de Australia, VUMA South África, MIVENA 6.2b de Japón (fig. 11.21), entre otros.

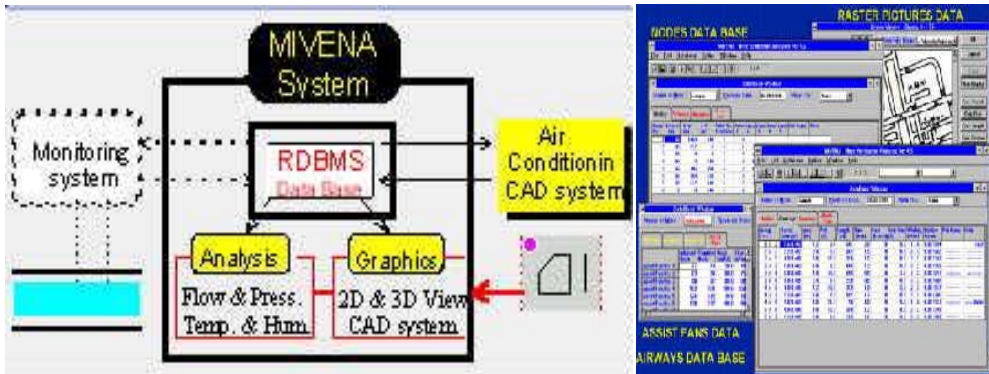


Figura 11.21 Diagrama de bloques, input & output del programa MIVENA System (<http://uws47.mine.akita-u.ac.jp/mivena/index-e.html>)

#### 11.6.1.3. Impacto ambiental debido a polvos y gases

En todos los proyectos de explotación subterránea, en los tajeos y frentes de trabajo (frentes de avance de galerías, rampas, traviesas, accesos, etc.) existe una concentración de partículas o polvos (<1  $\mu\text{m}$  de diámetro) y gases (O, N, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.) que contaminan la atmósfera subterránea y causan riesgo para la salud y bienestar de los trabajadores, lo que debe ser evaluado para su prevención y atenuación a niveles admisibles.

El proceso de excavación de las aberturas subterráneas en las etapas de construcción, preparación y explotación tiene un carácter dinámico, ocasionando la generación de polvo en dos frentes: fragmentación de rocas y minerales y utilización de equipos con motor diesel.

La fragmentación de rocas y minerales se lleva a cabo mediante el proceso de trituración, corte, abrasión y acción de explosivos, por la utilización de equipos (perforadoras, trituradores, tuneladoras: raise boring; etc.) y por la remoción y transporte.

La predicción de la cantidad de polvo producido en el proceso de excavación subterránea se puede realizar utilizando la ecuación (3.49) teniendo en cuenta la cantidad de material rocoso excavado por hora.

La cantidad de partículas emitidas por los equipos alimentados con motores diesel puede ser estimada por las ecuaciones (3.50) y (3.51).

La predicción de la concentración de los gases tóxicos se puede cuantificar dependiendo de las fuentes. Para los gases generados por el uso de explosivos se pueden utilizar las ecuaciones (3.35) y (3.36); y para emisiones de gases por equipos diesel la ecuación (3.37).

Luego, es necesario predecir el nivel del posible impacto ambiental que se espera por la contaminación provocada por polvo y gases, tarea que debe hacerse basada en la cuantificación de las emisiones de polvo y gases y la matriz base elaborada y presentada en el Cuadro 3.25 (gases) y Cuadro 3.43 (polvos) adaptándose a las normas consideradas.

11.6.1.4. Impacto ambiental acústico

En el proceso de realización del proyecto va a ser necesario utilizar metodologías de trabajo en las actividades cíclicas unitarias (perforación, desmote con explosivos/corte, soporte, remoción, transporte), servicios auxiliares (ventilación, drenaje, aire comprimido, entibación, llenado), operaciones de extracción, trituración, etc. Todas estas actividades requieren la utilización de herramientas y equipos o maquinarias, que en el momento de operar producen ruido o alteran las condiciones ambientales de la atmósfera subterránea.

Para predecir el nivel acústico de las operaciones, es conveniente elaborar una lista de equipos y maquinarias (marca, tipo, tamaño, operaciones a realizar y nivel de ruido suministrado por el fabricante) relacionada con los lugares de trabajo (secciones) y las actividades operacionales o de servicios auxiliares, con base en el estudio de detalle del proyecto.

La predicción de la magnitud de la generación de ruido, se debe cuantificar utilizando la ecuación (3.124) para los martillos neumáticos, las ecuaciones (3.125) y (3.126) para los equipos con motor diesel, y las ecuaciones (3.127), (3.128) y (3.129) para los ventiladores. También se puede utilizar la información suministrada por los fabricantes de los equipos.

La información relacionada con el nivel de ruido producido por los equipos, debe ser la referida a la fuente inicial o a la posición del operador. Ejemplo de ello son los resultados obtenidos en los estudios de aplicación (Cuadro 11.11).

Cuadro 11.11 Nivel sonoro continuo equivalente máximo (fuente) registrados en la mina de Panasqueira (basado en el Cuadro 7.15)

Ambiente de trabajo	Sección del ambiente	Equipos	Exposición (h/día)	Leq dB (A)	No. de hombres
Tajeos	5 x 2,2 m <sup>2</sup>	LHD Wagner Diesel ST-3.5	6,3	102	2
Tajeos	5 x 2,2 m <sup>2</sup>	LHD eléctrico EST-2D	5,2	93	2
Tajeos	5 x 2,2 m <sup>2</sup>	Jumbo Tamrock H107	5,6	120	2
GalP-5, rampa L2/L3	3,2 x 2,5 m <sup>2</sup>	Dumper Wagner MT 412	6,5	104	1
Gal., ramp. Desm.	5 x 2,2 m <sup>2</sup>	Tractor AGRIA	Eventual	97	13
P. extr.(Gal. D15 )	4 x 2,4 m <sup>2</sup>	Sistema Jaula - Vagones	6,5	89	8
Galería D23:L2	3,2 x 2,5 m <sup>2</sup>	2 Ventiladores de 80 hp	Eventual	111	Variable
Galería D23.L2	3,2 x 2,5 m <sup>2</sup>	1 Ventilador de 80 hp	Eventual	102	Variable
Tajeos	5 x 2,2 m <sup>2</sup>	1 Ventilador de 7.5 kW	Eventual	92	Variable
Cámara de trituración	30 x 20 m <sup>2</sup>	Triturador primario	2,05	103	1
Correa transportadora	5 x 2,4 m <sup>2</sup>	Cinta transp.Tolvas	2,05	97	1
Vagón de mineral	6 x 2,5 m <sup>2</sup>	Descarga vagones	Eventual	93	1

La predicción del nivel acústico a producirse en el proyecto de explotación subterránea no debe tener solo un carácter puntual (ocupacional), sino también es de

carácter ambiental. Para predecir el *nivel sonoro continuo equivalente*  $L_{Aeq,T}$  se puede usar la ecuación (3.118), o las ecuaciones experimentales obtenidas durante la aplicación en la mina de Panasqueira (Cuadro 11.12).

Cuadro 11.12 Ecuaciones para la determinación de la distancia máxima (D) desde la fuente que la contaminación acústica alcanza para un valor máximo permisible de  $Leq$  de 85 dB(A)

Equipos	Ecuación	Ecuación base
Extracción con jaula y vagones	$D = 4,2212Leq_{m\acute{a}x} - 358,801$	10.4
Ventiladores	$D = 2,0221Leq_{m\acute{a}x} - 171,877$	10.5
Jumbos y LHDs (diesel, eléctricos)	$D = 1,2413Leq_{m\acute{a}x} - 105,511$	10.6
Para cualquier fuente	$D = 2,3015Leq_{m\acute{a}x} - 195,627$	10.7

Las ecuaciones presentadas en el Cuadro 11.12 son aplicables para aberturas subterráneas con secciones de 8 a 15 m<sup>2</sup> (media de 11 m<sup>2</sup>) excavadas con explosivos en roca esquistosa, donde el impacto ambiental sonoro alcanza una distancia D (m) desde la fuente de emisión que es la máxima ( $Leq_{m\acute{a}x}$ ) expresada en dB (A).

La tipificación del nivel de impacto ambiental acústico en el proyecto de explotación subterránea se puede realizar con base en la cuantificación de la magnitud de la emisión acústica para cada equipo o actividad a realizar y con la matriz elaborada (Cuadro 3.90).

Con la metodología propuesta para la predicción del impacto ambiental ocasionado por la alteración de la temperatura, de la concentración de gases y polvos, la variación de la velocidad y caudal de aire y la emisión de ruido, es posible predecir el nivel de impacto ambiental subterráneo para otros contaminantes ambientales, como son la iluminación (sección 3.5), radiación (sección 3.5), explosión e incendio (sección 3.6).

### 11.6.2. Predicción del impacto ambiental por la alteración del agua subterránea

#### 11.6.2.1. Cantidad de agua subterránea

Tal como fue analizado en el Capítulo 3 de la Segunda Parte del presente estudio, las alteraciones en las condiciones naturales de las aguas subterráneas se expresan en su cantidad (caudal) y en su calidad. Por lo tanto, para la predicción del impacto ambiental en el agua subterránea se deben caracterizar estos aspectos en sus condiciones naturales, de modo que sirvan de referencia para la predicción de las posibles alteraciones ambientales cuando se realice el proyecto.

Para estimar la cantidad de agua subterránea en el área de realización del proyecto de explotación se puede utilizar la ecuación (4.5).

El caudal de agua subterránea varía a lo largo del año en relación directa con las precipitaciones (estación meteorológica), y el riesgo ambiental también puede ser proporcional a esta variación. Es obvio que un mayor caudal de agua generará un mayor riesgo ambiental relacionado con el potencial de inundación e influye en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso.

La estimación del nivel de impacto ambiental relacionado con la posible inundación de las aberturas subterráneas puede variar dentro del ámbito de acción del proyecto de una zona a otra dependiendo de las precipitaciones, de las condiciones de la localización de las aberturas en el macizo rocoso y los accesos a la superficie, como también de sus condiciones geológicas.

Tales condiciones pueden definir la distribución de este caudal de agua determinado, de modo que se puede estimar el caudal de agua que eventualmente podría drenar por gravedad y el caudal de agua que será necesario controlar mediante técnicas conocidas, como por ejemplo el bombeo.

Para estimar el tipo de nivel de impacto ambiental debido al caudal de agua subterránea se debe utilizar el caudal cuantificado y relacionarlo con la matriz elaborada (Cuadro 4.11).

En las medidas de prevención y atenuación para el control del riesgo ambiental relacionado con el caudal de aguas subterráneas, se utilizan técnicas de impermeabilización o bombeo. La ingeniería relacionada con el control mediante el sistema de bombeo está descrita en la sección 4.6.1 del Capítulo 4 de la Segunda Parte del presente trabajo de investigación.

Por ejemplo, en la mina de Neves Corvo se utilizó la técnica de impermeabilización del lecho del río y bombeo en el 100% del caudal del agua presente en el ambiente subterráneo, y en el caso de las minas de Panasqueira y San Rafael se utilizó un sistema mixto, es decir, drenaje por gravedad y bombeo.

#### *11.6.2.2. Calidad del agua subterránea*

El impacto ambiental provocado por el drenaje ácido de minas subterráneas está relacionado fundamentalmente con la alteración de la calidad del agua superficial al recibir la descarga de agua contaminada, lo que se refleja generalmente en los siguientes aspectos: propiedades térmicas; pH; color; sabor; olor; concentración de sólidos y de metales. Por lo tanto, las predicciones deben estar orientadas a estos aspectos.

La descarga del drenaje ácido ocasiona la disminución del pH, el incremento de la concentración de metales, la alteración de la temperatura y turbidez de las aguas superficiales que comprometen la biodiversidad existente, siendo una seria amenaza para el dominio biológico del ecosistema.

La predicción del drenaje de aguas ácidas tiene dos objetivos: 1) Determinar el potencial de producción aguas ácidas de un cierto volumen de explotación; y 2) Predecir la calidad del drenaje sobre la base de la tasa medida de la formación de aguas ácidas.

Hay dos puntos importantes que se deben considerar al evaluar el potencial de generación de aguas ácidas del material de la roca. El primero, es cómo recolectar las muestras de campo para su uso en las pruebas analíticas y el segundo, cual es el método analítico de análisis que debe utilizarse.

Los métodos utilizados para predecir el potencial de generación de aguas ácidas son dos: estáticos y dinámicos. Los factores que influyen en la selección del régimen de muestreo y del método analítico incluyen el conocimiento existente de la geología, los costos y el tiempo disponible para el muestreo.



**a). Método estático:** existen varios métodos y los más conocidos son: Neutralización potencial USEPA estándar; potencial de producción alcalina; relación de sulfuros (APP/S); producción neta de ácidos (NAP); contabilidad ácido-base (ABA) y generación neta de ácido (NAG); peróxido de hidrógeno (Mitchell, P., 2000).

Las pruebas estáticas predicen la calidad del drenaje comparando el máximo potencial de producción de aguas ácidas de la muestra AP (kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t) con su máximo potencial de neutralización NP (kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t), que puede ser determinado por las ecuaciones (11.1) y (11.2).

$$NP = \frac{\%S}{100} \left[ \frac{kgS}{kgmuestra} \right] \frac{1}{32} \left[ \frac{kmolS}{kgS} \right] 1.0 \left[ \frac{kmolH_2SO_4}{kmolS} \right] 98 \left[ \frac{kgH_2SO_4}{kmolH_2SO_4} \right] 1000 \left[ \frac{kgmuestra}{t} \right]$$

$$AP = \frac{V_{H_2SO_4} [Litros] M \left[ \frac{eq}{L} \right] 0.049 \left[ \frac{Kg}{eq} \right]}{W [g] 10^{-6} \left[ \frac{t}{g} \right]} \quad (11.1) \text{ y } (11.2)$$

El punto final de la valoración ocurre cuando el pH es de 4. La forma simplificada AP = 31,25 S, donde S es el sulfuro de azufre total en la muestra (%).

NP es una medida del material carbonatado disponible para neutralizar el ácido, cuyo valor está determinado por la valoración directa ácida de la muestra, siendo el pH generalmente de 3,5, lo que permite determinar la cantidad de ácido consumido (Ferguson, K.D., et al., 1991, Lapakko 1993). El potencial líquido de la neutralización (NNP) o el valor ácido/base (ABA) están determinados por la ecuación (11.3).

$$NNP = NP - AP \quad (11.3)$$

Un NNP de 0 es equivalente a una relación de NP/AP de 1. Los resultados de esta prueba estática (AP, NP y NNP) generalmente se expresan en unidades de masa (kilogramo, tonelada métrica, etc) de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) por 1000 toneladas métricas de roca (Ferguson, K.D., et al., 1991).

La relación NP/AP es la más utilizada para predecir la generación de drenaje ácido, con la incorporación de un factor de seguridad para reducir los riesgos de los parámetros desconocidos (Ejemplo, Placer Dome. Inc, Cuadro 11.13).

Cuadro 11.13 Relación de NP/AP utilizado por Placer Dome Inc. (Mitchell, P., 2000)

Relación NP/AP	Potencial de generación aguas ácidas (ARD)
<1	Genera ARD a menos que los sulfuros no sean reactivos
1 - 2	Posible generación de ARD si el mineral se neutraliza, cubierto o no reactivado de otra manera
> 2	Poco probable la generación de ARD

Si la diferencia entre NP y AP es negativa, existe un potencial de producción de aguas ácida de la roca muestreada. Si fuera positiva el riesgo es menor. La predicción del potencial de producción de agua ácida es más difícil cuando el NNP está entre -20 y 20. Una relación entre el potencial de neutralización de una muestra de la producción de ácido y el potencial de 3:1 indica una menor probabilidad de generar ácidos, sin embargo, una relación de 1:1 o menos, indica una mayor probabilidad de generar agua ácida (Brodie et al. 1991).

**b). Método dinámico:** las pruebas dinámicas son distintas de las pruebas estáticas y se basan en la imitación de las reacciones naturales de oxidación. Las pruebas utilizan típicamente un volumen de muestra mayor y requieren un tiempo también mayor para completar la prueba, en comparación con los ensayos estáticos.

Estas pruebas proporcionan información de la tasa de oxidación de los sulfuros y consecuentemente de la producción ácida. Existen muchos métodos, tales como: *humidity cells, sohelet extraction, column tests, bc research confirmation, batch reactor y field tests* (Cuadro 11.14).

Cuadro 11.14 Métodos de ensayo dinámicos

Humidity cells (Sobek et al, 1978).	Sohelet extraction (Singleton, G.A., et al y 1978; Sullivan, P.J. et al, 1982)	BC research confirmation (Duncan and Walden, 1975)
<ul style="list-style-type: none"> <li>. Tamaño de partícula 200 g de 2.38 mm de roca.</li> <li>. Exposición de 3 días al aire seco, 3 días al aire húmedo y enjuagado con 200 ml en el día 7</li> <li>. Costo: US\$ 425-850</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. No representa el tamaño de partícula</li> <li>T=70°C (Singleton y Lavkulich, 1978)</li> <li>T=25°C (Sullivan y Sobek, 1982)</li> <li>. Costo: US\$ 212-425</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. 400 mesh o tamaño de partícula</li> <li>. Adición de 15/30 g de solución bacteriana activa</li> <li>. Si el pH 2,2 a 2,5, T = 35 °C</li> <li>. Si el pH aumenta la muestra no produce ácido</li> <li>. Si el pH disminuye, 1/2 de la masa de la muestra original se añade en cada uno de los dos aumentos</li> <li>. Costos: US\$ 170-340</li> </ul>

La concentración de metales en el agua subterránea proveniente de las operaciones mineras, está relacionada con el tipo de mineral presente en el macizo rocoso y las propiedades de lixiviación por la acción del agua. La predicción del nivel de concentración de metales pesados se debe realizar para cada caso en particular.

Finalmente, para predecir el nivel de impacto ambiental se puede utilizar la matriz base elaborada para este fin (Cuadro 4.16 y 4.17).

**11.6.3. Predicción del impacto ambiental en el macizo rocoso**

Para la predicción del impacto ambiental por la inestabilidad y desprendimiento de las rocas se propone utilizar el Índice de Calidad Q (ecuación 5.2) y la relación del tamaño equivalente (ecuación 5.3) de Barton, relacionados mediante la ecuación (5.37). Esta ecuación representa un punto de referencia en la

predicción de la posible existencia o no de riesgos ambientales geotécnicos (Cuadro 11.15), estableciendo una comparación entre el tamaño equivalente crítico  $D_{ec}$  ( $D_{ec} = 2,821Q^{0,3838}$ ) y del proyecto  $D_{ep}$ .

Cuadro 11.15 Cuadro para predecir la presencia del riesgo ambiental o no por la inestabilidad y desprendimiento de las rocas

Tamaño Equivalente	Riesgo de impacto ambiental	
	Si	No
$D_{ep} \geq D_{er}$	x	-
$D_{ep} < D_{er}$	-	x

En el caso de la posible existencia de riesgo ambiental, la predicción del nivel de impacto ambiental puede ser realizada utilizando la matriz base del Cuadro 5.19 relacionando los valores determinados con los resultantes de los ensayos *in situ* y de laboratorio, utilizando la técnica desarrollada en el Capítulo 3 de la Segunda Parte del presente trabajo.

Otra forma de predecir el impacto ambiental en el macizo rocoso puede ser mediante la cuantificación de la velocidad vibratoria crítica  $v_c$  (m/s) provocada por la detonación de explosivos.

El nivel de daño provocado puede ser previsto mediante las ecuaciones 5.30 y 5.34 que determinan la sobreexcavación y la distancia de los daños provocados alrededor de una abertura subterránea, respectivamente.

En general, las vibraciones menores a 0,51 m/s no provocan ningún daño al macizo rocoso, y los posibles efectos esperados en los diferentes niveles de la roca están indicados en el Cuadro 11.16.

Cuadro 11.16 Efectos de la velocidad vibratoria crítica provocados por la detonación de explosivos (Persson, *et al.*, 1993)

Velocidad pico de partículas $v_c$ (m/s)	Efectos en el macizo rocoso
< 0,254	No existe fracturación
0,254 – 0,381	Pueden ocurrir desplazamientos o caídas de algunas rocas
0,635 – 2,54	Fuerte presencia de fracturas de tensión y fracturas radiales
> 2,54	Rotura completa

#### 11.6.4. Predicción del impacto ambiental en el ambiente biológico exterior

Los impactos ambientales en el medio biológico se presentan cuando se realizan actividades que cambian las funciones naturales del ecosistema. Los cambios pueden afectar la salud humana y el funcionamiento del ecosistema terrestre y acuático en el ambiente exterior en las áreas de influencia de las descargas de contaminantes desde el ambiente subterráneo, por lo que es indispensable evaluarlos en el EIAS.

En *áreas no agrícolas*, el grado de impacto ambiental está definido en relación a la cantidad de emisiones, al período de exposición, toxicidad, captación y bioacumulación de metales pesados y otros elementos. Además, se puede generar

un impacto en la cadena alimentaria de los animales. Otro aspecto importante es la degradación del ecosistema provocada por la subsidencia (paisaje).

En *áreas agrícolas*, se deben evaluar los impactos adversos a los cultivos, suelos (degradación) y el recurso agua que pueden comprometer la salud humana y animal.

La descarga de contaminantes provenientes del ambiente subterráneo puede destruir el hábitat y provocar la migración de animales silvestres o inducir cambios fisiológicos y aumentar la susceptibilidad a las enfermedades e incluso influir en la salud del hombre a través de la cadena alimentaria.

Para predecir el impacto ambiental relacionado con estos aspectos, los indicadores pueden ser:

a) *Para la cobertura vegetal*, un porcentaje de la superficie cubierta (PSC), ponderado en función del índice de interés de las especies existentes  $k$  (Cuadro 11.17), determinado por la ecuación 11.4, cuya función de transformación se muestra en la fig. 11.22. En esta ecuación  $S_t$  es la superficie total considerada y  $S_z$  es la superficie cubierta por cada especie o tipo de vegetación existente.

$$PSC = \frac{100}{S_t} \sum_1^z S_z \cdot K \tag{11.4}$$

Cuadro 11.17 Valores del índice de interés de las especies existentes  $K$

Especies	$K$
Endemismo	1
Rara	0,8
Poco común	0,6
Frecuente	0,4
Común	0,2
Muy común	0,1

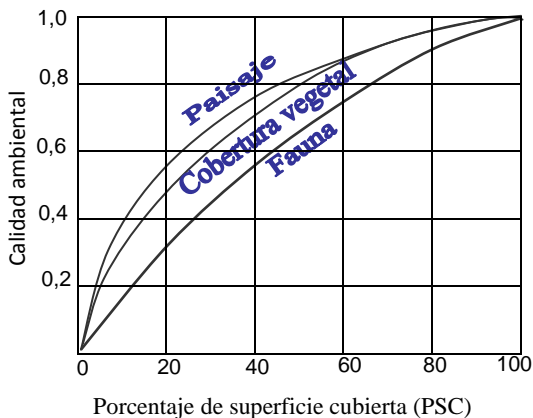


Figura 11.22 Función de transformación para paisaje, cobertura vegetal y fauna (Conesa, V., 1997)

La metodología para evaluar el impacto paisajístico se puede basar en el valor relativo del porcentual del paisaje  $V_r$  (%) expresado por la ecuación (11.5), donde el valor absoluto es  $V_a$  (espectacular 16 a 25, soberbio 8 a 16, distinto 4 a 8, agradable 2 a 4, vulgar de 1 a 2 y feo 0 a 1), tamaño medio de las poblaciones próximas y  $P$  (cantidad de habitantes en el Cuadro 11.18), distancia media a las poblaciones próximas  $d$  (km en el Cuadro 11.18), accesibilidad a los puntos de observación  $A_c$  (inmediata 4, buena 3, regular 2 mala 1 e inaccesible 0), superficie de observación  $S$  (muy grande 4, grande 3, pequeña 2 y muy pequeña 1).

$$V_r = 1.125 \left[ \frac{P}{d} \cdot A_c \cdot S \right]^{1/4} \cdot V_a \quad (11.5)$$

Cuadro 11.18 Indicadores P y d (Conesa, V., 1997)

No. Habitantes	P	Distancia (km)	d
1-1000	1	0 – 1	1
1000-2000	2	1-2	2
2000-4000	3	2-4	3
4000-8000	4	4-6	4
8000-16000	5	6-8	5
16000-50000	6	8-10	6
50000-100000	7	10-15	7
100000-500000	8	15-25	8
500000-1000000	9	25-50	9
>1000000	10	>50	10

Cuadro 11.19 Valores de los coeficientes de calidad y abundancia (Conesa, V., 1997)

Razón	Coef	Cuantificación
Abundancia de especies	a	Muy abundante 5, Abundante 4, Medio 3, Poco 2, Muy poco 1.
Diversidad de especies	b	Excepcional 5, Alta 4, Aceptable 3, Baja 2, Uniforme 1.
Especies protegidas	c	De 1 a 10
Diversidad de biotipo	d	Igual a cuantificación de b
Abundancia de biotipo	e	Igual a cuantificación de a
Escasez de biotipo	f	Muy raro 5, Raro 4, Relativamente raro 3, Común 2 y Muy común 0
Endemismos	g	Si 5, no 0

b) Para la fauna, se considera como indicador del impacto el valor ecológico VE determinable con la ecuación (11.6), que mide el valor del biotipo por su calidad y abundancia expresado mediante los coeficientes a, b, c, d, e, f, g (Cuadro 11.19) y la función de transformación de la fig. 11.22.

$$VE = \frac{a \cdot b + c + 3d}{e} + 10(f + g) \quad (11.6)$$

Para la predicción del nivel de impacto ambiental los valores inferiores a 0,5 son considerados inadmisibles por las normas vigentes.

### 11.7. Medidas de prevención y corrección para el impacto ambiental

Prevenir, atenuar o corregir el impacto ambiental significa introducir medidas preventivas y/o correctivas con el fin de: a) Explorar en mayor grado las oportunidades que ofrece el ambiente para el mejor desempeño ambiental del proyecto; b) Evitar, anular, atenuar, corregir o compensar los efectos negativos de

las acciones derivadas del proyecto sobre el ambiente; y c) Aumentar, mejorar y potenciar los efectos positivos que puedan existir.

Es necesario estudiar en profundidad las medidas a introducir en el proyecto, pudiendo adaptarse las siguientes:

*Medidas preventivas*, que evitan la presencia del efecto modificando los elementos definidos en el proyecto (tecnología, dimensionamiento, traslado, tamaño, materias primas, consumibles, etc.);

*Medidas correctivas*, los impactos recuperables, orientadas a anular, atenuar, corregir o modificar las acciones y efectos sobre el proceso productivo (técnicas, etc.), condiciones de funcionamiento (filtros, reductores acústicos, normas de seguridad, etc.), factores del medio como agente transmisor (dilución, etc.), factores del medio como agente receptor (aumento de caudal, oxigenación de las aguas, etc.);

*Medidas de compensación* de impactos irreversibles e inevitables, que no anulan el efecto ni atenúan, pero compensan de alguna manera la alteración del factor (indemnización por contaminación, creación de áreas verdes, etc.).

En función del nivel del impacto ambiental y el tipo de medidas correctivas se consideran:

*Posibles*, cuando tienden a la corrección de impactos recuperables;

*Obligatorias*, que corrigen impactos recuperables, no inadmisibles en el sentido ambiental, hasta alcanzar las normas aprobadas o legalmente establecidas;

*Convenientes*, para atenuar impactos recuperables, admisibles en el aspecto ambiental;

*Imposibles*, cuando se trata de impactos irreversibles, no admisibles en el aspecto ambiental.

### **11.7.1. Medidas de prevención y corrección para el impacto ambiental en la atmósfera subterránea**

Las medidas de prevención y corrección de los impactos ambientales producidos en la atmósfera subterránea son de tipo térmico, dinámico, volumétrico, polvos, gases, ruido, radiación, explosión e incendio. La búsqueda de alternativas tiene relación con los factores, las fuentes de contaminación o alteración del ambiente de la atmósfera subterránea (fig. 11.23).

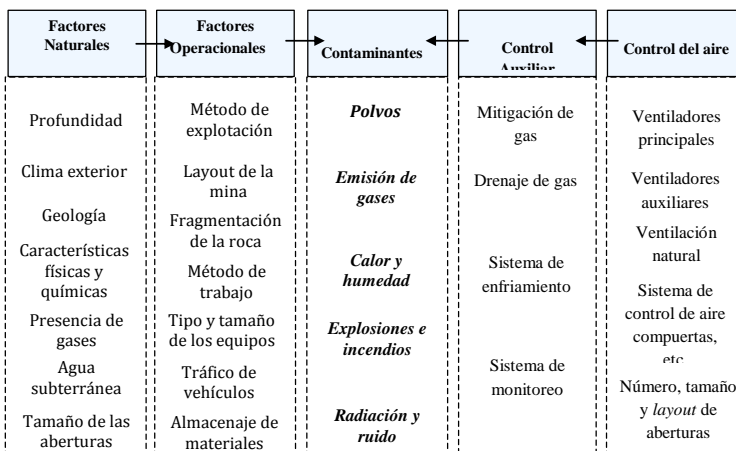


Figura 11.23 Factores y sistema de control del impacto ambiental en la atmósfera subterránea

La herramienta tecnológica para la prevención y corrección fue desarrollada en el Capítulo 1 de la Segunda Parte del presente trabajo de investigación. Las expresiones matemáticas para obtener el caudal mínimo de aire para conseguir una calidad de aire de la atmósfera subterránea admisible por las normas (estándares) vigentes, se resumen en el Cuadro 11.20, cuyo detalle puede verse en la parte que se refiere a este párrafo.

Cuadro 11.20 Ecuaciones que permiten calcular el caudal mínimo de aire que evita el impacto ambiental del aire de la atmósfera subterránea

Tipo de impacto	Ecuación		Ecuación
Térmico	Continuo	$QQ_{i-f} = \frac{q(t_i - t_f + \Delta t_{i-f})}{t_f - t_{fi}}$	3.24
	Lineal	$Q_{i-f} = Q_m = V_m \cdot S_{i-f}$	3.29
	Discontinuo	Se $\Delta t_{i-f} > \Delta t_{fi}$ : (para $\Delta t = \Delta t_{total}$ ); Se $\Delta t_{fi} > \Delta t_{i-f}$ : (2.32) $t_f = t_i - \Delta t_{i-f} \left( \frac{Q_{i-f1}}{q} \right)$ e $t_{f1} = t_i - \Delta t_{i-f} \left( \frac{q}{V_m \cdot S_{i-f1}} \right)$	3.31 3.32
Gases	$Q_{go} = IQA_g q_{ge} P_e$ , $Q_e = \left( \frac{S}{t} \right) (L + 120)$ , $Q_e = \frac{L \cdot S}{t} \ln \left( \frac{C_e}{VLA} \right)$	3.43 3.44 3.45	
Polvos	$Q_p = \frac{Q_i \cdot VLA_p \cdot P}{60 C_p}$ , $Q_p = \frac{E_p}{60(VLA_p - C_{ep})}$	3.54 3.55	
Hombres	$q = VLA_h N^*$		3.73
General	$q = VLA_h N + VLA_d P_m$		3.73
Iluminación y radiación	$Q_1 = \frac{ES\delta}{\phi\mu}$ (iluminación), $Q_2 = Q_1 \left( \frac{WL_1}{WL_2} \right)^{1.85}$ (radiación)		3.94 3.96
	$Q_{sb} = \frac{LHD_p P_{pi}}{P_{pi} N_b}$ (explosiones), $MSI = \frac{GAM}{GTAM}$ (incendios)		3.110 3.113

\* Sin considerar caudal para equipos diesel

Se recomienda tener una referencia sobre la *velocidad crítica* del aire, que es la mínima velocidad que permite mantener el aire del ambiente subterráneo en condiciones saludables para los trabajadores (hombres). Los estudios de aplicación en las minas de Neves Corvo, Panasqueira y San Rafael permiten expresar que esta velocidad es de 0,5 a 0,8 m/s.

Otro procedimiento en la determinación del caudal mínimo de aire requerido para la atmósfera subterránea es aplicando la ecuación (3.58), que considera el caudal mínimo de aire para todos los contaminantes ambientales.

Las condiciones que permiten adoptar el caudal de aire de la medida correctiva para todos los contaminantes están indicadas en el Cuadro 11.21.

Cuadro 11.21 Condiciones que permiten adoptar el caudal de medida correctiva conjunta (térmica, dinámica, volumétrica, debido a polvos y gases)

Condición	Caudal a adoptar	Condición	Caudal a adoptar
Se $Q_{mt} > Q$	$Q_{mt}$	Se $q > Q$	$q$
Se $Q_{mt} < Q$	$Q$	Se $q < Q$	$Q$

El procedimiento térmico para obtener el caudal de aire requerido es mediante un sistema de ventilación principal, ventilación auxiliar o ventilación natural. Para el impacto ambiental sonoro es posible optar por las medidas de control detalladas en la sección 3.7.6 del Capítulo 3 Segunda Parte.

**11.7.2. Medidas de prevención y corrección para el impacto ambiental en el dominio ambiental del agua**

La búsqueda de alternativas para la prevención y corrección del impacto ambiental debido al caudal de agua subterránea está relacionada con las técnicas de impermeabilización, drenaje por gravedad y bombeo. Entre estas técnicas la más económica es el drenaje por gravedad y después el bombeo cuando ya no es posible drenar.

Los detalles del proceso de diseño del sistema de bombeo están en la sección 4.6.1 del Capítulo 4 de la Segunda Parte del presente estudio, expresadas mediante las ecuaciones 4.11 a 4.17.

Para la prevención y corrección del impacto ambiental debido a la calidad del agua de mina (pH, metales pesados, concentración de sólidos, etc) existen dos procesos: tratamiento activo y pasivo, desarrollado en la sección 4.5.2 del Capítulo 4 de la Segunda Parte.

El tratamiento químico activo de las aguas ácidas de mina (AMD) para remover los metales y la acidez es con frecuencia un proceso costoso, pero los sistemas pasivos pueden ser ejecutados como una solución permanente para muchos tipos de aguas ácidas de minas a un costo mucho menor (Faulkner, B.B. *et al.*, 1994).

La tecnología pasiva incluye: los estanques, los drenes anóxicos de piedra calcárea (ALD), los sistemas de producción de alcalinidad sucesiva (SAPS), las lagunas de piedra calcárea y las zanjas de piedra calcárea (OLC).



La selección de un sistema pasivo apropiado se basa en la química, la tasa de escurrimiento, la topografía local y las características del sitio (Hyman, D.M. et al., 1995) y requiere mejoras continuas.

La fig. 11.30 (adaptado de Hedin, R.S., *et al.* 1994) resume el proceso actual en la selección del sistema pasivo apropiado para varias condiciones. En general, las aguas alcalinas pueden ser tratadas en estanques aeróbicos; los ADL pueden tratar agua con bajo Al,  $Fe^{3+}$ ,  $O_2$ ; los SAPS, lagunas anaeróbicas y los OLC pueden tratar agua ácida con alto contenido de Al,  $Fe^{3+}$ , y  $O_2$ .

### 11.7.3. Medidas de prevención y corrección para el impacto ambiental en el dominio ambiental roca

Entre las medidas de prevención y corrección utilizadas ampliamente en excavaciones subterráneas están las relacionadas con la instrumentación y con los *sistemas de soporte*, cuya tecnología de selección y diseño para diferentes condiciones del medio rocoso y aberturas subterráneas se han desarrollado en la sección 3.7.6 del Capítulo 3 de la Segunda Parte de este estudio.

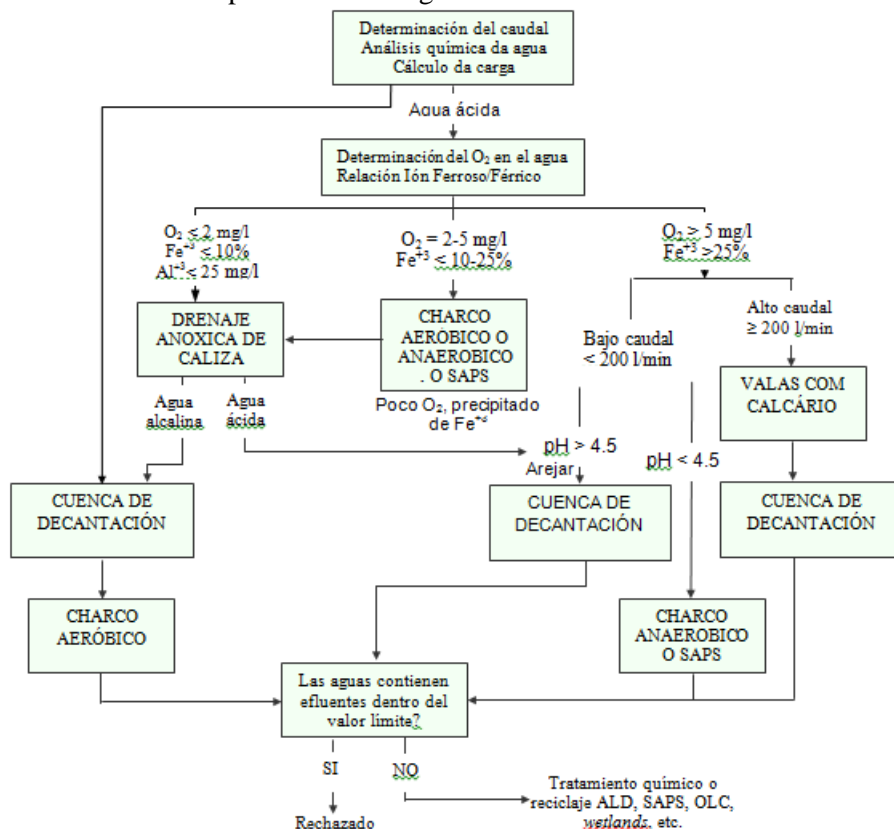


Figura 11.30 Diagrama para la selección del método de tratamiento pasivo de drenaje ácido de minas basado en la química y caudal de agua (Hedin, R.S. et al., 1994)

### 11.8. Programa de monitoreo y control

Las normas legales de nivel general (Unión Europea) o a nivel de país (Portugal, etc.) contemplan la necesidad de que los estudios de impactos ambientales incluyan un *programa de monitoreo y control* denominado también programa de vigilancia ambiental.

Este programa debe establecer un sistema que garantice el cumplimiento de las medidas de prevención y corrección contenidas en el estudio de impacto ambiental. Es decir, plantea la cuestión de si las medidas de prevención y corrección previstas como resultado del EIAS (Estudio de Impacto Ambiental Subterráneo) responderán positivamente en los términos propuestos en el momento de su incorporación al proceso de ejecución del proyecto.

Partiendo de la situación actual de referencia, sin proyecto, y con base en el seguimiento previsto, es posible efectuar una evaluación futura, en un momento determinado, y verificar en que medida se cumplen las predicciones de los impactos y las medidas correctivas y decidir la necesidad o no de adoptar nuevas medidas.

El programa de monitoreo y control (programa de vigilancia ambiental) debe ser elaborado por el equipo proyectista, en su primera fase (sin proyecto) y por el equipo auditor posteriormente (con el proyecto en ejecución).

Además, el programa de monitoreo y control, útil en la mejora del sistema de gestión ambiental, sirve también para informar al sector administrativo responsable del aspecto ambiental, de la actividad que se ocupará de los factores e indicadores que sean posible medir, establecidos en el EIAS.

Los aspectos cubiertos por el programa de monitoreo y control son:

- Introducción correcta y garantizar el nivel adecuado de eficacia de las medidas de prevención, protección, correctivas o compensatorias;
- La medición de los impactos residuales cuya total corrección no sea posible, comparándolo con las observaciones realizadas durante la ejecución del proyecto y con los previstos en el EIAS;
- La medición de otros impactos no previstos de posterior aparición durante la ejecución del proyecto, sean o no consecuencia de las medidas correctivas.

En el proceso de realizar el programa de monitoreo y control es necesario utilizar procedimientos técnicos confiables y estandarizados.

Para la atmósfera subterránea existen normas y regulaciones legales en diferentes países alrededor del mundo, como un asunto de Seguridad, Higiene y Salud. Por lo tanto, conviene revisar y dar carácter ambiental a esas normas y regulaciones.

En relación al agua subterránea se pueden aplicar las normas y regulaciones existentes para aguas y en particular para el drenaje ácido de minas.

La parte ambiental de la roca constituye un dominio muy complejo, por lo que existe dificultad en legislar, por lo tanto es recomendable utilizar los estándares de referencia existentes para condiciones similares obtenidos de las experiencias *in situ* y en laboratorio.

### **11.9. Informe final**

La síntesis del proceso, la comunicación de todos los aspectos estudiados, analizados y evaluados se presenta en un informe final.

El informe final debe tener calidad técnica, ser comprensible, de fácil lectura, de estructura no compleja y progresiva; de manera que el público en general y la administración ambiental puedan juzgar y decidir sobre la admisibilidad ambiental del proyecto.

En cuanto al contenido, debe ser similar al determinado por las normas existentes para los estudios de impacto ambiental en el exterior. Aquí se propone una adaptación de la EPA de los Estados Unidos de América:

- Introducción y discusión de la acción propuesta;
- Estudio ambiental de la situación pre-operacional;
- Descripción del proyecto (diseño, implantación, operación y abandono y cierre);
- Acciones que pueden actuar sobre el ambiente en las distintas fases del proyecto;
- Factores susceptibles de recibir impactos;
- Posibles impactos sobre el ambiente;
- Alternativas de acción previstas;
- Impactos mayores y medidas para minimizar;
- Impactos negativos que no son posibles de evitar o son de alto costo;
- Relación entre la utilización de los recursos ambientales a corto plazo con la productividad a largo plazo;
- Usos irreversibles o insustituibles de los recursos;
- Comentarios recibidos durante el proceso de investigación o de la realización del EIAS;
- Discusión de los resultados obtenidos en la evaluación cuantitativa y cualitativa y en relación al impacto residual;
- Propuesta de estudios complementarios y de detalle cuando sean necesarios;
- Conclusiones;
- Programa de monitoreo y control.



## Capítulo 12

# SISTEMAS DE GESTIÓN PARA EL AMBIENTE SUBTERRÁNEO

### 12.1. Sistema de Gestión Ambiental (EMS) /ISO 14001

#### 12.1.1. Aplicación del sistema al ambiente subterráneo

Los problemas de contaminación y desequilibrio ambiental producidos por el hombre en el ambiente subterráneo (atmósfera subterránea, agua subterránea, roca en interacción con el hombre), deben ser tratados con base en las normas legales y la administración de la salud y seguridad del trabajo (fig. 12.1).

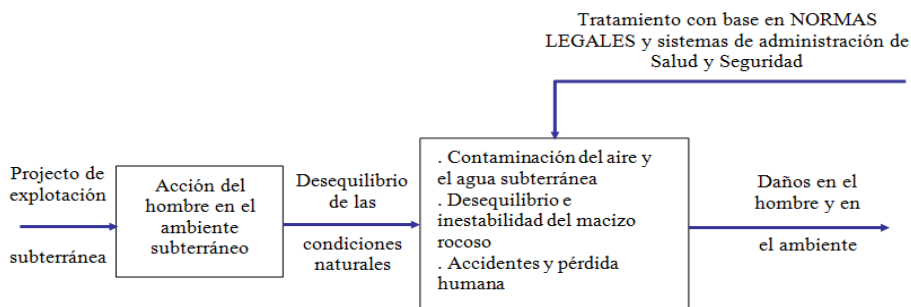


Figura 12.1 Tratamiento actual de los accidentes ambientales en el ambiente subterráneo

Los accidentes que ocurren diariamente en los trabajos subterráneos, provocan considerables daños en el hombre y en el ambiente, demostrando que la sola aplicación de las normas legales no es suficiente para evitar o reducir este grave problema, y por lo tanto, existe una gran necesidad de buscar procedimientos proactivos.

La norma ISO 14000, mediante la serie 14001 considera precisamente este procedimiento (proactivo) desafiando a la organización a caracterizar sus *aspectos ambientales*, a establecer sus propias metas y objetivos, a comprometerse para adoptar procesos efectivos y confiables para la mejora continua y hacer que los empleados y directores practiquen un sistema de prevención, formación y responsabilidad compartida, donde el cumplimiento de las normas legales sea más que un documento a considerar.

La ISO 14001 fue preparada para su aplicación en organizaciones de cualquier tipo y tamaño y para adecuarse a diversas condiciones geográficas, sociales y culturales, lo mismo que la tecnología no constituye requisito en ninguna parte de la norma. El único requisito tecnológico es la obligación de considerar el uso de procesos, prácticas, materiales o productos que eviten, reduzcan o controlen la contaminación, mediante el reciclado, el tratamiento, los cambios en el proceso, los mecanismos de control, el uso eficiente de recursos y la sustitución de materiales (Cascio, J. *et al.*, 1996).

Siendo una norma de mucha importancia en la prevención y cumplimiento de los compromisos ambientales de una organización y no existiendo restricciones

de ningún tipo y siendo que se puede adecuar a diversas condiciones geográficas, como en el ambiente subterráneo existen serios problemas de tipo ambiental, se considera altamente positivo la aplicación de la norma ISO 14001 en la gestión del ambiente subterráneo, siendo las normas legales un elemento que participa en conformidad con los estándares de calidad del ambiente subterráneo (fig. 12.2).

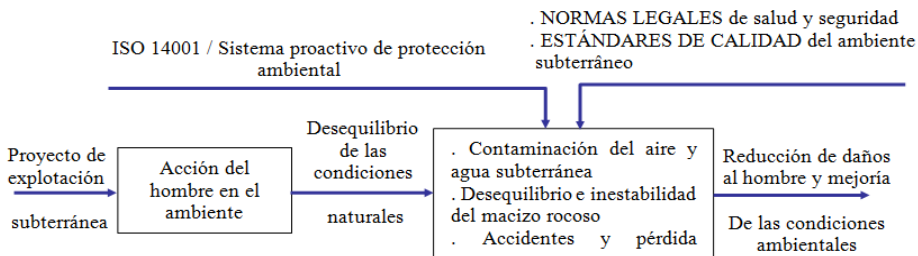


Figura 12.2 La ISO 14001 en la gestión del ambiente subterráneo

Como un aspecto adicional, la ISO 14001 considera que los beneficios potenciales de la prevención de la contaminación ambiental incluyen la reducción de los impactos ambientales adversos, eficiencia mejorada y *reducción de costos*, obligando a los funcionarios de la organización, a considerar estas opciones aunque la solución seleccionada permita controlar la contaminación. Este requerimiento contempla el aspecto de la viabilidad económica de las alternativas de las medidas correctivas a utilizar, siendo esta cuestión muy importante en todo proyecto de ingeniería.

### 12.1.2. Gestión ambiental estratégica y mejora continua con la ISO 14001

Cuando una empresa minera decide obtener la certificación de la norma ISO 14001 debe seguir una ruta ilustrada en la fig. 12.3 y Cuadro 12.1 que muestran la secuencia de acciones a realizar para la aplicación del EMS, que comprende 5 secciones principales con un total de 17 elementos.

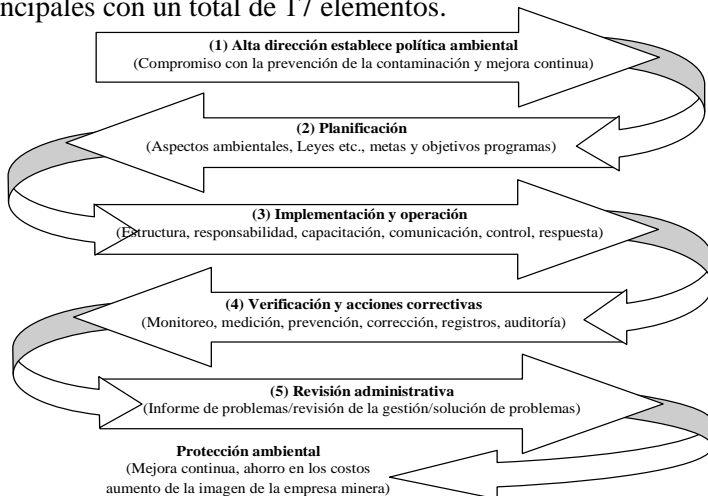


Figura 12.3 Elementos secuenciales en la implementación estratégica de la ISO 14001 (Martin, R., 1998)

No es recomendable elaborar un procedimiento muy complicado, y es conveniente abordar solamente aquí lo que está relacionado con la intención de la norma. Un procedimiento funcional puede ser:

- Asegurar la colaboración de todas las partes responsables del sistema. La dirección de la empresa debe fomentar la total participación de los trabajadores relacionados con el proceso.
- Simplificar el proceso recomendado por los participantes con método de reducción sucesiva hasta conseguir diferenciar entre temas de *formación* y temas *operacionales*.
- Poner en circulación el proceso con carácter provisional y período de prueba y pedir la opinión de los participantes, de cuyo resultado eliminar o aumentar según sea necesario. Luego de este periodo oficializar el documento y revisar en forma periódica para garantizar la mejora continua.

Cuadro 12.1 Secciones y elementos de la norma ISO 14001  
(Davis, P., 1998, NSF International, 1996)

Secciones (5)	Elementos (17)
4.1 Política ambiental	4.1. Política ambiental
4.2 Planificación	4.2.1 Aspectos ambientales 4.2.2 Legal y otros requerimientos 4.2.3 Metas y objetivos 4.2.4 Programa(s) de administración ambiental
4.3 Implementación y operación	4.3.1 Estructura y responsabilidad 4.3.2 Capacitación, concienciación y competencia 4.3.3 Comunicación 4.3.4 Documentación del EMS 4.3.5 Control de documentos 4.3.6 Control operacional 4.3.7 Preparación y respuesta a emergencias
4.4 Verificación y acciones correctivas	4.4.1 Monitoreo y medición 4.4.2 Inconformidad y acción correctiva y preventiva 4.4.3 Registros 4.4.4 Auditoría de sistemas de administración ambiental
4.5 Revisión administrativa	4.5 Revisión administrativa

Como se ilustra en la fig. 12.3 los elementos de los niveles iniciales son los mas críticos del sistema ya que sirven de apoyo a los superiores, en el nivel 1 está el elemento base que es el compromiso de la alta dirección con la política ambiental, en el nivel 2 están las metas y objetivos ambientales y en el nivel 3 el programa de control ambiental integrado por los procesos, prácticas, procedimientos y líneas de responsabilidad.

Una información importante que alimenta al proceso es la revisión administrativa que proviene de las auditorías EMS que comprende el nivel 4. El fin de esta auditoría es asegurar que el EMS funcione como se espera.

La efectividad y avances conseguidos por la EMS son evaluados periódicamente mediante la revisión administrativa localizada en el nivel 5. En el último nivel está la meta final que es el objetivo final que consiste en lograr una

mejora constante con el fin de asegurar que la organización cumpla de forma consistente y confiable sus obligaciones ambientales y de protección.

El *National Center for Environmental Decision-Making Research (NCEDR)* de la *Universidad de Tennessee* considera 5 fases o pasos a seguir en la aplicación de la norma ISO 14001 hasta la obtención de la certificación (fig. 12.4).

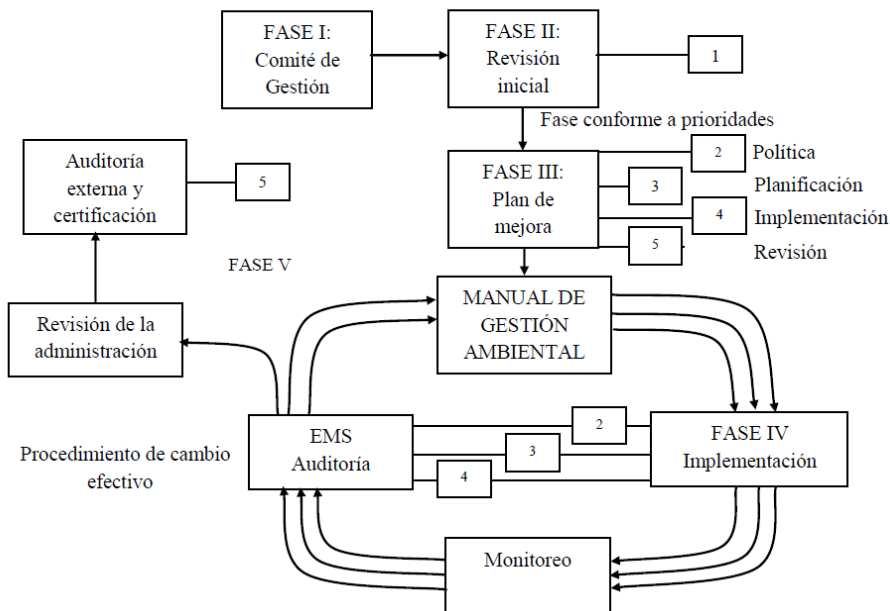


Figura 12.4 Fases del sistema de gestión ambiental ISO 14001 en la obtención de la certificación (Martin, R., 1998)

Algunas instituciones dedicadas a la aplicación de la ISO 14001 consideran 3 fases con 24 pasos como ISOTOP (<http://www.isotop.net/11a.asp>) y otros consideran 10 pasos como LEHDER ([http://www.lehder.com/factsheets/ehs/ehs\\_factsheet\\_iso.html](http://www.lehder.com/factsheets/ehs/ehs_factsheet_iso.html)).

### 12.1.3. Revisión inicial

Tomada la decisión de obtener la certificación mediante la norma ISO 14001 se conforma el comité, el paso inicial consiste en determinar el estado actual de los programas ambientales de la empresa minera. En el caso del ambiente subterráneo de minas en operación se debe caracterizar el programa de salud y seguridad existente.

Cada especificación de la norma debe ser revisada, inclusive la política, exigencias legales, capacitación, objetivos y metas, sistemas de control operacionales, documentación, monitoreo y control, revisión de la administración y acción correctiva.

Se debe considerar la condición operacional, incluyendo posibles incidentes y situaciones de emergencia que pueden ser encontradas, así como la habilidad de proveedores y subcontratistas para acordar con la empresa el programa EMS y la norma legal aplicable.



La revisión inicial considera la parte de la contabilidad, los sistemas de computación, las adquisiciones, la utilización de energía y otros programas de administración. El enfoque debe ser para alcanzar la eficiencia operacional que asegure mejoras ambientales y minimice el costo de la protección ambiental.

El análisis inicial permite una rápida determinación del sistema de gestión ambiental y los procedimientos para compararlo con las exigencias de la norma. El modelo puede ser un cuestionario.

La revisión inicial debe evaluar las normas internas actuales de la empresa relacionadas con el ambiente, salud y seguridad, como prácticas operacionales y directrices, además de normas externas y reglamentos.

#### 12.1.4. Política ambiental de la empresa minera (4.1)

La empresa minera debe definir una declaración de sus intenciones y principios en relación con su desempeño ambiental que proporcione un marco de acción y para el establecimiento de sus objetivos y metas ambientales.

Para obtener resultados satisfactorios del EMS es indispensable el compromiso de todos los niveles de la estructura orgánica, siendo el compromiso de la alta dirección de máxima importancia.

Tal hecho exige que la organización defina su política ambiental (Cuadro 12.2), que garantice la satisfacción de las siguientes condiciones:

Cuadro 12.2 Modelo del establecimiento de la política ambiental de una empresa minera

Política ambiental de una empresa minera
<p><i>a) Compromiso de mejora constante y prevención de la contaminación:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Realizar prácticas de tecnología limpia y de elementos no contaminantes que permita una mejora continua y un desarrollo sustentable;</li> <li>○ Restaurar los recursos naturales donde sea posible;</li> <li>○ Prevenir la contaminación y realizar un proceso productivo de forma que reduzca las emisiones al ambiente a niveles permisibles;</li> <li>○ Aplicar procedimientos y metodología adecuadas durante el ciclo de vida, que permita proteger el ambiente;</li> <li>○ Desarrollar la conciencia ambiental en el personal de todo nivel en el sentido de que la interacción con las instalaciones, equipos y otros recursos conduzcan a la reducción de los riesgos ambientales.</li> </ul> <p><i>b) Cumplimiento de las normas legales vigentes y uso de tecnología adecuada:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Cumplir con todos los dispositivos legales, reglamentos, estándares y otros dispositivos vigentes aplicables a las operaciones mineras;</li> <li>○ Adoptar soluciones tecnológicas ambientalmente aplicables, prácticas, eficientes y aplicables económicamente;</li> <li>○ Asumir la responsabilidad ambiental ante el personal de la empresa y la comunidad.</li> </ul> <p><i>c) Establecimiento y revisión de objetivos ambientales:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Dimensionar y adoptar equipos, procesos, metodologías y técnicas con conciencia ambiental de modo de reducir el consumo de recursos, incluyendo químicos y energéticos;</li> <li>○ Comunicar al personal de todos los niveles (de la empresa, contratistas, subcontratistas y proveedores) para la toma de conciencia y contribución en el proceso del sistema ambiental;</li> <li>○ Mantener el centro de trabajo seguro y saludable para todo el personal.</li> </ul>

- La política ambiental de la empresa debe ser relevante a la naturaleza, al nivel de impactos ambientales de sus actividades de explotación subterránea, sus productos y otras actividades conexas, o sea la política debe ser concordante con sus propias necesidades y realidades.
- Debe incluir un compromiso a favor de la mejora continua, la prevención de la contaminación, el acatamiento a la legislación y reglamentación ambiental aplicable y otras que la organización suscriba.
- El anterior compromiso, debe ser apoyado con una serie de objetivos y metas concretas y muy bien definidas, o sea cuantificadas para permitir medir la eficacia y los avances en la consecución de los objetivos.
- La política ambiental de la empresa debe estar documentada, implantada, actualizada, comunicada a los empleados y estar a disposición del público.

### 12.1.5. Planificación ambiental (4.2)

Después del establecimiento de la política ambiental la ISO 14001 requiere que la empresa desarrolle un plan para cumplir esa política, en consecuencia la organización debe considerar:

**a) Aspectos ambientales (4.2.1):** la norma define aspectos ambientales como *cualquier elemento de las actividades, productos y servicios que pueden interactuar con el ambiente*, considerando como un aspecto *muy ambiental* aquello que *tiene o puede tener un impacto ambiental significativo*.

En el caso del ambiente subterráneo el entorno en que la empresa opera es la interacción del aire de la atmósfera subterránea, el agua subterránea, el macizo rocoso, el hombre (en el medio subterráneo y exterior) y la biodiversidad en el medio exterior (por la descarga de aguas subterráneas, subsidencia, escombros y estériles), los que sufren una alteración de sus condiciones naturales ocasionadas por la explotación subterránea provocan un impacto ambiental negativo (Cuadro 12.3).

Cuadro 12.3 Modelos de aspectos e impactos ambientales

Aspectos ambientales	Impactos ambientales
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Baja cantidad y velocidad alta/baja del aire</li> <li>○ Emisiones de gases de motores diesel</li> <li>○ Emisiones de partículas de motores diesel</li> <li>○ Emisión de gases de detonación de explosivos</li> <li>○ Emisión de partículas de roca y metales</li> <li>○ Emisión de gases y partículas explosivas</li> <li>○ Emisión acústica y radiación</li> <li>○ Escurrimiento de agua subterránea</li> <li>○ Drenaje ácido de agua subterránea</li> <li>○ Descarga de aguas ácidas y contaminadas</li> <li>○ Inestabilidad del macizo rocoso</li> <li>○ Daños del macizo rocoso</li> <li>○ Operación con uso de energía eléctrica</li> <li>○ Generación y disposición de material estéril</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Niveles de gases tóxicos e cancerígenos</li> <li>○ Niveles de polvo</li> <li>○ Niveles de gases tóxicos</li> <li>○ Niveles de sílice, etc., metales y polvo</li> <li>○ Niveles de explosión e incendios</li> <li>○ Niveles de radiación</li> <li>○ Niveles de influencia en la roca e inundaciones</li> <li>○ Impactos en la flora, fauna, diversidad y hábitat, tierras agrícolas y forestales</li> <li>○ Impacto en el macizo rocoso, flora, fauna y tierras agrícolas y forestales</li> <li>○ Niveles de uso de energía, impacto visual, etc.</li> </ul>

El personal encargado de los registros deberá catalogar y categorizar los elementos ambientales en relación a su impacto y los que considere importantes.

**b) Aspectos legales y otros requerimientos (4.2.2):** la empresa debe identificar y catalogar los requerimientos de tipo legal o de otro tipo que la empresa haya adoptado para sus operaciones. En el caso de que el producto sea destinado al mercado de otros países, como es el caso de las minas metálicas, es esencial considerar las leyes ambientales aplicables del país de origen y de destino. En el modelo presentado en el Cuadro 12.4 se considera el nombre de las leyes en muchos países, más puede variar de un país a otro.

Cuadro 12.4 Modelo de identificación y catalogación de requerimientos legales

Leyes y normas relacionadas con los aspectos ambientales
<p>a) <i>A nivel general</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Leyes de seguridad, higiene y salud</li> <li>○ Ley del ambiente, aire limpio, del ruido</li> <li>○ Leyes de aguas superficiales y subterráneas</li> <li>○ Ley de contaminantes y de protección ambiental</li> <li>○ Ley de estudio, evaluación y gestión ambiental</li> <li>○ Ley de control y denuncia de minería superficial y/o subterránea</li> <li>○ Ley de conservación y recuperación de recursos</li> <li>○ Ley para el control de sustancias peligrosas para la salud y el ambiente</li> <li>○ Ley de planificación de sustancias peligrosas</li> <li>○ Ley de cierre de minas</li> <li>○ Ley de protección ambiental de la flora, fauna, tierras agrícolas y forestales</li> <li>○ Ley de salubridad pública</li> <li>○ Ley de zona de protección ambiental</li> <li>○ Ley de daños ambientales</li> <li>○ Ley de disposición de escombros e impacto visual</li> <li>○ Reglamentos internos de ambiente, seguridad, higiene y salud</li> </ul> <p>b) <i>En Portugal</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Decreto-ley Nro.162/90 del 22 de mayo de 1990, Reglamento general de Seguridad e Higiene en el trabajo en las Minas y Canteras</li> <li>○ Decreto-ley n.º 270/2001 del 6 de octubre de 2001, Explotación de masas minerales – canteras</li> <li>○ Decreto Reglamentario n.º 09/92 del 28 de abril, Reglamentación sobre ruido</li> <li>○ Decreto-ley n.º 292/2000 del 14 de noviembre de 2000, Reglamento general de ruido</li> <li>○ Decreto-ley n.º 236/98 del 1 de agosto de 1998, Ley de Aguas, etc.</li> </ul> <p>c) <i>En Perú</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ D.S. No 014-92-EM del 04 de Julio de 1992, Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería</li> <li>○ D.L.No. 613-90-PE del 07 de septiembre 1990, Código del Medio Ambiente y Recursos Naturales</li> <li>○ Ley No. 26786 del 12 de mayo de 1997, Ley de Evaluación de Impacto Ambiental para Obras y Actividades</li> <li>○ D.S. No. 016-93-EM del 28 de abril de 1993, Reglamento para la protección ambiental en la actividad minero – metalúrgica</li> <li>○ D.S. No 023-92-EM del 09 de octubre de 1992, Reglamento de Seguridad e Higiene Minera, etc.</li> </ul>

**c) Objetivos y metas (4.2.3):** la norma define como *objetivo ambiental* el que surge de la política ambiental que una empresa establece para conseguir

realizarla, pudiéndose cuantificar cuando es práctico y, como *meta ambiental*, los requerimientos de desempeño detallados, cuantificados cuando sea práctico, aplicables a la empresa, o a parte de ella, que surgen de los objetivos y precisan ser establecidos y realizados para conseguir esos objetivos (Cuadro 12.5). Los fines y metas deben concordar con la política ambiental.

Cuadro 12.5 Modelo de definición de objetivos y metas para la gestión del ambiente subterráneo de una mina en operación

Objetivos y metas para el ambiente subterráneo de la empresa minera
<p>a) <i>Objetivo: Prevenir y reducir las emisiones de polvos y gases</i></p> <p>Metas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Evaluar y poner en práctica acciones para dotar de caudal y velocidad de aire adecuados</i> Dotar de un caudal de aire mayor al mínimo permisible en 100% del ambiente para 2005 Dotar de aire con velocidad admisible en 100% del ambiente para 2005</li> <li>○ <i>Realizar el estudio de impacto ambiental y poner en práctica para prevenir y reducir las emisiones de polvos y gases de equipos con motor diesel – gases de la detonación de explosivos</i> Dotar de sistemas de filtro y catalizador de gases al 100% de los equipos diesel para 2004 Reducir la concentración de polvos al nivel permisible en 50% de los tajeos para 2004 Reducir la concentración de polvos al nivel permisible en 100% de los tajeos para 2005</li> <li>○ <i>Realizar el estudio de impacto ambiental y poner en práctica para prevenir y reducir las emisiones de polvos de rocas, minerales y metales</i> Reducir a niveles permisibles la concentración de sílice libre en 60% de los tajeos para 2004 Reducir a niveles permisibles concentración de sílice libre en 100% de los tajeos para 2006 Reducir a niveles permisibles concentración de metales tóxicos en 90% de tajeos para 2005</li> <li>○ <i>Evaluar y poner en práctica acciones para reducir el riesgo de explosiones e incendios</i> Reducir a niveles permisibles la emisión de metano en 90% de los tajeos para 2005 Reducir a niveles aceptables la concentración do polvo de carbón en 100% de los tajeos para 2006</li> </ul>
<p>b) <i>Objetivo: Prevenir y reducir las emisiones acústicas y radiación</i></p> <p>Meta:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Evaluar el impacto ambiental acústico y de radiación y poner en práctica acciones de reducción y de protección</i> Dotar de sistemas de protección auditivos adecuados al 100% del personal afectado para 2004 Capacitar sobre las causas y consecuencias del ruido y radiación al 100% del personal para 2006 Dotar de sistemas de protección para la radiación al 100% del personal afectado para 2004</li> </ul>
<p>c) <i>Objetivo: Prevenir y reducir las descargas de agua subterránea</i></p> <p>Metas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Evaluar el impacto ambiental debido a la presencia de caudal de agua en los frentes de trabajo</i> Sistema de bombeo adecuado para el control de agua que precisan control de aguas residuales, Noviembre 2004 Sistema de alcantarillas para control del agua en zonas de drenaje por gravedad, Noviembre 2004</li> <li>○ <i>Evaluar el impacto ambiental debido a descargas de agua de minas</i> Obtención del pH del agua a niveles permisibles para Julio de 2004 Reducir a niveles permisibles la concentración de metales para Febrero de 2004</li> </ul>
<p>d) <i>Objetivo: Prevenir y reducir el riesgo ambiental por inestabilidad y desprendimiento de rocas</i></p> <p>Metas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Evaluar todos los procesos de excavación o abertura en rocas para reducir el 40% de accidentes para 2004, 65% para 2005 y 100% para 2006</li> <li>○ Evaluar el comportamiento geotécnico del macizo rocoso en la parte superior de la zona de los tajeos para prevenir el riesgo de subsidencia para 2005</li> <li>○ Iniciar con un cambio del método de explotación subterránea mas adecuado a partir del primer trimestre de 2006</li> </ul>

**d) Programa de gestión ambiental (4.2.4):** proporciona los elementos necesarios para conseguir las políticas de la empresa, para garantizar la protección ambiental y permitir una mejora constante. Está influenciado por las políticas, su aspecto ambiental, leyes y normas. El programa consta de pasos de acción, recursos y responsabilidades establecidas.

Las herramientas para poner en práctica el programa de control ambiental son: proceso de documentos; prácticas; procedimientos; capacitación y concienciación del personal; y plan de emergencia.

Como aspecto importante, el programa de control ambiental debe designar responsabilidades para cumplir con los objetivos y metas estableciendo el tiempo requerido.

El organigrama propuesto es para una mina subterránea con una producción considerada grande ( $\geq 2500$  t/día), que para el caso de empresas menores o con sistemas de explotación no complejas la estructura orgánica puede ser simplificada (fig.12.5).

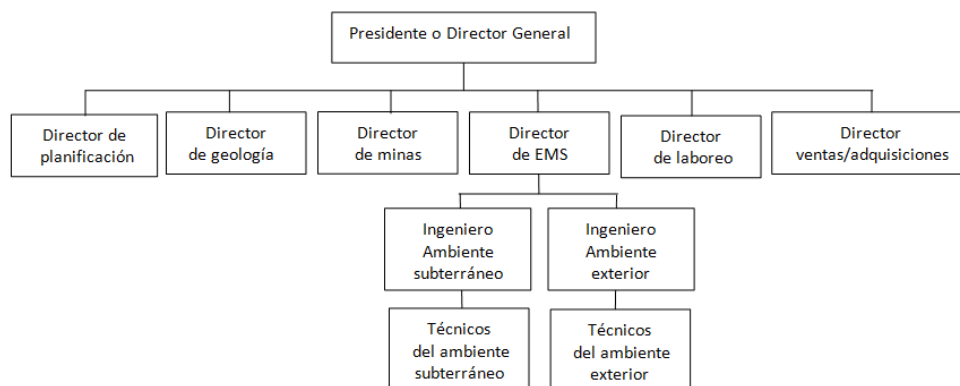


Figura 12.5 Propuesta de un modelo de estructura orgánica de una empresa minera que explota por método subterráneo, con detalle del departamento de EMS

### 12.1.6. Implementación y operación (4.3)

La implantación práctica de un EMS adecuado en una organización puede facilitar la identificación de impactos y riesgos ambientales actuales y potenciales, además de permitir establecer objetivos y metas incluyendo el desarrollo de estrategias eficientes para minimizar los riesgos ambientales en las operaciones. En la implantación y operación del EMS son evaluados los elementos que se indican en el Cuadro 12.6.

Cuadro 12.6 Modelo de elementos típicos del programa de gestión ambiental

Elementos típicos de un programa de gestión ambiental
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Estructura administrativa, responsabilidades, organización y autoridad (organigrama, fig. 4.54)</li> <li>○ Proceso de controles ambientales en todas las actividades del proceso operacional</li> <li>○ Recursos (personal adecuado, recursos financieros, equipos, materiales, energía, etc.)</li> <li>○ Proceso para establecer objetivos y metas para conseguir las políticas ambientales</li> <li>○ Procedimientos y controles operativos a ser utilizados</li> <li>○ Capacitación</li> <li>○ Sistema de medición y auditoría</li> <li>○ Revisión administrativa y panorama general</li> </ul>

**a) Estructura y responsabilidad (4.3.1):** la organización de una empresa se expresa en un organigrama que refleje la estructura administrativa, responsabilidades, organización y autoridades, siendo importante el apoyo de la presidencia o dirección general, las gerencias de línea y los empleados (fig. 12.5).

La empresa que se comprometa a un EMS efectivo, deberá cumplir con las leyes y normas y la prevención ambiental estará encaminada al progreso ambiental, pero una empresa que no lo practique efectivamente no podrá obtener beneficios ambientales

La responsabilidad ambiental debe ser distribuida desde los niveles superiores hasta los empleados, aspecto este que permite proporcionar una retroalimentación regular a los directivos y empleados sobre el cumplimiento del SEM, sus avances, etc. que permitan lograr los objetivos y metas y la política ambiental de la empresa.

**b) Capacitación, concientización y competencia (4.3.2):** la empresa debe especificar los tipos de capacitación que deberán ser proporcionados tales como: entrenamiento para la concientización general; y la competencia de los empleados para realizar una acción determinada (Cuadro 12.7). También es probable que sea necesario capacitar a los contratistas y proveedores cuyas acciones podrían generar impactos ambientales en la empresa.

Cuadro 12.7 Capacitación, toma de concientización y competencia (Martin, R., 1998)

Tipo de capacitación	Audiencia	Propósito
Elevada conciencia sobre la importancia estratégica del EMS	Directores y gerentes de alto nivel	Compromiso con la política ambiental y mejora continua
Elevada conciencia ambiental	Todos los empleados	Compromiso con la política, objetivos, metas y responsabilidad ambiental
Desarrollo de habilidades	Empleados con responsabilidad ambiental	Mejor desempeño en áreas específicas, operaciones e ingeniería
Cumplimiento	Empleados cuyas acciones pueden afectar el cumplimiento	Asegurar que las normas y exigencias internas sean del conocimiento

Todo el personal relacionado con los asuntos ambientales deberá conocer el impacto actual o potencial de sus actividades laborales, el papel que desempeñan, sus responsabilidades y las consecuencias que podría ocasionar la falta de seguimiento del procedimiento (Cuadro 12.8).

El control de la capacitación del personal de las empresas contratistas debe ser: cuando se dan las identificaciones de seguridad, mediante manuales de procedimientos antes del inicio de actividades, seminarios de capacitación obligatorios para contratistas con periodicidad, videos e inspecciones sobre la conformidad en el cumplimiento. En caso de ser detectada una violación de las normas y procedimientos, otorgar capacitación adicional.

Cuadro 12.8 Modelo de capacitación para empleados de una empresa minera

Tipos de capacitación
<p>a). <i>Capacitación sobre emisiones peligrosas, agua subterránea e inestabilidad de rocas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Capacitación sobre polvos y gases tóxicos y explosivos peligrosos</li> <li>○ Capacitación sobre la acción de las inundaciones y aguas ácidas y contaminadas</li> <li>○ Capacitación sobre los riesgos de la inestabilidad y desprendimiento de rocas</li> <li>○ Capacitación sobre la acción en el caso de situaciones de emergencia</li> <li>○ Capacitación de percepción general, funciones y seguridad en actividades de riesgo ambiental</li> </ul>
<p>b). <i>Capacitación en prevención, preparación y respuesta a emergencias</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Capacitación para el control y seguridad en las acciones en condiciones de riesgo ambiental</li> <li>○ Capacitación de respuesta a emergencias ambientales</li> </ul>
<p>c) <i>Otras capacitaciones</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Capacitación de operadores del sistema ambiental con un mínimo impacto</li> <li>○ Capacitación sobre conciencia ambiental para cumplir con la política y procedimientos ambientales y requerimientos del EMS.</li> </ul>

**c) Comunicación (4.3.3):** la empresa debe establecer procedimientos para: a) Mantener comunicación interna entre las diversas funciones y niveles de la organización; y b) Recibir, documentar y responder las comunicaciones importantes de externos interesados en relación a los aspectos ambientales y el SEM (Cuadro 12.9).

Cuadro 12.9 Modelo de comunicación interna y externa

Comunicación interna y externa
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Presentaciones periódicas del equipo de gestión y empleados sobre aspectos ambientales</li> <li>○ Reuniones abiertas para las familias de empleados, la comunidad que rodea y funciones públicas</li> <li>○ Capacitación en percepción ambiental para empleados, contratistas y proveedores</li> <li>○ Comunicación escrita en forma de publicación periódica o informe anual</li> <li>○ Uso de un número telefónico libre para retroalimentación del público en general</li> </ul>

Por lo tanto, la comunicación con los empleados, con los vecinos y con otros miembros públicos interesados y los clientes es la clave para el buen control ambiental.

**d) Documentación del sistema de gestión ambiental EMS y control de documentos (4.3.4 y 4.3.5):** la empresa debe asegurar que el registro oficial sea compatible entre el proceso documentado y la realidad de la práctica, que puede ser escrito en papel o en soporte informático. El soporte informático permite organizar

y distribuir la información con mucha facilidad. La documentación debe contener la fecha de elaboración, revisión y actualización.

Es importante aplicar el dicho: “comunique lo que haga y haga lo que dice”.

Se debe establecer un procedimiento para definir la manera como serán controlados los documentos relacionados con el sistema de gestión ambiental, conservándose los archivos organizados y de fácil identificación. Los elementos de control de documentos son: fecha de emisión y revisión (firmado); identificación del documento; número de copias y referencias.

**e) Control operacional (4.3.6):** a nivel *general* la empresa debe identificar aquellas operaciones y actividades asociadas con los aspectos ambientales importantes en concordancia con su política, objetivos y metas y asegurar su realización (Cuadro 12.10).

Cuadro 12.10 Modelo de procedimientos para el control operacional

Control operacional
<p><i>a) General</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ El establecimiento y mantenimiento de procedimientos documentados que cubran las situaciones en las que su ausencia podría producir cambios en la política ambiental, sus objetivos y metas</li> <li>○ Establecimiento de criterios de operación en los procedimientos</li> <li>○ Establecimiento y mantenimiento de procedimientos relacionados con los aspectos ambientales importantes de bienes y servicios utilizados por la organización y comunicar sobre los procedimientos y requisitos importantes para proveedores y contratistas</li> </ul> <p><i>b) Proveedores</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Pedir información a los proveedores o contratistas sobre las actividades, materiales a utilizar, posibles descargas ambientales e impactos experimentados por ellos</li> <li>○ Exigir que los proveedores y contratistas tengan su propio EMS registrado</li> <li>○ Supervisar las instalaciones de los proveedores y contratistas para garantizar el cumplimiento del EMS</li> </ul>

La empresa debe estar segura de que los proveedores y contratistas comprendan y estén conscientes del EMS de la empresa, de modo que no cometan fallas en su cumplimiento.

El proceso de control de las operaciones se debe realizar antes, durante y después del proceso operaciones, de forma que sea posible tomar las medidas correctivas oportunas (fig. 12.6).

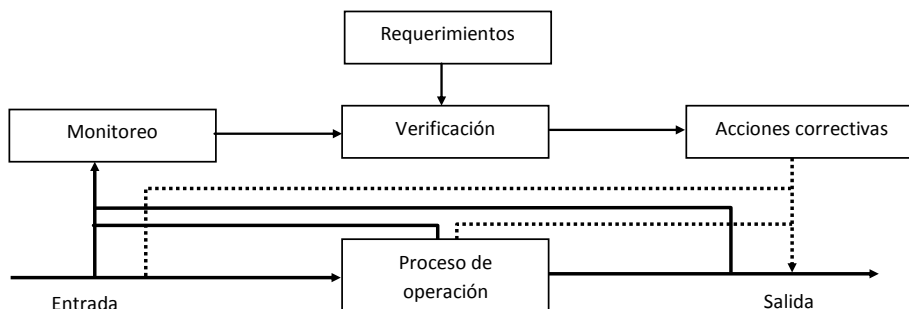


Figura 12.6 Proceso de control operacional en el EMS



**f) Preparación y respuesta a emergencias (4.3.7):** los procedimientos de control operacional están al frente de la línea de defensa para cualquier necesidad de respuesta de emergencia. Sin embargo, la necesidad de estar preparados para una emergencia es parte crítica del EMS. En caso de surgir una emergencia, una respuesta organizada y competente ayudará a minimizar cualquier daño a la salud humana y al ambiente, por lo que es necesario tener un plan de emergencia (Cuadro 12.11).

Cuadro 12.11 Modelo de desarrollo de un plan de emergencia

Elementos a considerar en un plan de emergencia
<p><i>a) Elementos de planificación</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Identificación y descripción de las áreas de almacenaje y uso de sustancias peligrosas (almacén de municiones, reactivos químicos, etc.)</li> <li>○ Identificación de áreas sensibles que pueden ser afectadas por las emisiones peligrosas (escuelas, hospitales, hábitat silvestre, etc.)</li> <li>○ Documentación de métodos utilizados para determinar la ocurrencia de emisiones de una sustancia peligrosa</li> <li>○ Descripción de métodos para evaluar áreas susceptibles a una emisión constante</li> <li>○ Instrucciones para el uso del plan y registrar la lista de las organizaciones y personas que recibirán este plan</li> </ul> <p><i>b) Operaciones, dirección y control</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Designar un coordinador de emergencia que determinará cuando poner en práctica el plan</li> <li>○ Designar personal capacitado en respuesta a emergencias (especialistas en materiales peligrosos, médicos, de seguridad y enlace de comunicaciones)</li> <li>○ Describir los métodos de comunicación a utilizar entre los participantes</li> <li>○ Describir los procedimientos de entrada y salida de los participantes del área del incidente, con las precauciones de seguridad, vigilancia médica y equipo protector del personal</li> <li>○ Descripción del procedimiento ante una emisión de sustancias peligrosas</li> <li>○ Identificar la asistencia exterior como: bomberos, policía y asistencia médica</li> <li>○ Números telefónicos de emergencia y listas de nombres y números de organizaciones y agencias a ser notificados en caso de emergencia</li> </ul> <p><i>c) Administración de recursos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Descripción del equipo de emergencia y equipo auxiliar en la comunidad</li> <li>○ Lista de recursos y personal disponible para casos de emergencias</li> <li>○ Descripción del programa de capacitación para el personal de las instalaciones</li> </ul> <p><i>d) Medidas de protección del personal y procedimientos de evacuación</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Descripción de los planes de evacuación de las instalaciones</li> <li>○ Información sobre evacuaciones preventivas y sobre las instalaciones que proporcionen alimentación, abrigo y atención médica de la población desplazada</li> </ul>

Las técnicas pueden incluir la capacitación del personal, la certificación de los operadores de equipos y sistemas, la participación en grupos de planificación de emergencias de la comunidad, el desarrollo de grupos de investigación de accidentes e incidentes, la participación en investigaciones y conferencias, el desarrollo de programas de seguridad y salud.

**12.1.7. Verificación y acciones correctivas (4.4)**

Consiste en la verificación o vigilancia de las actividades relacionadas con el EMS, así como a los medios y métodos para tomar las medidas correctivas, en caso de detectarse deficiencias.

**a) Monitoreo y medición (4.4.1):** consiste en la recolección constante de datos y un rastreo continuo de parámetros específicos, para evaluar el avance del EMS y el cumplimiento de los objetivos y metas ambientales establecidas (Cuadro 12.12). Un sistema de monitoreo y medición debe comprender:

- . Procedimientos para el monitoreo y medición de los aspectos clave de las operaciones y actividades que pueden tener un impacto significativo.
- . Mecanismos para registrar la información que rastree el desempeño y control de las operaciones importantes;
- . Procedimientos para la calibración de los equipos, a fin de garantizar que los registros sean representativos y confiables (Cuadro 12.13);
- . Procedimientos para evaluar periódicamente el cumplimiento de las leyes y reglamentos ambientales.

Cuadro 12.12 Modelo de monitoreo y método de medición

Métodos de monitoreo y medición	
Características clave	Métodos de monitoreo y medición
<p>a). <i>Caudal, velocidad y temperatura del aire</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. Poco caudal de aire en algunos sitios</li> <li>. Velocidad y temperatura alta/baja en algunos sitios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Sistemas de medición con anemómetros</li> <li>. Sistemas de medición con termómetros</li> </ul>
<p>b). <i>Emisiones al aire</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. Inventario de emisiones tóxicas</li> <li>. Concentración de polvo, sílice libre, etc.</li> <li>. Metano y polvo de carbón</li> <li>. Ruido y radiación de elementos radioactivos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Sistema de medición con detectores de gas</li> <li>. Muestras de polvo con bombas personales y de alto volumen</li> <li>. Sistemas de medición del nivel de ruido y radiación</li> </ul>
<p>c). <i>Caudal y drenaje ácido</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. Caudal de agua en los frentes de trabajo</li> <li>. Concentración de sólidos y metales</li> <li>. Bajo pH por el drenaje ácido</li> <li>. Grasas y aceites generados por la operación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Sistemas de medición de agua conocidos</li> <li>. Muestreo de la descarga en boca de mina</li> <li>. Muestreo del agua superficial aguas arriba y aguas abajo</li> </ul>
<p>d). <i>Inestabilidad y caída de rocas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. Parámetros geotécnicos/geomecánicos rocas</li> <li>. Parámetros dinámicos del macizo rocoso</li> <li>. Dimensión de aberturas y planes de fuego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Muestreo y ensayos en laboratorio de mecánica de las rocas</li> <li>. Ensayos <i>in situ</i> para determinar las tensiones y parámetros dinámicos</li> </ul>
<p>e). <i>Uso de energía</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. Energía consumida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Facturas de energía eléctrica</li> <li>. Inventario (potencia) de equipos eléctricos y tiempo de funcionamiento</li> </ul>
<p>Nota: El inventario de emisiones tóxicas, concentración de sólidos y metales y otros contaminantes en el aire y agua deben ser los indicados en las normas legales o estándares internacionales. Los sistemas de medición deben ser los aceptados por los organismos de calidad de cada país o instituciones internacionales como EPA, MSHA, ISO, ISRM, etc.</p>	

Cuadro12.13 Modelo de matriz de calibración de equipos

Equipos	Frecuencia	Equipos	Frecuencia
Anemómetros	Mensual	Sensor de pH	Diaria
Detector de gas	Antes de cada uso	Espectómetro	Diaria
Colector de polvos	Antes de cada uso	Sensor de temperatura	Trimestral
Detector de llama	Semanal	Ensayos compresión uniaxial	Antes del ensayo
Termómetro	Antes de cada uso	Ensayos compresión triaxial	Antes del ensayo
Alarma alta concentración	Mensual	Ensayos de resistencia a tracción	Antes del ensayo
Sonómetro	Antes de cada uso	Ensayos dinámicos, etc.	Antes del ensayo
Medidor de radiación	Semanal		
Medidor de flujo			

Nota: La frecuencia de calibración de los equipos a ser utilizados debe ser concordante con las exigencias de las normas legales y entidades de normas de calidad como EPA, MSHA, ISO, ISRM, etc.

La ISO 14001 exige que la empresa establezca y mantenga un procedimiento documentado de leyes ambientales para evaluar periódicamente el cumplimiento de estas leyes y normas (Cuadro 12.14).

Cuadro 12.14 Modelo de procedimiento para el cumplimiento de leyes y normas

Cumplimiento de leyes y normas
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Revisión de documentación legal sobre el volumen, velocidad y la temperatura del aire, informe gubernamental requerido, plan y notificaciones de restricciones, registros de capacitación, inspecciones, registros de mediciones, estudios y medidas correctivas aplicadas y otras informaciones.</li> <li>○ Revisión de documentos legales de emisiones de polvos y gases de motores diesel, concentración de polvos, sílice, metales, metano, polvo de carbón, etc., autorizaciones para el uso de equipos, informes, monitoreo y mediciones, horas de operación, registros de eficiencia del sistema de control, registros del consumo de diesel, inventario de emisiones, etc</li> <li>○ Revisión de la documentación legal sobre el caudal y descarga de agua subterránea, incluyendo datos de informes de mediciones y monitoreo en la descarga, aguas arriba y aguas debajo de la descarga en los ríos, plan de control y resultados, datos e informes sobre la acidez y toxicidad del efluente, etc.</li> <li>○ Revisión de documentación sobre el proceso de normalización y control sobre la inestabilidad y caída de rocas, incluyendo ensayos <i>in situ</i> y en laboratorio, mediciones y monitoreos de deformaciones, caracterización geotécnica local, etc., medidas de control y resultados.</li> <li>○ Revisión de documentación sobre inspecciones para garantizar una gestión ambiental eficiente, colocación adecuada de avisos sobre riesgos y calidad del ambiente, señales de advertencias, etc, registros sobre inspección y mantenimiento adecuado de equipos de control ambiental.</li> </ul>

**b) Inconformidad y acción correctiva y preventiva (4.4.2):** la no conformidad es la desviación entre el EMS y los requerimientos de la ISO 14001 y no se debe confundir con el incumplimiento. Puede incluir la política, objetivos y metas, la estructura y responsabilidades, planes de capacitación, requerimientos

operacionales, programa de calibración de quipos, registros, control de documentos, preparación para emergencias y procedimientos de respuesta, monitoreo y medición de planes, auditorías EMS y revisión de la documentación administrativa y la implantación de mejoras del EMS (Cuadro 12.15).

Cuadro 12.15 Modelo de procedimiento para gestión de no conformidades

Aspectos a considerar para la gestión de no conformidades
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Identificación de las causas de la no conformidad u otros métodos</li> <li>○ Identificación de opciones para la acción correctiva y preventiva, incluyendo la modificación u otros controles</li> <li>○ Capacitación del personal</li> <li>○ Implementación de un plan para la acción de medidas correctivas</li> </ul>

**c) Registros (4.4.3):** es fundamental mantener los registros ambientales del EMS. Estos registros permitirán que la empresa muestre la conformidad de la gestión ambiental con la ISO 14001, así como evaluar el progreso para alcanzar los objetivos y metas ambientales (Cuadro 12.16).

Cuadro 12.16 Modelo de registros ambientales de la empresa

Registros ambientales de la empresa
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Informes de incidentes y quejas</li> <li>○ Información de contratistas y proveedores, del proceso operacional y productos obtenidos</li> <li>○ Registro de no conformidades y acciones correctivas y preventivas</li> <li>○ Procedimientos para la preparación y respuesta a emergencias</li> <li>○ Registros de revisión de la dirección, auditoría, inspección gubernamental, capacitación y vigilancia</li> <li>○ Registros de la inspección y calibración de los equipos</li> <li>○ Registros relacionados con impactos ambientales y leyes o normas ambientales</li> </ul>

**d). Auditoría de sistemas de administración ambiental (4.4.4):** la auditoría EMS debe permitir que la empresa determine si el sistema:

- Es cónsono a lo planificado para el control ambiental, incluyendo los requerimientos de la ISO 14001;
- Fue debidamente aplicado y mantenido para su realización;
- Proporciona información sobre los resultados de la auditoría EMS a la dirección, para su revisión.

Los procedimientos del programa de auditoría deben especificar la frecuencia de las auditorías, el ámbito de acción, metodologías, responsabilidades y requerimientos para el proceso y presentación de resultados.

Es conveniente distinguir entre la auditoría EMS exigida por la ISO 14001 y la auditoría de registro realizada por los servicios oficiales con fines de certificación.

La auditoría puede ser conducida por el personal de la empresa o por un equipo de auditorías de terceras partes. En el primer caso debe existir un mecanismo para asegurar su objetividad.

Es importante recordar que esta auditoría es una auditoría del EMS, mas no del desempeño ambiental de la empresa. Por lo tanto, los criterios son establecidos por la empresa y frente a estos criterios es que se practica la auditoría.

El método para la recolección de pruebas puede incluir: entrevistas al personal, revisión de los documentos; observación de las actividades; observación de las condiciones; datos de los ensayos; datos del monitoreo y otros registros. El informe de la auditoría y los descubrimientos tiene un carácter confidencial y contiene importante información (Cuadro 12.17).

Cuadro 12.17 Modelo de temas a considerar en el informe de auditoría EMS

Temas a considerar en el informe de la auditoría EMS
<p><i>a) Organización y personal</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nombre de la empresa auditada y estructura de la organización</li> <li>○ Nombre de los directores y del personal que participa en la auditoría como auditados</li> <li>○ Nombre del equipo de auditoría. Nombre de la empresa del tercer auditor (si fuera el caso)</li> </ul> <p><i>b) Protocolo del auditor</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ámbito, objetivos y plan de la auditoría</li> <li>○ Criterios de auditoría acordados (debe incluir la lista de documentos de referencia contra los cuales se realiza la auditoría)</li> <li>○ Período de la auditoría y lista de distribución del informe</li> </ul> <p><i>c) Descubrimientos de la auditoría</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Identificación de los datos confidenciales asociados con el contenido de la auditoría</li> <li>○ Resumen del proceso de la auditoría</li> <li>○ Descubrimientos de la auditoría y conclusiones en relación a la conformidad de la EMS con los criterios de auditoría SEM</li> <li>○ Descubrimientos de la auditoría y conclusiones en relación si el sistema fue practicado y mantenido debidamente.</li> <li>○ Descubrimientos de la auditoría y conclusiones en relación al proceso de revisión interna si es capaz de asegurar la calidad del EMS</li> </ul>

#### 12.1.8. Revisión administrativa (4.5)

Proporciona el vínculo entre la política ambiental de la empresa, sus metas a largo plazo, los resultados ambientales y la mejora constante. Según la ISO 14001 se debe realizar y documentar la revisión de la dirección a intervalos de tiempo determinados para asegurar que el EMS sea conveniente, adecuado y efectivo.

La dirección tiene responsabilidades únicas y exclusivas dentro de la ISO 14001, que son: política y estrategia ambiental; opinión y acción sobre la revisión del EMS y los resultados de la auditoría; opinión y acción sobre los resultados de desempeño ambiental; acciones de mejora continua; atribuciones del personal capacitado; organización adecuada; recursos financieros y tecnológicos.

Una apropiada revisión administrativa debe garantizar la siguiente información:

- Revisión administrativa anterior y resultados de auditoría;
- Objetivos y metas ambientales frente a los resultados de desempeño;
- Nueva legislación;
- Nuevas expectativas de grupos interesados;
- Cambios aplicables en la tecnología, incluyendo procesos de trabajo;
- Posición financiera y competitiva de la organización;
- Áreas y actividades del negocio;
- Preferencias del mercado;

- Incidentes ambientales, no conformidades y acciones correctivas.

El personal administrativo ambiental debe asegurar una revisión administrativa productiva y efectiva. Sus funciones son: destacar los problemas actuales y emergentes; coordinar con los auditores EMS; supervisar el EMS con los indicadores de procesos y desempeñan que se utilizan; proporcionar guías sobre las medidas de desempeño ambiental a los órganos de línea y de apoyo; y la recolección, análisis y revisión de las medidas de desempeño ambiental. Para la revisión administrativa la dirección puede utilizar métodos formales o informales (Cuadro 12.18).

Cuadro 12.18 Modelo del procedimiento para la revisión administrativa

Métodos formales	Métodos informales
<ul style="list-style-type: none"> <li>Actualización y revisión regular de una serie de indicadores ambientales (gráficos)</li> <li>Revisión del programa y procesos, mediante: requerimientos, flujos del proceso, procedimientos, dependencias de funciones, mediciones, puntos de control y elementos conexos.</li> <li>Revisión de no conformidades y tiempo real revisado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Discusiones de funcionarios de igual nivel y que administran operaciones similares</li> <li>Revisiones no programadas</li> <li>Comunicaciones telefónicas, Email, etc.</li> <li>Reuniones personales</li> </ul>

Finalmente, es posible la modificación de los objetivos y metas ambientales, en el caso de existir una justificación técnica y económica para su realización.

## 12.2. Sistema de Gestión del Ambiente, Salud y Seguridad Ocupacional EHSMS

### 12.2.1. Sistema de gestión de ambiente, salud y seguridad EHS/EHSMS

El sistema de gestión integrado de ambiente, salud y seguridad se conoce como EHS o como EHSMS por sus denominaciones en lengua inglesa *Environmental, Health and Safety* e *Environmental, Health and Safety Management System*, respectivamente. Este sistema permite asegurar al personal la buena salud y seguridad en el trabajo, minimizar cualquier impacto adverso que sus actividades puedan causar al ambiente y contribuir positivamente para la vida de la comunidad local.

Se trata de un sistema integrado de gestión ambiental EMS (*Environmental Management System*) y de la gestión de la salud y seguridad denominado OHSMS (*Occupation Health and Safety Management System*).

Como ya se indicó, el EMS (ISO 14001) es un proceso cíclico y de mejora continua para una eficiente protección ambiental (fig. 12.7).

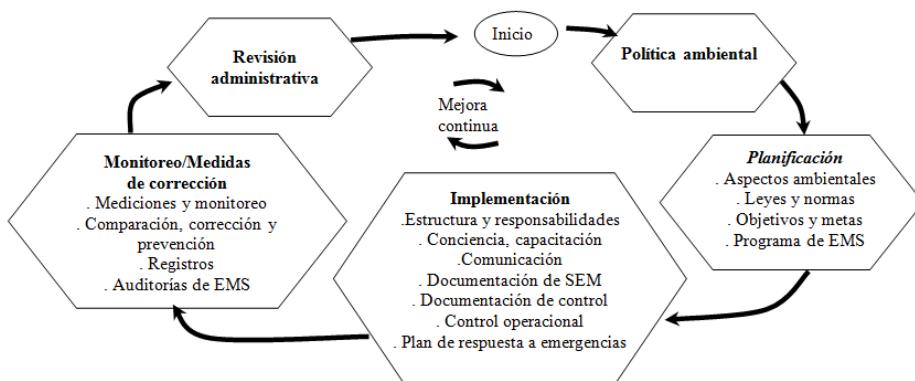


Figura 12.7 Proceso del sistema de gestión ambiental EMS (McClean, R. et al., 2000)

Cook, Adrian (2001) indica que el OHSMS está establecido básicamente por: política; planificación; implementación; monitoreo y corrección; también de carácter cíclico y mejora continua (fig. 12.8). El OHSMS permite la administración de la salud y seguridad ocupacional (OHS) integrado en la estructura de gestión empresarial y a tomar conciencia y responsabilidad por el OHS, realizar las mediciones del alcance del sistema en forma planificada, utilizar el proceso de auditoría administrativa apropiado, adoptar un proceso de mejora continua y reducir accidentes, daños y costos.

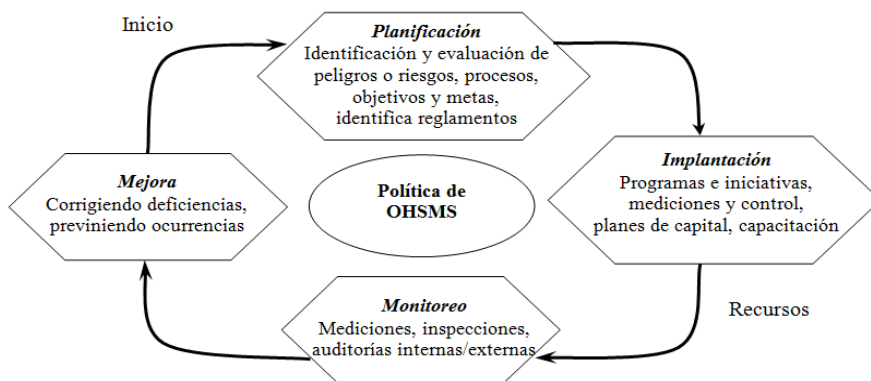


Figura 12.8 Proceso del sistema de gestión de salud y seguridad OHSMS (Cook, Adrian, 2001)

Kloepfer, Robert, (1995) considera que el sistema de gestión integrado EHSMS está compuesto de 10 pasos, siendo su implementación: 1. Organización y dotación de personal adecuado; 2. Políticas y procedimientos; 3. Planificación; 4. Programas del sistema de gestión; 5. Evaluación y revisión; 6. Gestión de los sistemas de información; 7. Registro y presupuesto; 8. Objetivos y metas; 9. Vigilancia legal y regulatoria; 10. Gestión de riesgos y pérdidas.

Kogas también considera 10 elementos principales como requerimientos de la política, implementación y operación del EHSMS (fig. 3.55).

Comparando el EMS con el OHSMS ilustrados en las fig. 12.7 y 12.8 respectivamente, es obvio que tienen características semejantes tanto en el proceso como en la estructura, por lo tanto un sistema de gestión integrado de gestión del ambiente, salud y seguridad EHSMS en términos generales comprende cuatro aspectos principales: políticas del EHS; planificación; implementación y operaciones y monitoreo/medidas correctivas; compuesto por 10 elementos (fig. 12.9 y fig.12.10).

La etapa de la planificación comprende: integración de aspectos ambientales, de salud y seguridad; identificación y evaluación de peligros o riesgos; procesos; definición de objetivos y metas; identificación de reglamentos y leyes aplicables, definición del programa de EMS y determinación del requerimiento económico.

La etapa de implementación y operaciones comprende: definir la estructura y responsabilidades; capacitación y creación de conciencia del personal; comunicación; documentación del EHSMS y de control; control operacional y plan de respuesta a emergencias.

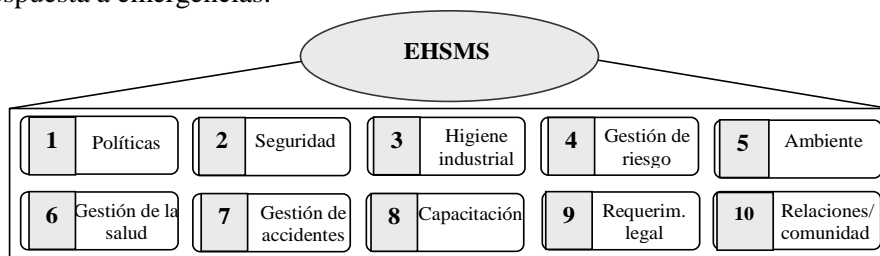


Figura 12.9 Requerimientos del EHSMS (Korea GAS Corporation, <http://www.kogas.or.kr/english/kogasready/EHS1.pdf>)

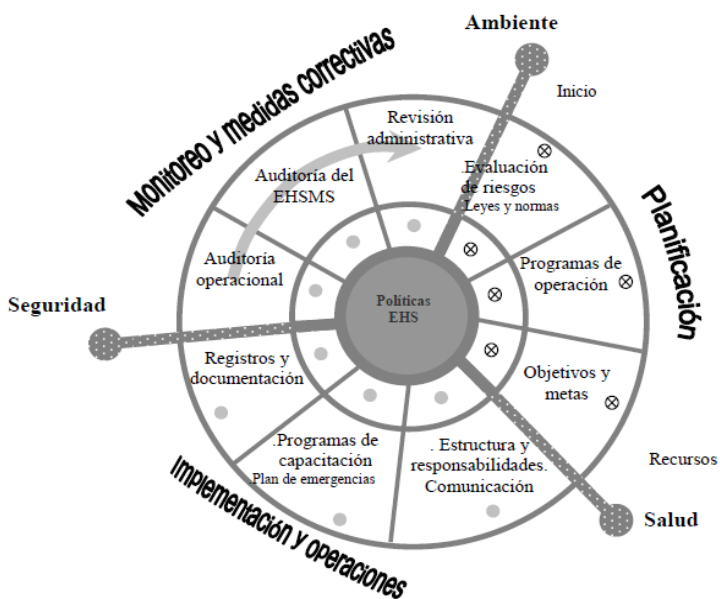


Figura 12.10 Gestión del Ambiente, Salud y Seguridad EHSMS (ALCOA, 1999)



### **12.2.2. Políticas**

Para la mejor comprensión de las políticas de EHSMS de una empresa minera a continuación se enuncian las políticas adoptadas por algunas empresas mineras conocidas.

La política de Medio Ambiente, Salud y Seguridad en el Trabajo del Grupo Río Tinto entiende que la excelencia en la gestión de las responsabilidades en salud, seguridad y medio ambiente es esencial para el éxito duradero de la empresa. A través de prácticas de gestión eficaces, el grupo busca asegurar la salud y seguridad en el trabajo a sus empleados, minimizar cualquier impacto adverso que sus actividades puedan causar al medio ambiente y contribuir positivamente en la vida de la comunidad local (<http://www.riotinto.com.br/pubc02.htm>).

Para alcanzar estos objetivos el grupo Río Tinto, se propone desarrollar sus actividades sobre una base sólida de cumplimiento de las leyes, reglamentos y compromisos voluntarios de EHS aplicables.

Procurar el mejoramiento continuo a través del establecimiento y revisión de metas, evaluación y presentación de informes del desempeño en EHS y la utilización de las mejores prácticas disponibles adecuadas a la situación local.

Contribuir al desarrollo de legislación y reglamentos consistentes; promover una mejor comprensión de estas cuestiones de EHS pertinentes a sus actividades.

Otra referencia importante es la de Nabalco, que hace parte del Grupo Alcan, que es una empresa australiana dedicada a la explotación del aluminio y considera sus políticas de EHS de manera detallada en el Cuadro 12.19.

Adicionalmente, Nabalco considera políticas ante la comunidad, basadas en el siguiente lema: “Trabajando con las Personas y el Ambiente”, dando importancia a las relaciones efectivas con las comunidades.

Las relaciones con las comunidades están basadas en la confianza, dignidad y respeto mutuo, asumiendo el compromiso para el desarrollo en el largo plazo. La Política ante la comunidad tiene varios principios clave: educación y capacitación; consulta; comprensión y comunicación.

Estos principios serán cruciales para lograr en el futuro el éxito para su comprensión. El rendimiento de las comunicaciones y conexiones con la comunidad debe ser monitoreado continuamente.

El mantenimiento de relaciones eficaces es un aspecto fundamental de la planificación empresarial en el largo plazo, constituyendo parte de las metas y objetivos.

Basado en las políticas adoptadas por estas dos organizaciones se puede definir que la política del EHSMS de una empresa minera es buscar asegurar la salud y seguridad en el trabajo de sus empleados, minimizar cualquier impacto adverso que sus actividades puedan ocasionar al medio ambiente y contribuir positivamente en la vida de la comunidad local.

Cuadro 12.19 Política de ambiente, salud y seguridad de Nobalco (Grimonnd, D., 2002)

Ambiente	Salud y Seguridad
<p>Nobalco reconoce que la protección ambiental es parte esencial de sus operaciones. Sus objetivos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mantener una mejor práctica del sistema de gestión ambiental;</li> <li>○ Operar de manera ambientalmente responsable;</li> <li>○ Monitoreo y esfuerzo continuo en la minimización del impacto de sus operaciones en el ambiente natural;</li> <li>○ Asegurar la conformidad en el cumplimiento de todas las normas legales;</li> <li>○ Uso eficiente de materias primas;</li> <li>○ Mantener planes de emergencia ante posibles riesgos ambientales;</li> <li>○ Asegurar que todos los empleados y personal de empresas contratistas tengan conciencia ambiental;</li> <li>○ Incluir la protección ambiental para nuevos desarrollos;</li> <li>○ Comunicación efectiva sobre la gestión ambiental y comunidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nobalco cree que todos los daños y accidentes son evitables y que ningún trabajo es tan urgente que no pueda ser realizado con seguridad. Esta es una buena gestión para prevenir los daños a la salud y enfermedades.</li> <li>○ Las normas de salud ocupacional y el nivel de seguridad son comparables con otras empresas</li> <li>○ Las obligaciones de salud y seguridad están acordes con las normas legales pertinentes vigentes</li> <li>○ Nobalco adopta un sistema común de gestión de la salud ocupacional y salud para su propio personal y los contratistas</li> <li>○ El sistema deberá incluir el peligro y el análisis de riesgo, información, instrucción y capacitación con el propósito de eliminar daños a la salud, enfermedades o pérdidas.</li> <li>○ La competencia en salud ocupacional y asuntos de seguridad es tan importante como otras competencias de trabajo.</li> <li>○ Los desvíos a los valores de los estándares de salud ocupacional y seguridad en el proceso operacional son inaceptables.</li> <li>○ El personal es responsable de su propia seguridad y de los que trabajan junto a él.</li> </ul>

### 12.2.3 Objetivos y principios

Una gestión basada en el EHS debe establecer los objetivos y principios concordantes con su política. De seguidas se resumen los objetivos y principios adoptados por Anglo American (<http://www.copebras.com.br/politicamasso.pdf>) que es una empresa internacional, líder en minería y recursos naturales.

La visión de la empresa debe ser obtener retornos significativos para sus accionistas, actuando de forma responsable en relación al ambiente y la sociedad y estar comprometida con los principios del desarrollo sustentable. Esta política se ocupa de los desafíos centrales del medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo dentro del contexto del mundo globalizado.

Para dar un significado práctico, esta visión significa medir el proceso, en los siguientes objetivos:

#### a) Ambiente:

- Preservar los recursos ambientales;
- Prevenir o minimizar los impactos adversos derivados de las operaciones;
- Demostrar activa responsabilidad para con la Tierra y la biodiversidad;
- Promover las buenas relaciones y capacitación de las comunidades en las cuales se insertan

- Respetar la cultura y las tradiciones de las poblaciones.
  - b) Salud y seguridad del trabajo
- Prevenir o minimizar los accidentes y daños a la salud relativos al trabajo de empleados y contratistas;
- Contribuir en la resolución de los problemas prioritarios de salud en la comunidad.

Esta política se revisa regularmente para reflejar el compromiso, y la creciente comprensión de los principios del desarrollo sustentable.

#### **12.2.4. Principios de gestión**

Los principios de gestión deberán ser compatibles con la política ambiental, de salud y seguridad asumidas por la empresa. A continuación se presentan los principios de gestión comprometidos con la protección ambiental que son necesarios alentar activamente.

1. *Compromiso*: garantizar que los ejecutivos senior y gerentes, responsables de los temas de seguridad, salud y ambiente tengan experiencia. Dotar de recursos financieros y humanos adecuados para asegurar que tales temas serán tratados de manera que reflejen las prioridades de la empresa.

2. *Competencia*: garantizar la competencia y responsabilidad en todos los niveles a través de la selección, retención, educación, entrenamiento y concientización para todos los aspectos de medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo.

3. *Evaluación de los riesgos*: identificar, evaluar y priorizar los peligros y riesgos asociados a todas las actividades operacionales.

4. *Prevención y control*: prevenir, minimizar y/o controlar los riesgos prioritarios a través de la planificación, el diseño, la inversión y los procedimientos de gestión y de operación. Preparar y probar periódicamente los planes de respuesta a emergencias. Cuando los accidentes o los incidentes ocurren, tomar pronta acción correctiva, investigar las causas básicas y tomar las acciones que los corrijan. Procurar activamente prevenir las recurrencias y difundir las experiencias aprendidas.

5. *Desempeño*: establecer objetivos, metas e indicadores de desempeño apropiados para todas las operaciones. Cumplir, como mínimo, todas las leyes y reglamentos aplicables y donde sea apropiado, aplicar las mejores prácticas internacionales.

6. *Evaluación*: monitorear, analizar y confirmar la eficacia de la gestión y del desempeño de la operación en relación a los objetivos y metas de la empresa o divisiones y a los requisitos legales aplicables. Es esencial para este proceso un sistema de auditorías apropiadas y la generación de informes de progreso.

7. *Relación con las partes interesadas*: promover y mantener un diálogo abierto y constructivo además de una buena relación profesional con los empleados, comunidades locales, agencias reguladoras, instituciones empresariales y otras partes interesadas y afectadas, para expandir conocimiento y proporcionar una mutua comprensión de las cuestiones de interés común. Informar sobre los progresos encaminados al logro de los objetivos.

8. *Mejora continua*: cultivar la creatividad y la innovación en la administración y desempeño de las operaciones y la proximidad para resolver los desafíos que el proyecto enfrenta. Apoyar la investigación y el desarrollo en cuestiones de ambiente, seguridad y salud en el trabajo, y promover la implantación de mejores prácticas y tecnologías donde sea apropiado.

Es obvio que los objetivos y principios de gestión indicados tienen mucho que ver con el sistema de gestión ambiental ISO 14001, con la particularidad de incluir la parte de seguridad y salud.

#### **12.2.5. Implementación del EHSMS**

Para implementar la política del EHS es necesario satisfacer requisitos mínimos de manera que sea posible obtener resultados eficientes de los objetivos y metas establecidas en el EHSMS. Por ejemplo el Grupo Río Tinto (<http://www.riotinto.com.br/pubc02.htm>) establece los siguientes requisitos mínimos:

- Asegurar que las cuestiones de EHS sean parte integrante de las estrategias de largo plazo;
- Establecer programas y procedimientos para asegurar la implementación adecuada y consistente de sus políticas de EHS;
- Evaluar anticipadamente las potenciales implicaciones sobre la EHS de las actividades de explotación, desarrollo, expansión, adquisición, ventas y cierre e implementar acciones para minimizar los impactos sociales y ambientales adversos;
- Organizar para que los costos de las actividades de EHS relacionados con la operación, rehabilitación y cierre estén incluidos en la preparación de propuestas de inversión, planes anuales, y la rendición de cuentas; asegurar la eficiente utilización de energía, agua y otros materiales y poner en práctica programas de prevención de la contaminación; realizar auditorías regulares para evaluar el cumplimiento de las leyes y de las políticas de EHS de la empresa;
- Evaluar los riesgos del EHS asociados a sus actividades y productos y tomar las providencias adecuadas para minimizar los riesgos potenciales; preparar, probar y mantener procedimientos de emergencia en cooperación con las autoridades locales de atención a las emergencias;
- Preparar y mantener un plan para el eventual cierre de cada operación, incluyendo: gestión de impactos sociales y ambientales, estimado de costos del cierre y provisión financiera, y consulta y cooperación con las comunidades locales;
- Asegurar que todos en la empresa estén conscientes de las cuestiones relativas al EHS y que las incorporen en sus actividades diarias;
- Fomentar la consulta, principalmente con los empleados y comunidades locales, oír y responder las preocupaciones presentadas y, contribuir con programas de educación pública sobre temas relativos a EHS;
- Exigir que todos los contratados implementen prácticas que sean consistentes con la política de EHS de la empresa;
- Investigar procesos, prácticas y tecnologías que mejoren el desempeño en EHS;

- Reportar regularmente al Consejo de Administración de la empresa, sobre la evolución del desempeño de EHS y demás asuntos de importancia relacionados con la política de EHS.

### 12.2.6. Capacitación y/o entrenamiento del personal en temas de seguridad

En relación al entrenamiento del personal en seguridad, Ramani, R.V., (1992) indica que el recurso humano es la inversión más preciosa realizada en una mina. El personal requerido para el trabajo no es solo el que sea físicamente más apto, sino el obtenido por la meticulosa selección y por el entrenamiento y orientación adecuada al trabajo.

La reglamentación norteamericana contempla para el personal nuevo de minas subterráneas un entrenamiento mínimo de 40 horas, de las cuales 32 en aulas y 8 en el sitio de trabajo. Adicionalmente, todo el personal requiere un refrescamiento en un total anual de 8 horas. Los temas en los cuales deben ser capacitados y entrenados están en el Cuadro 12.20.

Para fines de entrenamiento y capacitación, pueden ser utilizados videos, programas de instrucción, simulación de emergencias en minas, inspección al inicio de turnos de trabajo, estudio de libros relacionados con la salud y seguridad, manuales de seguridad, etc.

La fig. 12.11 ilustra la estructura, herramientas y técnicas del sistema de seguridad y control de pérdidas y la interrelación entre materiales, equipos y acciones del hombre en el ambiente de trabajo subterráneo.

Cuadro 12.20 Temas del programa de entrenamiento y capacitación en salud y seguridad en minas subterráneas (Ramani, R.V., 1992)

Temas	Personal nuevo	Personal experimentado	Entrenamiento anual
Normas y responsabilidades de los supervisores	TP	TP	
Dispositivos de rescate y respiración	TP		TP
Introducción al ambiente de trabajo	TP	TP	
Salud en el trabajo	TP	TP	
Identificación de peligros	TP	TP	
Peligros de la electricidad	TP		TP
Primeros socorros	TP		TP
Aspectos de salud y seguridad, tareas atribuidas	TP		
Estándares de salud y seguridad		TP	TP
Prevención de accidentes			TP
Explosivos	TP		TP
Entrada y salida de la mina, transporte y comunicación	TP		TP
Mapa de la mina, sitios de salidas, evacuación en emergencias	TP	TP	TP
Plan de ventilación y control de desprendimiento de rocas	TP		TP
Polvos y gases			
Agua subterránea			
TP: para todo el personal			

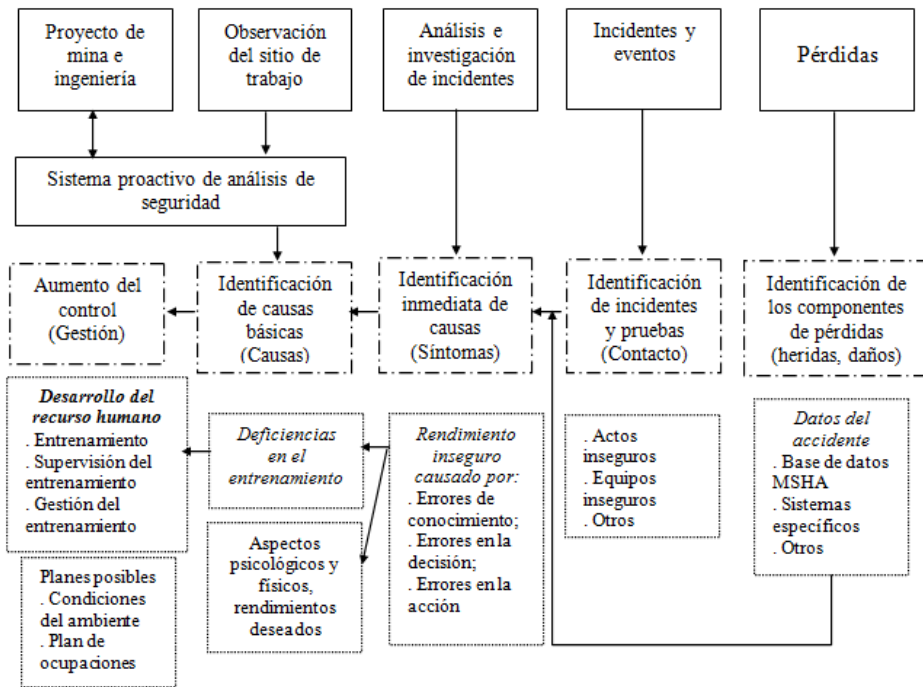


Figura 12.11 Esquema para la evaluación y desarrollo de un entrenamiento efectivo y designación estratégica de puestos de trabajo (Ramani, R.V., 1992)

### 12.2.7. Programa de salud ocupacional

El EHSMS debe considerar un programa relacionado con los problemas de salud ocupacional, accidentes y lesiones sufridas por el personal de una mina. Este programa debe incluir un examen médico antes del ingreso y un continuo monitoreo durante el tiempo de ejercicio del trabajo, para garantizar buenas condiciones de salud y condiciones físicas.

Los exámenes o monitoreos médicos podrán revelar problemas en la condición física, pérdida de audición, pérdida de visión, problemas de corazón, artritis, enfermedades pulmonares, etc. Como es obvio estos exámenes y monitoreos permiten dotar del personal adecuado y prevenir o realizar un tratamiento médico del problema de salud ocupacional identificado.

Por lo tanto, el programa de monitoreo de la salud ocupacional tiene como objetivos fundamentales:

- Protección de la salud individual del personal;
- Monitorear antes y después de la admisión del personal;
- Identificación de la incidencia de los temas ocupacionales en la salud del personal;
- Tomar medidas correctivas que pueden incluir protección, tratamiento, responsabilidad por funciones adecuadas, etc.

Todo el procedimiento previsto y ejecutado en el programa de salud ocupacional debe estar documentado.

**12.2.8. Planificación del EHSMS**

La planificación del sistema de gestión del ambiente, salud y seguridad (fig. 12.12) comprende la evaluación de riesgos, programa de operación y determinación de metas y objetivos.

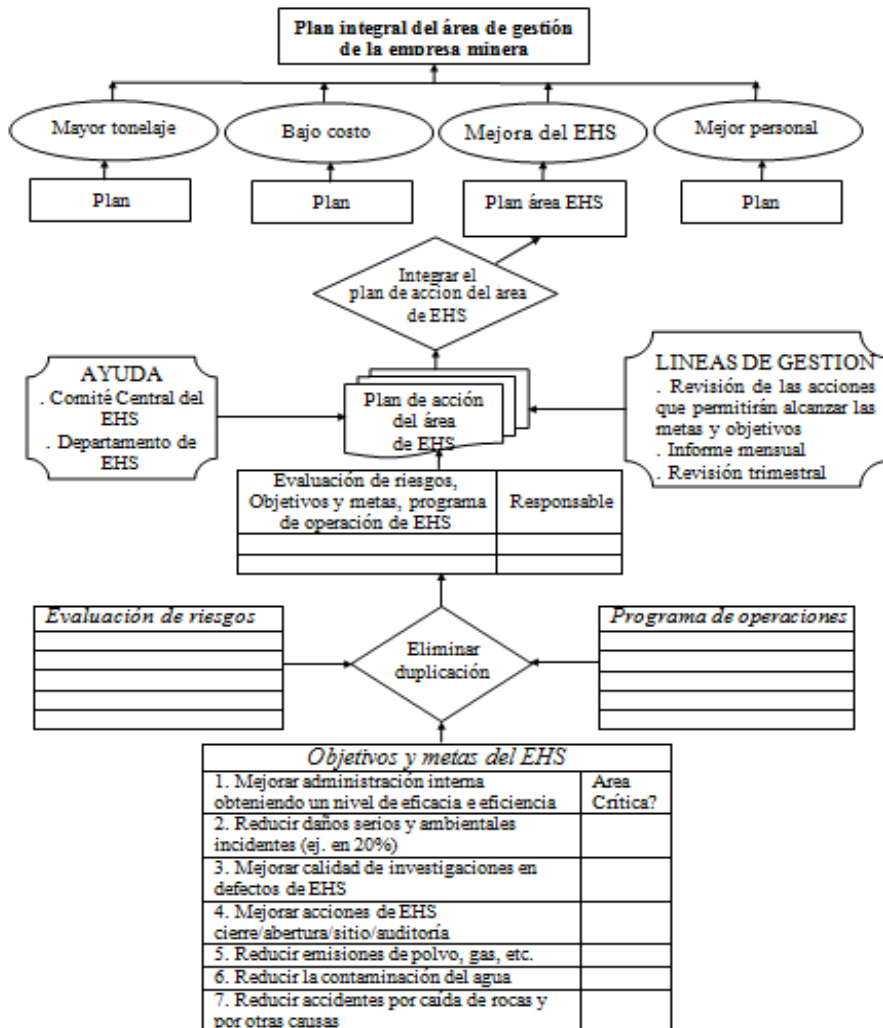


Figura 12.12 Proceso de planificación del sistema de gestión EHS (basado en Nobalco del Grupo Alcan, Grimond, D., 2002)

**12.2.9. Implementación de operaciones, monitoreo y medidas correctivas**

La implementación de operaciones, monitoreo y medidas correctivas son parte del sistema integrado EHSMS que pueden ser realizados con base en la sección 4.2.6, 4.2.7 y 4.2.8 desarrollado en el tema de Sistemas de Gestión Ambiental EMS, incluyendo los aspectos de gestión en Salud y Seguridad ocupacional OHSMS.

**12.2.10. El departamento de EHS en una organización empresarial minera**

El departamento de EHS debe estar inserto en la estructura de la empresa, de forma que tenga la importancia necesaria igual a otros departamentos y permita una gestión eficiente a todos los niveles.

El organigrama de la empresa puede variar tanto en la estructura como en los elementos que son de apoyo a la presidencia o dirección general, a las gerencias de línea y los empleados (fig. 12.13).

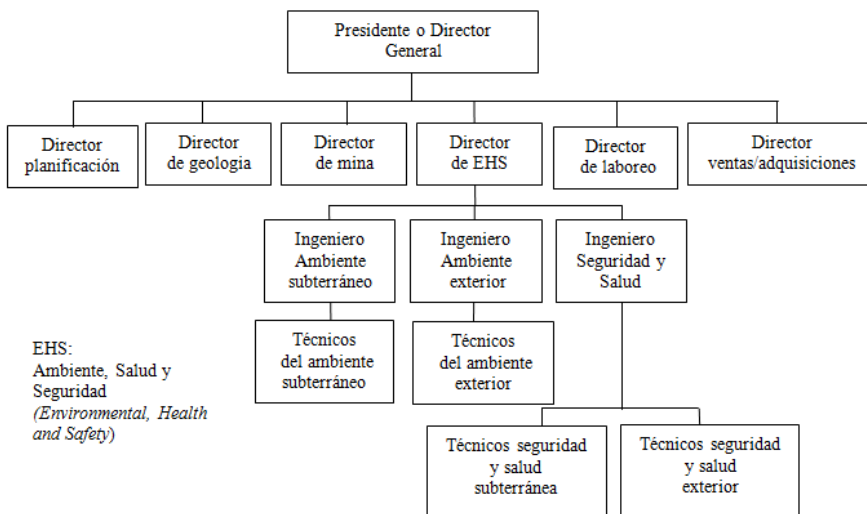


Figura 12.13 Propuesta de un modelo de estructura orgánica de una empresa minera que explota por el método subterráneo, con detalle del departamento de EHS

La responsabilidad ambiental, de salud y seguridad ocupacional debe ser distribuida desde los niveles superiores hasta los empleados, lo que permitirá proporcionar una retroalimentación periódica a los directivos y empleados con relación al cumplimiento del EHSMS por la empresa.



# **QUINTA PARTE**

## **ASPECTOS FINALES**

---



## Capítulo 13

### RESULTADOS Y REFERENCIAS

---

#### 13.1. Resumen de los resultados del desarrollo de la Ingeniería Ambiental Subterránea

El desarrollo de la ingeniería ambiental subterránea y los resultados obtenidos en la aplicación experimental en tres minas en operación, así como su posterior interpretación, permiten enunciar las siguientes conclusiones:

##### A) En términos generales:

El ambiente subterráneo, así como el ambiente exterior, son un sistema dinámico de interacción mutua e integral de los cuatro dominios importantes: atmósfera subterránea, agua subterránea, roca y el componente biológico (hombre). Por lo tanto, el hombre al explotar el recurso mineral provoca un desequilibrio ambiental como queda de manifiesto en los impactos negativos que atentan su propia salud, su vida y la biodiversidad en su ámbito de acción.

Dado los crecientes avances de la ingeniería ambiental en el sentido de un desarrollo sustentable, el ambiente subterráneo no puede ser una excepción, debido a que la ingeniería ambiental subterránea desarrollada muestra la aplicabilidad de los principios, conceptos, procesos y sistemas de gestión contemporáneos.

Son válidos los modelos matemáticos, técnicas y sistemas de gestión desarrollados para la evaluación del impacto ambiental relacionado con los factores ambientales: temperatura, gases tóxicos, polvos, velocidad y caudal del aire, ruido, explosión e incendio, iluminación y radiación, cantidad y calidad de las aguas subterráneas e inestabilidad y desprendimiento de rocas.

La ingeniería ambiental subterránea es aplicable a explotaciones subterráneas en operación y para nuevos proyectos.

Para la gestión del ambiente subterráneo son aplicables los sistemas de gestión ambiental (EMS) ISO 14001, el sistema de gestión integrado de ambiente, salud, seguridad (EHS) y también el sistema integrado de ambiente, salud, seguridad y comunidad (EHSC).

La secuencia de acciones para realizar una evaluación de impacto ambiental subterráneo es: identificación y caracterización de las fuentes generadoras de impacto ambiental, identificación del nivel de impacto o riesgo ambiental, búsqueda de alternativas de prevención y corrección, aplicación de la mejor alternativa, monitoreo y control.

Para todos los factores ambientales existe alguna divergencia en las normas adoptadas por cada país o región.

##### B) En términos específicos:

###### B.1 – En el dominio ambiental atmósfera subterránea:

- La influencia de la temperatura del ambiente exterior en el ambiente subterráneo es irrelevante en áreas donde la temperatura media mensual alcanza valores de hasta 6 °C (Andes de Perú y zonas similares), sin embargo, para

- temperaturas más elevadas (Europa y zonas similares) existe una considerable influencia (5 °C a 6 °C para profundidades de 700 a 800 m);
- El riesgo ambiental térmico se presenta en minas tipificadas como profundas, o sea, en profundidades donde la transferencia de calor del macizo rocoso al aire de la atmósfera subterránea supera los 25 °C;
  - En aberturas subterráneas sin presencia de agua termal, el mayor contaminante térmico es el que proviene de la transferencia de calor de la roca virgen a la atmósfera subterránea (85% a 90%), seguido por los equipos diesel (6% a 8%) y finalmente por la detonación de explosivos (4% a 7%). Por lo tanto, el parámetro más importante es la propiedad térmica del macizo rocoso;
  - La técnica de ventilación permite obtener una temperatura de confort en el ambiente subterráneo cuando la temperatura del aire en la entrada de un trecho es de  $\leq 27$  °C. Cuando estas temperaturas superan este valor se torna imposible la aplicación de esta técnica siendo necesario usar el enfriamiento;
  - En los frentes de trabajo con temperaturas cercanas al límite indicado en el punto anterior, los caudales de confort térmico mínimo son de 9 m<sup>3</sup>/s y máximo de 36 m<sup>3</sup>/s;
  - El volumen de aire requerido en el ambiente subterráneo, para la producción de una tonelada de mineral, muestra una variación de 11.124 m<sup>3</sup>/t (Neves Corvo, 6.500 t/día), 8.129 m<sup>3</sup>/t (San Rafael, 2.500 t/día) y 4908 m<sup>3</sup>/t (Panasqueira, 2.000 t/día);
  - En condiciones extremas el caudal mínimo requerido para el hombre representa apenas un 4,5% del requerido para la utilización de equipos diesel. Por lo tanto, la importancia de considerar el caudal mínimo de aire para los hombres es insignificante cuando no hay presencia de equipos con motor diesel;
  - El impacto ambiental negativo moderado a alto (gases y polvos) en la atmósfera subterránea sucede con velocidades típicas de 0,5 m/s a 1 m/s y caudal de 7 m<sup>3</sup>/s a 16 m<sup>3</sup>/s;
  - En la actualidad, por la constante tendencia a la mecanización de las operaciones mineras de explotación, la principal fuente de contaminación del aire, mediante gases tóxicos a la salud humana (CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, hidrocarburos, hollín), la constituyen los equipos desplazados con motores diesel;
  - Los gases producto de las detonaciones de cargas explosivas constituyen una fuente de contaminación adicional, cuya presencia en el aire ocurre principalmente en el proceso y en los sitios de remoción de material desmontado;
  - Las concentraciones típicas de gases caracterizadas son: CO de 0,0 a 500 ppm, CO<sub>2</sub> de 0,0 a 3.000 ppm, NO de 0,0 a 6 ppm, NO<sub>2</sub> de 0,0 a 12 ppm y O<sub>2</sub> de 19,2 a 20,9 %, presentando niveles de impacto ambiental de moderado a alto en muchos locales;
  - La mecanización en las operaciones de perforación minimiza la contaminación del aire por las partículas sólidas, constituyendo la fuente principal de empeoramiento del ambiente las operaciones de manipulación del material desmontado (remoción, transporte, trituración);

- El sílice libre suspendido en el aire está en función de la mayor o menor ocurrencia de cuarzo en el yacimiento y en las rocas encajantes;
- La concentración típica de polvos varía de 0 a 5 mg/m<sup>3</sup>, con sílice libre de 0 a 13,4 % (Neves Corvo) y de 0 a 100% (Panasqueira), ocasionando un impacto ambiental moderado a alto;
- La velocidad mínima (crítica) de aire que permite obtener una buena calidad del aire está entre 0,5 a 0,8 m/s;
- El costo de reducción de las emisiones de motor diesel es de 8 – 12 €/HP para la técnica de oxidación catalítica, 30 – 50 €/HP para el sistema de filtros y de 50 €/HP para la reducción catalítica selectiva;
- Los costos de conservación de una buena calidad ambiental del aire en la atmósfera subterránea varían en función del tamaño de la producción, de la profundidad de la operación, del nivel de mecanización, de la presencia de agua termal y de las condiciones hidrogeológicas. Los costos de operación para las minas estudiadas varían de 0,0000190 €/m<sup>3</sup> de aire (Panasqueira), 0,0000766 €/m<sup>3</sup> (Neves Corvo) y 0,0002612 €/m<sup>3</sup> (San Rafael);
- Las operaciones y equipos utilizados en trabajos subterráneos, generan un nivel sonoro continuo equivalente en la fuente que varía de 89 dB (A) hasta 120 dB (A), con impacto ambiental acústico que alcanza distancias de 5,0 m a 35 m alrededor de la fuente;
- Las medidas correctivas del impacto ambiental sonoro mas recomendables son las de protección colectiva, de organización del trabajo, de protección individual y de capacitación.

#### B.2 – En el dominio ambiental del agua subterránea:

- El caudal y calidad del agua (água ácida de mina) constituyen parámetros fundamentales para la evaluación del riesgo o impacto ambiental debido a la alteración de las aguas subterráneas;
- El caudal está en función de las condiciones morfológicas e hidrogeológicas del ámbito de acción de la explotación subterránea. Las mediciones de 810 l/s en la mina de Panasqueira frente a 72 l/s en Neves Corvo; son reflejo de lo expuesto;
- La calidad del agua está en función de la litología, tipo de yacimiento, mineralogía del medio rocoso, las dimensiones de la superficie del macizo expuesto y del caudal de agua que drena en las aberturas. La calidad típica del agua subterránea en una mina en operación (Panasqueira) es: pH de 3,5 a 7, Cu de 0,02 a 3,16 ppm, Zn de 0,15 a 21,8 ppm, Fe de 0,16 a 23,20 ppm, Mn de 0,05 a 30,40 ppm y As de 0,0 a 0,10 ppm;
- La descarga de agua ácida de mina en el agua natural superficial provoca un impacto ambiental de moderado a alto. Esta alteración característica es la del río Bodelhão (Panasqueira), con mejor calidad aguas arriba (pH de 5,2, Cu 0,1 ppm, Zn 0,8 ppm, Fe 0,08 ppm, Mn 0,5 ppm y As 0,0 ppm) y con fuerte alteración aguas abajo (pH 4,2, Cu 3,1 ppm, Zn 16,0 ppm, Fe 3,0 ppm, Mn 8,2 ppm y As 0,03 ppm);

- La medida preventiva y correctiva para el caudal es el bombeo y para las aguas ácidas de medida la medida técnica y económicamente viable es el sistema wetland (pantanos);
- Los costos ambientales debido al control del caudal pueden variar desde 3.800 €/año (35HP) hasta 18.900 €/año (200 HP).

**B.3 – En el dominio ambiental de la roca:**

- Los parámetros geoambientales que pueden caracterizar el macizo rocoso son: el índice RMR (*Rock Mass Ratio*), el índice Q (*Tunneling Quality Index*), tensiones en las tres direcciones ( $\sigma_1, \sigma_2$  e  $\sigma_3$ ), resistencia a la compresión y la tracción, módulo de deformación ( $E_m$ ), velocidad de propagación de las ondas P ( $V_p$ ) y la densidad ( $\rho$ );
- Los indicadores de riesgo o impacto ambiental geotécnico, pueden ser una dimensión equivalente ( $D_e$ ) en función del índice Q, deformación ( $\delta$ ), variación de la tensión ( $\Delta\sigma$ ), relación entre la tensión y la resistencia ( $\Delta\sigma/ECU$ ), factor de seguridad (FS), velocidad vibratoria crítica ( $v_c$ );
- No existen normas o estándares universales, por lo que es necesario determinar los estándares para cada proyecto;
- Las medidas de prevención y corrección consisten en el monitoreo y control permanente, sistemas de inyección y tratamiento de suelos y los sistemas de apoyo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALCOA, (1999), “*Alcoa Environment Health & Safety Annual Report*”, Pittsburgh US.
- ALVAREZ, J., (2001). “*Comportamiento estructural y mineralización de estaño – cobre, Mina San Rafael, Puno – Peru*”, XXV Convención de Ingenieros de Minas del Perú.
- AMANN, MARKUS, ET AL., (2000), “*Cost-effective Control of Acidification and Ground-level Ozone*”, Eighth Interim Report (Part 2) to the European Commission.
- ANON, (1974). “*Dust Control*”, Stanhope Bretby: NCB Mining Research and Development Establishment.
- ARENAS, M., (1999), “*Exploración y Geología de la Mina San Rafael, Puno*”. Revista Minería n.º 250 – XLVII, Mayo 1999. Perú.
- ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF COST ENGINEERING INTERNATIONAL, AACE, (1990), “*Standard 10S-90. Standard Cost Engineering Terminology*, US.
- AUSTIN, B.A., (1982), “*Illumination in Mines*”, 36, Environmental Engineering in South African.
- BANERJEE, S.C., (2000), “*Prevention and Combating Mine Fires*”, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- BELL, L.H., et al., (1994), “*Industrial Noise Control. Fundamentals and Applications*”, Marcel Dekker, Inc. US.
- BARETTINO FRAILE, D., (1992), “*Identificación y evaluación del I.A. sobre la Gea*”, ITGE, Gráficas Monterreina S.A. Madrid, Espanha.
- BARNES D. ET AL, (1986), “*Water and Wastewater Engineering Systems*”, Longman Scientific and Technical. London.
- BARTON, N., (1971), “*A relationship between joint roughness and joints shear strength*”, Proc. Sym. ISRM. Rock Fracture – Nancy.
- BARTON, N., LOSET, F., LIEN, R., AND LUNDE J., (1980), “*Application on Q-System in Design Decisions Concerning Dimensions and Appropriate Support for Underground Installations*”. International Conference on Sub-surface Space. Rockstore, Stokgolm. Sub-surface Space, vol.2. Pergamon.
- BARTON, N., LIEN, R. AND LUNDE J., (1980) “*Estimation of support requirements for underground excavations*”, 16<sup>th</sup> Symposium on Design methods in Rock Mechanics. Minnesota.
- BRANDIS, S., LUMSDEN, A.C. AND BARTON, N., (1981) “*Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints*”, Int. Jour. Rock.Mech, Min.Sci. No.18.
- BARTON, N., AND CHOUBEY, V., (1977), “*The shear strength of rock joints in theory and practice*”. 23<sup>rd</sup> U.S. Sym. Rock Mech. Berkeley.

- BARTON, N., AND BAKHTAK, (1984), “*Large scale static and dynamic friction experiments*”, Int. Jour. Rock. Mech, Min. Sci. No.20.
- BARTON, N., (1995), “*The influence of Joint Properties in Modeling Rock Masses*”, Proc. 8<sup>th</sup> Int.Cong. On Rock mech. Tokyo. Ed. BALKEMA (1997). Vol3.
- BARTON, N., Y GRIMSTAD, E., (2000), “*El sistema Q para la selección del sostenimiento en el método Noruego de excavaciones de túneles*”, Capítulo 1, Ingeo Túneles Libro 3, Madrid.
- BAUMGARTNER, A. AND REICHEL, E. (1975), “*The World Water Balance*“, Elsevier Science Publishers, Amsterdam and New York.
- BERNARDO, P. A. M. (1995), “*Dimensionamento e Simulação de Redes de Ventilação Mineira*”, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Mineralogia e Planeamento Mineiro, IST Lisboa.
- BERNARDO, P. A. M., (1999), “*Registo de medições da concentração de gases com EXOTOX 60 na mina da Panasqueira*”, hoja de registro de mediciones realizadas. Lisboa.
- BIENIAWSKI, Z.T., (1978), “*Determining Rock Mass Deformability*”, Experience from histories. Int. Jour. Rock. Mech. Min. Sci. No.15.
- BIENIAWSKI, Z.T., (1989), “*Engineering Rock Mass Classifications*”, John Wiley, New York.
- BIENIAWSKI, Z.T., (1992), “*Ground Control*”, Chapter 10.5 SME Mining Engineering handbook, 2<sup>nd</sup> Edition V 1, Hartman H.L. Editor, US.
- BILSOM (2003), “*Suppliers of Safety and Personnel Protection Equipment for All Industries*”, Stratfords Ltd Safety Catalogue, <http://www.stratfords.com>.
- BRODIE, M.J., BROUGHTON, L.M. AND ROBERTSON, A.M., (1991), “*A Conceptual Rock Classification System for Waste Management and a Laboratory Method for ARD Prediction From Rock Piles*”. In Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage. Conference Proceedings, Montreal, Canadá.
- BROW WEIS, E., (1989), “*In Fairness to Future Generations: International law, common patrimony and intergovernmental equity*”, University of California, San Francisco 94143-0448.
- BRUEL & KJAER, (1994), “*Manual de Utilização do Sonómetro Integrador de Precisão Modelo 2236*”, Versión Internacional.
- CALIZAYA, F., AND MULYADI, A., (1999). “*New P.T. Freeport Mine ventilation system – basic requirements (25 kt/day plan)*”, Technical Papers. Mining Engineering, US.
- CALIZAYA, F., AND KETUT KARMAWAN, K., (2002), “*P.T. Freeport DOZ Mine Ventilation System*”, Tembagapura, Indonesia, Mine Ventilation Services, Inc. Fresno, California, US.



- CARVALHO, P., (1986), “ *Na introduction to the Neves – Corvo Copper Mine, Portugal*”, Iberian Field Conference of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, SGA, Lisboa.
- CASCIO, J., WOODSIDE G., and PHILIP, M., (1996), “*Guide ISO 14000*” McGraw Hill, Sidney Australia.
- CHOW VEN TE, D.R., AND MAYS L., (1988), “*Applied Hydrology*”, McGraw – Hill, New York, US.
- CLARK, R.B., (1992), “*Marine Pollution*”, 3<sup>rd</sup> ed. Clarendon Press, Oxford.
- COMMONWEALTH OF AUSTRALIA, (2002), “*Overview of Best Practice Environmental Management in Mining*”, *Environment Australia ISBN 0 642 48797 9 of the series 0 642 19418 1*, Sydney, Australia.
- CONESA FERNÁNDEZ, V., (1997), “*Guia metodológica para la evaluación del impacto ambiental*”, 3ª Edición, Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España.
- CONSELHO DA COMUNIDADE EUROPEIA, (2003), “*Decisão 2002/358/CE do Conselho, de 25 de Abril de 2002, sobre Mudança do Clima*”, Unión Europea.
- CONSULTANTS, ECOLOGY AND ENVIRONMENT, INC., UNITED STATES, (2001), “*Acid Rain Control and Environmental Improvement Project in the people’s Republic of china*”, Initial Environmental Examination IEE in Anhi Province.
- CONTI, R. S., AND C. D. LITTON, C. D., (1995), “*A Comparison of Mine Fire Sensors*”. US Bureau of Mines. Report Investigation 9572.
- COOK, A. P., AND VAN DER MERWE, J. N., (2000), “*Design, Construction and Testing of Underground Seals*”, Final project Report, Safety in Mines Research Advisory Committee SIMRAC, South Africa.
- COOK ADRIAN, (2001), “*OHSMS in British Columbia OHSMS in British Columbia a WCB Perspective a WCB Perspective*”, CEEA Conference Vancouver B.C., Canadá.
- CORDNER, J. P., (1980), “*Costs and benefits of environmental protection*”, National Conference, Melbourne, Australia.
- COUPERS, D., LOBATO, J., E PINTO, R. J., (1998), “*A aplicação do método de bench and fill aos minérios fissurais do jazigo de Neves Norte*”, IV Simposio Internacional de Sulfuretos Poli Metálicos da Faixa Piritosa Ibérica, Lisboa.
- CREEDY, D.P., (1996), “*Methane prediction in collieries*” Safety In Mine Research Advisory Committee – SIMRAC, Final Project Report.
- CREEDY, D.P., AND ARMSTRONG, W., (1996), “*Methane Prediction in Collieries*”, Final project Report, Safety in Mines Research Advisory Committee SIMRAC, South Africa
- C&T BRASIL, (2003), “*Protocolo de Quioto à Convenção sobre Mudança do Clima*”, Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasil.

- DALY, D., (1994), “*Lecture Series on Groundwater*”, Civil and Environmental Engineering Department, University College Cork.
- DAVIS, M.L. AND CORNWELL, D.D., (1991), “*Introduction to Environmental Engineering*”, McGraw – Hill, New York, US.
- DAVIS, PATIE, (1998), “*Implementing an Environmental Management System in Community –Based Organization*”, EPA US /NSF International, Michigan, US.
- Decreto-lei n.º 162/90 del 22 de Mayo de 1990, “*Regulamento Geral de Segurança e Higiene no Trabalho nas Minas e Pedreiras*”, de Portugal.
- Decreto-lei n.º 251/87 del 24 de Junio. “*Regulamento Geral sobre o Ruído*”, Portugal.
- Decreto-lei n.º 292/89 del 2 de Septiembre, *Lei do ruído em Portugal*.
- Decreto-lei n.º 292/89 del 2 de Septiembre. *Alteração dos artigos 4.º, 20.º, 21.º, 22.º, 23.º, 35.º, 36.º e 37.º do Decreto-lei n.º 251/87*. Diário da República I Série N.º 202 – 2-9-1989, Portugal.
- Decreto Regulamentar n.º 09/92 del 28 de Abril, *Regulamentação sobre ruído*, Portugal.
- Decreto-lei n.º 236/98 – del 1 Agosto, *Lei de águas*, Portugal.
- Decreto-lei n.º 292/2000 del 14 de Noviembre. “*Regulamento Geral do Ruído*”, Portugal.
- Decreto-lei n.º 270/2001 del 6 de Octubre de 2001, *Exploração de massas minerais – pedreiras*, Portugal.
- Decreto Ley Nro. 708 – 709 del 6 de noviembre de 1991 y Decreto supremo Nro. 023-92-EM, “*Reglamento de Seguridad e Higiene Minera*”, Perú.
- Decreto Supremo No 014-92-EM del 4 de julio de 1992, *Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería*, Perú.
- Decreto Ley No. 613-90-PE del 7 de septiembre de 1990, *Código del Medio Ambiente y Recursos Naturales*, Perú.
- Decreto Ley No. 26786 del 12 de mayo de 1997, *Ley de Evaluación de Impacto Ambiental para Obras y Actividades*, Perú.
- Decreto Supremo No. 016-93-EM del 28 de abril de 1993, *Reglamento para la protección ambiental en la actividad minero – metalúrgica*, Perú.
- Decreto Supremo No 023-92-EM de 9 de octubre de 1992, *Reglamento de Seguridad e Higiene Minera, etc.*, Perú.
- DEERE, D.U., (1964), “*Technical Description of Rock Cores for Engineering purposes*”, Rock Mechanics and Engineering Geology. Volume 1.
- DEPARTMENT OF THE INTERIOR - OFFICE OF SURFACE MINING US, (2003), “*Acid Mine Drainage treatment techniques and costs*”, US.
- DEUTZ CORPORATION, TUV Zertifikat, December, (1997), <http://www.deutzusa.com/Technical/>.

- DIAMOND CRAIN, P., (1996), "*Environmental Management System – Demonstration Project*", NSF International, Michigan, US.
- DINIS DA GAMA, CARLOS (2000), "*Geotecnia Ambiental – Perspectivas e Aplicações*", Revista Geotecnia n.º 90, Lisboa, Portugal.
- DINIS DA GAMA, C., (1998), "*Evaluación de los daños al macizo rocoso provocados por las voladuras en túneles*". IngeoTUNELES.Vol. 2, pp. 231-249, Madrid.
- DINIS DA GAMA, C., (1998), "*Acompanhamento Geomecânico da mina da Panasqueira*", Abril Mayo 98, Hidromineira, Lisboa.
- DINIS DA GAMA, C. AND XIANBIN, YU., (1999), "*Geomechanics investigations in a multiple room and pillar mine*", ISRM International Congress on Rock Mechanics Paris.
- DINIS DA GAMA, C., E MARQUES BERNARDO, P., (2001), "*Condições técnicas para uso de explosivos na escavação de túneis urbanos em maciços rochosos*", Curso sobre Túneis em Meios urbanos, Coimbra Portugal.
- DINIS DA GAMA, C., AND NAVARRO TORRES, V.F., (2002), "*Prediction of EDZ (Excavation Damaged Zone) from Explosive Detonation in Underground Openings*" ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions, EUROCK 2002.
- DRYSDALE, D., (1985), "*An Introduction to Fire Dynamic*", John Wiley&Sons, New York, US.
- DU PLESSIS, J.J.L., AND BRYDEN, D.J., (1997), "*Systems to Limit Coal Dust and Methane Explosions in Coal Mine*", Final project Report, Safety in Mines Research Advisory Committee SIMRAC, South Africa.
- DUNCAN, D. AND C. WALDEN, (1975), "*Prediction of Acid Generation Potential*". Report to Water Pollution Control Directorate, Environmental Protection Service, Environment Canadá.
- PERSSON P.A., HOLMBERG R. AND LEE J., (1993). "*Rock Blasting and Explosives Engineering*". CRC Press, Inc, FL, US.
- EDGAR, T.F., (1983), "*Coal Processing and Pollution Control*". Houston: Gulf Publishing, US.
- EPA (1993). "*Pautas y Especificaciones para preparar Planes del proyecto de garantía de Calidad*". QUAM-005/80. Washington D.C. US.
- EPA, (1994), "*U.S. EPA 530-R-94-036, Acid mine drainage prediction: U.S.*
- EPA Office of Solid Waste Branch (1994). "*Acid mine Drainage Prediction*". Washington D.C. US.
- EPA 420-F-00-057, (December 2000), "*Heavy-Duty Engine and Vehicle Standards and Highway Diesel Fuel Sulfur Control Requirements*", US.
- EPA, (December, 1994). EPA530-R-94-036. "*Acid Mine Drainage Prediction*", Agriculture & Natural Resources Development de West Virginia University

- (2001). Acid Mine Drainage Treatment Costs with Calcium Oxide and the Aquafix Machine.
- EPA,540-R-00-002 -OSWER 9355.0-75, 2000, “A Guide to Developing and Documenting Cost Estimates During the Feasibility Study”, US.
- EPA, (1996), “The Role of Cost in the Superfund Remedy Selection Process”. US.
- EPA, *Technical Support Document for the Heavy-Duty Engine and Vehicle Standards and Highway Diesel Fuel Sulfur Control Requirements: Air Quality Modeling Analyses*, EPA420-R-00-028, Washington, DC, December 2000, p. V-34.
- EPA, (2003), “Remedial Investigation/ Feasibility Study and Selection of Remedy”, Subpart E - Hazardous Substance Response, Section 300.430.
- ESI international, (1999), “Diesel emission control strategies available to the underground mining industry”, Washington, US.
- FALCH, E. *et al.*, (1998), “Guía ambiental para el manejo de problemas de ruido en la industria minera”, Ministerio de Energía y Minas, Perú.
- FAULKNER, B.B., AND J.G. SKOUSEN, (1994), “Treatment of acid mine drainage by passive treatment systems”. p. 250-257. In: International Land Reclamation and Mine Drainage Conference, U.S. Bureau of Mines SP 06A-94, April 24-29, Pittsburgh, PA.
- FERGUSON, K. D., AND MORIN, K.A., (1991), “The Prediction of Acid Rock Drainage - Lessons From the Database”. In Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Conference Proceedings, Montreal, Canadá.
- FERNÁNDEZ RUBIO, R., *et al.*, (1988). “Mining-Hydrological characteristics of the Underground Copper Mine of Neves-Corvo, Portugal”. Third International Mine Water Congress. Melbourne, Australia.
- GARSHICK, E., (2003). “Diesel Exhaust: Health Effects and Research Needs”. Harvard Medical School, Boston MA, US.
- FIDALGO DE MATOS, M.C., (2002). “Ambiente mineiro: tecnologias de diagnóstico, prevenção e tratamento passivo das águas ácidas contaminadas por minerais sulfurados”, Tese de doutoramento, IST Lisboa.
- GAYUBAS, J.C.S. (1998). “Guía práctica para el Control del Ruido Ambiental en Canteras y Graveras”. López Jimeno C. Editor, Entrono Gráfico, S.L. Madrid España.
- GIARDINO, D.A., (1999), “Estimating the Rate of Coal Combustion in a Mine Fire” U.S. Department of Labor - Mine Safety and Health Administration MSHA.
- GÓMEZ OREA, D., (1988), “Evaluación del impacto ambiental de proyectos agrarios”. Madrid, España.
- GOUVEIA, Nelson, (1976), “Contabilidade básica” , São Paulo: McGraw-Hill de Brasil.

- GRIMONND, DOUG, (2002), “*Safety, Health, Environment and Community Report*”, Nabalco – Alcan Group Aluminium”, Northern Territory, Australia.
- GUILLEN, L.(1997). “*Reporte sobre la mina de San Rafael*”, Puno, Perú.
- JENKINS, G. P., HARBERGER, A. C., (1990), “*Manual: cost-benefit analysis of investment decisions*”, Program on Investment, University of Chicago, <http://www.econ.queensu.ca>.
- HANEY, R.A, ONDREY, R.S. *et al.*, (1994). “*Control of Diesel Particulates Emission in underground Coal Mine*”, Mine Safety and Health Administration MSHA, Pittsburgh, Pennsylvania, US.
- HANEY, R.A, SASEEN G.P. *et al.*, (1997). “*An Overview of Diesel Particulate Exposures and Control Technology in the U.S. Mining industry*”, Mine Safety and Health Administration MSHA, Pittsburgh, Pennsylvania, US.
- HANEY, R.A., SASEEN, G. P., (2000), “*Estimation of Diesel Particulate Concentration in Underground Mines*”. Mine Safety and Health Administration MSHA, Pittsburgh, Pennsylvania, US.
- HARRIS, J.D., (1987), “*Carbon Dioxide as an Index of Diesel Pollutants*”, Diesels in Underground Mines, Bureau of Mines Information Circular, US.
- HARTMAN, H.L. (1982). “*Heat in Mines*”, Chapter 20, Mine ventilation and air conditioning. 2<sup>nd</sup>. Ed. New York US.
- HARTMAN, H.L., (1982), “*Psychrometry, refrigeration, and heat transfer process*”, Chapter 21, Mine ventilation and air conditioning. 2<sup>nd</sup>. Ed. New York US.
- HARTMAN, H.L. AND MUTMANSKY, J.M., (1982). “*Flow of Air through Mine Openings and Ducts*”. Chapter 6, Mine Ventilation and Air Conditioning”, Second Edition. The University of Alabama, US.
- HEDIN, R.S., R.W. NAIRN, AND R.L.P. KLEINMANN, (1994), “*Passive treatment of coal mine drainage*”, U.S. Bureau of Mines Information Circular IC 9389, Pittsburgh, PA.
- HOEK, E., AND BROWN, E.T., (1982), “*Underground Excavations in Rock*”, Institution of Mining and Metallurgy, London.
- HOEK, E., (1995), “*Estimating the Strength and Deformability of very poor Quality Rock Masses*”, Rock Engineering, A.A. Balkema Publishers.
- HOEK, E., CARRANZA – TORRES, E., AND CORCUM, B., (2002), “*Hoek-Brown Failure Criterium – 2002 Edition*”. NARMS, Toronto.
- HOLDING, W., (1994), “*Review of Practices for the Prevention, Detection and Control of Underground Fires in coal Mines*”, Final project Report, Safety in Mines Research Advisory Committee SIMRAC, South Africa.
- HOLMAN, J.P., (1983). “*Transferência de calor*”, McGraw Hill, San Paulo.
- HOLMBERG, R., (1982), “*Charge calculation for tunneling*”, Underground Mining Methods Handbook. W. Hustrulid /Editor, AIME, New York, US.

- HOUGHTON, D.A., (1976), “*The role of Rock Quality Indices in the Assessment of Rock Masses*”, Proc. Symp. Exploration for Rock Engineering, Johannesburg.
- HOWES, M.J., (1982), “*Noise Control*”. Camborne School Mines, University of Exeter, UK.
- HUDSON, J.A. AND HARRISON, J.P., (1997), “*Engineering Rock Mechanics*”, University of London. Pergamon, Oxford.
- HUISINGH, DONALD AND VICKI BAILEY, VICKI, (1982), “*Invest in clean technology as a porcentaje of total investment in pollution abatement*”, Making Pollution Pay, US.
- HYMAN, D.M., AND G.R. WATZLAF, (1995), “*Mine drainage characterization for the successful design and evaluation of passive treatment systems*”, In: Proceedings, Seventeenth Annual Conference of the National Association of Abandoned Mine Lands, French Lick, IN.
- IBARRA, J.A., *et al.*, (1996), “*Overbreak and Underbreak in Underground Openings Part 2: Causes and Implications*”, México.
- IBARRA, N.H., AND MAERZ N.H., (1996), “*Overbreak and Underbreak in Underground Openings, Part.2: causes and Implications*”, México.
- IGM Instituto Geológico e Mineiro de Portugal, (1992), “*Levantamento de empoeiramento, ruído, condições térmicas e oxigénio na empresa Somincor – Mina de Neves Corvo*”, Relatório do Laboratório de DGGM.
- IGM Instituto Geológico e Mineiro de Portugal, (1996), “*Boletim de Análise de Sílica Livre com Difracción de Raios X*”, Laboratório de IGM.
- IGM Instituto Geológico e Mineiro de Portugal, (1998), “*Levantamentos de Empoeiramento, Ruídos, temperatura e Oxigénio na Mina da Panasqueira*”, Relatório do Laboratório de DGGM.
- INAG Instituto da Água – Ministério do Ambiente Portugal (2003), “*Registos da Estação Meteorológica 12L/03 de Covilhã do INAG – DHRH SNIR*”.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON METAL AND THE ENVIRONMENT, (2002). “*Eco-Efficiency and Materials*” Ottawa Canadá.
- INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC, (1996). “*Greenhouse Gas Inventory Reference*”. Manual (Revised). v.3., Paris, Francia.
- INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTER ISRIC, (2003), “*Global Assessment of Human-induced Soil Degradation GLASOD*”, Myrene. Arendal. N-4800. Norway.
- INTERNATIONAL STANDARD, ISO 1999-1990. “*Determination of occupational noise exposure and estimation of noise induced hearing impairment*”.
- INTERNATIONAL STANDARD, ISO 1996, “*Description and Measurement of Environmental Noise. Part 1 (ISO 1996-1), Part 2 (ISO 1996-2) and Part 3 (ISO 1996-3)*”.

- IPCC/OECD/IEA (2002), “*Programmed on National Greenhouse Gas Inventories*”, Expert Group Meeting on Good Practice in Inventory Preparation: Energy, CH<sub>4</sub> Emissions Coal Mining and Handling, WMO, UNEP.
- JOHNSON, A.I., (1967), “*Specific yield compilation of specific yields various materials*” USGS Water Supply. US.
- KEPLER, D.A., AND E.C. MCCLEARY, (1997), “*Passive aluminium treatment successes*”, In: Proceedings, Eighteenth West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, April 15-16, 1996, Morgantown, WV.
- KIELY, GERARD, (1999), “*Ingeniería ambiental – Fundamentos, entornos, tecnología y sistemas de gestión*”, McGraw – Hill, Madrid, España.
- KIESSELL, F.N., (1992). “*Gas and Dust control*”. SME Mining engineering handbook, 2<sup>nd</sup> Edition V 1, Hartman H.L. Editor, USA.
- KOGAS Korea Gas Corporation, (2000), “*Annual Report*”, South Korea.
- KREIDER, JAN, F., (2001), “*Handbook of heating, ventilation, and air conditioning*”, USA.
- KULHAWY AND GOODMAN, (1980), “*Design of Foundations on Discontinuous Rock*”, Proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock, International Society for Rock Mechanics, Vol. I, pp. 209-220.
- KULA, E., (1992), “*Economics of natural resources and the environment*”. Melbourne Australia.
- LABORATÓRIO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E GEORRECURSOS DO IST (2001), “*Resultados da análise química elementar por Espectrometria de Fluorescência de Raios X e mineralógica por Difracción de Raios X de amostras de pó da mina da Panasqueira*”, Lisboa.
- LACY, W. C., (1992), “*Mineral Prospecting and Exploration*”, Section 4 SME Mining Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition volume 1, Hartman H.L., Senior Editor.
- LAMA, R.D. *et al.*, (1983). “*An improved method measurements of gas content of coal of seams: studies on the Collinsville coal mine*” CSIRO. Queensland, Australia.
- LAPAKKO, K., (1993). “*Predictive Testing for Mine Waste Drainage Quality. In Mine Operation and Closure*” Short Course. Sponsored by EPA and others April 27 - 29, 1993. Helena, MT.
- LAPRECHT, JAMES L., (1997), “*ISO 14000 Directrices para la Implementación de un Sistema de Gestión Medioambiental*”. AENOR, Madrid España.
- LAUBSCER, D.H., (1990), “*Geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design*”. Paper to Institution of Mining and Metallurgy, London.
- LAWRENCE, R.W., HIGGS T. W., AND M. BRATTY M., (1999), “*Treatment of Acid Mine Waters and Industrial Effluents*”, Simons Ltd., Vancouver, Canadá.

- LLANQUE, O. E, NAVARRO TORRES, V.F. et al., (1999). “*Explotación Subterránea- conceptos y casos prácticos*”. IIMP Lima, Perú.
- LOBATO, J., (2000), “*Evaluation of Mining Induced Stress on Support Requirements at Neves Corvo*” Dissertation of Master of Science in the University of Exeter.
- LÓPEZ JIMENO, C., et al., (1989), “*Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*”. ITGE, Madrid, España.
- LÓPEZ JIMENO, C. Editor, (1996). “*Ventilación de túneles*”. Capitulo 22, Manual de túneles y obras subterráneas. Madrid España.
- LÓPEZ JIMENO, C., (1997). “*Manual de Túneles y Obras Subterráneas*”, Entorno Gráfico S.L. Madrid, España.
- MACLEAN RICHARD, SUGAR WILLIAM, (2000), “*EH&S Management Systems: Easy to Understand, Difficult to Successfully Implement*” Anheuser-Busch Companies, Inc., St. Louis, Missouri, US.
- MAGIL, P. L ET AL., (1956), “*Air Pollution Handbook*”. McGraw Hill, New York.
- MAJOR, G, (1978), “*Occupational hygiene standards and the interpretation of environmental measurements*”, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Australian pneumoconiosis conference, Sydney, Australia.
- MANUFACTURES OF EMISSION CONTROLS ASSOCIATION, MECA, (2000), “*MECA Independent Cost Survey for Emission Control Retrofit Technologies*”, Washington, DC 20036-5603, US.
- MARK, A. NEARING, (1998), “*Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in measurements*”, Agricultural research service, United States Department of Agriculture USDA.
- MARTINEZ, J.G. AND BAUER, S., (2001). “*Incorporation of environmental sustainability in cost-benefit analysis for development projects*”, Giessen.
- MAS Instrument Division, (1994), “*Sampling Pumps 484108 Instruction Manual*” Pittsburgh US.
- MARTIN, RAYMOND, (1998), “*ISO 14001 Guidance Manual*” National Center for Environmental Decision-Making Research NCEDR, University of Tennessee.
- MCGINNESS, STEPHEN, (1999), “*Treatment of Acid Mine Drainage*”, Science and environment section house of commons library research paper, UK.
- MCPHERSON, M.J., (2001), “*Subsurface Fires and Explosions*”, Virginia Polytechnic Institute and State University, US.
- MEYER, C. F. AND VAN ZYL, F. J., (1999), “*Reduce Explosion Risks and Improve Safety and Health Conditions by Better Ventilation Practices in Mechanical Miner Headings*”, Final project Report, Safety in Mines Research Advisory Committee SIMRAC, South Africa.



- MITCHELL, PAUL, (2000). “*Prediction, Prevention, Control, and Treatment of Acid Rock Drainage*”. Environmental policy in mining, US.
- NAIQUE, R., (2001), “*Registo da temperatura no couro mineiro da Panasqueira*”, Barroca Grande, Portugal.
- MINA DE NEVES CORVO (Somincor), (2000), “*Listagem Geral de Furos e Chaminés por Função*”, Portugal.
- MEDINA, E., LIZANA, J., VILLAFRANCA, W., (2001), “*Minado mediante Subniveles ubicados cada 50 metros en la mina San Rafael – Puno*”. XXV Convención de Ingenieros de Minas del Perú.
- MINA DE NEVES CORVO (Somincor), (2000), “*Relatório de Ventilação Secundária*” Departamento de Ventilação de Minas, Portugal.
- MINA DE NEVES CORVO (Somincor), (2000), “*DTS – Departamento de Estudos Planeamento Mineiro Ventilação Secundária, dos anos 1998, 1999 e 2000*”, Portugal.
- MINA DE NEVES CORVO (Somincor), (2000), “*Stress Modeling of Neves North bench and Fill Area*”, Rock Mechanics Department, Neves Corvo Mine.
- MINE SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION, MSHA, (2001), *Rules and Regulations U.S.*, Federal Register/Vol.66, No.13/Friday, January 19.
- MINE VENTILATION SERVICE INC., (1999). “*Ventilation Notes and Supplemental Information*”. Fresno US.
- MINE VENTILATION SERVICES, INC., (2000), “*VnetPC 2000 (Version 1.02) User’s Manual & Tutorial*”, Fresno, CA 93727 US.
- MURRAY AND LOPEZ, SMITH, (1998). “*Toward environmentally and socially sustainable development 1999*”, Environment Matters at the World Bank – Annual, Review.
- MUTMANSKY, J.M., *et al.*, (1992). “*Environmental health and safety*”. SME Mining engineering handbook, 2<sup>nd</sup> Edition V 1, Hartman H.L. Editor. USA.
- NAVARRO TORRES, V.F., (1999), “*Explotación subterránea – Casos prácticos en minas del Perú*”, Curso en Machala, Ecuador.
- NAVARRO TORRES, V.F., (2001), “*Avaliação do impacte Ambiental Sonoro no Ambiente Subterrâneo da Mina da Panasqueira*”, Relatório Centro de Geotecnia IST, Lisboa.
- NIYOGI DEV, K., MCKNIGHT DIANE, M., WILLIAM M. LEWIS, M., WILLIAM, AND KIMBALL BRIANT, A., (1994) “*Experimental Diversion of Acid Mine Drainage and the Effects on a Headwater Stream*”, Colorado U.S.
- NORMA PORTUGUESA 1733, “*Grau de reacção humana ao ruído*”. Direcção Geral da Qualidade, Lisboa.
- NORMA PORTUGUESA NP-2074, (1983), “*Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares*” Direcção – Geral da Qualidade (DGQ).

- NOVITSKY, A., (1962), "Ventilación de minas, acondicionamiento del aire, incendios subterráneos y salvamento". Buenos Aires, Argentina.
- ONDREY, R. S., *et al.*, (2001), "Summary of Minimum Dust Control Parameters", Mine Safety and Health Administration MSHA Pittsburgh Safety Health Technology Center, Pennsylvania, US.
- PALMA, V. (1981), "The San Rafael in Cooper Lode System, Puno SE Peru", Master Thesis, Queen's University, Canadá.
- Portaria n.º 286/93 de 12 de Março, *Lei sobre poluição do ar em Portugal*.
- RAISWELL, R. W., ET AL., (1992), "Environmental Chemistry", Edward Arnol, London.
- RAMANI, RAJÁ V., (1992), "Mine Ventilation". Chapter 11.6. SME Mining Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition Volume 1. Littleton, Colorado, US.
- RAMANI, RAJA V., (1992), "Environmental Issues" Chapter 11.0 , SME Mining Engineering Handbook, 2nd Edition Volume 1.
- REVALLE, P., *et al.*, (1989), "The environment – Issues and Choices Society", PWS Publisher S. Boston, Massachusetts, USA.
- REVISTA ÁGUA & AMBIENTE no. 20 – Ano 2 (2001), "Especial sobre indústria extractiva", Portugal.
- RIBEIRO E SOUSA, L., (2001), "A observação no controlo da sequência de obras subterráneas em meios urbano", Curso sobre Túneis em Meios urbanos, Coimbra Portugal.
- RIPLEY EARLE A., *et al.*, (1996). "Environmental effects of mining". USA.
- ROMANA RUIZ, M., (2002), "Determination of Deformation Modulus of Rock Masses by means of Geomechanical Classifications", ISRM International Symposium of Rock Engineering for Mountainous Regions – EUROROCK2002, Portugal
- SISKIND, D. E., STAGG, M. S., KOPP, J. W, AND DOWING, C. H. (1980), "Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting", U.S. Bureau of Mines.
- ROSE, H.J.M., (1982), "Radiation in Mines", 27, Environmental Engineering in South African.
- SANDS, P., (1995). "Principles of international environmental law", New York: Manchester University Press.
- SANZ CONTRERAS, J.L., (1992), "Concepto de impacto ambiental y su evolución". ITGE, Gráficas Monterreina S.A., Madrid, España.
- SERAFIM AND PEREIRA, (1983), "Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski", Proc. Int. Sym. Eng. Geological and Underground Construction. Lisbon 1 (II).

- SINGH, R. N. (1998), “*Wastewater Quality Management in Coal Mines in the Illawarra Region*”, University of Wollongong - Australia, International Conference on Mining and the Environment, Indonesia.
- SINGLETON, G.A. AND L.M. LAVKULICH, (1978), “*Adoption of the Soxhlet Extractor for Pedologic Studies*”. Soil Science Society of America Journal, Vol. 42, p. 984-986.
- SOBEK, A.A., SCHULLER, W.A., FREEMAN, J.R. SMITH, R.M., (1978) “*Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils*”, EPA 600/2-78-054, US.
- SPOSITO, G., (1989). “*The Chemistry of Soils*”, Oxford University Pres, UK.
- STEWART, K.M., (2001), “*Health Effects of Diesel Exhaust*”. American Lung Association of Pennsylvania. US.
- STUMM, W., AND MORGA., J.J., (1981), “*Aquatic Chemistry. An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in natural Waters*”, 2<sup>nd</sup> edn, John Wiley, New York.
- SULLIVAN, P.J. AND A. SOBEK, (1982), “*Minerals and the Environment*”, Laboratory Weathering Studies of Coal Refuse , Volume 14, pp 561 – 568, US.
- SUMMERS BROUGHTON, L., E BONELLI ARENAS J., (1999), “*Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido de Minas*”, Dirección General de Asuntos Ambientales, MEM Perú.
- THOMPSON, J., CURLEY, R. AND KNUTSON, J., (2002), “*Reducing Water Pumping Costs*”, Development Engineer, Biological & Agricultural Engineering Dept. UC Davis One Shields Ave., Davis, CA 95616.
- TOMB, T. F., AND GERO, A. J., *et al.*, (1995), “*Analysis of Quartz Exposure Data Obtained from Underground and Surface Coal Mining Operations*” Mine Safety and Health Administration MSHA, Pittsburgh, Pennsylvania, US.
- TOMB, T. F. AND HANEY, R, (2001), “*Comparison of Number and Respirable Mass Concentration Determinations*”, Mine Safety and Health Administration MSHA, Pittsburgh, Pennsylvania, US.
- TROTTER, D.A., (1977), “*Safety’s newest concern – mine lighting*”, Canadian Mining Journal, July pp 24-31.
- TURCIC, P.M., AND BANFIELD, J.L., (1982), “*Ventilation of Mines by Fans*”. Chapter 11, Mine Ventilation and Air Conditioning”, Second Edition. The University of Alabama, US.
- UNAL, E., (1983), “*Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs*”, Pennsylvania, US.
- VIDALÓN, J., (2001). “*Mitigación de pasivos ambientales mineros en la cuenca alta del rio Pisco, Perú*”. XXV Convención de Ingenieros de Minas del Perú.
- VUTUKURI, V.S., *et al*, (1986). “*Environmental engineering in mines*”. University of New South Wales, Sydney Australia.

YOKOGAWA GROUP (2000), "*Environmental management of results versus targets. Environmental accounting*", Japan.

WILLIAMS, L., CHILTON, E. J. *et al.*, (1987), "*Measuring gaseous pollutants from diesel exhaust in underground mines*". Proceedings: Bureau of Mines technology Transfer Seminar, Louisville, KY, and Denver, CO, US.

WALLI, R.A., (1982), "*Mine Dust*", Chapter 5 Mine Ventilation and Air Conditioning", Second Edition. The University of Alabama, US.

WALTON, W.H., (1978), "*International research programs in the pneumoconiosis, legislation, standards, medical aspects*". Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Australian pneumoconiosis conference, Sydney, Australia.

# ANEXOS

## Anexo 4.1 Pérdida de presión debido a la fricción de las tuberías $C_a$ (%)

DIÁMETRO NOMINAL													CAUDAL (m <sup>3</sup> /h)
en milímetros													
20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	
en pulgadas													
¾	1	1¼	1½	2	2½	3	4	5	6	8	10	12	
7.5	2.7	0.75	0.22	0.08	.	.	.	.	.	.	.	.	1
16.0	6.0	1.8	0.5	0.17	.	.	.	.	.	.	.	.	1.5
27.0	10.0	2.7	0.8	0.28	0.07	.	.	.	.	.	.	.	2
<b>58.0</b>	21.5	6.0	1.8	0.6	0.16	0.05	.	.	.	.	.	.	3
<b>100.0</b>	<b>27.0</b>	10.0	3.0	1.06	0.27	0.1	.	.	.	.	.	.	4
.	<b>55.0</b>	15.5	4.7	1.8	0.42	0.15	0.05	.	.	.	.	.	5
.	<b>80.0</b>	<b>22.0</b>	6.6	2.2	0.6	0.2	0.07	.	.	.	.	.	6
.	.	<b>37.0</b>	11.5	3.9	1.0	0.35	0.13	.	.	.	.	.	8
.	.	<b>56.0</b>	<b>17.0</b>	5.7	1.5	0.5	0.2	0.06	.	.	.	.	10
.	.	<b>85.0</b>	<b>26.0</b>	8.5	2.3	0.8	0.28	0.09	.	.	.	.	12.5
.	.	.	<b>37.0</b>	<b>12.5</b>	3.3	1.1	0.4	0.13	0.05	.	.	.	15
.	.	.	<b>47.0</b>	<b>16.0</b>	4.2	1.4	0.5	0.17	0.06	.	.	.	17.5
.	.	.	<b>63.0</b>	<b>21.5</b>	5.7	2.0	0.7	0.23	0.09	.	.	.	20
.	.	.	<b>95.0</b>	<b>33.0</b>	<b>8.5</b>	3.0	1.1	0.36	0.13	.	.	.	25
.	.	.	.	<b>45.0</b>	<b>12.0</b>	4.2	1.5	0.5	0.2	0.05	.	.	30
.	.	.	.	<b>61.0</b>	<b>16.0</b>	5.7	2.0	0.65	0.24	0.06	.	.	35
.	.	.	.	<b>78.0</b>	<b>20.5</b>	<b>7.0</b>	2.5	0.8	0.3	0.08	.	.	40
.	.	.	.	<b>100</b>	<b>26.0</b>	<b>9.0</b>	3.1	1.0	0.4	0.1	.	.	45
.	.	.	.	.	<b>32.0</b>	<b>11.0</b>	3.8	1.25	0.5	0.12	.	.	50
.	.	.	.	.	<b>45.0</b>	<b>16.0</b>	<b>5.5</b>	1.8	0.7	0.16	0.05	.	60
.	.	.	.	.	<b>60.0</b>	<b>21.0</b>	<b>7.2</b>	2.4	0.9	0.21	0.07	.	70
.	.	.	.	.	<b>76.0</b>	<b>26.5</b>	<b>9.2</b>	3.1	1.2	0.27	0.08	.	80
.	.	.	.	.	.	<b>34.0</b>	<b>12.0</b>	<b>3.8</b>	1.4	0.36	0.12	.	90
.	.	.	.	.	.	<b>40.0</b>	<b>14.0</b>	<b>4.7</b>	1.8	0.42	0.14	.	100
.	.	.	.	.	.	<b>56.0</b>	<b>20.0</b>	<b>6.8</b>	2.5	0.6	0.2	0.08	120
.	.	.	.	.	.	<b>80.0</b>	<b>27.0</b>	<b>9.0</b>	<b>3.3</b>	0.8	0.26	0.1	140
.	.	.	.	.	.	.	<b>36.0</b>	<b>11.5</b>	<b>4.25</b>	1.0	0.34	0.13	160
.	.	.	.	.	.	.	<b>43.0</b>	<b>14.0</b>	<b>5.3</b>	1.25	0.42	0.17	180
.	.	.	.	.	.	.	<b>50.0</b>	<b>17.5</b>	<b>6.5</b>	1.8	0.5	0.2	200
.	.	.	.	.	.	.	<b>80.0</b>	<b>26.5</b>	<b>10.0</b>	<b>2.3</b>	0.8	0.32	250
.	.	.	.	.	.	.	.	<b>36.0</b>	<b>14.0</b>	<b>3.3</b>	1.1	0.48	300
.	.	.	.	.	.	.	.	.	<b>19.0</b>	<b>4.5</b>	<b>1.5</b>	0.6	350
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	<b>5.8</b>	<b>1.9</b>	0.8	400
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	<b>7.0</b>	<b>2.4</b>	1.0	450
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	<b>2.9</b>	<b>1.2</b>	500

Obs1: Cuando se utilizan tubos de acero sin costura, de aluminio o plástico rígido, las pérdidas de presión se reducen (20% factor 0,8). Pero cuando están unidos por juntas, presentan mayores pérdidas, siendo, por lo tanto, desaconsejable usar el factor de reducción para la determinación del diámetro adecuado de los tubos de succión. Se debe observar que la velocidad del agua no debe ser superior a 2 m/s.

Obs2: Para la succión no se deben usar los valores marcados en **bold**

Obs3: Ejemplo de uso del cuadro: la pérdida de presión por fricción en 30m de una tubería de 4" para una vacío de 5m<sup>3</sup>/h es de 30m x 0,05% = 0,015m

Anexo 4.2 Pérdidas de presión en registro de cajón (m)

DIÁMETRO NOMINAL												Caudal m <sup>3</sup> /h
en milímetros												
25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	
en pulgadas												
1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"	
0.01	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
0.04	0.01	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.5
0.09	0.03	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
0.18	0.06	0.02	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3
0.36	0.12	0.04	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4
0.48	0.18	0.06	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5
0.60	0.30	0.09	0.04	.	.	.	.	.	.	.	.	6
.	0.40	0.18	0.06	.	.	.	.	.	.	.	.	8
.	0.65	0.30	0.12	0.04	.	.	.	.	.	.	.	10
.	.	0.36	0.18	0.06	.	.	.	.	.	.	.	12.5
.	.	0.60	0.24	0.09	0.04	.	.	.	.	.	.	15
.	.	0.90	0.36	0.13	0.06	.	.	.	.	.	.	17.5
.	.	1.20	0.40	0.15	0.07	0.04	.	.	.	.	.	20
.	.	.	0.65	0.27	0.12	0.06	.	.	.	.	.	25
.	.	.	0.90	0.36	0.15	0.07	.	.	.	.	.	30
.	.	.	1.20	0.45	0.21	0.09	0.04	.	.	.	.	35
.	.	.	.	0.65	0.27	0.11	0.05	.	.	.	.	40
.	.	.	.	0.85	0.33	0.12	0.06	.	.	.	.	45
.	.	.	.	0.90	0.40	0.18	0.09	0.04	.	.	.	50
.	.	.	.	.	0.60	0.25	0.12	0.05	.	.	.	60
.	.	.	.	.	0.90	0.33	0.15	0.07	.	.	.	70
.	.	.	.	.	1.20	0.40	0.18	0.09	0.03	.	.	80
.	.	.	.	.	.	0.50	0.20	0.11	0.04	.	.	90
.	.	.	.	.	.	0.70	0.27	0.12	0.05	.	.	100
.	.	.	.	.	.	1.20	0.40	0.18	0.06	.	.	120
.	.	.	.	.	.	.	0.50	0.25	0.09	0.04	.	140
.	.	.	.	.	.	.	0.65	0.36	0.12	0.05	.	160
.	.	.	.	.	.	.	0.90	0.40	0.13	0.06	.	180
.	.	.	.	.	.	.	1.20	0.50	0.18	0.08	0.04	200
.	.	.	.	.	.	.	.	0.90	0.24	0.11	0.05	250
.	.	.	.	.	.	.	.	1.20	0.33	0.15	0.09	300
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.50	0.21	0.11	350
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.60	0.30	0.15	400
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.90	0.38	0.18	450
.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.20	0.40	0.22	500

Anexo 4.3 Pérdidas de presión en curvas de 90° (m)

DIÁMETRO NOMINAL												Caudal m <sup>3</sup> /h
en milímetros												
25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	
en pulgadas												
1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"	
0.01	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
0.02	0.01	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.5
0.06	0.02	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
0.12	0.04	0.02	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3
0.25	0.06	0.03	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4
0.32	0.12	0.04	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5
0.40	0.16	0.06	0.03	.	.	.	.	.	.	.	.	6
.	0.28	0.12	0.04	.	.	.	.	.	.	.	.	8
.	0.45	0.20	0.06	0.03	.	.	.	.	.	.	.	10
.	.	0.25	0.12	0.04	.	.	.	.	.	.	.	12.5
.	.	0.40	0.16	0.06	0.02	.	.	.	.	.	.	15
.	.	0.60	0.24	0.09	0.03	.	.	.	.	.	.	17.5
.	.	0.80	0.30	0.10	0.04	0.03	.	.	.	.	.	20
.	.	.	0.40	0.18	0.06	0.04	.	.	.	.	.	25
.	.	.	0.60	0.24	0.10	0.05	.	.	.	.	.	30
.	.	.	0.80	0.30	0.15	0.06	0.02	.	.	.	.	35
.	.	.	.	0.45	0.18	0.07	0.03	.	.	.	.	40
.	.	.	.	0.55	0.22	0.08	0.04	.	.	.	.	45
.	.	.	.	0.60	0.26	0.12	0.06	0.02	.	.	.	50
.	.	.	.	.	0.40	0.16	0.08	0.03	.	.	.	60
.	.	.	.	.	0.60	0.22	0.10	0.05	.	.	.	70
.	.	.	.	.	0.80	0.26	0.12	0.06	0.02	.	.	80
.	.	.	.	.	.	0.32	0.14	0.07	0.03	.	.	90
.	.	.	.	.	.	0.50	0.18	0.08	0.03	.	.	100
.	.	.	.	.	.	0.80	0.26	0.12	0.04	.	.	120
.	.	.	.	.	.	.	0.34	0.16	0.06	0.02	.	140
.	.	.	.	.	.	.	0.45	0.24	0.06	0.03	.	160
.	.	.	.	.	.	.	0.60	0.28	0.09	0.04	.	180
.	.	.	.	.	.	.	0.80	0.32	0.12	0.05	0.02	200
.	.	.	.	.	.	.	.	0.60	0.16	0.07	0.03	250
.	.	.	.	.	.	.	.	0.80	0.22	0.10	0.06	300
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.32	0.15	0.07	350
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.40	0.20	0.10	400
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.60	0.25	0.12	450
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.80	0.30	0.15	500

Anexo 4.4 Pérdidas de presión en válvula de base (m)

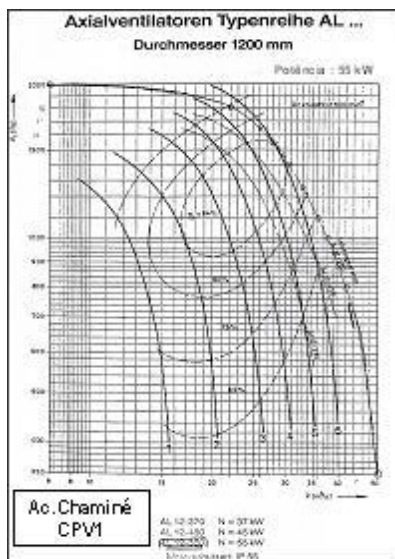
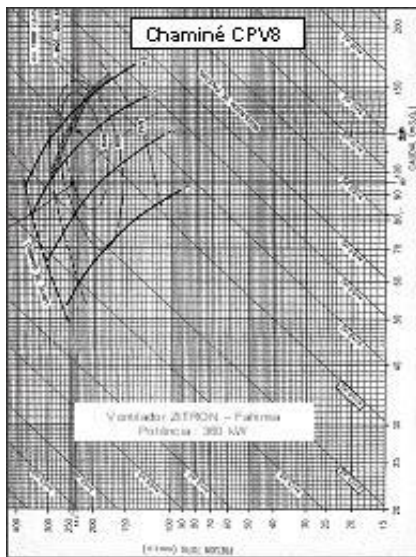
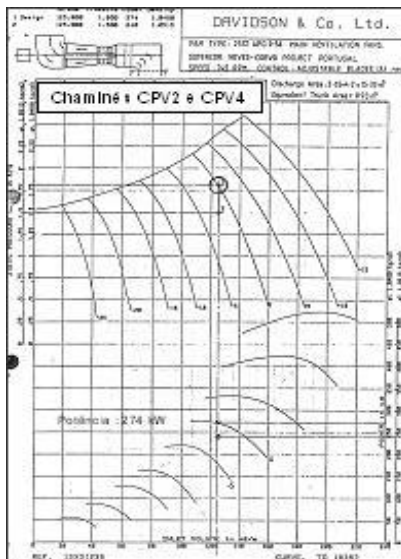
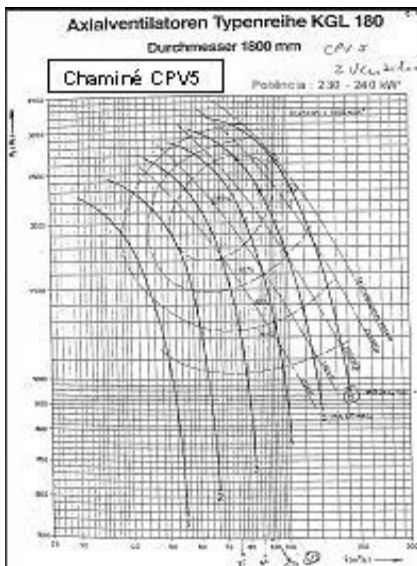
DIÁMETRO NOMINAL										Caudal m <sup>3</sup> /h
en milímetros										
40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	
en pulgadas										
1½"	2"	2½"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.5
0.10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
0.15	0.10	.	.	.	.	.	.	.	.	3
0.20	0.15	0.10	.	.	.	.	.	.	.	4
0.25	0.15	0.10	.	.	.	.	.	.	.	5
0.35	0.20	0.15	0.10	.	.	.	.	.	.	6
0.65	0.25	0.20	0.15	0.10	.	.	.	.	.	8
.	0.40	0.25	0.20	0.10	.	.	.	.	.	10
.	0.65	0.30	0.25	0.15	0.10	.	.	.	.	12.5
.	.	0.40	0.30	0.20	0.15	.	.	.	.	15
.	.	0.50	0.35	0.25	0.20	.	.	.	.	17.5
.	.	0.60	0.40	0.30	0.25	0.10	.	.	.	20
.	.	.	0.50	0.35	0.30	0.15	.	.	.	25
.	.	.	0.60	0.40	0.30	0.20	.	.	.	30
.	.	.	0.80	0.45	0.35	0.25	0.10	.	.	35
.	.	.	.	0.50	0.35	0.25	0.10	.	.	40
.	.	.	.	0.60	0.40	0.30	0.15	.	.	45
.	.	.	.	0.70	0.45	0.30	0.15	0.10	.	50
.	.	.	.	.	0.50	0.35	0.20	0.10	.	60
.	.	.	.	.	0.60	0.40	0.25	0.10	.	70
.	.	.	.	.	0.70	0.45	0.30	0.15	0.10	80
.	.	.	.	.	.	0.50	0.35	0.15	0.10	90
.	.	.	.	.	.	0.55	0.40	0.20	0.15	100
.	.	.	.	.	.	0.65	0.45	0.25	0.15	120
.	.	.	.	.	.	.	0.50	0.30	0.20	140
.	.	.	.	.	.	.	0.55	0.35	0.25	160
.	.	.	.	.	.	.	0.60	0.40	0.30	180
.	.	.	.	.	.	.	0.65	0.45	0.35	200
.	.	.	.	.	.	.	.	0.50	0.40	250
.	.	.	.	.	.	.	.	0.60	0.45	300
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.50	350
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.60	400
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.70	450
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.85	500



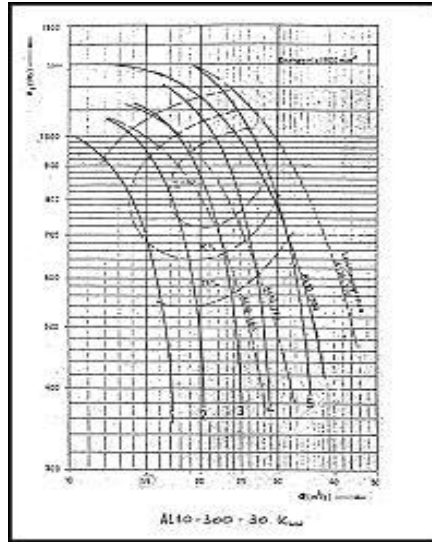
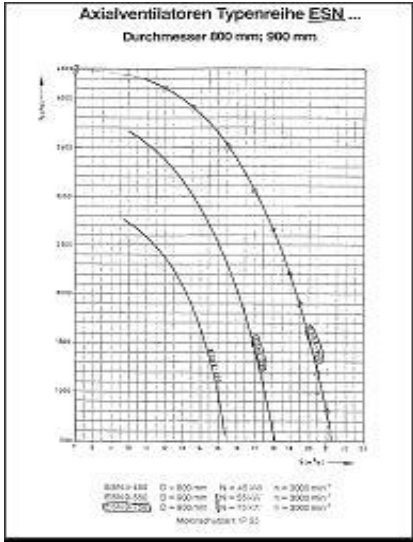
Anexo 4.5 Pérdidas de presión en válvula de retención (m)

DIÁMETRO NOMINAL												Caudal m <sup>3</sup> /h
en milímetros												
25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	
en pulgadas												
1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"	
0.02	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
0.06	0.02	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.5
0.15	0.05	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
0.30	0.10	0.04	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3
0.60	0.20	0.07	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4
0.80	0.30	0.11	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5
1.00	0.40	0.15	0.07	.	.	.	.	.	.	.	.	6
.	0.70	0.30	0.11	.	.	.	.	.	.	.	.	8
.	1.10	0.50	0.20	0.06	.	.	.	.	.	.	.	10
.	.	0.60	0.30	0.10	.	.	.	.	.	.	.	12.5
.	.	1.00	0.40	0.15	0.06	.	.	.	.	.	.	15
.	.	1.50	0.60	0.22	0.08	.	.	.	.	.	.	17.5
.	.	2.00	0.70	0.25	0.11	0.07	.	.	.	.	.	20
.	.	.	1.10	0.45	0.20	0.08	.	.	.	.	.	25
.	.	.	1.50	0.60	0.25	0.12	.	.	.	.	.	30
.	.	.	2.00	0.75	0.35	0.15	0.06	.	.	.	.	35
.	.	.	.	1.10	0.45	0.18	0.08	.	.	.	.	40
.	.	.	.	1.40	0.55	0.20	0.10	.	.	.	.	45
.	.	.	.	1.50	0.65	0.30	0.15	0.06	.	.	.	50
.	.	.	.	.	1.00	0.40	0.20	0.08	.	.	.	60
.	.	.	.	.	1.50	0.55	0.25	0.12	.	.	.	70
.	.	.	.	.	2.00	0.65	0.30	0.15	0.06	.	.	80
.	.	.	.	.	.	0.80	0.35	0.19	0.07	.	.	90
.	.	.	.	.	.	1.20	0.45	0.21	0.08	.	.	100
.	.	.	.	.	.	2.00	0.65	0.30	0.10	.	.	120
.	.	.	.	.	.	.	0.85	0.40	0.15	0.06	.	140
.	.	.	.	.	.	.	1.10	0.60	0.20	0.08	.	160
.	.	.	.	.	.	.	1.50	0.70	0.22	0.10	.	180
.	.	.	.	.	.	.	2.00	0.80	0.30	0.13	0.06	200
.	.	.	.	.	.	.	.	1.50	0.40	0.18	0.08	250
.	.	.	.	.	.	.	.	2.00	0.55	0.25	0.15	300
.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.80	0.36	0.18	350
.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.00	0.50	0.25	400
.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.50	0.60	0.30	450
.	.	.	.	.	.	.	.	.	2.00	0.70	0.36	500

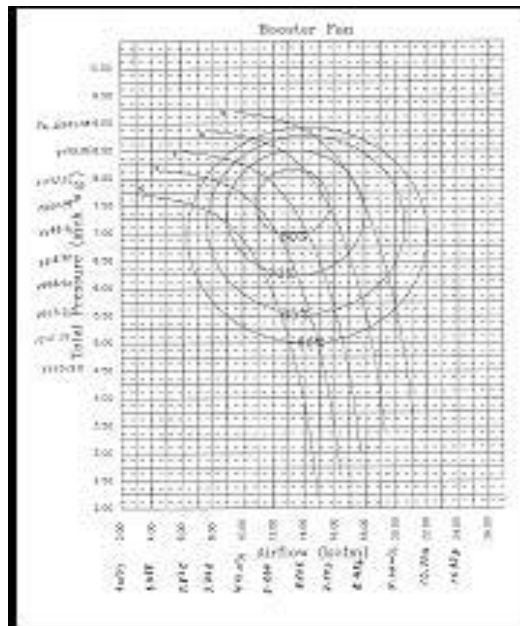
Anexo 7.1 Curvas características de los ventiladores principales  
(Departamento de Ventilación de Minas Neves Corvo 2000)



Anexo 7.2 Curva característica de los ventiladores auxiliares KORFMANN  
(Departamento de Ventilación de Minas mina Neves Corvo 2000)



Curva característica de ventilador auxiliar Joy Axivane Mine Fan  
(Mine Ventilation service, Inc US) - Panasqueira





Anexo 7.4 Índice RQD y calificación del macizo rocoso del área de la rampa CRAM03 (con base en J. Lobato 2001)

Pozo	Cota	RQD (%)	Descripción	Calificación Bieniawski
RC242	682	74	Esquistos en el piso	Buena
	618	52		Media
RC243	692	85	Esquistos	Muy buena
RC257	682	91		Muy buena
RC265	615	38	Esquistos negros en el piso	Mala
	654	33		Mala
	RC293	612		42
RC368	586	77	Esquistos negros	Buena
	669	40		Mala
	622	46		Media
RC601	622	67	Tufos con vetas de pirita	Buena
	590	68		Buena
RC611	686	93	Pirita masiva	Muy buena
	559	72		Buena
RC614	662	93	Pirita masiva	Muy buena
RC615	662	87	Esquistos con pirita	Muy buena
	612	93	Esquistos con pirita	Muy buena
	590	69		Buena
	573	85		Muy buena
RC620	662	87	Gravas con algunas fracturas y cristales de CO <sub>3</sub>	Muy buena
RC630	569	43		Media
RC639	662	92		Muy buena
RC650	612	41	Pirita masiva	Media
RC661	681	82	Tufos silíceos en esquisto con grey	Muy buena
RC719	631	39	Tufos silíceos con pirita masiva y calcopirita	Mala
RC729	612	93		Muy buena
RC748	558	89	CVS esquistos	Muy buena
	612	72		Buena
RC776	612	42	CVS/PQ tufos silíceos con algún Cu	Media
	590	36		Mala
RC782	584	71	CVS	Buena
RC788	654	36	CVS tufos silíceos con algún Cu	Mala
RC791	631	88	Esquistos	Muy buena
	612	41	Esquistos	Media
	592	81		Muy buena

Anexo 8.1 Resultados de la medición de polvos en el ambiente subterráneo de la mina de Pansqueira

Fecha de medición: Enero de 2001

Filtro Nro .	LOCAL	Peso Filtro (g)*	Peso Filtro + Poeiras (g)*	Peso polvos		Captador de Alto Volume-CAV			Concentración		
				(g)	(µg)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)**	Temp oC (h)**	Vol. Total (m <sup>3</sup> )**	mg/ m <sup>3</sup>	µg/ m <sup>3</sup>	mg/ m <sup>3</sup> (***)
1	L2.Poço extracção (antes passagem ar poço)	3.9604	4.3485	0.3881	388150	80	12.06	965	0.4024	402.238	
2	L2. Poço extracção (depois passagem ar poço)	3.9463	6.6206	2.6742	2674250	80	11.79	943	2.8359	2835.896	2.0612
3	L3. Poço de extracção (antes passagem ar poço)	3.9730	4.1000	0.1270	127000	80	12.03	962	0.01203	12.025	1.0214
4	L3. Poço de extracção (antes passagem ar poço)	3.95155	4.0522	0.1006	100650	80	11.95	956	0.01053	10.528	
5	L2.P4. Virador vagões de minério	3.9656	6.7880	2.8224	2822450	80	11.64	931	3.0316	3031.633	1.7355
6	L2.P4. Virador vagões de minério	3.9695	6.1680	2.1985	2198500	80	11.41	913	2.4079	2407.996	
7	Câmara de quebragem	4.0269	5.1020	1.0751	1075100	80	7.06	565	1.9028	1902.832	5.4305
8	L3.D21.R(-2).AW33	4.0367	4.7985	0.7618	761850	80	5.30	424	1.7968	1796.816	
9	L3.D21.R(-2).AW33	4.0648	5.1205	1.0557	1055750	80	7.29	583	1.8109	1810.892	1.7341
11	Cabeça correia de	4.0206	5.8595	1.8389	1838900	80	9.93	794	2.3160	2315.990	0.6211
12	Cabeça correia de	3.9669	6.2862	2.3193	2319300	80	8.53	682	3.4007	3400.733	

\* Laboratorio de Beralt & Tin Wolfram (Portugal) S.A.

\*\* Captación "in situ" con CAV-A/HF

\*\*\* Medición en el mes de Septiembre de 2001

Anexo 8.3 Resultados de la medición de gases en el ambiente subterráneo de la mina de Panasqueira

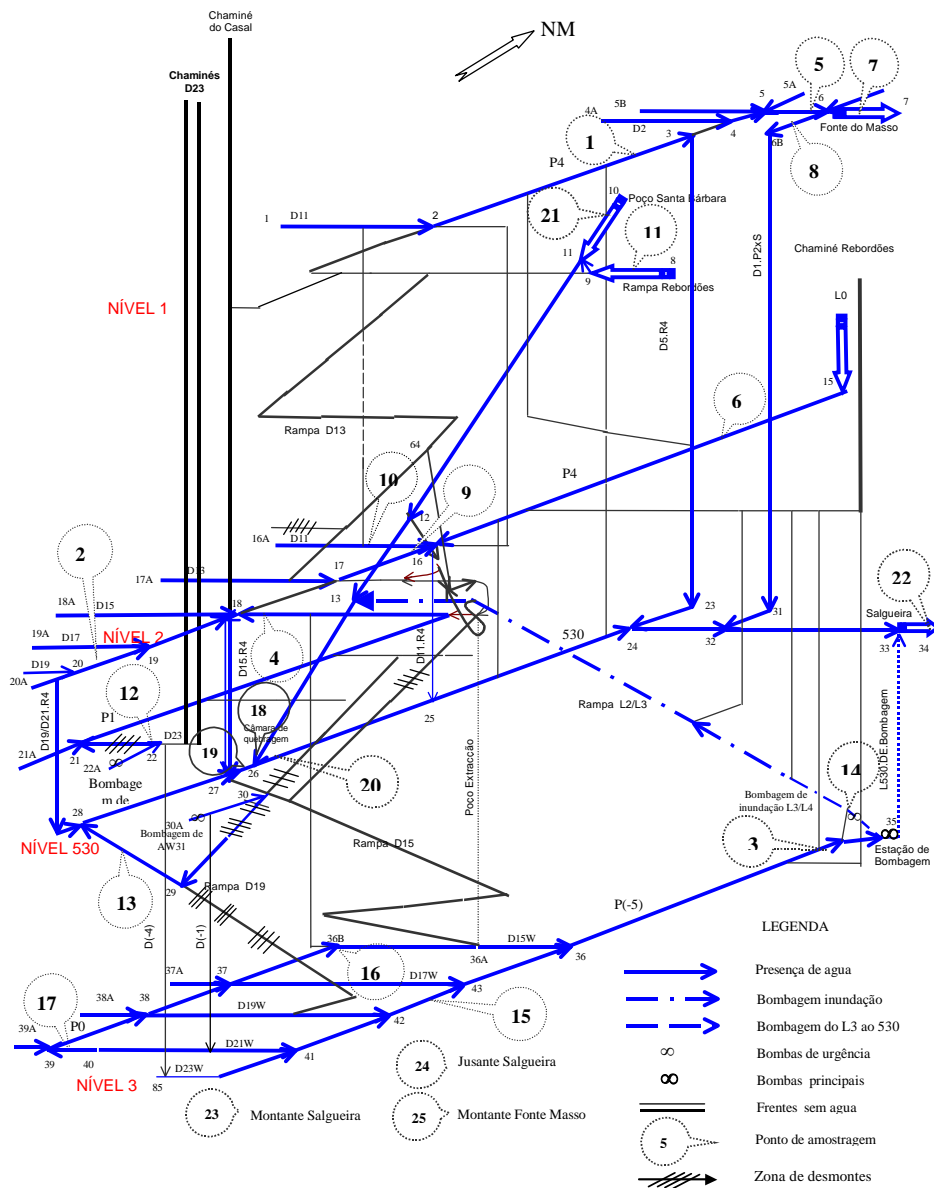
BERALT TIN &  
WOLFRAM  
Portugal S.A. - IST

Tabela 4: BASE DE DADOS DE GASES NO AR DO AMBIENTE SUBTERRÂNEO DA MINA DA PANASQUEIRA

DATA:13/12/2000 a  
12/02/2001

Ensaio Nro.	LOCAL DE ENSAIO	EQUIPAMENTO NO AMBIENTE	HOMENS	GASES NO AMBIENTE SUBTERRÂNEO												Observações
				CO		CO2		NO		NO2		SO2		H2S		
				ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
1	L3.D21.R-2.AW33(N9)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	20	0.002	1000	1.00	2.00	0.00	3.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por duas câmaras
2	L3.D21.R-2.AW33(E72)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	500	0.05	3000	0.30	1.00	0.00	3.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por só uma câmara
3	L3.D21.R-2.AW33(W76)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	100	0.01	1100	1.10	0.70	0.00	3.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por duas câmaras
4	L3.D19.R1.AW30(N420)	Jumbo electro hidraulico	2	0.00	0.00	2500	0.25	0.40	0.00	9.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por só uma câmara
5	L3.D19.R1.AW30(E421)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	200	0.02	100	0.01	0.10	0.00	6.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por só uma câmara
6	L3.D19.R1.AW32(N59)	LHD eléctrica Wagner 2.5Yd3	2	200	0	2000	2.00	0.40	0.00	8.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por duas câmaras
7	L3.D19.R1.AW32(E31)	Jumbo electro hidraulico	2	0.00	0.00	400	0.04	0.10	0.00	6.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por duas câmaras
8	L3.D19.R-3.AW30(N280)	LHD eléctrica Eimco #1	2	100	0.01	0	0.00	0.20	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por quatro câmaras
9	L3.D19.R-3.AW30(428)	Jumbo electro hidraulico	2	0.00	0.00	0	0.00	0.20	0.00	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por duas câmaras
10	L3.D17.R1.AW33(WN6)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	0.00	0.00	0	0.00	0.30	0.00	12.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por duas câmaras
11	L3.D19.R0.AW32(I4N)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	5	0.00	0	0.00	0.00	0.00	2.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por duas câmaras
12	L3.D19.R5.AW30(E423)	LHD eléctrica Wagner 2.5Yd3	2	0.00	0.00	0	0.00	0.30	0.00	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso de só uma câmara
13	L3.D19.R1.AW32(S9)	LHD eléctrica Wagner Yd3	2	0.00	0.00	200	0.02	0.10	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por tres câmaras
14	L3.D21.R2.AW33(S72)	LHD eléctrica Wagner 2.5Yd3	2	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	3.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por duas câmaras
15	L3.D19.R2.AW32(I4S)	LHD eléctrica Wagner 2.5Yd3	2	0.00	0.00	500	0.05	0.00	0.00	5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por só uma câmara
16	L3.D21.R-1.AW33(30)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	500	0.05	1000	0.10	1.60	0.00	2.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por quatro câmaras
17	L3.D21.R-1.AW33(E10)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	500	0.05	2000	0.20	3.50	0.00	4.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso de só uma câmara
18	L3.D21.R-1.AW33(43)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	0.00	0.00	500	0.05	1.20	0.00	0.70	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por quatro câmaras
19	L3.D21.R-2.AW33.Ac.r.D23(23)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	10	0.001	0	0.00	3.20	0.0003	2.30	0.0002	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso de só uma câmara
20	L2.Poço Extração	Jaula e vagões	4	0.00	0.00	0	0.00	0.30	0.0000	0.80	0.0001	0.00	0.00	0.00	0.00	Galeria L2.D15
21	L3.D21.R-2.AW33.Ac.r.D23(20)	Carregamento explosivo ANFO	2	10.00	0.00	1000	0.10	0.60	0.00	2.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso de só uma câmara
22	L3.D21.R-1.AW33(S23)	Perto carregamento explosivo ANFO	2	10.00	0.00	1000	0.10	2.50	0.00	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso de só uma câmara
23	L3.D21.R-1.AW33(78)	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	10.00	0.00	2000	0.20	2.60	0.00	1.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso de só uma câmara
24	L2.P4.D13.Raquete	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	1	0.00	0.00	500	0.05					0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso por duas câmaras
25	L3.D21.R-1.AW33	LHD Diesel Wagner 3.5Yd3	2	30.00	0.003	2000	0.20	3.50	0.0004	1.00	0.0001	0.00	0.00	0.00	0.00	Acesso de só uma câmara

Anexo 8.4 Puntos de muestreo en el ambiente de la mina de Panasqueira





Anexo 8.5 Caudal y resultados de análisis de laboratorio del agua subterránea de la mina de Panasqueira

BERALT TIN &  
WOLFRAM Portugal  
S.A. - IST

BASE DE DADOS DE AGUA NO AMBIENTE  
DA MINA PANASQUEIRA

DATA: 12, 15, 16 e 17  
de Janeiro 2001

Cód. Ensaio	FONTES DE AGUA	LOCAL DE ENSAIO	CAUDAL (l/s)	AMORÇAMENTO Nro.	RAMO**			L (m)	QUALIDADE DE AGUA*							OBSERVAÇÕES
					de	a			pH	Sólidos grs/l	Cu ppm	Zn ppm	Fe ppm	Mn ppm	As ppm	
L1-1	Chaminés (Torvas) do D11W	D11W	3,31	1	2	3	200,0	6,54	0,34	0,10	0,44	4,60	0,27	0,028	Agua drena pela chaminé R4.D5	
L1-2	D3W, D2W, D1W, P4 e P3	D1 entre P3 e P2	81,24	5	5	6	220,0	3,50	0,66	0,59	2,03	3,70	4,68	0,0067	Agua de zonas antigas pela galeria a Fonte de Masso	
L1-3	D1, P2.N	P2.S	12,99	8	6	6B	80,00	3,49	0,76	0,63	2,11	23,4	4,94	0,012	Agua drena pela chaminé D1.P2xS a L530	
L1-4	Nível 1	Boca Mina Fonte de Masso	91,70	7	6	7	1250,0	3,55	0,45	0,42	1,80	4,35	3,95	0,0074	Agua drena ribeira de Bodelhão	
L1-5	Filtrações perto da superfície	Rampa Rebordões	8,60	11	8	9	200,90	6,07	0,10	0,02	0,15	0,98	0,19	0,0000	Agua drena por acesso a Poço S. Bárbara	
L1-6	Superfície	Poço S. Bárbara entre Rebordões e L1	-	21	10	11	123,90	6,09	0,09	0,03	0,25	0,16	0,05	0,0053	Agua drena por Poço S. Bárbara	
L2-7	Chaminés (Torvas) do D11W	D11W entre P5A e P4	4,71	10	16A	16	-	6,42	0,66	0,14	0,47	4,65	0,78	0,031	Agua drena a Ch.Elevador e R4.D11	
L2-8	Norte de P4 (L0)	P4 entre D7 e D5	3,75	9	15	16	666,00	5,17	4,71	0,31	5,00	17,40	11,20	0,030	Agua drena por Chaminé D11.R4	
L2-9	P4.S e D11W	P4 entre D11 e Ch.elevador	7,53	6	-	-	-	7,43	0,63	0,70	0,99	3,85	1,66	0,040	Agua drena por chaminé elevador	
L2-10	D17.W (desmontes antigos)	D17W antes de P4	3,10	-	19A	19	-	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena a P4	
L2-11	Zona D19W, desmontes(subsidência)	P4 entre D17 e D19	57,24	2	19	18	-	3,16	1,30	3,03	10,40	23,20	12,40	0,031	Agua drena a P4	
L2-12	Chaminé perto do Casal	P4, perto do Ch. Casal	18,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena a Chaminé do Casal	
L2-13	Desmontes antigos(subsidência)	D15W perto do P4	100,26	-	18A	18	-	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena ao D15.R4	
L2-14	Sul do P1 e Bombagem de AW31	D15E antes de P4	55,86	4	21	18	680,00	4,31	1,02	2,07	15,00	5,80	7,00	0,040	Agua drena a P4 e depois a Chaminé D15.R4	
L2-15	Bombagem de AW2	D23 E, bombagem	10,00	12	22	21	112,00	6,20	0,64	1,56	11,60	0,18	4,30	0,0053	Agua drena a P1	
L2-16	Zona P1 Sul, desmontes(subsidência)	P1 antes de D23	45,86	-	21A	21	-	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena pelo P1	
L3-17	R0.W	Rampa D19 entre R0 e acesso AW31	4,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Agua do R0 junta-se com agua bombada de AW31	
L3-18	Desmontes AW31	Bombagem	39,35	-	30A	30	-	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena à Rampa D19	
L3-19	Rampa D19	Acesso a L530	43,97	13	29	28	51,30	3,70	1,04	2,33	12,60	4,49	8,60	0,036	Agua drena ao L530	
L3-20	Estação de bombagem	L3/L4	71,56	14	35	13	957,00	6,50	1,00	0,27	4,60	0,82	4,92	0,013	Agua bomb. da estação bombag. à C. de queb. pela	
L3-21	Nível 3	Acesso de L3 a E. Bombagem	50,2	3	36	35	700,00	6,72	1,95	0,40	5,00	1,72	7,00	0,025	Agua drena a E. Bombagem	
L3-22	Chaminés(Torvas) D15	D15W antes de P(-5)	10,82	-	36A	36	270,00	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena ao P(-5)	
L3-23	Acessos de D17W, D19W	Entre P0 e D15W	5,98	16	36B	36A	193,00	3,65	3,91	2,38	10,40	5,80	25,40	0,098	Agua drena ao D19W	
L3-24	Chaminé (Torva) D21.R0	D21W antes de P0	3,15	17	40	36B	345,00	4,14	2,28	3,16	21,80	11,43	30,40	0,0044	Agua drena ao P0	
L3-25	Chaminé e Torvas de D21W e P-5 desde D21.R0	P(-5) entre D17W e D19W	5,19	15	40	36	733,00	6,64	1,40	0,29	4,40	0,67	6,40	0,018	Agua drena pela P(-5)	
L3-26	Superfície, L1 e L2	Poço S. Bárbara entre L2 e acesso rampa L2/L3	28,4	-	12	13	140,00	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena à Câmara de quebragem	
L3-27	Superfície, L1, L2 e E. Bombagem	Câmara de quebragem	-	18	13	26	40,00	6,20	0,21	0,18	0,97	1,60	0,76	0,025	Agua drena ao L530	
L3-28	Chaminé Casal e Ch.D15.R4	Entre Ch.Casal e acesso a P.S. Bárbara	286,5	19	27	26	93,00	4,70	0,94	2,34	14,20	5,40	7,20	0,025	Agua drena pelo L530	
L3-29	Ch.Casal, Ch.D15.R4, C.quebragem	Depois do acesso a P.S. Bárbara	-	20	30	25	365,00	5,41	1,07	1,75	11,2	5,00	7,00	0,0056	Agua drena pelo L530, à Salgueira	
L3-30	P4	D5.R4	3,31	-	3	23	90,00	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena a L530 de L1	
L3-31	P2	D1.P2xS	12,99	-	6B	31	90,00	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena a L530 de L1	
L3-32	Estação de bombagem	L530.DE Bombagem	0,00	-	35	33	60,00	-	-	-	-	-	-	-	Chaminé de bombagem, não usado por inundação	
L3-33	D13, P4(sul) P4(norte) e D11	D11.R4	8,46	-	16	25	30,00	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena a L530 de L2	
L3-34	Zona desmontes antigos L2 depois de D19	D19W/D21.R4	-	-	20A	28	30,00	-	-	-	-	-	-	-	Agua drena a L530 de L2	
L3-35	L1(parte) .L2,L3	Boca Mina Salgueira	810,22	22	25	34	-	3,99	1,05	2,01	12,60	4,09	8,60	0,026	Agua drena a ribeira Bodelhão	
L3-36	Ribeira Bodelhão, L1	Ribeira de Bodelhão antes de agua de Mina Salgueira	-	23	-	-	-	5,16	0,12	0,15	1,04	0,03	0,87	0,0000	Agua drena a rio Zézere	
L3-37	Ribeira Bodelhão, L1,L2,L3	Ribeira de Bodelhão depois de agua de Mina Salgueira	-	24	-	-	-	4,18	0,81	3,11	15,80	2,91	8,20	0,026	Agua drena a rio Zézere	
L3-38	Das linhas de agua	Montana Fonte do Masso	-	25	-	-	-	5,27	0,06	0,04	0,52	0,13	0,09	0,00	Agua drena a rio Zézere	

\* Laboratório de BERALT TIN & WOLFRAM Portugal S.A., Mina de Panasqueira.

\*\* Mapa de presença de agua no ambiente subterráneo da mina da Panasqueira (Janeiro 2001).

Anexo 9.1 Parámetros térmicos, dinámicos y volumétricos de la mina de San Rafael

MINSUR S.A.													DATA: 20/ 09/2001		
IST - UTL		MEDICAO DE PARAMETROS DINAMICOS E TERMICOS DO AMBIENTE SUBTERRANEA											T.Exterior Inicio (4 am)Ts:2°C,Th:1°C		
													T.Exterior Fim(4 pm)Ts:13.5°C,Th:12°C		
NIVEL	FRETE	ESTAC	TRECHO			SEC	VELOCIDADE		CAUDAL	CONDICIONES TERMICA			OBSTR.	PAREDE	OBSERVACOES
			de	a	m		m2	m/s		m3/s	Ts(°C)	Th(°C)			
Rpa.523	523-254	1	35	55		20.8	0.39	8.11	27	22		Nao	Rocha	Estacao em Km.7	
3850	RB(Cx 3850)	2	34	52		2.54	9.25	23.50	31	30		Nao	Rocha	?	
3850	RB(Cx 3850)	3	33	34		2.54	0	0.00	32	31		Nao	Rocha	Ventil. Desligado	
Rpa.523	523-243	4	34	41		22.5	0.01	0.23	30	29		Nao	Rocha	Ar tranquilo	
Rpa.523	523-239	5	40	41		21.4	1.79	38.31	28	27		Nao	Rocha	Ventil. Desligado	
Rpa.523	523-236	6	9	40		19.9	1.74	34.63	27	26		Nao	Rocha		
4100	100-27N	7	27	28		17.8	1.58	28.19	19.5	16.5		Leve	Rocha	Ventil.conectado	
4100	100-27N	8	28	29		4.72	2.05	9.68	18.5	16.5		Nao	Rocha	Ventil.conectado	
4125	Cx-125	9	15	16		9.24	0.98	9.06	14	12.5		Nao	Rocha		
Rpa.523	523-Niv 150 +20m	10	6	7		27.8	1.4	38.93	16.5	15		Nao	Rocha		
4200	200-S(Cx San Rafael)	11	25	26		?	2.54		11	10.5		Nao	Rocha	Ar entra á chamine	
4200	200-22-N	12	59	86		22.7	2.37	53.68	24	23.5		Nao	Rocha	By Pass	
4200	200-22-N	13	59A	86		6.51	0.98	6.38	24.5	24		Moderada	Rocha	"Veta techo"	
4200	200-3	14	86	87		5.96	13.65	81.35	25	24.5		Nao	Rocha		
4450	450-N	15	11	12		12.5	1.01	12.63	11.5	11		Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
4450	450-N	16	11	12		11.5	1.06	12.20	6.5	5.5		Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
Rpa.523	523-02	17	1	6		24.8	4.68	116.06	8.5	8		Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
4533	533-120-N	18	54C	51		7.57	2.13	16.12	19	18.5		Leve	Rocha	Ventil.ligado	
4533	533-125N	19	96	51		7.63	1.81	13.81	20	19.5		Nao	Rocha	Ventil.ligado	
4533	533-117N	20	54C	51		9.88	1.81	17.88	19.5	19		Nao	Rocha	Galeria paralela 54C-51	
4533	533-102N	21	50	54C		9.12	1.17	10.67	20	19.5		Nao	Rocha	Ventil.ligado	
4533	533-98N	22	50A	50		8.42	1.21	10.19	20	19.5		Nao	Rocha	Ventil.ligado	
4533	533-88N	23	61	50A		4.28	4.22	18.06	20	19.5		Nao	Rocha	Porta aberta	
4533	533-71N	24	62	61		5.13	2.24	11.49	20	19.5		Nao	Rocha		
4600	600 San Rafael	25	4	21		11.9	1.72	20.54	9	7		Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
4666	666 San Rafael	26	5	36		13.1	1.1	14.37	9	7		Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
4600	Zapata	27	3	22		8.26	0.44	3.63	6.5	6		Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
4533	A chaniné está em processo de alargamento							0.00				Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
	Gal. Patron EV2	28				4	1.37	5.48	14.5	14		Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
	Ch. Volcan EV3	se medir a 2m (indirec.)						0.00				Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
	Ch. Patron EV1	na seccao irregular (indirec.)						0.00				Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
	Ch. Alimak EU5	vel o acesso(indirec.)						0.00				Nao		Estac. Ventilacao	
	Tajeos EV4	na seccao irregular(indirec.)						0.00				Nao	Rocha	Estac. Ventilacao	
	Ch. 4850 EU3	vel o acesso(indirec.)						0.00				Nao		Estac. Ventilacao	
	Gal. 4890 EU3	vel o acesso (indirec.)						0.00				Nao		Estac. Ventilacao	
	Ch.4920 EU1	vel o acesso(indirec.)						0.00				Nao		Estac. Ventilacao	



ISBN 978-85-61121-89-1



9 788561 121891