

104

# Série Estudos e Documentos

## **Os desafios da biometalurgia frente ao crescimento das minas urbanas**

**Ellen Cristine Giese**

**CETEM**  
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL



## **SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS**

**Os desafios da biometalurgia frente ao crescimento das minas urbanas**

## **PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

**Jair Messias Bolsonaro**

Presidente

## **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES**

**Marcos Cesar Pontes**

Ministro de Estado

**Leonidas de Araújo Medeiros Junior**

Secretário-Executivo

**Darcton Policarpo Damião**

Subsecretário de Unidades Vinculadas

**Alexandre Mendonça Gonçalves**

Coordenador-Geral de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Silvia Cristina Alves França**

Diretora

**Marusca Santana Custodio**

Coordenadora Substituta de Administração - COADM

**Robson de Araújo D'Ávila**

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

**Paulo Fernando Almeida Braga**

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

**Andréa Camardella de Lima Rizzo**

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

**Francisco Wilson Hollanda Vidal**

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

**José Antônio Pires de Mello**

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

# **SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS**

ISSN 0103-6319

ISBN 978-65-5919-017-1

**SED - 104**

## **Os desafios da biometalurgia frente ao crescimento das minas urbanas**

**Ellen Cristine Giese**

Química, D.Sc. em Engenharia e Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, SP  
Tecnologista Pleno do CETEM/MCTI

**CETEM/MCTI**

2020

# **SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS**

**Carlos Cesar Peiter**

Editor

**Ana Maria Botelho M. da Cunha**

Subeditora

## **CONSELHO EDITORIAL**

Francisco R. C. Fernandes (CETEM), Gilson Ezequiel Ferreira (CETEM), Alfredo Ruy Barbosa (consultor), Gilberto Dias Calaes (ConDet), José Mário Coelho (CPRM), RupenAdamian (UFRJ).

A Série Estudos e Documentos publica trabalhos que busquem divulgar estudos econômicos, sociais, jurídicos e de gestão e planejamento em C&T, envolvendo aspectos tecnológicos e/ou científicos relacionados à área minerometalúrgica.

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

**Valéria Cristina de Souza**

Coordenação Editorial

Editoração Eletrônica

**Ellen Cristine Giese**

Revisão

**Clarissa Cezário da Cunha**

CRB 6123

Catologação na Fonte

---

G455

Giese, Ellen Cristine

Os desafios da biometalurgia frente ao crescimento das minas urbanas / Ellen Cristine Giese. \_\_Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2020.

43p.: il. (Série Estudos e Documentos, 104)

1. Biolixiviação. 2. Biossorção. 3. Mineração Urbana.  
I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Giese, Ellen Cristine. III. Título.  
IV. Série.

CDD 669.02

---

## SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1   INTRODUÇÃO	9
2   MINAS URBANAS	13
3   BIOLIXIVIAÇÃO	19
4   BIOSSORÇÃO	28
5   CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
6   AGRADECIMENTOS	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33



## **RESUMO**

Ao longo do tempo, os microrganismos desenvolveram diferentes mecanismos biológicos para sobreviver em meio às altas concentrações dos mais diferentes elementos químicos. Atualmente, os processos biológicos frutos de seu metabolismo diversificado se apresentam como uma grande variedade de ferramentas que vêm sendo empregadas na biohidrometalurgia. A biolixiviação e biooxidação, por exemplo, são processos que facilitam a degradação dos minerais e são acompanhadas de uma liberação de metais. Os processos biológicos são especialmente atraentes para minérios de baixo teor e são usados em escala industrial principalmente para minérios sulfetados. Porém, nos dias atuais, o mundo enfrenta um risco crescente de oferta de matérias-primas críticas e a inovação é necessária no que diz respeito à mineração sustentável das minas urbanas. A biometalurgia pode desempenhar um papel crucial na reciclagem de resíduos e recuperação de metais. O presente artigo apresenta uma visão geral das estratégias biotecnológicas atualmente aplicadas em larga escala na biomineração além de identificar tecnologias, atualmente desenvolvidas em laboratório, que têm uma perspectiva para a recuperação de metais em larga escala a curto e médio prazos. Também são abordados os desafios de P, D & I para o estabelecimento da biomineração urbana.

### **Palavras-chave**

Biolixiviação; biossorção; mineração urbana.



## **ABSTRACT**

Over time, microorganisms have developed different biological mechanisms to survive in high concentrations of the most different chemical elements. Currently, the biological processes resulting from its diversified metabolism are presented as a wide variety of tools that have been used in biohydrometallurgy. Bioleaching and biooxidation, for example, are processes that facilitate the degradation of minerals and are accompanied by a release of metals. Biological processes are especially attractive for low-grade ores and are used on an industrial scale mainly for sulphide ores. However, nowadays, the world faces an increasing risk of supplying critical raw materials and innovation is necessary with regard to the sustainable mining of urban mines. Biometallurgy can play a crucial role in recycling waste and recovering metals. This article presents an overview of the biotechnological strategies currently applied on a large scale in biomineration in addition to identifying technologies, currently developed in the laboratory, that have a perspective for the recovery of metals on a large scale in the short and medium terms. The R, D & I challenges for the establishment of urban biomineration are also addressed.

### **Keywords**

Bioleaching; biosorption; urban mining.

## 1 | INTRODUÇÃO

A biohidrometalurgia, campo da hidrometalurgia que incorpora o uso de microrganismos no processo de recuperação de metais, tem atraído o interesse do setor mineral para a recuperação de metais de minérios ou concentrados de baixo teor, como por exemplo, a biolixiviação de calcopirita, um mineral portador de cobre.

Os microrganismos apresentam um grande potencial para a mineração sustentável através da possibilidade do reaproveitamento de resíduos e rejeitos da mineração convencional e, em paralelo ao desenvolvimento de processos de biolixiviação em larga escala, têm sido realizadas pesquisas intensivas sobre as possibilidades de aplicação da biohidrometalurgia em diferentes tipos de resíduos, entre eles, os resíduos eletroeletrônicos (WILLNER et al., 2015; ZHUANG et al., 2015; GIESE, 2017a).

Os processos biotecnológicos aplicados na biometalurgia são derivados de ciclos metálicos biogeoquímicos naturais e reduzem a demanda de recursos, como minérios, energia e espaço de aterro para resíduos sólidos. A biohidrometalurgia é ecologicamente correta em comparação com a maioria dos processos existentes e também é considerada uma tecnologia verde por produzir uma menor quantidade de resíduos e demandar menos energia se comparada, por exemplo, a processos pirometalúrgicos.

Diferentes grupos de microrganismos, quimiotróficos e especialmente os resistentes à valores extremos de pH (acidófilos), tem sido utilizados nos processos de biolixiviação. Os consórcios microbianos mais utilizados incluem *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*,

*Leptospirillum ferrooxidans* e alguns microrganismos heterotróficos, como por exemplo *Sulfolobus* sp. e também fungos microscópicos como *Penicillium* sp. e *Aspergillus niger*.

No momento presente se observa que os países industrializados estão cada vez mais confrontados com a potencial escassez de matérias-primas críticas, ou seja, aquelas para as quais existe alto o risco de impactos adversos nas suas economias. Recente relatório sobre matérias-primas críticas e estratégicas aborda em maior detalhe esse tema geopolítico (PEITER, 2020). A União Europeia, por exemplo, tem definido e divulgado listas de matérias-primas críticas e recentemente atualizou com 30 selecionadas que incluem metais a granel, minerais industriais, os metais do grupo da platina (MGPs) e os elementos de terras raras (ETRs) (EUROPEAN COMMISSION, 2014). O Departamento de Energia dos EUA identificou cinco ETRs (disprósio, térbio, európio, neodímio e ítrio) como críticos para o desenvolvimento de energias limpas (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2011), ao mesmo tempo em que várias agências americanas se uniram identificar quais seriam os principais minerais críticos para o País (DOI, 2018).

O risco de suprimento desses materiais está cada vez mais pressionando os governos a expandirem a capacidade de minerar e extrair esses materiais de minérios de baixo teor e concentrados primários, bem como otimizar a recuperação e a reciclagem de resíduos e sucatas eletroeletrônicas (ZHUANG et al., 2015; SOUZA; NASCIMENTO, GIESE, 2019; GIESE, 2019a). Em 2020, os EUA reconheceram que não podem depender mais das importações de minerais críticos de outros países, os quais são cada vez mais necessários para manter sua força econômica e militar no século 21. De acordo com

Ordem Executiva recentemente publicada (EXECUTIVE ORDER 13953, 2020), para 31 dos 35 minerais críticos considerados essenciais, os EUA importam mais da metade de seu consumo anual. Os Estados Unidos não têm produção doméstica de 14 destes minerais e são totalmente dependentes de importações para atender sua demanda. Assim, a partir de outubro de 2020, os EUA iniciaram um plano de ação para reduzir sua vulnerabilidade a ações adversas de governos estrangeiros, desastres naturais ou outras interrupções no fornecimento. A ordem é desenvolver cadeias seguras de suprimento de minerais críticos que não dependem de recursos ou processamento de outros países.

As fontes primárias de matéria prima de mais alto teor vêm diminuindo continuamente com a exploração convencional, o que significa que a concentração de minerais alvo nos minérios está diminuindo e os níveis de impureza estão aumentando. Em contrapartida, embora os resíduos urbanos e industriais contenham concentrações metálicas bem menores, seus volumes podem ser enormes, bem como podem se apresentar em formas mais puras. Exemplos incluem, mas não se limitam aos resíduos das minas de bauxita, fosfogesso, cinzas, escórias e efluentes metalúrgicos, drenagem ácidas de minas e resíduos sólidos industriais e municipais. Na última década outro tipo de resíduo tem emergido como potencial matéria-prima para a recuperação de valores metálicos, especialmente os metais críticos: os provenientes das minas urbanas.

As demandas crescentes por minerais críticos e estratégicos têm impulsionado a mineração urbana, ampliando o desenvolvimento de novas rotas tecnológicas baseadas na

biometalurgia para extrair, separar, purificar e recuperar metais críticos a partir de resíduos (GIESE; XAVIER; LINS, 2018; XAVIER et al., 2019).

A busca por tecnologias emergentes poupadoras de energia aliada às políticas econômicas de baixo carbono tornam estes elementos de grande importância econômica e estratégica, bem como demandam e valorizam novas tecnologias para seu processamento. Os metais que podem ser recuperados através dos processos biometalúrgicos podem ser divididos nas seguintes categorias:

- metais básicos (por exemplo, Cr, Pb, Zn, Cu, Ni);
- metais preciosos (Au, Ag e metais do grupo da Platina);
- metais críticos (Li, Elementos Terras Raras);
- radionuclídeos (Th, U).

## 2 | MINAS URBANAS

A escassez de matérias-primas minerais tem sido impulsionada pelo crescimento populacional e pelo aumento do consumo, especialmente nos setores industriais de alta tecnologia. A baixa oferta de alguns óxidos metálicos é um problema global crítico decorrente do fato de que os minerais brutos primários não são renováveis. Depois da extração e uso, os metais extraídos das fontes primárias são relegados às minas urbanas (aterros sanitários, entre outros) especialmente na forma de produtos em fim de vida (KIDDEE et al., 2013).

As minas urbanas incluem resíduos secundários que são gerados diretamente nas áreas urbanas. Estes recursos são caracterizados pela heterogeneidade material, contendo diversos metais e suas ligas além de plásticos, vidros e cerâmicas. Um exemplo dessa matriz complexa em termos de variedade de materiais é o lixo eletrônico (DEBARAJ; YOUNG, 2010).

O objetivo da mineração urbana é alcançar a utilização máxima de materiais com custos mínimos de produção e de processamento, concomitantemente com a diminuição do impacto ambiental (ALLWOOD et al., 2011). Deste modo, a mineração urbana se encaixa nas tendências atuais de economia circular, buscando o aproveitamento econômico de matérias-primas secundárias resultante da geração de resíduos, pelo descarte de produtos pós-consumo. As matérias-primas voltam à cadeia produtiva por meio de recirculação ou reciclagem, minimizando os impactos ambientais e favorecendo a sustentabilidade (XAVIER; LINS, 2018).

As minas urbanas possuem a característica de receber vários tipos de fluxos de resíduos, os quais encontram-se prontamente acessíveis e apresentam concentrações significativas de metais. Um paralelo entre a disponibilidade de metais críticos nas fontes minerais primárias e a disponibilidade em minas urbanas pode ser visto na Tabela 1 (WANG et al., 2017).

**Tabela 1.** Disponibilidade de alguns metais críticos na mineração tradicional vs. mineração urbana.

Metais	Disponibilidade em Minérios %	Disponibilidade em Minas urbanas %	Composição das minas urbanas
Li	$6,5 \times 10^{-3}$	1-6	cerâmica, vidro, baterias, indústria nuclear
In	$1,0 \times 10^{-5}$	0,5-5	TVs e monitores LCD, laptops
Ga	$1,5 \times 10^{-3}$	-	semicondutores, células fotovoltaicas, ligas metálicas
Ge	$7,0 \times 10^{-5}$	-	fibra óptica e de infravermelho, catalisadores
Mo	$1,1 \times 10^{-4}$	10-30	produtos eletroeletrônicos, catalisadores
W	$1,0 \times 10^{-3}$	-	carboneto cimentado, catalisadores
V	1,8	1-12	siderurgia, aviação, catalisadores

Devido ao seu amplo uso em tecnologias de ponta, a maioria dos metais valiosos estão disponíveis nas minas urbanas na forma de resíduos eletrônicos (e-wastes), catalisadores, rejeitos e escória. A Figura 1 ilustra os diversos produtos de alta tecnologia que contém metais críticos e são considerados matéria-prima quando descartados ao final do uso em aterros, constituindo as minas urbanas.



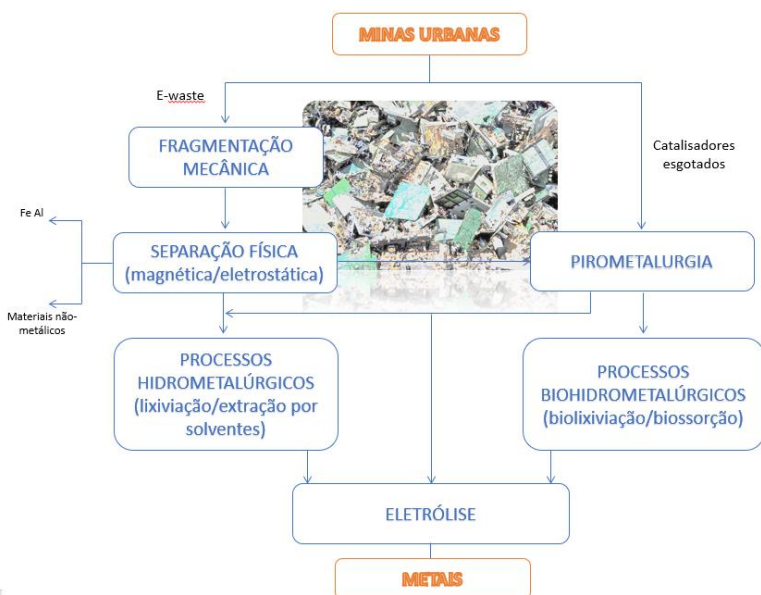
**Figura 1.** Produtos de alta-tecnologia considerados fontes secundárias de metais na mineração urbana.



As placas de circuito impresso (PCBs) representam aproximadamente 3-6% do peso total dos componentes do e-waste e apresentam cerca de 40% em peso de metais com valor econômico (DAVE; SODHA; TIPRE, 2018; DAS; VIDYADHAR; MEHROTRA, 2009). Desta maneira, os PCBs têm recebido muita atenção e são considerados um dos resíduos mais valiosos das minas urbanas. A composição típica de PCBs compreende 0,3% a 0,4% de elementos preciosos (20-500 ppm de ouro, 200-3000 ppm de prata e 10-200 ppm de platina), 28% de elementos valiosos (cobre 10-20%, níquel 1-3%, alumínio e aço) e metais tóxicos, como chumbo, cádmio, arsênio e antimônio incluindo 49% de vidro e cerâmica e 19% de materiais plásticos (ARSHADI; MOUSAVI, 2015). Esses metais estão acoplados intactos uns com os outros e formam uma estrutura de difícil desfragmentação (CUCCHIELLA et al., 2015; HUANG; GUO; XU, 2009). Conforme estimado, uma tonelada métrica de PCBs contém de 80 a 1.500 kg de ouro e 160-210 kg de cobre (LI et al., 2007).

Atualmente, as tecnologias convencionais de reciclagem destes resíduos buscam, em um primeiro momento, o enriquecimento do conteúdo metálico por etapas de pré-tratamento mecânicos seguido da recuperação dos elementos por métodos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. A biohidrometalurgia tem sido sugerida em substituição aos processos hidrometalúrgicos.

A biomineração consiste em dois sistemas biológicos combinados: a biolixiviação para a solubilização dos metais valiosos e a biossorção para a recuperação e separação seletiva dos metais. A Figura 2 ilustra as etapas de processamento de resíduos eletroeletrônicos.



**Figura 2.** Produtos de alta tecnologia considerados fontes secundárias de metais na mineração urbana.

Na etapa de pré-tratamento ocorrem os processos de desmontagem que geralmente são feitos manualmente. Os componentes metálicos são beneficiados com o uso de processos físicos constituídos por operações unitárias usadas convencionalmente no tratamento de minérios, tais como: cominuição em moinhos, classificação granulométrica, separação magnética e eletrostática, flotação etc., de modo a concentrar os metais de interesse. A recuperação e refino é realizada através de processos metalúrgicos de pirometalurgia e hidrometalurgia (lixiviação e extração por solventes).

A biomineração urbana surge como uma alternativa ao uso de métodos hidrometalúrgicos os quais, em geral, envolvem um alto consumo de energia e, portanto, alto custo operacional, além da poluição secundária decorrente (GIESE; XAVIER; LINS, 2018; XAVIER et al., 2019; GIESE, 2019b). A biolixiviação é amplamente utilizada na extração e recuperação de metais de minérios e resíduos enquanto a biorremediação se concentra na remoção ou imobilização de contaminantes perigosos, como radionuclídeos e metais pesados de locais contaminados. Estes bioprocessos serão melhor detalhados a seguir.

### 3 | BIOLIXIVIAÇÃO

As principais reações químicas que culminam na biolixiviação de metais a partir de resíduos sólidos são (MINIMOL et al., 2020):

**Redoxólise:** responsável pela solubilização do metal por meio de reações de oxidação e redução. Em condições aeróbias e ácidas, os microrganismos oxidam íons ferrosos a férricos que agem como oxidantes para as formas de metal insolúvel. Além disso, pode ocorrer a formação de ácido sulfúrico catalisada por íon férricos na presença de compostos de enxofre.

**Complexólise:** os metabólitos extracelulares das células microbianas podem agir como ligantes e auxiliar na quelação ou podem complexar diretamente com os metais.

**Acidólise:** consiste na geração de ácidos inorgânicos e orgânicos com a conseqüente dissolução de metais da superfície. O ácido inorgânico produzido pelos microrganismos é geralmente ácido sulfúrico que desempenha um papel na solubilização de sulfetos metálicos. Outro grupo de microrganismos excreta ácidos orgânicos como os ácidos cítrico, glutâmico e oxálico. Os metais são deslocados de suas superfícies pelos prótons dos ácidos carboxílicos.

Um dos primeiros estudos sobre lixiviação microbiológica de metais a partir de resíduos eletrônicos foi realizado com o uso de consórcios bacterianos de *A. ferrooxidans* e *A. thiooxidans* e fúngicos de *A. niger* e *Penicillium simplicissimum* na presença de 10-100 g/L de sucata eletrônica proveniente da trituração de componentes de computadores contendo 237 g/kg Al, 80 g/kg

Cu, 20 g/kg Pb, 15 g/kg Ni, 23 g/kg Sn e 26 g/kg Zn (BRANDL; BOSSHARD; WEGMANN, 2001). A formação de ácidos inorgânicos e orgânicos causou a mobilização de metais. Os fungos conseguiram solubilizar Cu e Sn em 65%, e Al, Ni, Pb e Zn em mais de 95%. As bactérias foram capazes de lixiviar mais de 90% do Cu, Zn, Ni e Al.

Desde então, muitos pesquisadores têm avaliado o uso dos diversos processos biohidrometalúrgicos para a recuperação de valores metálicos a partir de resíduos eletroeletrônicos. A Tabela 2 relaciona diferentes estudos realizados para a bioextração de metais de diferentes tipos de resíduos sólidos.

**Tabela 2.** Tipos de resíduos e metais extraídos através de processos biohidrometalúrgicos.

Tipo de resíduos	Metais extraídos	Microrganismos usados	Referências
Cinzas volantes	Zn, Cd, Ni, Cr, Pb, Mn, Fe, Al	<i>A. thiooxidans</i> , <i>A. ferrooxidans</i> , <i>A. niger</i>	BROMBACHER; BACHOFEN; BRANDL, 1998
Escória de fundição de cobre	Fe, Zn, Ni	<i>A. ferrooxidans</i> , <i>A. thiooxidans</i> , <i>A. caldus</i> , <i>L. ferrooxidans</i> ,	KAKSONEN et al., 2011
Catalisadores esgotados	Al, Co, Mo, Ni	<i>A. ferrooxidans</i> , <i>A. thiooxidans</i>	GHOLAMI et al., 2011
Catalisadores esgotados	Ni, V, Mo, Al	Bactérias oxidantes de ferro/enxofre, <i>A. niger</i>	SANTHIYA; TING, 2011
Catalisador de hidrocracking (HDC)	Mo, Ni, Al	<i>Acidianus brierleyi</i>	GERAYELI et al., 2013
Catalisador de hidrocracking (HDC)	Ni, Fe, W, Mo, Al	<i>P. simplicissimum</i>	AMIRI; YAGHMAEI; MOUSAVI, 2010
Resíduos eletrônicos	Sn, Ni, Pb, Zn, Al	<i>A. ferrooxidans</i> , <i>A. thiooxidans</i> , <i>A. niger</i> , <i>P. simplicissimum</i>	BRANDL; BOSSHARD; WEGMANN, 2001
Resíduos eletrônicos	Pb, Zn	<i>A. ferrooxidans</i> , <i>A. thiooxidans</i>	WANG et al., 2009
Resíduos de escória de cinzas	Sc, Y, La, Nd, Sm, Gd	quimolitoautotróficos acidofílicos	MURAVYOV et al., 2015

**Tabela 2a.** Tipos de resíduos e metais extraídos através de processos biohidrometalúrgicos.

<b>Tipo de resíduos</b>	<b>Metais extraídos</b>	<b>Microrganismos usados</b>	<b>Referências</b>
Resíduos de escória de cinzas	Sc, Y, La, Nd, Sm, Gd	quimolitoautotróficos acidofílicos	TSAPLINA et al., 2015
Resíduos eletrônicos	Ce, Eu, Y	<i>A. ferrooxidans</i>	MARRA et al., 2018
Resíduos eletrônicos	Au, Al, Cu, Ni, Zn	<i>P. putida</i> , <i>A. ferrooxidans</i> + <i>A. thiooxidans</i>	BRANDL et al., 2001
PCBs	Cu, Al, Ni, Zn	<i>S. thermosulfidooxidans</i> + acidófilos	ILYAS et al., 2007
PCBs	Cu	<i>A. ferrooxidans</i> + <i>A. thiooxidans</i>	ISIDAR et al., 2016
PCBs	Cu	<i>A. ferrooxidans</i> + <i>L. ferrooxidans</i> + <i>A. thiooxidans</i>	BAS; DEVECI; YAZICI, 2013
PCBs	Cu, Al, Zn	quimolitoautotróficos acidofílicos	ZHU et al., 2011
PCBs	Cu, Ni	<i>A. ferrooxidans</i>	ARSHADI; MOUSAVI, 2014
PCBs	Al, Cu, Zn	<i>A. ferrooxidans</i>	YANG et al., 2014
Pó de lâmpada fluorescente	Y	<i>A. ferrooxidans</i> + <i>L. ferrooxidans</i> + <i>A. thiooxidans</i>	YANG et al., 2014
PCBs	Cu	<i>A. ferrooxidans</i>	YANG et al., 2009
PCBs	Cu	<i>A. ferrooxidans</i>	CHEN et al., 2015
PCBs	Cu	<i>A. ferrooxidans</i>	ANNAMALAI; GURUMURTHY, 2019
PCBs	Cu	<i>L. ferriphilum</i> + <i>S. thermosulfidooxidans</i> (sobrenadante)	WU et al., 2018
Resíduos eletrônicos	Cu, Au, Zn, Fe, Ag	<i>C. violaceum</i>	PRADHAN; KUMAR, 2012
Resíduos eletrônicos	Cu, Au, Zn, Fe, Ag	<i>C. violaceum</i> + <i>P. aeruginosa</i>	PRADHAN; KUMAR, 2012
PCBs	Cu	quimolitoautotróficos acidofílicos	WEI et al., 2019
Catalisadores catalíticos (FCC)	ETRs	<i>G. oxydans</i>	REED et al., 2016
Catalisadores catalíticos (FCC)	ETRs	<i>G. oxydans</i>	THOMPSON et al., 2017
Pó de lâmpada fluorescente	ETRs	<i>Kombucha</i>	HOPFE et al., 2017

**Tabela 2b.** Tipos de resíduos e metais extraídos através de processos biohidrometalúrgicos.

Tipo de resíduos	Metais extraídos	Microrganismos usados	Referências
Pó de lâmpada fluorescente	Ce, Eu, La, Y	<i>A. thiooxidans</i> , <i>P. putida</i> .	MARRA et al., 2018
PCBs	Au	<i>C. violaceum</i>	FARAMARZI et al., 2004
PCBs	Cu	quimolitoautotróficos acidofílicos	ZHU et al., 2011
PCBs	Au, Ag	<i>P. balearica</i>	KUMAR; SAINI; KUMAR, 2017
PCBs	Cu	quimolitoautotróficos acidofílicos	XIANG et al., 2010
Resíduos eletrônicos	Au, Cu	<i>C. violaceum</i> , <i>P. fluorescens</i>	PHAM; TING, 2009
Placas de circuito de TV (STVB)	Cu	quimolitoautotróficos acidofílicos	BAS; DEVECI e YAZICI, 2013
Baterias Ni-Cd	Ni, Cd, Co, Zn	<i>A. fumigatus</i> , <i>A. flavipes</i> , <i>A. japonicus</i> , <i>A. tubingensis</i> <i>A. versicolor</i> , <i>A. niger</i>	KIM et al., 2016
PCBs	Al	<i>A. ferrooxidans</i>	FU et al., 2016
Baterias Ni-Cd	Cd	<i>A. ferrooxidans</i>	VELGOSOVÁA et al., 2013
PCBs	Al, Cu, Mg, Zn	<i>A. thiooxidans</i>	HONG; VALIX, 2014
PCBs	Cu	<i>S. thermosulfidooxidans</i>	RODRIGUES et al., 2015
Baterias Li	Cu, Li, Mn, Al, Co, Ni	<i>A. niger</i>	BAHALOO-HOREH et al., 2016
Baterias Li	Li, Mn, Cu, Al, Co, Ni	<i>A. niger</i>	BAHALOO-HOREH et al., 2018

Um grande grupo de resíduos sólidos ricos em metais de transição é formado por catalisadores esgotados usados na indústria de refino de petróleo. Estes catalisadores contêm W, Mo, Ni, V, Co e Al, além de também conter alguns contaminantes orgânicos (carbono e óleos) (AMIRI; YAGHMAEI; MOUSAVI, 2011). Alguns autores citam o uso de cepas fúngicas para a biossolubilização de metais nestes

casos, como por exemplo, o fungo *P. simplicissimum* (AMIRI; YAGHMAEI; MOUSAVI, 2010; 2011), o qual foi capaz de extrair quantidades de metais na ordem de 100% W e Fe, 92% Mo, 66% Ni e 25% Al. O principal agente lixiviante foi o ácido glucônico, produzido metabolicamente pelo microrganismo a partir da celulose.

O potencial da bactéria *Gluconobacter oxydans* na biolixiviação de catalisadores catalíticos (FCC) foi demonstrada por REED et al., (2016). Na presença de ácido glucônico produzido metabolicamente durante o processo de biossolubilização, 49% de ETRs foram extraídas do resíduo. Este rendimento aumentou para 56% com a otimização de parâmetros do processo, como níveis de oxigênio e adição de nutrientes (THOMPSON et al., 2017).

Uma nova abordagem para o processo de biolixiviação de sucatas de placas de circuito de TV (STVB) foi adotada, baseada na adição de pirita (5-50 g/L) como fonte de ferro e enxofre, por BAS; DEVECI e YAZICI (2013). Desta maneira, a biolixiviação de íons Cu usando uma cultura mista de bactérias mesófilas aumentou de 24% para 84% com uma diminuição significativa no consumo de ácido, de 62%.

Outra matriz sólida utilizada na recuperação de ETRs é o pó fosfórico de lâmpadas esgotadas. Este resíduo contém principalmente três dos cinco ETRs mais críticos, ou seja, ítrio, európio e térbio, muitas vezes em quantidades gramas por kg de pó (BEOLCHINI et al., 2012). Kombucha é uma cultura mista simbiótica composta por leveduras (*Zygosaccharomyces lentus*) e bactérias acéticas (*Komagataeibacter hansenii*), usada em domicílios para a produção de bebidas. Este consórcio microbiano é conhecido por produzir altas



quantidades de ácidos orgânicos, principalmente ácido acético e ácido glucônico. HOPFE et al., (2017) observaram uma solubilização de 6,5%mol ETRs de pó fosfórico em 2 semanas de contato na presença do Kombucha.

MARRA et al., (2018) propôs um processo de biolixiviação em duas etapas para a extração de ETRs de pó fosfórico utilizando *A. thiooxidans* e *P. putida*. A primeira etapa consistiu na biolixiviação com a bactéria oxidante *A. thiooxidans*, a qual apresentou rendimentos de extração de cerca de 99% para Ce e Eu, e de 80% para La e Y, sendo que o pH da solução de lixiviação caiu de 3,5 para 1,0 após 8 dias. Na segunda etapa, o cianeto produzindo como metabólito secundário por *P. putida* auxiliou na liberação de 48% de ouro dentro de 3h.

Uma rota biohidrometalúrgica baseada na atividade fúngica de *A. niger* foi avaliada para a recuperação de Cu, Li, Mn, Al, Co e Ni de baterias de lítio. A eficiência da bioextração foi de 100% Cu, 95% Li, 70% Mn, 65% Al, 45% Co e 38% Ni, a qual ocorreu através da ação do ácido cítrico produzido metabolicamente (BAHALOO-HOREH et al., 2016). A adaptação prévia do fungo em meios contendo resíduos metálicos promoveu a bioextração de 100% Li, 94% Cu, 72% Mn, 62% Al, 45% Ni e 38% Co, sendo que neste caso o principal ácido produzido metabolicamente foi o ácido glucônico (BAHALOO-HOREH et al., 2018).

A bactéria *Chromobacterium violaceum* tem sido amplamente utilizada na recuperação de metais a partir de fontes secundárias. FARAMARZI et al., (2004) estudaram a recuperação de ouro de PCBs. Em uma primeira etapa, as placas foram cominuídas manualmente em peças de 5-10 mm que continham, cada uma, cerca de 10 mg de Au. Em seguida,

as peças foram submetidas à bioextração na presença de *C. violaceum*, resultando em uma dissolução de Au de 14,9%. Em trabalho semelhante, o ouro foi solubilizado por microrganismos como *P. fluorescens* e *P. plecoglossicida* (BRANDL et al., 2008). Os microrganismos utilizados nestes experimentos são bactérias cianogênicas, ou seja, são produtoras de ácido cianídrico. Em estudos similares, *C. violaceum* foi capaz de lixiviar mais de 79% Cu, 69% Au, 46% Zn, 9% Fe e 7% Ag, respectivamente, de uma concentração de lixo eletrônico de 1% (m/v). Culturas mistas de *C. violaceum* e *P. aeruginosa* foram capazes de lixiviar metais em 83% Cu, 73% Au, 49% Zn, 13% Fe e 8% Ag (PRADHAN; KUMAR, 2012).

Como dito anteriormente, as placas de circuito impresso (PCBs) são os mais valiosos resíduos eletroeletrônicos. Porém, os componentes não-metálicos destas peças são tóxicos para a comunidade bacteriana utilizada no processo de biolixiviação. ZHU et al., (2011) avaliaram então, os efeitos do pH inicial, da concentração inicial de íons Fe(II), a concentração inicial de resíduos, o tamanho de partícula e a quantidade de células bacterianas iniciais para determinar as condições ótimas de biolixiviação de PCBs utilizando uma cultura mista de bactérias isoladas previamente de drenagem ácida de minas. Os resultados mostraram que o pH inicial e a concentração de Fe(II) foram os parâmetros avaliados mais significativos na solubilização de íons cobre. As condições otimizadas foram: pH inicial 2,0; Fe(II) inicial de 12 g/L, concentração de PCBs em 12 g/L, inóculo 10% (v/v) e tamanho de partícula de 60-80 mesh. Estas condições garantiram uma eficiência de bioextração de cobre de 96,8% em 45 h, e de 88,2% alumínio e 91,6% de em 98 h.

Um consórcio bacteriano enriquecido de drenagem ácida de minas também foi usado visando a extração de cobre de PCBs. Neste estudo, o pH inicial e a concentração de íons Fe(II) também demonstraram ser os fatores mais importantes para o desempenho do processo e, a bioextração de cobre foi maior quanto menor foi a concentração inicial de PCBs. A taxa máxima de lixiviação de cobre, de cerca de 95%, foi alcançada após 5 dias de lixiviação, em pH inicial 1,5; Fe(II) inicial de 9 g/L e concentração inicial de resíduo de 20 g/L (XIANG et al., 2010).

A bactéria *Pseudomonas balearica* foi utilizada para a bioextração de ouro e prata de PCBs triturados ( $\leq 150 \mu\text{m}$ ). Em condições ótimas de extração, fixadas em pH inicial 9,0, densidade de polpa de 10 g/L (m/v), 30 °C, e concentração de glicina de 5 g/L, cerca de 68,5% de ouro e 33,8% de prata foram dissolvidos (KUMAR; SAINI; KUMAR, 2017).

PHAM e TING (2009) compararam a biolixiviação de ouro de e-waste contendo ouro e cobre por *C. violaceum* e *P. fluorescens*. Embora a cepa de *C. violaceum* avaliada tenha produzido mais cianeto do que a cepa de *P. fluorescens* na ausência de resíduos eletrônicos, a bactéria *P. fluorescens* apresentou maior taxa de crescimento, maior produção de cianeto e maior eficiência de lixiviação de ouro em todas as densidades de polpa testadas para o lixo eletrônico, proveniente de uma empresa de reciclagem de Singapura.

WEI et al., (2019) propuseram um sistema integrado para a biolixiviação de PCBs e recuperação de cobre por bactérias biolixiviantes em campo elétrico de corrente contínua utilizando um reator bioelétrico. Os resultados mostraram que a aplicação de corrente elétrica de 40 mA auxiliou na diminuição do tempo

de lixiviação para apenas três dias com 100% de eficiência e recuperação de cerca de 97% dos íons Cu lixiviados ao final de quatro dias operacionais. O campo elétrico melhorou a atividade e o crescimento das bactérias oxidantes de ferro e facilitou a oxidação dos íons Fe(II), o que resultou na lixiviação eficaz do Cu dos PCBs e a rápida eletrodeposição dos íons no cátodo.

A maioria dos processos estudados para a biolixiviação de metais a partir de resíduos eletroeletrônicos tem sido realizada por meio da biolixiviação direta, ou seja, com as células microbianas crescendo em contato com os resíduos. HONG e VALIX (2014) optaram por comparar as taxas de extração de cobre de PCBs utilizando três processos: um processo químico abiótico, na presença de ácido sulfúrico inorgânico; um processo de lixiviação indireta usando ácido sulfúrico gerado por bactérias e um processo de lixiviação direta na presença de bactérias acidófilas. O rendimento de ácido sulfúrico gerado por bactérias usado para a lixiviação indireta e direta foi de 14,9 g/L. Os resultados indicaram que a dissolução do cobre é influenciada pela passivação e acoplamento galvânico, que reduziu o rendimento de solubilização de íons Cu e resultou em uma lixiviação mais lenta na presença das bactérias (HONG; VALIX, 2014)

## 4 | BIOSORÇÃO

A biossorção é utilizada como um processo subsequente à lixiviação/biolixiviação, sendo considerada uma opção de baixo custo para a recuperação de íons metálicos de uma fase aquosa. O processo baseado na biossorção oferece muitas vantagens quando comparado aos métodos convencionais utilizados, tais como baixo custo operacional, menor geração de efluentes e diminuição dos impactos ambientais (GIESE, 2019c; GIESE, 2020a,b).

No processo de biossorção, materiais adsorventes de baixo custo podem ser obtidos a partir de materiais naturalmente abundantes ou de resíduos agroindustriais. Devido ao seu pequeno tamanho e diferentes estruturas em sua superfície, a biomassa microbiana pode apresentar áreas superficiais específicas muito altas, fornecendo um grande número de sítios ativos com alguma seletividade para sorção de íons metálicos. Como estes grupos estão naturalmente presentes na superfície das células microbianas, os biossorventes não requerem funcionalização como alguns sorventes convencionais (GIESE; MAGALHÃES; EGLER, 2016).

A biossorção refere-se à sorção passiva e/ou complexação de íons metálicos através de mecanismos baseados em interações físico-químicas entre os íons e os grupos funcionais presentes na superfície do material adsorvente, como a complexação, a troca de íons e a quelação de íons metálicos ou interações eletrostáticas (GIESE, 2020a,b).

WON et al., (2010) relataram a recuperação de íons platina com o uso de um material biosorvente de alto desempenho, a poli-etilenimina modificada com biomassa da bactéria *Escherichia coli*. A adsorção de Pt foi de 108,8 mg/g a partir de efluentes coletados de um laboratório industrial.

KUCUKER et al., (2017) avaliaram o potencial de recuperação de Nd a partir de um licor lixiviado de ímãs de disco rígido utilizando as microalgas verdes *Chlorella vulgaris*. A condição ótima para o processo foi estabelecida em pH inicial 5,0. A captação de Nd a partir de uma solução inicial de 250 mg/L, em diferentes temperaturas de 21, 35 e 50 °C apresentou taxas de 126,13, 157,40 e 77,10 mg/g, respectivamente. Os resultados apresentados demonstraram que a *C. vulgaris* apresentou maior afinidade por íons neodímio que o carvão ativado e outros materiais biossorventes tais como *A. gracilis*, *Sargassum* sp. e *A. densus*.

O uso de polpa de madeira funcionalizada como biossorvente de íons Cr(IV) de resíduos eletrônicos foi investigada, como uma etapa posterior à lixiviação do resíduo na presença de ácido málico e peróxido de hidrogênio. A taxa de recuperação de Cr(VI) foi de 98,25%, correspondendo a cerca de 25 mg/g (VARSHNEY; JAIN; SRIVASTAVA, 2018).

A recuperação de tungstênio de minas urbanas tornou-se viável devido a crescente demanda por este elemento na fabricação de produtos avançados para a indústria automotiva. OGI et al., (2016) estabeleceram um processo de biossorção de W de minas urbanas por biomassa de *E. coli* e outros materiais como levedo de cerveja, borra de shochu (bebida destilada de arroz), e koji (*Aspergillus* spp.). Os biossorventes

avaliados foram capazes de bioissorver seletivamente os íons W de um licor lixiviado de carboneto de tungstênio contendo outros íons metálicos tais como molibdênio e vanádio.

SHEEL e PANT (2017) propuseram um processo híbrido de bioissorção de ouro para licores lixiviados de PCBs, utilizando uma combinação de tiosulfato de amônio e células de *Lactobacillus acidophilus*. Os pesquisadores observaram uma maior eficiência de bioissorção de íons Au devido à interação  $\pi$ - $\pi$  resultante nas ligações amida entre os elementos presentes. Este processo possibilitou a recuperação de 90% de ouro.

A biomassa de *Aspergillus carbonarius* foi imobilizada usando alginato de sódio e testado como um bioissorvente para cromo hexavalente. A adsorção máxima de Cr(VI), de cerca de 92,43% foi obtida em pH inicial 2,0 por 12 h a 37 °C, com dosagem de adsorvente de 20 g/ 25 mL (Lakshmi et al., 2020).

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A extração de metais a partir de minas urbanas pode ser considerada uma solução alinhada com a economia circular e que vem ao encontro das principais demandas sociais, ambientais, econômicas e tecnológicas.

Porém, apesar de todas as vantagens oferecidas pela biomineração urbana, os processos ainda estão sendo estudados em escala de laboratório devido às baixas taxas de rendimento e longos tempos operacionais, fatores estes que ainda limitam sua aplicação em escala industrial. A implementação da mineração urbana em larga escala depende tanto do desenvolvimento de tecnologia viável quanto de uma logística reversa eficaz.

A biomineração de resíduos tecnológicos requer maior atenção no Brasil e no mundo. O uso de processos biotecnológicos na mineração tem despertado maior atenção da comunidade global por ser uma tecnologia ecologicamente correta e muitas vezes mais econômica que as tecnologias convencionais. Porém, ainda são necessários maiores investimentos e esforços governamentais para que as minas urbanas se transformem em matérias-primas rentáveis.



## **6 | AGRADECIMENTOS**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Brasil pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLWOOD, J.M.; ASHBY, M.F.; GUTOWSKI, T.G.; WORRELL, E. Material efficiency: a white paper. Resources, Conservation and Recycling, v. 55, 362e381, 2011.

AMIRI, F.; YAGHMAEI, S.; MOUSAVI, S.M. Comparison of different methods in bioleaching of tungsten-rich spent hydro-cracking catalyst using adapted *Penicillium simplicissimum* BBRC-20019. Chemical Engineering Transactions, v. 21, p. 1483-1488, 2010.

AMIRI, F.; YAGHMAEI, S.; MOUSAVI, S.M. Bioleaching of tungsten-rich spent hydrocracking catalyst using *Penicillium simplicissimum*. Bioresource Technology, v. 102, p. 1567-1573, 2011.

ANNAMALAI, M.; GURUMURTHY, K. Enhanced bioleaching of copper from circuit boards of computer waste by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Environmental Chemistry Letters, v. 17, p. 1873-1879, 2019.

ARSHADI, M.; MOUSAVI, S. M. Simultaneous recovery of Ni and Cu from computer-printed circuit boards using bioleaching: statistical evaluation and optimization. Bioresource Technology, v. 174, p. 233e242, 2014.

ARSHADI, M.; MOUSAVI, S.M. Multi-objective optimization of heavy metals bioleaching from discarded mobile phone PCBs: simultaneous Cu and Ni recovery using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Separation and Purification Technology, v. 147, p. 210-219, 2015.

ARYA, S.; KUMAR, S. Bioleaching: urban mining option to curb the menace of E-waste challenge. Bioengineered, v. 11, p. 640-660, 2020.

BANIASADI, M.; VAKILCHAP, F.; BAHALOO-HOREH, N.; MOUSAVI, S. M.; FARNAUD, S. Advances in bioleaching as a sustainable method for metal recovery from e-waste: A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 76, p. 75-90, 2019.

BANIASADI, M.; GRAVES, J.E.; RAY, D.A.; DE SILVA, A.L.; RENSHAW, D.; FARNAUD, S. Closed-Loop recycling of copper from waste printed circuit boards using bioleaching and electrowinning processes. Waste and Biomass Valorization, 2020.

BAHALOO-HOREH, N.; MOUSAVI, S.M.; SHOJAOSADATI, S.A. Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*. *Journal of Power Sources*, v. 320, p. 257-266, 2016.

BAHALOO-HOREH, N.; MOUSAVI, S.M.; baniasadi, m. Use of adapted metal tolerant *Aspergillus niger* to enhance bioleaching efficiency of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries *Journal of Cleaner Production*, v. 197, p. 1546-1557, 2018.

BAS, A.D.; DEVECI, H.; YAZICI, E.Y. Bioleaching of copper from low grade scrap TV circuit boards using mesophilic bacteria. *Hydrometallurgy*, 138, 65-70, 2013.

BEOLCHINI, F.; FONTI, V.; DELL'ANNO, A.; ROCCHETTI, R.L.; VEGLIÒ, F. Assessment of biotechnological strategies for the valorization of metal bearing wastes. *Waste Manage*, v. 32, p. 949-956, 2015.

BRANDL, H.; BOSSHARD, R.; WEGMANN, M. Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. *Hydrometallurgy*, v. 59, p. 319-326, 2001.

BRANDL, H.; LEHMANN, S.; FARAMARZI, M.A.; MARTINELLI, D. Biomobilization of silver, gold, and platinum from solid waste materials by HCN-forming microorganisms. *Hydrometallurgy*, v. 94, p. 14-17, 2008.

BROMBACHER, C.; BACHOFEN, R.; BRANDL, H. Development of a laboratory-scale leaching plant for metal extraction from fly ash by *Thiobacillus* strains. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 64, p. 1237-1241, 1998.

CHEN, S.; YANG, Y.; LIU C.; DONG, F.; LIU, B. Column bioleaching copper and its kinetics of waste printed circuit boards (WPCBs) by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Chemosphere*, v. 141, p. 162e168, 2015.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, S. C.L.; ROSA, P. Recycling of WEEE: an economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 263-272, 2015.

DAVE, S.R.; SODHA, A.B.; TIPRE, D.R. Microbial technology for metal recovery from E-waste printed circuit board. *Journal of Bacteriology and Microbiology*, v. 6, p. 241-247, 2018.

DAS, A.; VIDYADHAR, A.; MEHROTRA, S.P. A novel flowsheet for the recovery of metal values from waste printed circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53, p. 464-469, 2009.

DEBARAJ, M.; YOUNG, H.R. Current research trends of microbiological leaching for metal recovery from industrial wastes. *Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*, v. 4, p. 1289-1296, 2010.

DOI - Department of the Interior. Final list of critical minerals 2018. Department of the Interior; Office of the Secretary. 18 may. 2018. Disponível em: <<https://www.federalregister.gov/documents/2018/05/18/2018-10667/final-list-of-critical-minerals-2018>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. Critical raw materials for the EU – report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. 2014. Disponível em: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf). Acesso em: 23 set. 2020.

EXECUTIVE ORDER 13953 of September 30, 2020. Executive Order on Addressing the Threat to the Domestic Supply Chain from Reliance on Critical Minerals from Foreign Adversaries. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-addressing-threat-domestic-supply-chain-reliance-critical-minerals-foreign-adversaries/>. Acesso em: 22 out. 2020.

FARAMARZI, M.A.; STAGARS, M.; PENSINI, E.; KREBS, W.; BRANDL, H. Metal solubilization from metal-containing solid materials by cyanogenic *Chromobacterium violaceum*. *Journal of Biotechnology*, v. 113, p. 321-326, 2014.

FATHOLLAHZADEH, H.; EKSTEEN, J.J.; KAKSONEN, A.H.; WATKIN, E.L.J. Role of microorganisms in bioleaching of rare earth elements from primary and secondary resources. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 103, p. 1043-1057, 2018.

FU, K.; WANG, B.; CHEN, H.; CHEN, M.; CHEN, S. Bioleaching of Al from coarse-grained waste printed circuit boards in a stirred tank reactor. *Procedia Environmental Sciences*, v. 31, p. 897-902, 2016.

GERAYELI, F.; GHOJAVAND, F.; MOUSAVI, S.M.; YAGHMAEI, S.; AMIRI, F. Screening and optimization of effective parameters in biological extraction of heavy metals from refinery spent catalysts using a thermophilic bacterium. *Separation and Purification Technology*, v. 118, p. 151-161, 2013.

GIESE, E.C.; MAGALHÃES, D.P.; EGLER, S.G. Biossorção de Elementos de Terras-Raras. *Série Tecnologia Ambiental*, Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 9-40, 2016.

GIESE, E.C. Biolixiviação: uma avaliação das inovações tecnológicas na biomineração de minerais sulfetados no período de 1991 a 2015. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, v. 14, p. 192-203, 2017a.

GIESE, E.C.; XAVIER, L.H.; LINS, F.A.F. Biomineração urbana: o futuro da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos. *Brasil Mineral*, n. 385, p. 22-26, 2018.

GIESE, E.C. A biohidrometalurgia e os minerais críticos. *Série Estudos e Documentos*, Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p. 9-27, 2019a.

GIESE, E.C. Challenges of biohydrometallurgy in the circular economy. *Insights in Mining, Science and Technology*, v. 1, n. 3, 123, 2019b.

GIESE, E.C. Prospection of technologies related to metal biosorption process. *Revista Geintec: Gestão, Inovação e Tecnologias*, v. 9, p. 5046-5057, 2019c.

GIESE, E.C. Biosorption as green technology for the recovery and separation of rare earth elements. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 36, n. 4, p. 52, 2020a.

GIESE, E.C. Mining applications of immobilized microbial cells in alginate matrix: an overview. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, v. 36, n. 4, p. 775-787, 2020b.

GHOLAMI, R.M.; BORGHEI, S.M.; MOUSAVI, S.M. Bacterial leaching of a spent Mo-Co-Ni refinery catalyst using *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Hydrometallurgy*, v. 106, p. 26-31, 2011.

HONG, Y.; VALIX, M. Bioleaching of electronic waste using acidophilic sulfur oxidising bacteria. *Journal of Cleaner Production*, v. 65, p. 465-472, 2014.

HOPFE, S.; FLEMMING, K.; LEHMANN, F.; MÖCKEL, R.; KUTSCHKE, S.; POLLMANN, K. Leaching of rare earth elements from fluorescent powder using the tea fungus *Kombucha*. *Waste Management*, v. 62, p. 211-221, 2017.

HUANG, K.; GUO, J.; XU, Z. Recycling of waste printed circuit boards: a review of current technologies and treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, v. 164, p. 399-408, 2009.

ILYAS, S.; ANWAR, M. A.; NIAZI, S.B.; GHOURI, M. A. Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria. *Hydrometallurgy*, v. 88, p. 180-188, 2007.

ISIDAR, A.; VOSSENBERG, J.V.D.; RENE, E.R.; VAN HULLEBUSCH, E.D.; LENS, P.N.L. Two-step bioleaching of copper and gold from discarded printed circuit board. *Waste Management*, v. 57, p. 149-157, 2016.

KAKSONEN, A.H.; LAVONEN, L.; KUUSENAHO, M.; KOLLI, A.; NÄRHI, H.; VESTOLA, E.; PUHAKKA, J.A.; TUOVINEN, O.H. Bioleaching and recovery of metals from final slag waste of the copper smelting industry. *Minerals Engineering*, v. 24, p. 1113-1121, 2011.

KIDDEE, P.; NAIDU, R.; WONG, M.H. Electronic waste management approaches: an overview. *Waste Management*, v. 33, 1237e1250, 2013.

KIM, M-J.; SEO, J-Y.; CHOI, Y-S.; KIM, G-H. Bioleaching of spent Zn-Mn or Ni-Cd batteries by *Aspergillus* species. *Waste Management*, v. 51, p. 168-173, 2016.

KUCUKER, M.A.; WIECZOREK, N.; KUCHTA, K.; COPTY, N.K. Biosorption of neodymium on *Chlorella vulgaris* in aqueous solution obtained from hard disk drive magnets. PLOS ONE, v. 12, p. 0175255, 2017.

KUMAR, A.; SAINI, H.S.; KUMAR, S. Bioleaching of gold and silver from waste printed circuit boards by *Pseudomonas balearica* SAE1 isolated from an e-waste recycling facility. Current Microbiology, v. 75, p. 194-201, 2017.

LAKSHMI, S., SUVEDHA, K.; SRUTHI, R.; LAVANYA, J.; VARJANI, S.; NAKKEERAN, E. Hexavalent chromium sequestration from electronic waste by biomass of *Aspergillus carbonarius*. Bioengineered, p. 708-717, 2020.

LI, J.; LU, H.; GUO, J.; XU, Z.; ZHOU, Y. Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards. Environmental Science and Technology, v. 41, p. 1995-2000, 2007.

MARRA, A.; CESARO, A.; RENE, E.R.; BELGIORNO, V.; LENS, P.N. Bioleaching of metals from WEEE shredding dust. Journal of Environmental Management, v. 210, p. 180-190, 2018.

MINIMOL, M.; SHETTY K,V.; SAIDUTTA, M.B. Process engineering aspects in bioleaching of metals from electronic waste. In: JEROLD, M.; AROCKIASAMY, S.; SIVASUBRAMANIAN, V. (eds) Bioprocess Engineering for Bioremediation, v. 104, p. 27-44, 2020.

MURAVYOV, M.I.; BULAEV, A.G.; MELAMUD, V.S.; KONDRAT'EVA, T. F. Leaching of rare earth elements from coal ashes using acidophilic chemolithotrophic microbial communities. Mikrobiologiya, v. 84, p. 216-224, 2015.

OGI, T.; MAKINO, T.; OKUYAMA, K.; STARK, W.J.; ISKANDAR, F. Selective biosorption and recovery of tungsten from an urban mine and feasibility evaluation. Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 55, p. 2903-2910, 2016.

PEITER,C.C. Capítulo 1: Matérias-primas críticas e estratégicas. *In: Estudo das cadeias produtivas de materiais críticos: oportunidades e ameaças da economia circular. Relatório final de projeto Programa Dialogos Setoriais União Europeia Brasil. Nona Chamada. Projeto n. 128 A. 228 p. (no prelo).*

PHAM, V.A.; TING, Y.P. Gold bioleaching of electronic waste by cyanogenic bacteria and its enhancement with bio-oxidation. *Advanced Materials Research*, v. 71-73, p. 661-664, 2009.

PRADHAN, J.K.; KUMAR, S. Metals bioleaching from electronic waste by *Chromobacterium violaceum* and *Pseudomonas* sp. *Waste Management and Research*, v. 30, p. 1151-1159, 2012.

REED, D.W.; FUJITA, Y.; DAUBARAS, D.L.; JIAO, Y.; THOMPSON, V. S. Bioleaching of rare earth elements from waste phosphors and cracking catalysts. *Hydrometallurgy*, v. 166, p. 34-40, 2016.

RODRIGUES, M.L.M.; LEÃO, V.A.; GOMES, O.; LAMBERT, F.; BASTIN, D.; GAYDARDZHIEV, S. Copper extraction from coarsely ground printed circuit boards using moderate thermophilic bacteria in a rotating-drum reactor *Waste Management*, v. 41, p. 148-158, 2015.

THOMPSON, V.S.; GUPTA, M.; JIN, H.; VAHIDI, E.; YIMM, J; NGUYEN, V.; FUJITA, Y.; SUTHERLAND, J.W.; JIAO, Y. Techno-economic and life cycle analysis for bioleaching rare-earth elements from waste materials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* v. 6, p. 1602-1609, 2017.

TSAPLINA, I.A.; PANYUSHKINA, A.E.; GRIGOREVA, N.V.; BULAEV, A. G.; KONDRAT'eva, T. F. Growth of acidophilic chemolithotrophic microbial communities and sulfur oxidation in the presence of coal ashes. *Microbiology*, v. 84, p. 177-189, 2015.

SANTHIYA, D.; TING, Y-P. Use of adapted *Aspergillus niger* in the bioleaching of spent refinery processing catalyst. *Journal of Biotechnology*, v. 121, p. 62-74, 2011.

SHEEL, A.; PANT, D. Recovery of gold from electronic waste using chemical assisted microbial biosorption (hybrid) technique. *Bioresource Technology*, v. 247, p. 1189-1192, 2018.

SOUZA, A.C.S.P.; NASCIMENTO, M.; GIESE, E.C. Desafios para a extração sustentável de minérios portadores de terras raras. *HOLOS*, v. 1, p. 1-9, 2019.



US DEPARTMENT OF ENERGY. Critical Materials Strategy. 2011. Disponível em: [http://energy.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf) 2011.

VARSHNEY, S.; JAIN, P.; SRIVASTAVA, S. Removal and recovery of chromium from e-waste by functionalized wood pulp: a green bio-hydrometallurgical approach. *National Academy Science Letters*, v. 42, p. 99-103, 2018.

VELGOSOVÁ, O.; KADUROVÁ, J.; MARCINCAKOV, R.; PALFY, P.; TRPCEVSKÁ, J. Influence of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and ferric iron on Cd bioleaching from spent Ni-Cd batteries *Waste Management*, v. 33, p. 456-461, 2013.

XAVIER, L.H.; LINS, F.A.F. Mineração urbana de resíduos eletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. *Brasil Mineral*, n. 379, p. 22-26, 2018.

XAVIER, L.H.; DUTHIE, A.C.; GIESE, E.C.; LINS, F.A.F. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. *Resources Policy*, v. 1, p. 101467, 2019.

XIANG, Y.; WU, P.; ZHU, N.; ZHANG, T.; LIU, W.; WU, J.; LI, P. Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacterial consortium enriched from acid mine drainage. *Journal of Hazardous Materials*, v. 184, p. 812-818, 2010.

WANG, J.; BAI, J.; XU, J.; LIANG, B. Bioleaching of metals from printed wire boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* and their mixture. *Journal of Hazardous Materials*, v. 172, p. 1100-1105, 2009.

WANG, M.; TAN, Q.; CHIANG, J.F.; LI, J. Recovery of rare and precious metals from urban mines – A review. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, v. 11, p. 1, 2017.

WEI, X.; LIU, D.; HUANG, W.; HUANG, W.; LEI, Z. Simultaneously enhanced Cu bioleaching from E-wastes and recovered Cu ions by direct current electric field in a bioelectrical reactor. *Bioresource Technology*, p. 122566, 2019.

WILLNER, J.; KADUKOVA, J.; FORMALCZYK, A.; SATERNUS, M. Biohydrometallurgical methods for metals recovery from waste materials. *METABK*, v. 54, p. 255-259, 2015.

WON, S.W.; MAO, J.; KWAK, I. S.; SATHISHKUMAR, M.; YUN, Y.S. Platinum recovery from ICP wastewater by a combined method of biosorption and incineration. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 1135-1140, 2010.

WU, W.; LIU, X.; ZHANG, X.; TAN, W. Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacteria-free cultural supernatant of iron-sulphur-oxidizing bacteria. *Bioresources Bioprocess*, v. 5, p. 1-13, 2018.

YANG, T.; XU, Z.; WEN, J.K.; YANG, L. Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Hydrometallurgy*, v. 97, p. 29-32, 2009.

YANG, Y.; CHEN, S.; LI, S.; CHEN, H.; LIU, B. Bioleaching waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and its kinetics aspect. *Journal of Biotechnology*, v. 173, p. 24-30, 2014.

ZHU, N.; XIANG, Y.; ZHANG, T.; WU, P.; DANG, Z.; LI, P.; WU, J. Bioleaching of metal concentrates of waste printed circuit boards by mixed culture of acidophilic bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, v. 192, p. 614-619, 2019.

ZHUANG, W-Q.; FITTS, J.P.; AJOFRANKLIN, C.M.; MAES, S.; ALVAREZ-COHEN, L.; HENNEBEL, TOM. Recovery of critical metals using biometallurgy. *Current Opinion in Biotechnology*, v. 33, p. 327-335, 2015.

## 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 2019, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 340 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). 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 <http://www.cetem.gov.br/series>.

### Últimos números da Série Estudos e Documentos

**SED-103 – Certificação de ouro de garimpo - Estudo dos requisitos da Norma “Fairmined Standard for Gold from Artisanal and Small-scale Mining, including associated precious metals (V2.0 ARM / 5 April 2014)”.** Líllian Maria Borges Domingos, Zuleica Carmen Castilhos, Jéssica Zickwolf Ramos, 2020.

**SED-102 – A mineração urbana de resíduos eletroeletrônicos: perspectivas a partir da aplicação dos objetivos de desenvolvimento sustentável.** José Antônio Sena do Nascimento, Renata da Costa Barreto, 2019.

**SED-101 – Aspectos econômicos e sociais da atividade extrativa mineral: um olhar sobre os objetivos de desenvolvimento sustentável.** José Antonio Sena do Nascimento, Ana Maria B. M. da Cunha, Márcia Viana de Sá Earp, Ricardo Peiter C. Ferreira e Fernando F. de Castro, 2019.

## **INFORMAÇÕES GERAIS**

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ  
Geral: (21) 3865-7222  
Biblioteca: (21) 3865-7218  
E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto: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.

Weask 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 Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, 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 Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m<sup>2</sup> de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.**

**Durante seus 42 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.**