

Série Tecnologia Ambiental

Avaliação de risco à saúde humana da utilização de resíduos de rochas ornamentais como fertilizantes naturais

**Cristiane Andrade de Lima
Roberto Carlos da Conceição Ribeiro
Manuella de Lima Ribeiro
Pedro Paulo Cardoso Lima**



SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

**Avaliação de risco à saúde humana da utilização de
resíduos de rochas ornamentais como fertilizantes
naturais**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Luciana Santos

Ministra de Estado

Luis Manuel Rebelo Fernandes

Secretário Executivo

Isa Assef dos Santos

Subsecretária de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Silvia Cristina Alves França

Diretora

Robson Araujo D’Avila

Coordenador de Administração - COADM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Paulo Fernando Almeida Braga

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Marisa Nascimento

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

STA - 142

Avaliação de risco à saúde humana da utilização de resíduos de rochas ornamentais como fertilizantes naturais

Cristiane Andrade de Lima

Engenheira Química, D.Sc., Instituto Estadual
do Ambiente/INEA

Roberto Carlos da Conceição Ribeiro

Engenheiro Químico, D.Sc., Pesquisador do CETEM/MCTI

Manuella de Lima Ribeiro

Estagiária do CETEM, aluna de graduação de Engenharia
Química da UERJ

Pedro Paulo Cardoso Lima

Bolsista de Iniciação Científica do CETEM/MCTI

CETEM/MCTI

2025

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Editor: Luis Gonzaga Santos Sobral

Subeditor: Andréa Camardella de Lima Rizzo

CONSELHO EDITORIAL: Saulo Rodrigues P. Filho (UNB), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánches (EPUSP), Virginia Sampaio Ciminelli (UFMG), Luís Alberto Dantas Barbosa (UFBA), Ricardo Melamed (UNB), Marcello F. Veiga (University of British Columbia-Canadá), Bruce Marshall (University of British Columbia-Canadá).

Não existe uma definição única que se enquadre na ampla diversidade que o tema “Tecnologias Ambientais” abrange. Em primeiro lugar, o campo das Tecnologias Ambientais é caracterizado por um alto grau de diversidade e heterogeneidade. Em geral, o termo é usado para incluir tecnologias e aplicações que supostamente ajudam a reduzir o impacto negativo da atividade industrial e dos serviços, de usuários privados ou públicos, no meio ambiente. O conceito se refere, normalmente, a tecnologias “no final do processo” (end-of-pipe) integradas a tecnologias limpas e de recuperação de áreas contaminadas. No entanto, também pode abranger questões de sentido mais amplo, como monitoramento, medição, mudança de produtos ou gerenciamento de sistemas ambientais. As tecnologias ambientais são, portanto, de natureza interdisciplinar e podem ser aplicadas em qualquer etapa da cadeia produção-consumo. Tendo isso em mente, a *Série de Tecnologia Ambiental* tem por objetivo congrega especialistas, tais como: pesquisadores, tecnologistas, professores etc., do CETEM em particular, para que divulguem suas pesquisas em áreas tão diversas para servirem como estímulo para os novos e futuros pesquisadores.

There is no single definition that fits the wide diversity that the theme “Environmental Technologies” covers. First, the field of Environmental Technologies is characterized by a high degree of diversity and heterogeneity. In general, the term is used to include technologies and applications that are supposed to help reduce the negative impact of industrial activities and services, by private or public users, on the environment. The concept usually refers to technologies “at the end of the process” (end-of-pipe) integrated with clean technologies and recovery of contaminated areas. However, it can also cover broader issues such as monitoring, measuring, changing products or managing environmental systems. Environmental technologies are, therefore, of an interdisciplinary nature and can be applied at any stage of the production-consumption chain. Bearing this in mind, the “Environmental Technology Series” aims at bringing together specialists, such as: researchers, technologists, professors etc., from CETEM in particular, to disseminate their research in such diverse areas to serve as a stimulus for new and future researchers.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Copyright © 2025 CETEM/MCTI

Todos os direitos reservados.
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação de copyright (Lei 5.988)

Valéria Cristina de Souza
Diagramação e Editoração Eletrônica

André Luiz Costa Alves
Projeto Gráfico

Informações:
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Av. Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Homepage: www.cetem.gov.br

CIP – Catalogação na Publicação

A945

Avaliação de risco à saúde humana da utilização de resíduos de rochas ornamentais como fertilizantes naturais / Cristiane Andrade de Lima [et al.]. – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2025.
58 p. - (Série Tecnologia Ambiental; 142).
ISBN 978-65-5919-068-3.

1. Rochas ornamentais - resíduos. 2. Fertilizantes. 3. Avaliação de risco à saúde humana. I. Lima, Cristiane Andrade. II. Ribeiro, Roberto Carlos da Conceição. III. Ribeiro, Manuella de Lima. IV. Lima, Pedro Paulo Cardoso. V. Centro de Tecnologia Mineral. VI. Série.

CDD 552.4

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI
Bibliotecário(a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 – 5849

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Rochas Ornamentais	13
1.2 Geração de Resíduos	14
1.3 Aplicações Industriais	17
1.4 Avaliação de Risco à Saúde Humana	17
2 OBJETIVO	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Formulação do Problema	28
3.2 Seleção dos Compostos Químicos de Interesse (CQIS)	29
3.3 Valores Orientadores Nacionais e Internacionais Utilizados	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 Caracterização dos Resíduos	31
4.2 Modelo Conceitual de Exposição	33
4.3 Avaliação da Exposição	34
4.4 Variáveis Populacionais e de Tempo de Permanência Utilizados	40
4.5 Avaliação dos Efeitos	41
4.6 Valores de Referência de Toxicidade	44

4.7 Caracterização do Risco	46
4.8 Sumário dos Resultados da Avaliação de Risco à Saúde	49
5 CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

RESUMO

Muitos metais são essenciais para o crescimento de todos os tipos de organismos, sendo requeridos em baixas concentrações, mas podem danificar sistemas biológicos, dependendo da concentração existente, condições de uso e susceptibilidade do organismo envolvido. Uma dificuldade surge ao se converter o risco associado a um particular agente químico em uma medida do risco total representado por todos os agentes poluentes liberados em um determinado local ou região. Neste contexto, buscam-se relacionar a intensidade da poluição com os potenciais riscos à saúde humana e/ou ao meio ambiente, expressam-os como estimativas numéricas comparáveis. Para tal, foram desenvolvidas metodologias para avaliação de risco à saúde humana face a um cenário de contaminação por resíduos gerados na lavra e no beneficiamento do Mármore Bege Bahia. Os resultados de uma avaliação de risco permitem identificar os compostos químicos de interesse (CQIs), bem como as subáreas dentro da área de estudo que representam risco. Estas informações podem ser usadas para orientar decisões de gerenciamento de riscos, incluindo decisões de se e onde ações de remediação seriam necessárias. O objetivo foi avaliar se os resíduos da lavra e do beneficiamento de rochas ornamentais de Cachoeiro de Itapemirim representam risco à saúde. Para tal foi utilizada uma abordagem toxicológica baseada nas metodologias de avaliação de risco à saúde humana propostas pela US EPA (United States Environmental Protection Agency) com a possibilidade de utilização dos resíduos como fertilizante. Conclui-se que para os trabalhadores rurais, que manuseariam o solo fertilizado com resíduos de rochas, bem como para os consumidores dos vegetais que seriam cultivados no local, o risco para o desenvolvimento de efeitos cancerígenos e não-cancerígenos esteve dentro dos níveis considerados aceitáveis e, portanto, são improváveis de causar efeitos à saúde destes grupos de pessoas. Estes resultados indicam que, face aos cenários de exposição avaliados, a ingestão e o contato dérmico com solo, a inalação de

material particulado, bem como a ingestão de vegetais são improváveis de causar efeitos à saúde do grupo de pessoas aqui avaliados. Entretanto, cabe ressaltar que apenas foi avaliado neste trabalho o risco potencial à saúde humana oriundo da presença de metais nos resíduos de rochas. Qualquer outro tipo de parâmetros, tais como microrganismos patogênicos, pesticidas etc., não foram avaliados neste estudo.

Palavras-chave

Resíduos de rochas, fertilizantes, avaliação de risco à saúde humana.

ABSTRACT

Many metals are essential for the growth of all types of organisms, being required in low concentrations, but can damage biological systems, depending on the existing concentration, conditions of use and susceptibility of the organism involved. A difficulty arises when converting the risk associated with a particular chemical agent into a measure of the total risk posed by all polluting agents released in a given location or region. In this context, we seek to relate the intensity of pollution with the potential risks to human health and/or the environment, and express them as comparable numerical estimates. To this end, methodologies were developed to assess the risk to human health regarding to a scenario of contamination of waste generated in the mining and processing of Beige Bahia Marble. The results of a risk assessment allow you to identify the chemical compounds of interest (CQIs), as well as the subareas within the study area that represent risk. This information can be used to guide risk management decisions, including decisions as to whether and where remediation actions would be necessary. The objective was to evaluate whether waste from the mining and processing of Bahia Bege Marble poses a risk to human health and/or the environment. Thus, methodologies were developed to assess the risk to human health regarding to a scenario of contamination of waste generated in the mining and processing of Beige Bahia Marble. The results of a risk assessment allow you to identify the chemical compounds of interest (CQIs as well as the subareas within the study area that represent risk. This information can be used to guide risk management decisions, including decisions as to whether and where remediation actions would be necessary. The objective was to evaluate whether waste from the mining and processing of dimension stones from Cachoeiro de Itapemirim pose a health risk. Therefore, a toxicological approach was used based on human health risk assessment methodologies proposed by the US EPA (United States Environmental Protection Agency) with the possibility of

using the waste as fertilizer. It is concluded that for rural workers, who would handle soil fertilized with rock waste, as well as for consumers of vegetables that would be grown on site, the risk of developing carcinogenic and non-carcinogenic effects was within levels considered acceptable and, therefore, unlikely to cause health effects to these groups of people. These results indicate that, given the exposure scenarios evaluated, ingestion and dermal contact with soil, inhalation of particulate matter, as well as ingestion of vegetables are unlikely to cause health effects to the group of people evaluated here. However, it is worth noting that only the potential risk to human health arising from the presence of metals in rock waste was evaluated in this study. Any other type of parameters, such as pathogenic microorganisms, pesticides, etc., were not evaluated in this study.

Keywords

Dimension stones waste, fertilizer, risk assessment to human health.

1 | INTRODUÇÃO

1.1 | Rochas Ornamentais

O setor de rochas ornamentais desempenha um papel fundamental no mercado econômico do Brasil, pois ocupa a 5ª posição de maior produtor mundial, sendo reconhecido, internacionalmente, pela qualidade e exuberância das rochas ornamentais aqui produzidas. O setor gera receitas substanciais, tornando-o de extrema importância para a economia do país, tanto na geração de receita quanto na geração de empregos, que ultrapassa os 400 mil, segundo a Abirochas, 2023. Além disso, devido à alta geodiversidade, grande território e elevada capacidade de produção, o Brasil teve um aumento de 1,6 milhões de toneladas exportadas em 10 anos, o que consolida o mercado de rochas ornamentais como um ramo em constante expansão e, pela alta lucratividade, não demonstra indícios de desaceleração (ABIROCHAS, 2023).

O setor de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo, que é o Estado de maior produção brasileira, tem como referência o município de Cachoeiro de Itapemirim, região que apresenta área geográfica de 892 km² e com uma população estimada em 175.000 habitantes. Esse município funciona como polo de desenvolvimento local, abrangendo mais nove municípios IBGE (2000).

A história da mineração no município de Cachoeiro de Itapemirim começou por volta do ano de 1874, com a chegada de colonos europeus na localidade. A mineração de calcário era objeto de investigação do governo local. Vieram para o município diversas famílias italianas, muitas das quais foram pioneiras na fabricação de cal. A fábrica de cimento instalada em 1924 também se

beneficiava das jazidas de calcário existentes na região, caminhando juntamente com a formação da atividade mineradora de Cachoeiro de Itapemirim (VILLASCHI e SABADINI, 2000).

As primeiras unidades produtivas do setor de mármore e granito no Espírito Santo datam da década de 30, sendo consolidada no Estado na década de 60. Apesar de tradicionalmente concentrada na região de Cachoeiro de Itapemirim, hoje a produção de rochas encontra-se disseminada por todo Estado, apresentando distintas características por região. A região sul possui grande concentração de empresas de beneficiamento e a norte com forte concentração da atividade extrativa. O processo completo de produção do setor envolve as atividades de extração, serragem, polimento e corte. A indústria de mármore e granito é uma das mais representativas e importantes da economia local, tendo em sua atividade reflexos sobre a indústria mecânica e o comércio exterior. As atividades do setor podem ser divididas em extração, desdobramento (produção de chapas) e beneficiamento (constituído pelo polimento e produtos finais), que constituem os elos principais da cadeia produtiva de rochas ornamentais, complementada por uma indústria de bens de capital e fornecedores de insumos.

1.2 | Geração de Resíduos

Todo o processamento das rochas ornamentais gera uma quantidade significativa de resíduos, tanto grosseiros, gerado pela quebra das peças durante o corte, e resíduos finos que aparecem na forma de lama. Após a evaporação da água, o pó resultante é acumulado nas serrarias ou pedreiras (FARIAS, 1995) ou encaminhado para aterros específicos.

O desdobramento e o polimento ocorrem em vias úmidas e tem como consequência direta a geração de efluente. No desdobramento o efluente é composto de água e resíduo sólido (pó de calcário) oriundo do bloco que está sendo serrado. A serragem origina, também, fragmentos de calcário, conhecidos como casqueiro (laterais externas do bloco), assim como pedaços de chapas quebradas durante o processo. Estes resíduos sólidos não são compatibilizados como integrante do efluente.

Na etapa de polimento, além da água e resíduos sólidos o efluente é composto por outros insumos utilizados: resina, catalisador e material abrasivo. Destes insumos a resina é utilizada em maior escala e, segundo Calhau et al. (2010), é uma resina poliéster ortotereftálica insaturada diluída em monômero de estireno, onde numa possível lixiviação para o meio ambiente poderá contaminar solo e os corpos d'água. A mistura dos efluentes provenientes da serragem e os originados pelo polimento provocará a contaminação do pó de rochas oriundo do desdobramento dos blocos, podendo inviabilizar o aproveitamento dos mesmos.

Na etapa de polimento o volume de efluente gerado é enviado para tanques de decantação construídos em série. O processo de decantação, para a remoção de partículas sólidas em suspensão, é um dos mais comuns no tratamento da água. Consiste na utilização das forças gravitacionais para decantar as partículas com densidade superior à da água, depositando-as em uma superfície ou zona de armazenamento. Nestes tipos de tratamento uma parcela da água é recuperada podendo retornar ao processo industrial.

Nas Figuras 1 a 3 estão apresentados exemplos da geração de resíduos grossos e finos na região de Cachoeiro de Itapemirim durante o beneficiamento das rochas ornamentais.



Figura 1: Geração de resíduos nas serrarias.



Figura 2: Resíduos grosseiros gerados nas serrarias.



Figura 3: Tanques de decantação para o resíduo fino.

1.3 | Aplicações Industriais

A fim de mitigar o impacto ambiental causado pelos resíduos, muitos estudos foram realizados por Ribeiro, et al 2011 (a); Ribeiro e Conceição (2011 b); Ribeiro, et al 2013, Ribeiro, et al 2015 (a), Ribeiro, e Oliveira 2015 (b), Ribeiro et al 2015 (c), Ribeiro, R. C. C et al 2016 (a), Ribeiro et al. 2016 (b) na aplicação, principalmente, no setor polimérico desse material. No entanto, torna-se cada vez mais importante a realização de estudos de avaliação de risco à saúde humana no aproveitamento racional e seguro desses resíduos.

1.4 | Avaliação de Risco à Saúde Humana

A avaliação de risco à saúde humana fornece uma descrição quantitativa da segurança de um local para os seres humanos.

Ela vai além dos padrões ou valores de referência de qualidade ambiental, pois estes valores genéricos não consideram as condições específicas do local, tais como os tipos de pessoas ou seus hábitos alimentares. Além disso, os padrões não estão sempre disponíveis para todos os contaminantes. Por estas razões, a avaliação de risco é usada, frequentemente, para determinar se os contaminantes específicos de um local representam risco à saúde humana. Os resultados de uma avaliação de risco identificam os compostos químicos de interesse (CQIs) e as subáreas dentro da área do estudo que representam risco potencial à saúde.

A metodologia de avaliação de risco é extensamente utilizada e reconhecida por agências reguladoras e pela comunidade científica. Os métodos e procedimentos têm estado disponíveis por muitos anos, e tem crescido o número de pessoas especializadas no desenvolvimento de ações de gerenciamento de questões ambientais com base no risco (LIMA, 2009).

A metodologia de Avaliação de Risco à Saúde Humana foi introduzida, a cerca de 20 anos, e sua implementação tem sido atribuída ao interesse mundial na definição de uma metodologia ampla, na qual se possam incluir os vários aspectos relacionados à toxicidade das substâncias, unindo causas e efeitos de uma maneira quantitativa.

O objetivo principal da avaliação de risco à saúde humana é a identificação e quantificação dos riscos à saúde humana, decorrentes de uma contaminação ambiental, uma vez que a saúde humana e a segurança da população devem ser priorizadas, dentre os bens expostos a serem protegidos, na avaliação de risco em uma área contaminada (CETESB, 2001b).

A estrutura da metodologia de avaliação de risco à saúde humana proposta pela Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana, a

“United States Environmental Protection Agency” (US EPA, 1989a) foi desenvolvida de maneira que facilitasse a apresentação e o entendimento dos resultados pelo público em geral. Esta metodologia tem sido amplamente utilizada na solução de problemas de poluição ambiental, como ferramenta importante no processo de gerenciamento ambiental (HOFFMAN et al. *apud* FERNANDES e VEIGA, 1999; LIMA, 2004). Esta metodologia é baseada em princípios de toxicologia humana e no conhecimento das propriedades físico-químicas e comportamento ambiental dos contaminantes.

A maior dificuldade surge em se converter um risco associado com um particular agente químico para uma medida de risco total representado por todos os agentes poluentes liberados em um determinado local ou região. Desde 1986, a US EPA discute a questão com proposições de modelos de avaliação dose resposta para misturas de substâncias. O paradigma proposto começa com a formulação do problema e com o estabelecimento de modelos que determinem inequivocamente a relação dose-resposta para as misturas. A escolha do efeito crítico e os critérios para atribuir o peso de evidência são determinantes na avaliação de risco de misturas (LIMA, 2004).

Embora um enfoque único não seja recomendado para as avaliações de risco por exposições a múltiplas substâncias, recomendam-se diretrizes gerais para a avaliação de riscos para qualquer situação em que uma população está exposta ou potencialmente exposta, a dois ou mais compostos, que causem preocupação. No método utilizado deve-se assumir o fenômeno de aditividade de doses (ou de resposta), considerando todas as doses estimadas para as diferentes substâncias como doses da mesma substância, apenas diferenciando-as entre substâncias cancerígenas e não-cancerígenas, não sendo incorporada nenhuma

forma de interação antagonônica ou sinérgica entre as substâncias. Afirmar-se que a aditividade de dose (ou de resposta) é teoricamente válida e, portanto, é a que melhor se aplica para avaliar exposições de múltiplos elementos, de ação similar e que não interatuam. Propõe-se que a suposição de aditividade produza geralmente cálculos neutros de risco (ou seja, nem conservadores nem indulgentes) e que seja aceitável para compostos que induzam a tipos similares de efeitos nos mesmos locais de ação (US EPA, 1989a).

A metodologia de avaliação de risco à saúde humana (US EPA, 1989a) pode ser definida como uma metodologia quantitativa que utiliza modelos biológicos e estatísticos e resulta em estimativas numéricas, ou índices que relacionam a intensidade da poluição aos riscos à saúde humana. Tais índices são comparáveis entre si e podem ser utilizados no gerenciamento ambiental, com vistas à seleção da melhor técnica de remediação. Esta metodologia é composta pelas etapas listadas a seguir, que são interligadas:

De acordo com esta metodologia, as seguintes etapas devem ser seguidas, para se quantificar os riscos:

a) Formulação do problema.

A formulação do problema é a primeira etapa da Avaliação de Risco à Saúde Humana e consiste em se identificar os agentes tóxicos de interesse, suas transformações físico-químicas e transferências inter-compartimentos ambientais (US EPA, 1989a).

A base inicial de dados para execução da avaliação de risco é constituída pelas informações coletadas na etapa de investigação ambiental. Muitas vezes o planejamento da Avaliação de Risco tem como base estudos ambientais desenvolvidos em etapas anteriores. Nestes estudos são geradas informações passíveis de

serem utilizadas na Avaliação de Risco. Entretanto, no planejamento deve ser levantado o grau de detalhamento que cada dado, ou grupo de informações, deve ter para que o processo de Avaliação de Risco seja cumprido de forma satisfatória.

A formulação do problema é usada para focar as etapas subsequentes da avaliação. Este foco é fornecido usando um princípio fundamental da avaliação de risco; isto é, não há risco se não houver nenhuma ligação entre a fonte contaminada e os receptores. Ou seja, três elementos são requeridos: i) fonte de contaminação; ii) os receptores e iii) as vias de exposição entre a fonte de contaminação e os receptores (Figura 4). Na ausência de algum desses três elementos (fonte, via de exposição ou receptor) o risco não existe. Esta estrutura fonte/via de exposição/receptor serve como base para a investigação do local e é também a base para todas as etapas seguintes de uma avaliação de risco (US EPA, 1989a).



Figura 4: Três elementos do risco.

A presença de todos os três elementos da Figura 4 não indica, necessariamente, um risco inaceitável. Todavia, a combinação destes indica um potencial de existência de risco. Este potencial é investigado, mais detalhadamente, na formulação do problema. Para formulação do problema é utilizado o método de seleção preliminar, que fornece (US EPA, 1989a):

- Fonte: compostos químicos de interesse que ocorrem em concentrações superiores aos valores orientadores e/ou aos níveis de referência ou *background*;
- Via de exposição: vias de exposição críticas que servem como rotas primárias de exposição aos compostos químicos de interesse;
- Receptor: receptores preocupantes que apresentem elevados níveis de exposição local.

O método de seleção preliminar dos contaminantes, vias de exposição e receptores, está resumidamente esboçado a seguir (US EPA, 1989a):

Seleção dos contaminantes: O objetivo da seleção preliminar dos contaminantes é focar a avaliação nos contaminantes químicos de maior preocupação. Não são incluídos na avaliação de risco: os compostos químicos que na área de estudo apresentarem teores equivalentes ou inferiores às concentrações de referência; os que apresentarem teores na área de estudo inferiores aos valores orientadores; e/ou os que são classificados como nutrientes essenciais ou os fundamentalmente não-tóxicos. Os compostos químicos restantes, que apresentem potencial para aumentar o risco à saúde, são denominados compostos químicos de interesse (CQIs) e serão considerados na avaliação de risco.

Seleção das vias de exposição: O objetivo da seleção das vias de exposição é o de determinar quais são todas as possíveis rotas de exposição pelas quais os receptores podem estar expostos aos contaminantes da área de estudo. Uma lista de possíveis vias de exposição é desenvolvida. Essa lista é, então, avaliada para que se possa determinar se cada via é aplicável aos receptores.

Seleção dos receptores: O objetivo da seleção dos receptores é o de selecionar um conjunto representativo dos receptores que podem estar expostos na área do estudo aos contaminantes presentes na água, no solo, no sedimento, no ar e nos alimentos.

Uma vez que a seleção preliminar está completa, a formulação do problema segue com a elaboração do modelo conceitual das interações fonte/vias de exposição/receptor que será o direcionador preliminar do risco no local. Os modelos conceituais são, geralmente, apresentados na forma de diagramas ou desenhos. Eles constituem o registro visual dos resultados da formulação do problema e podem ser usados para comunicar o que deverá ser abordado nas etapas seguintes da avaliação de risco.

b) Avaliação da exposição.

Na avaliação de exposição é determinada a intensidade, frequência, duração e caminhos da exposição humana, atual ou futura, a determinado contaminante. A estimativa da exposição pode ser baseada diretamente em dados de monitoramento ambiental ou estimada pelo uso de modelos específicos para as condições existentes (US EPA, 1989a).

A avaliação é desenvolvida observando-se os usos atuais e prevendo-se os usos futuros da área em estudo e seu entorno, sendo necessário (US EPA, 1989a):

- Entender os mecanismos de liberação e transporte do contaminante no meio físico;
- Identificar as populações expostas;
- Identificar todas as vias potenciais de exposição;
- Estimar as concentrações nos pontos de exposição, para cada via específica.

A avaliação das informações obtidas permite a elaboração dos cenários de exposição, onde são identificadas as várias possibilidades para que um contaminante, a partir da origem da contaminação, atinja as populações potencialmente receptoras. Os resultados da avaliação da exposição são os valores de ingresso dos compostos indicadores para cada via de exposição específica (atual ou futura) (US EPA, 1989a).

c) Avaliação de toxicidade.

A proposta do processo da avaliação de toxicidade é avaliar o potencial de contaminantes para causar efeitos adversos em indivíduos expostos e providenciar, quando possível, uma estimativa de inter-relação entre a extensão da exposição ao contaminante e o aumento da probabilidade e/ou severidade dos efeitos adversos (CASTILHOS et al., 2005).

Nesta etapa, os bancos de dados toxicológicos servem como fonte de informações sobre a toxicologia dos compostos de interesse e os efeitos adversos à saúde. Esta etapa pode ser dividida em duas atividades principais (US EPA, 2002):

- Identificação dos efeitos adversos - determinação do tipo e magnitude do efeito adverso à saúde que é causado pela exposição a um agente tóxico específico.
- Determinação da dose-resposta - processo de avaliação quantitativa da toxicidade, relacionando-se a dose do contaminante que foi recebida com a incidência de efeitos adversos à saúde em uma dada população exposta.

Esta avaliação pode ser referida a efeitos tóxicos cancerígenos e não-cancerígenos, decorrentes de exposição ambiental.

d) Caracterização e quantificação dos riscos.

A caracterização do risco integra todos os dados obtidos nas etapas anteriores, tendo como objetivo quantificar o risco. Neste momento, as concentrações do contaminante medidas nos pontos de exposição e as concentrações teóricas estimadas por meio de modelos de transporte de massa, são comparadas com os dados toxicológicos específicos do composto de interesse. Esta comparação serve para determinar se os níveis de contaminação atuais ou futuros da área podem produzir algum efeito adverso à saúde humana, segundo os índices toxicológicos utilizados.

A caracterização de risco serve como ponte entre a avaliação do risco e o gerenciamento do risco e é, portanto, uma etapa-chave no processo de tomada de decisão. Deve conter não somente a apresentação da estimativa quantificada do risco, como também a discussão e interpretação dos resultados para ajudar no julgamento do significado do risco (US EPA, 1989a).

Tendo em vista que os mecanismos de toxicidade são diferentes para os efeitos cancerígenos e para os não-cancerígenos, as abordagens para a quantificação do risco também são diferentes.

2 | OBJETIVO

O objetivo principal desse estudo de avaliação de risco à saúde humana é o de determinar se substâncias químicas oriundas dos resíduos do corte de rochas ornamentais, da região de Cachoeiro de Itapemirim – ES, ao serem utilizados na composição de fertilizantes agrícolas, podem causar problemas à saúde das pessoas que manuseiam os fertilizantes e/ou consomem os produtos cultivados no solo fertilizado.

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliados resíduos do beneficiamento de mármore e granitos de 12 empresas da cidade de Cachoeiro de Itapemirim, nomeadas como empresas A à L, realizando-se apenas a avaliação dos metais presentes nos mesmos por meio de ICP-OS e absorção atômica na Coordenação de Análises Minerais (COAMI) do Cetem.

O escopo da avaliação de risco à saúde humana incluiu:

- Revisão e avaliação dos dados disponíveis sobre a caracterização dos diferentes resíduos testados;
- Avaliação dos níveis de risco aceitáveis pela legislação brasileira e internacional;
- Identificação dos receptores, possivelmente expostos, e avaliação das possíveis vias de contato entre os receptores e contaminantes;
- Cálculo dos riscos à saúde humana para os diversos tipos de receptores.

A avaliação de risco seguiu a metodologia proposta pela agência de proteção ambiental americana (US EPA, 1989. Risk Assessment Guidance for Superfund. Vol. I: Human Health Evaluation Manual), bem como as diretrizes sugeridas pela CETESB (CETESB, 2001. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas). Esta avaliação resulta em uma estimativa numérica de risco à saúde humana consequente da exposição a uma fonte de poluição ambiental.

Para o cálculo das doses dos contaminantes, às quais receptores humanos estariam sendo expostos, foram utilizadas as concentrações dos contaminantes em solo, além de parâmetros

populacionais e de tempo de permanência na área. As concentrações dos contaminantes utilizadas foram os dados de caracterização química das amostras de resíduos a serem possivelmente utilizados na fertilização.

Os parâmetros populacionais e de tempo de permanência considerados foram, sempre que possível, específicos para os cenários avaliados. Caso contrário, foram consideradas sugestões de parâmetros da CETESB (2001) e US EPA (1989).

3.1 | Formulação do Problema

3.1.1 | Caracterização da possível fonte de contaminação

Para fins de avaliação de risco à saúde humana, considerou-se como única possível fonte de contaminação os resíduos de rocha a serem utilizados na fertilização de solos.

Caracterização dos Receptores

3.1.2 | Trabalhadores agrícolas

Foram identificados como possíveis receptores, o grupo de pessoas que trabalhariam com o solo, ou seja, aquelas que manipulariam o fertilizante a ser aplicado ao solo. Para fins de análise de risco, considerou-se que estes trabalhadores também consumiriam os produtos a serem cultivados na área fertilizada.

3.1.3 | Consumidores dos produtos cultivados

Este grupo de pessoas é composto essencialmente por aqueles que apenas consumiriam os produtos cultivados no solo fertilizado com os resíduos de rochas.

3.1.4 | Caracterização das possíveis vias de exposição

Buscou-se identificar as principais vias de exposição pelas quais os eventuais receptores poderiam estar expostos aos possíveis contaminantes presentes na área fertilizada.

3.1.5 | Trabalhadores agrícolas

Para os trabalhadores agrícolas as seguintes vias de exposição foram consideradas:

- Ingestão acidental e contato dérmico com solo durante o manuseio do mesmo;
- Inalação de material particulado em ambiente aberto a partir de solo;
- Ingestão de vegetais cultivados na área fertilizada e
- Consumidores dos produtos cultivados.

Para os consumidores a única via de exposição considerada foi:

- Ingestão de vegetais cultivados na área fertilizada.

3.2 | Seleção dos Compostos Químicos de Interesse (CQIS)

Na abordagem de Avaliação de Risco à Saúde Humana proposta, as concentrações de substâncias químicas, presentes nos diferentes resíduos do corte de rochas ornamentais, foram, inicialmente, comparadas com os padrões ou valores orientadores preconizados por agências ambientais nacionais e internacionais para uso agrícola. Tais padrões representam as concentrações dos contaminantes correspondentes a critérios para a proteção da saúde humana por vias de exposição direta e indireta, utilizando-se, para isto, fatores conservadores de exposição, de transporte e

destino dos contaminantes. Estas comparações são feitas para determinar se as condições do local demandam avaliações mais específicas, ou seja, o cálculo do risco propriamente dito.

A seleção dos compostos químicos de interesse (CQIs) foi feita comparando-se a concentração medida na área de estudo, com o menor dos valores orientadores consultados (*i.e.*, o valor mais restritivo). Desta forma, todos os compostos químicos que ultrapassaram o valor de referência mais restritivo, em pelo menos uma das amostras analisadas, foram selecionados como sendo de interesse.

3.3 | Valores Orientadores Nacionais e Internacionais Utilizados

As referências que serviram para a seleção dos CQIs neste estudo estão listadas abaixo. Quando duas ou mais referências apresentavam valores distintos para um mesmo parâmetro, o valor mais baixo (*i.e.*, o mais restritivo) foi utilizado:

CETESB (2005) – valores de intervenção para solo uso agrícola; estes valores indicam o limite de contaminação do solo acima do qual existe risco potencial à saúde humana;

CCME (2006) – padrão canadense para solo uso agrícola;

US EPA (2002) – padrões nacionais dos Estados Unidos de uso residencial do solo, cenário de exposição via ingestão e contato dérmico com solo contaminado;

VROM (2000) – valores de intervenção estabelecidos pela agência ambiental holandesa;

Compostos Químicos de Interesse (CQIs) selecionados.

Os teores de metais presentes nos resíduos foram comparados com seus respectivos valores orientadores para proteção da saúde humana.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 | Caracterização dos Resíduos

Na Tabela 1 estão apresentados os teores de metais obtidos na caracterização química dos resíduos coletados nas 12 empresas de Cachoeiro de Itapemirim. Nas mesmas estão descritos os padrões: (1) CETESB (2005), valores de intervenção para solo uso agrícola no Estado de São Paulo, (2) CCME (2006), padrão canadense para solo uso agrícola, (3) US EPA (2002), uso de solo residencial, cenário de exposição via ingestão e contato dérmico com solo, (4) VROM (2000), valor de intervenção holandês para solo e em verde os pontos que ultrapassaram um desses parâmetros dentre os resíduos avaliados.

Tabela 1: Análise química (metais) encontrados nos resíduos.

[illegible]

Tabela 2: Sumário dos CQIs detectados em solo.

CQIs	Solo			
	A	E	F	K
Cádmio	✓	✓		
Cobalto			✓	
Cobre				✓

4.2 | Modelo Conceitual de Exposição

A partir da identificação dos compostos químicos de interesse, dos receptores potenciais e das vias de exposição foi desenvolvido um modelo conceitual de exposição (Figura 5) para o cenário avaliado, refletindo o entendimento inicial do problema com base nos dados disponíveis.

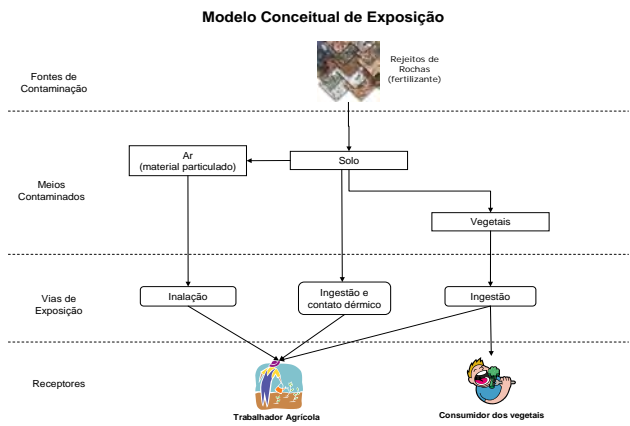


Figura 5: Modelo conceitual de exposição para os receptores humanos possivelmente expostos.

4.3 | Avaliação da Exposição

Nesta etapa foi quantificada a magnitude, frequência e duração da exposição para cada via de exposição e receptor.

4.3.1 | Cálculo da dose de exposição

As equações de exposição usadas para determinar a dose de exposição aos contaminantes via ingestão, contato dérmico com solo, inalação de material particulado e ingestão de alimento estão apresentadas a seguir.

Ingestão de Solo

A seguinte equação foi utilizada para o cálculo da dose administrada via ingestão acidental de solo (US EPA, 1989).

$$D_{\text{adm-solo}} = \frac{Cs \times IR \times FI \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$$

Legenda		
D_{adm-solo}	mg/kg-dia	Dose administrada pela ingestão acidental de solo
Cs	mg/kg	Concentração de contaminante no solo
IR	mg/dia	Taxa de ingestão de solo
FI	-	Fração de alimento consumido proveniente da fonte contaminada
EF	dias/ano	Frequência de exposição
ED	anos	Duração da exposição
CF	10 ⁻⁶ kg/mg	Fator de Conversão
BW	kg	Peso corporal
AT	dias	Período de exposição

Contato Dérmico com Solo

A seguinte equação foi utilizada para o cálculo da dose absorvida via contato dérmico com solo (US EPA, 2004).

$$D_{\text{abs-solo}} = \frac{Cs \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times EV \times CF}{BW \times AT}$$

Legenda		
D_{abs-solo}	mg/kg-dia	Dose absorvida por contato dérmico com solo
Cs	mg/kg	Concentração de composto químico no solo
SA	cm ²	Superfície da pele disponível para contato
AF	mg/cm ² -evento	Fator de aderência do solo à pele
ABS	-	Fração absorvida pela pele
*		
EF	dias/ano	Frequência de exposição
ED	anos	Duração da exposição
EV	eventos/dia	Duração da exposição
CF	10 ⁻⁶ kg/mg	Fator de conversão
BW	kg	Peso corporal
AT	dias	Período de exposição

* Detalhes adicionais dos *ABS* usados no estudo são fornecidos na Seção sobre Biodisponibilidade.

Inalação de material particulado

A seguinte equação foi utilizada para o cálculo da dose administrada via inalação de material particulado (HC, 2004).

$$D_{\text{adm-inal}} = \frac{Cs \times P \times IR \times AF \times D1 \times D2 \times D3 \times D4}{BW \times LE}$$

Legenda		
D_{adm-inal}	mg/kg-dia	Dose administrada pela inalação de material particulado
Cs	mg/kg	Concentração de contaminante no solo
P	kg/m ³	Concentração de material particulado no ar
IR	m ³ /h	Taxa de inalação
AF	-	Fator de absorção por inalação
D1	h/dia	Horas de exposição por dia
D2	-	Dias de exposição por semana/7dias
D3	-	Semanas de exposição por ano/52 semanas
D4	anos	Total de anos expostos ao site (utilizado apenas para avaliação carcinogênica)
BW	kg	Peso corporal
LE	anos	Tempo de expectativa de vida (utilizado apenas para avaliação carcinogênica)

Ingestão de Alimentos

A seguinte equação foi utilizada para o cálculo da dose administrada via ingestão de alimento (*i.e.*, vegetais) (US EPA, 1989).

$$D_{\text{adm-alim}} = \frac{Ca \times IR \times FI \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

Legenda		
D _{adm-alim}	mg/kg-dia	Dose administrada pela ingestão de alimento contaminado
Ca	mg/kg	Concentração de contaminante no alimento
IR	kg/refeição	Taxa de ingestão de alimento
FI	-	Fração de alimento consumido proveniente da fonte contaminada
EF	refeições/ano	Frequência de exposição
ED	anos	Duração da exposição
BW	kg	Peso corporal
AT	dias	Período de exposição

4.3.2 | Estimativas das concentrações dos contaminantes nos vegetais a partir do solo contaminado

Foram realizadas, também, modelagens de transporte dos contaminantes do solo para os vegetais a serem cultivados no solo a ser fertilizado. Para tal, partiu-se das concentrações dos compostos químicos previamente selecionados como sendo de interesse para o solo.

As seguintes equações foram utilizadas nas modelagens (GOLDER, 2005):

Modelagem do transporte de contaminantes do solo para as hortaliças (folhas)

$$C_{\text{solo-hortaliças}} = C_{\text{solo}} \times \text{BTF}_{\text{solo-vegetal}} \times (1-0,85)$$

Legenda		
C_{solo}	mg/kg	Concentração de contaminante no solo
BTF_{solo-veg.}	(mg/kg)/(mg/kg)	Fator de biotransferência solo-vegetal (folha e caule)
CF	-	Ajuste do peso seco/peso úmido (85% umidade no vegetal)
C_{solo-hortaliças}	mg/kg	Concentração nas hortaliças resultante do solo contaminado

Modelagem do transporte de contaminantes do solo para os vegetais (frutos)

$$C_{\text{solo-vegetal}} = C_{\text{solo}} \times \text{BTF}_{\text{solo-vegetal}} \times (1-0,85)$$

Legenda		
C_{solo}	mg/kg	Concentração de contaminante no solo
BTF_{solo-veg.}	(mg/kg)/(mg/kg)	Fator de biotransferência solo-vegetal (frutos, sementes e flores)
CF	-	Ajuste do peso seco/peso úmido (85% umidade no vegetal)
C_{solo-vegetal}	mg/kg	Concentração nos vegetais resultante do solo contaminado

Na Tabela 3 encontram-se descritos os parâmetros utilizados na modelagem matemática para estimativa dos teores de contaminantes transferidos para os vegetais.

Tabela 3: Sumário dos fatores de biotransferência (BTF) para cada contaminante utilizados nos modelos.

Parâmetros	BTF _{solo} /hortaliças	BTF _{solo} /vegetais	Fonte
Cádmio	5,5E-01	1,5E-01	Baes et al (1984)
Cobalto	2,0E-02	7,0E-03	Baes et al (1984)
Cobre	4,0E-01	2,5E-01	Baes et al (1984)

4.3.3 | Concentrações dos CQIs utilizadas no cálculo do risco

As concentrações dos Compostos Químicos de Interesse (CQIs), medidas ou estimadas, utilizadas no cálculo do risco à saúde humana encontram-se resumidas na Tabela 4.

Tabela 4: Concentrações dos CQIs, nos diferentes meios, utilizadas para o cálculo do risco.

CQIs	Unid.	Concentrações Utilizadas		
		Solo	Hortaliças	Vegetais
Cádmio Empresa A	mg/kg	2	1,7E-01	4,5E-02
Cádmio Empresa E	mg/kg	1,6	1,3E-01	3,6E-02
Cobalto Empresa F	mg/kg	38	1,1E-01	4,0E-02
Cobre Empresa K	mg/kg	81,2	4,9E+00	3,0E+00

4.4 | Variáveis Populacionais e de Tempo de Permanência Utilizados

As Tabelas 5 e 6 apresentam os parâmetros populacionais de tempo de permanência para cada cenário avaliado.

Tabela 5: Parâmetros populacionais utilizados nas estimativas de dose.

Parâmetros		Trabalhador rural		Consumidor	
		Valor	Referência	Valor	Referência
Taxa de ingestão de solo (mg/dia)	IR	150	CETESB, 2001 (cenário agrícola, adulto)	-	NA
Superfície da Pele Disponível para Contato	SA	5.700	US EPA, 2004	-	NA
Fator de aderência do solo à pele	AF	0,07	US EPA, 2004	-	NA
Taxa de ingestão de vegetais (kg/dia)	IR	0,04	CETESB, 2001 (cenário agrícola, adulto)	0,04	CETESB, 2001 (cenário agrícola, adulto)
Taxa de ingestão de hortaliças (kg/dia)	IR	0,04	CETESB, 2001 (cenário agrícola, adulto)	0,04	CETESB, 2001 (cenário agrícola, adulto)
Taxa de inalação (m³/h)	IR	0,66	HC, 2004	-	NA
Peso Corpóreo (kg)	BW	60	CETESB, 2001	60	CETESB, 2001

NA – Não aplicável

Tabela 6: Variáveis de tempo utilizadas nas estimativas de dose.

Parâmetros		Trabalhador rural		Consumidor	
		Valor	Referência	Valor	Referência
Frequência de Exposição (dias/ano)	EF	365	Específico (1)	365	Específico (1)
Duração da Exposição (anos)	ED	52	Específico (2)	52	Específico (2)
Período de Exposição – não cancerígenos (dias)	ATnc	18.980	US EPA, 1989 (3)	18.980	US EPA, 1989 (3)
Período de Exposição – cancerígenos (dias)	ATc	25.550	US EPA, 1989 (4)	25.550	US EPA, 1989 (4)

- (1) Pior caso, todos os dias do ano.
- (2) Expectativa de vida do brasileiro na região sudeste = 70 anos (IBGE, 2005), considerando que ele começaria a trabalhar no campo aos 18 anos.
- (3) $AT_{nc} = ED \times 365$ dias
- (4) $AT_c = 70 \text{ anos} \times 365$ dias
- “Específico” = “Específico para o cenário de exposição”

4.5 | Avaliação dos Efeitos

4.5.1 | Classificação dos contaminantes

Assume-se que os contaminantes não-carcinogênicos apresentem um efeito limiar (*threshold*). Para estes contaminantes, os valores de referência são chamados de doses de referência, RfDs (*Reference*

Doses, em mg/kg-dia), e considera-se que apresentam limites de exposição conservadores, abaixo dos quais nenhum efeito adverso à saúde é esperado durante o tempo de exposição.

Durante o desenvolvimento das RfDs para seres humanos, fatores de segurança e de incerteza são aplicados para extrapolar dados sobre animais ou atividades ocupacionais para os humanos. Exposições acima das doses de referências (RfDs) podem representar um risco para a saúde, mas o verdadeiro limite para uma resposta tóxica em seres humanos pode ser de fato muito mais alto, já que margens de segurança na ordem de 100 a 1000 estão tipicamente incorporadas aos RfDs.

Por outro lado, considera-se que os contaminantes classificados como carcinogênicos não possuem limiar de exposição para causar um efeito. O potencial de causar efeitos carcinogênicos é tipicamente expresso por um fator de potencial de carcinogenicidade (SF, *Slope Factor*), taxa de incidência de câncer por unidade de dose (mg/kg-dia)⁻¹, ou por uma unidade de fator de risco (URF – *Unit Risk Factor*), isto é, taxa de incidência de câncer por unidade de concentração (p.ex. para inalação (mg/m³)⁻¹). O fator de carcinogenicidade é tipicamente derivado da caracterização das taxas de respostas observadas em animais ou seres humanos ocupacionalmente expostos a altas doses, e da extrapolação para baixas doses em ambientes com receptores humanos.

Tabela 7: Sistemas de classificação para substâncias químicas desenvolvidos pela US EPA e IARC.

IARC ¹	US EPA ²	Descrição
Grupo 1	Grupo A	Carcinogênico humano
Grupo 2A	Grupo B	Provável carcinogênico humano
	Grupo B1	Evidências limitadas para seres humanos
	Grupo B2	Evidências inadequadas para seres humanos, evidências suficientes para animais
Grupo 2B	Grupo C	Possível carcinogênico humano
Grupo 3	Grupo D	Não-classificável quanto à carcinogenicidade humana
Grupo 4	Grupo E	Provavelmente não carcinogênico para humanos

(1) International Agency for Cancer Research: <http://monographs.iarc.fr>

(2) US EPA: Integrated Risk Information System (IRIS) <http://www.epa.gov/iris/>

As classificações carcinogênicas para os CQIs, estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Classificações carcinogênicas dos CQIs.

Contaminantes	Classificação US EPA	Classificação IARC	Classificado como carcinogênico
Cádmio	B1	NC	Sim
Cobalto	NC	2B	Sim
Cobre	D	NC	Não

NC – A agência não classificou a carcinogenicidade da substância química.

(1) classificado como carcinogênico, mas apenas para via de exposição inalação.

4.6 | Valores de Referência de Toxicidade

Sempre que possível, os valores de referência foram baseados em valores aceitos e estabelecidos pelo *Integrated Risk Information System* (IRIS). Quando estes valores de referência não estavam disponíveis, fontes alternativas foram consultadas, tais como o banco de dados RAIS (*Risk Assessment Information System*), dentre outros. Na tabela 9 apresentam-se os valores de referência de toxicidade oral para os CQIs.

Tabela 9: Valores de referência de toxicidade orais para CQIs.

CQIs	Principais Efeitos	RfD Dérmico (mg/kg-dia)	RfD Inalação (mg/kg-dia)	RfD Oral (mg/kg-dia)	SF Dérmico (mg/kg-dia) ⁻¹	SF Inalação (mg/kg-dia) ⁻¹	SF Oral (mg/kg-dia) ⁻¹
Cd	Câncer de pulmão e disfunção renal	nd	nd	5,0E-04(a)	nd	6,3E+00(b)	na
Co	Cancerígeno, efeitos cardiológicos e dermatite	1,6E-05(a)	5,7E-06(a)	3,0E-04(c)	na	9,8E+00(c)	na
Cu	Náusea, danos no fígado e no rim	nd	nd	4,0E-02(b)	nd	na	na

Fontes: IRIS: <http://www.epa.gov/iris/index.html>; RAIS: http://risk.lsd.ornl.gov/tox/tox_values.shtml; USEPA, 2004.

na – não aplicável, pois o metal não apresenta este tipo de efeito.

nd – não disponível.

4.7 | Caracterização do Risco

A caracterização de risco é o último passo no processo de avaliação de risco no qual as avaliações de exposição e toxicidade são integradas. O processo de caracterização de risco, conduzido neste estudo, reflete o enfoque conservador usado para gerar estimativas de risco. O processo e a interpretação destes passos são discutidos nas seções seguintes.

No caso de residentes, o risco foi calculado para tanto adultos como para crianças, sendo que crianças são consideradas, neste caso, os receptores mais críticos. Isto porque crianças são consideradas mais sensíveis à exposição a substâncias químicas e porque apresentam, tipicamente, maiores taxas de ingestão relativas ao peso corporal, além de apresentarem certos comportamentos que resultam em maior contato com o meio exposto (p.ex. ingestão de água). Adicionalmente, algumas substâncias são mais tóxicas para crianças do que para adultos (p.ex. chumbo).

Uma vez que o desenvolvimento de câncer é um processo longo, o risco para substâncias carcinogênicas foi avaliado para adultos que, neste caso, estariam expostos durante os 64 anos de vida adulta e 6 anos como criança; entretanto, para fins da avaliação de risco de câncer, teve a sua exposição distribuída durante 70 anos (expectativa de vida média da população brasileira na região sudeste; IBGE, 2005).

4.7.1 | Risco para compostos químicos não-carcinogênicos

As taxas estimadas de doses (D) foram comparadas às doses de referência (RfD) para os CQIs não-carcinogênicos, para cada via

de exposição. A razão entre a exposição estimada (D) e o RfD é o quociente de risco (“Hazard quotient”, HQ).

A equação utilizada para o cálculo do quociente de risco é apresentada abaixo:

$$HQ = \frac{D_n}{RfD_n}$$

onde,

HQ quociente de risco

D dose do contaminantes para o cenário de exposição “n” (mg/kg-dia);

RfD dose de referência do contaminantes para o cenário de exposição “n” (mg/kg-dia)

O Índice de Perigo (“*Hazard Index*”, HI) é a somatória dos Quocientes de Perigo (HQ), associados com as diferentes vias de exposição. Deste modo, o risco potencial associado com a exposição total a uma substância química pode ser avaliado. A equação para calcular um HI para uma substância química, por mais de uma via de exposição, é apresentada abaixo:

$$HI_i = \sum HQ$$

onde,

HI_i índice de risco para a substância *i*.

HQ quociente de risco da substância *i* associado às diferentes vias de exposição (*e.g.*, ingestão de água).

Não é cientificamente defensável somar os índices de risco para os diferentes contaminantes não carcinogênicos, já que estes podem atuar em diferentes tecidos ou órgãos resultando em diferentes

efeitos. Porém, se duas ou mais substâncias químicas apresentarem o mesmo mecanismo de ação, (isto é, atuam simultaneamente ou causam efeitos similares à saúde), pode ser apropriado somar os índices de risco para essas substâncias químicas.

Um índice de risco menor que 1, indica que a exposição predita é improvável de representar efeitos adversos à saúde. Entretanto, um índice de risco que exceda 1 não indica, necessariamente, que resulte em potenciais efeitos adversos à saúde. HIs que excedam o valor de 1 pedem uma avaliação de incerteza e premissas de exposição mais detalhadas. Ao avaliar a magnitude dos índices de risco, especialmente índices próximos a 1, é importante considerar as fontes de incerteza e premissas que podem ter influenciado nos cálculos, em sua maioria conservadores.

4.7.2 | Risco para compostos químicos carcinogênicos

A probabilidade de um indivíduo desenvolver câncer em razão da exposição a um agente carcinogênico (ILCR) é um índice que provê uma estimativa do risco de câncer ao longo da vida associado a uma via de exposição e a um composto carcinogênico específicos, e não considera a exposição por fontes naturais. O ILCR abaixo descrito está relacionado a um único composto carcinogênico e uma via de exposição:

$$ILCR_{via\ de\ exposição} = D_{via\ de\ exposição} \times SF_{via\ de\ exposição}$$

Onde:

ILCR Incremento probabilidade de um indivíduo desenvolver câncer em razão da exposição a um agente carcinogênico (adimensional)

- D Dose diária média ao longo da vida para uma via específica ajustada à absorção relativa (mg/kg-dia)
- SF Fator potencial de carcinogenicidade (mg/kg-dia)⁻¹ (*i.e.*, potência carcinogênica do composto)

O ILCR para uma via de exposição é calculado a partir da somatória da via específica ILCR com todos os compostos carcinogênicos. É geralmente plausível somar os ILCRs para cada via, por causa dos efeitos finais comuns à saúde humana.

Devido à margem conservadora (segurança), associada à consequente diminuição do fator de câncer e dos riscos unitários, e o desprezível impacto do risco incremental de 1 a cada 100.000 pela exposição, foi utilizado para propósitos de avaliação e gerenciamento para a presença de substâncias carcinogênicas neste estudo, um nível de risco de câncer de 1 em 100.000 (1,0E-05, *i.e.*, um caso de câncer em cem mil pessoas expostas a essa fonte de contaminação).

Isto significa que nesta análise de risco, considerou-se o nível de risco aceitável para o ILCR em todas as vias e todos os compostos carcinogênicos (ILCR_{total}) 1,0E-05 (*i.e.*, um caso em cem mil). Este valor alvo para câncer é recomendado pela maioria das agências reguladoras, inclusive CETESB, *Health Canada* e US EPA.

4.8 | Sumário dos Resultados da Avaliação de Risco à Saúde Humana

4.8.1 | Trabalhadores rurais

Os quocientes de perigo relativos à exposição de trabalhadores rurais aos contaminantes em todas as possíveis vias de exposição

foram inferiores a 1 (Tabela 10 e Figura 6). Para estes receptores, o incremento da probabilidade de desenvolverem câncer ao longo da vida (ILCR), face ao cenário atual de contaminação, foi inferior a $1,0\text{E-}05$ (Tabela 11 e Figura 7). Estes resultados indicam que o risco destes receptores de desenvolver câncer ou outros efeitos não cancerígenos ao longo da vida, face à exposição ao solo fertilizado com resíduos do corte de rochas ornamentais, encontra-se dentro dos limites considerados aceitáveis.

Tabela 10: Sumário do risco não cancerígeno para trabalhadores rurais.

Parâmetros	Inalação de material particulado	Ingestão de solo	Contato dérmico com solo	Ingestão de vegetais	Ingestão de hortaliças	HI
Cd (A)	$8,8\text{E-}05$	$5,0\text{E-}03$	$5,3\text{E-}04$	$1,5\text{E-}02$	$1,1\text{E-}01$	$1,3\text{E-}01$
Cd (E)	$7,0\text{E-}05$	$4,0\text{E-}03$	$4,3\text{E-}04$	$1,2\text{E-}02$	$8,8\text{E-}02$	$1,0\text{E-}01$
Co (F)	$1,5\text{E-}01$	$3,2\text{E-}01$	$8,4\text{E-}04$	$4,4\text{E-}02$	$2,5\text{E-}01$	$7,6\text{E-}01$
Cu (K)	$4,5\text{E-}05$	$5,1\text{E-}03$	$1,3\text{E-}05$	$2,5\text{E-}02$	$8,1\text{E-}02$	$1,1\text{E-}01$

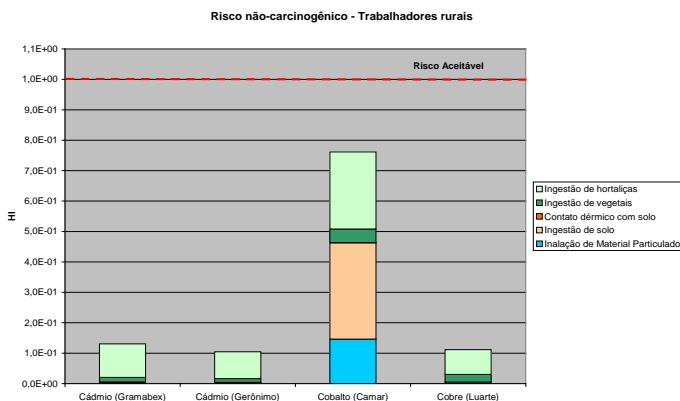


Figura 6: Risco não cancerígeno para trabalhadores rurais.

Tabela 11: Sumário do risco cancerígeno para trabalhadores rurais.

Parâmetros	Inalação de Material Particulado	ILCR
Cádmio	2,1E-07	2,1E-07
Cádmio	1,6E-07	1,6E-07
Cobalto	6,1E-06	6,1E-06

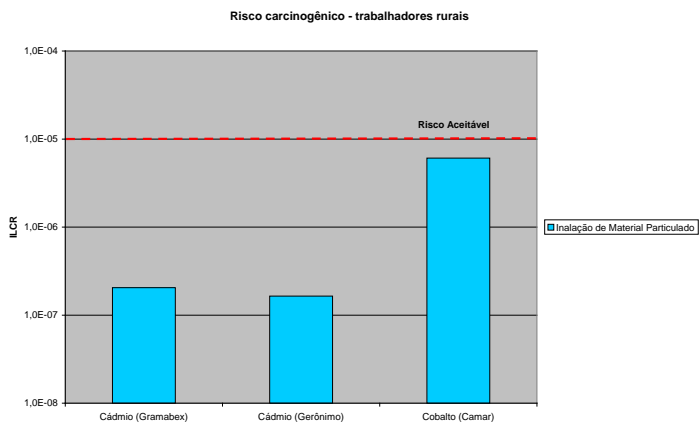


Figura 7: Risco cancerígeno para trabalhadores rurais.

4.8.2 | Risco cancerígeno para trabalhadores rurais.

Para os receptores que consumiriam os vegetais cultivados no solo fertilizado, os quocientes de perigo relativos à exposição aos contaminantes, em todas as possíveis vias de exposição, também foram inferiores a 1 (Tabela 12 e Figura 8). Estes resultados indicam que o risco destes receptores de desenvolver efeitos não

cancerígenos ao longo da vida, face à condição de exposição considerada, encontra-se dentro dos limites considerados aceitáveis.

Tabela 12: Sumário do risco não cancerígeno para consumidores de vegetais.

Parâmetros	Ingestão de vegetais	Ingestão de hortaliças	HI
Cádmio (A)	1,5E-02	1,1E-01	1,3E-01
Cádmio (E)	1,0E-02	8,8E-02	1,0E-01
Cobalto (F)	4,4E-02	2,5E-01	3,0E-01
Cobre (K)	2,5E-02	8,1E-02	1,1E-01

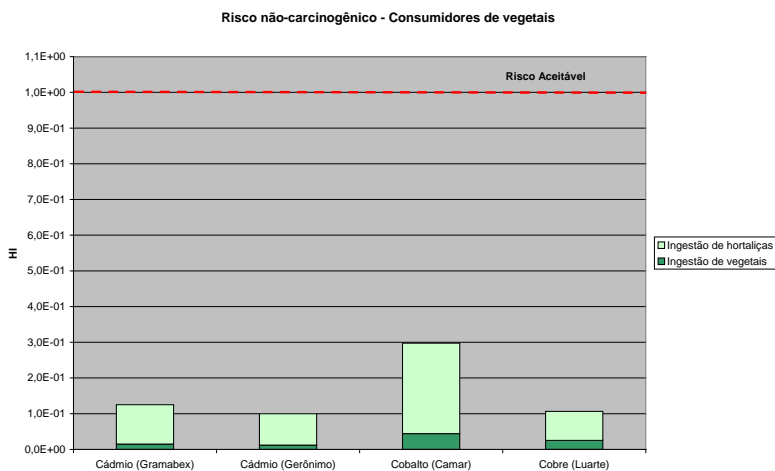


Figura 8: Risco não cancerígeno para consumidores de vegetais.

5 | CONCLUSÕES

Para os trabalhadores rurais que manuseariam o solo fertilizado com resíduos de rochas, bem como para os consumidores dos vegetais que seriam cultivados no local, o risco para o desenvolvimento de efeitos cancerígenos e não-cancerígenos esteve dentro dos níveis considerados aceitáveis e, portanto, são improváveis de causar efeitos à saúde destes grupos de pessoas. Estes resultados indicam que, face aos cenários de exposição avaliados, a ingestão e o contato dérmico com solo, a inalação de material particulado, bem como a ingestão de vegetais são improváveis de causar efeitos à saúde do grupo de pessoas aqui avaliados. Entretanto, cabe ressaltar que apenas foi avaliado neste trabalho o risco potencial à saúde humana oriundo da presença de metais nos resíduos de rochas. Quaisquer outros tipos de parâmetros, tais como microrganismos patogênicos, pesticidas etc., não foram avaliados neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS (2023) Balanço das exportações e importações de rochas janeiro a maio de 2023.

CASTILHOS, Z.C., CASTRO, A.M., RAMOS, A.S., LIMA, C.A.; RODRIGUES, A.P.C. (2005). Avaliação de risco à saúde humana: conceitos e metodologia. Série Estudos e Documentos - CETEM. ISSN - 0103-6319.

CETESB (Companhia e Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo). Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Estado de São Paulo, 2001.

CETESB (Companhia e Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo). Decisão de diretoria nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005.

CCME (Canadian Council of Ministers of Environment). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Summary Tables, Update 6.0.2, november, 2006.

GOLDER, 2005. Guidance document for country foods surveys for the purpose of human health risk assessment. Submitted to: Health Canada. Golder Associates Ltd., Canada, 2005.

HC (Health Canada). Federal Contaminated Site Risk Assessment in Canada. Part I: Guidance on Human Preliminary Quantitative Risk Assessment (PQRA). September, 2004.

LIMA, C.A. Avaliação de risco ambiental como ferramenta para o descomissionamento de uma indústria de metalurgia de zinco. Escola de Química. Tese de doutoramento. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2009.

LIMA, C.A. (2004). Quantificação do decréscimo do risco associado à biorremediação de solo contaminado por hidrocarbonetos de petróleo – Tese de Mestrado. Escola de Química/UFRJ, RJ.

RIBEIRO, R.C.C., OLIVEIRA, M.G., ARRUDA, C.M.R, CARRISSO, R.C.C.; RIBEIRO, L. (2011 a). Processo de formação de compósitos poliméricos utilizando como carga resíduos gerados na lavra e no beneficiamento de mármore e calcários ornamentais. Patente depositada 221109118311, INPI.

RIBEIRO, R.C.C.; CONCEIÇÃO, M.N. (2011 b). Processo de incorporação de resíduos oriundos do beneficiamento da pedra sabão na composição do pavimento asfáltico. Patente depositada PI 221112356619, INPI.

RIBEIRO, R.C.C.; OLIVEIRA, M.G.; CONCEIÇÃO, M.N. (2013). Processo de formação de papel polimérico utilizando como carga resíduos gerados na lavra e no beneficiamento de rochas ornamentais. Patente depositada, BR 1020130188816, INPI.

RIBEIRO, R.C.C.; OLIVEIRA, M.G.; VELOSO, F. (2015 a). Processo de formação de armações de óculos utilizando resíduos de pedra sabão e polipropileno, PI221109118311, INPI.

RIBEIRO, R.C.C.; OLIVEIRA, M.G. (2015 b). Processo de formação de tubetes e/ou vasos poliméricos agrícolas utilizando como carga, resíduos minerais, patente depositada BR1020150182465, INPI.

RIBEIRO, R.C C.; LIMA, C.A.; MOREIRA, T.C.R. (2015 c). Avaliação de risco à saúde humana da aplicação de resíduos gerados na lavra e beneficiamento do Mármore Bege Bahia como carga no setor polimérico. Livro Série Tecnologia Ambiental. Rio de Janeiro: CETEM, 41p.

RIBEIRO, R.C.C.; OLIVEIRA, M.G.; SOUZA, N. (2016 a). Processo de formação de papel Braille polimérico utilizando como carga resíduos gerados na lavra e no beneficiamento de rochas ornamentais. Patente depositada BR1020160082854, INPI.

RIBEIRO, R.C.C.; OLIVEIRA, M.G.; HENRIQUES, C.; LACERDA, G.; SANTOS, C.A.M.; HOLLANDA, F.W. (2016 b). Processo de formação de compósito de poliuretano com resíduos gerados na lavra e no beneficiamento de caulim. Patente depositada BR1020160300720, INPI.

US EPA (United States Environmental Protection Agency). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Human Health Evaluation Manual: Part A. July 1989.

US EPA (United States Environmental Protection Agency). Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC 20460. Dezembro, 2002.

US EPA (United States Environmental Protection Agency). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Human Health Evaluation Manual: Part E, Supplemental guidance for dermal risk assessment. Julho 2004.

VILLASCHI FILHO, A.; SABADINI, M.S. Arranjo produtivo de rochas ornamentais (mármore e granito) /ES. Seminários internacionais de arranjos e sistemas produtivos locais. (Nota técnica, 13). Rio de Janeiro, BNDES. 2000.

VROM (Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment). Intervention values and target values: soil quality standards. The Hague. VROM, 19p. 2000.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2024, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 390 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/repositorio-mineralis-e-biblioteca>.

Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA-141 – Produção de Piso Gerador de Energia Constituído por Resina e Resíduos do Mármore Bege Bahia. Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Lucas Marques Palermo de Aguiar, Williane Gomes de Figueiredo, Pedro Paulo Cardoso Lima, Marcell Nascimento da Conceição, Henriette Santos Branco, José Marcos do Rosário Barreira e Ana Clara Soares, 2025.

STA-140 – Georreferenciamento da região de extração do mármore Bege Bahia – Revisão da Literatura. Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Marcelle Lemos de Amorim Cerqueda, Rosana Elisa Coppedê Silva e Caroline Martins de Sousa, 2025.

STA-139 – Avaliação de riscos ecológico da disposição dos resíduos oriundos da lavra e beneficiamento do mármore Bege Bahia. Cristiane Andrade de Lima, Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Caroline Martins de Sousa, Manuella de Lima Ribeiro e Pedro Paulo Cardoso Lima, 2025.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na cidade Universitário, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 47 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.