



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE JURUTI
CURSO DE BACHAREL EM ENGENHARIA DE MINAS**

HERISSON PAOLO DOS SANTOS TORRES

**LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO ACERCA DO EMPREGO DA
BIOLIXIVIAÇÃO NA INDÚSTRIA MINERAL**

**JURUTI
2023**

HERISSON PAOLO DOS SANTOS TORRES

**LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO ACERCA DO EMPREGO DA
BIOLIXIVIAÇÃO NA INDÚSTRIA MINERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, como requisito, para obter o título de Bacharel em Engenharia de Minas, Universidade Federal do Oeste do Pará – Campus Juruti.
Orientador: Prof. Dr. Adriano Olímpio

**JURUTI
2023**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

- T6931 Torres, Herisson Paolo dos Santos
Levantamento bibliográfico acerca do emprego da biolixiviação na indústria mineral. / Herisson Paolo dos Santos Torres. – Juruti, 2023.
50 p. : il.
Inclui bibliografias.
- Orientador: Adriano Olimpio da Silva.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti, Bacharelado em Engenharia de Minas.
1. Mineração. 2. Biolixiviação. 3. Microrganismos mineradores. I. Silva, Adriano Olimpio da, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 549


HERISSON PAOLO DOS SANTOS TORRES

**LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO ACERCA DO EMPREGO DA
BIOLIXIVIAÇÃO NA INDÚSTRIA MINERAL**


Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, como requisito, para obter o título de Bacharel em Engenharia de Minas, Universidade Federal do Oeste do Pará – Campus Juruti.

Conceito: APROVADO


Data de Aprovação: 05 / 06 / 2023.

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANO OLÍMPIO DA SILVA**
Data: 17/06/2023 20:03:40-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Adriano Olímpio - Orientador.
Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA

Documento assinado digitalmente
 **ALINE ALVES DOS SANTOS NAUJORKS**
Data: 18/06/2023 13:15:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dra. Aline Alves dos Santos Naujorks
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

Documento assinado digitalmente
 **REGIS QUESADA CASQUET**
Data: 20/06/2023 12:33:03-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Me. Régis Quesada Casquet
Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA

Aos meus pais Jailson e Evanilce.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu alicerce e fonte de renovo.

Ao Prof. Dr. Adriano Olímpio, pela paciência e dedicação em conduzir minha orientação.

A meus pais que não mediram esforços em contribuir como minha conquista.

A minha namorada Joyce, companheira e incentivadora, que sempre esteve ao meu lado.

As minhas irmãs Hanna e Agnes, que me fazem querer ser um referencial

Aos mitos, amigos de turma que vou levar para vida toda.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente na minha Jornada Acadêmica.

"Você precisa aceitar o fato de não ser o melhor e ter o desejo de superar qualquer obstáculo à sua frente." One Piece (Echiro Oda)

RESUMO

A mineração está em constante evolução, sempre buscando melhorar o aproveitamento das jazidas, para atender as demandas do consumo de minerais das indústrias, e também atentando para as medidas de sustentabilidade. Para isso, devido as substâncias minerais não serem produtos renováveis, cada vez mais, há a procura por processos que gerem menos danos ao meio ambiente e a sociedade. Neste sentido apresenta-se a biolixiviação que é uma técnica pesquisada desde o século XIX, definida como um processo de dissolução de sulfetos minerais sob a ação de um grupo de microrganismos, atuando na extração de minerais metálicos de baixo teor, como uma alternativa aos processos industriais convencionais. Dessa forma, este estudo consiste em uma revisão bibliográfica sobre o uso da biolixiviação na indústria mineral, objetivando demonstrar o desenvolvimento do uso da biolixiviação na mineração. Para tal, buscou-se pelos termos em português: “Biolixiviação”, “Biolixiviação no Pará”, “biohidrometalurgia”, “microrganismos mineradores”, e em inglês a busca pelo termo “*bioleaching*”, em diversos bancos de dados. Foram encontrados 30 estudos a respeito do tratamento de minério por biolixiviação. Portanto, através dos resultados obtidos por cada estudo, foi possível uma análise mais precisa do panorama do desenvolvimento da biolixiviação como técnica para o tratamento de minerais metálicos.

Palavras-chave: Mineração. Biolixiviação. Microrganismos mineradores.

ABSTRACT

Mining is in constant evolution, always seeking to improve the use of deposits, to meet the demands of the consumption of minerals of the industries, and also paying attention to sustainability measures. For this, because mineral substances are not renewable products, increasingly, there is a demand for processes that generate less damage to the environment and society. In this sense, bioleaching is presented, which is a technique researched since the nineteenth century, defined as a process of dissolution of mineral sulfides under the action of a group of microorganisms, acting in the extraction of low-grade metallic minerals, as an alternative to conventional industrial processes. Thus, this study consists of a literature review on the use of bioleaching in the mineral industry. Aiming to demonstrate the development of the use of bioleaching in mining. or such, we searched for the terms in Portuguese: "Bioleaching", "Bioleaching in Pará", "biohydrometallurgy", "mining microorganisms", and in English the search for the term "bioleaching". In several databases, in which 30 studies were found regarding the treatment of ore by bioleaching. Therefore, through the results obtained by each study, it will be possible to a more precise analysis of the panorama of the development of bioleaching as a technique for the treatment of metallic minerals.

Keyword: Mining. Bioleaching. Microorganism miners.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simplificado das rotas para metalurgia.....	16
Figura 2 - Comparação entre diferentes tipos de metalurgia de metais.....	17
Figura 3 - Esquema do processo de biolixiviação em pilha (“ <i>heap leaching</i> ”).	18
Figura 4 - Mecanismos de ação da bactéria na biolixiviação: A) Contato direto; B) Contato indireto; C) Indireto.	20
Figura 5 - Composição e o modo de preparo do meio 9K.....	23
Figura 6 - Composição e o modo de preparo do meio T&K.	24
Figura 7 – Mapa de distribuição das principais pesquisas em biohidrometalurgia.	26
Figura 8 - Mapa de localização dos estudos encontrados.....	30

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns dos principais microrganismos encontrados em drenagens ácidas	22
Tabela 2 - Número total de trabalhos a respeito do uso de biolixiviação.....	28
Tabela 3 – Identificação do nome dos estudos encontrados sobre uso da biolixiviação.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGI	<i>American Geosciences Institute</i>
ANM	Agencia Nacional de Mineração
BDTD	Digital de Teses e Dissertações
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CODELCO	Corporación Nacional del Cobre, Chile
PIB	Produto Interno Bruto
SIMINERAL	Sindicato das Industrias minerais do Estado do Pará

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa da pesquisa	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral.....	15
2.2 Objetivo Específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Metalurgia Extrativa.....	16
3.2 O Processo de Biolixiviação	17
3.3 Microrganismos mineradores.....	20
3.4 Meios de cultura de crescimento bacteriano	23
3.5 Pesquisa e avanços industriais.....	24
3.6 Estado do Pará e a Mineração.....	26
4 METODOLOGIA.....	28
5 RESULTADOS.....	29
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O contexto social e tecnológico vivenciado atualmente é o produto de processos aplicados aos insumos advindos da atividade de mineração. A vida hoje tal como é pensada e vivida não pode ser sequer imaginada sem a mineração. Temos absoluta dependência dos bens minerais nas mais diversas necessidades pessoais e materiais (BEVILAQUA, 2020). Dessa forma, desde que a humanidade decidiu deixar os costumes nômades, viu a necessidade de novas práticas, e de aperfeiçoar suas técnicas, com isso nascem dois grandes ramos, a agricultura e a mineração, os quais são bases do crescimento da sociedade. Conforme cita Amarante (2015), a mineração é uma das atividades mais antigas da humanidade que moldou, ao longo do tempo, as paisagens culturais e influenciou a evolução das civilizações, nomeando até períodos de tempo chamando como a “Idade da Cobre” e a “Idade do Bronze”.

A mineração teve um crescimento lento comparado com a agricultura, que se desenvolveu mais rapidamente. Por muito tempo o minério explorado era somente os de fácil acesso ou que afloram na superfície e o aproveitamento não era bom, gerando muito rejeito rico em minério. Ao se atentar a essas variáveis notou-se que as perdas eram muito significantes, sendo assim necessário aprofundar o conhecimento em mecanismos. Nos últimos anos, os projetos minerários mudaram radicalmente seus paradigmas, buscando integrar minas e metalurgia para aumentar a produtividade (MAGALHÃES, 2019)

O Brasil tornou-se em 2018, o oitavo lugar no ranking entre os maiores países mineradores do mundo. Dados do Congresso Mundial de Mineração de 2018, o setor mineral passou a representar 4,2% do Produto Interno Bruto (PIB) do país e cerca de 20% do valor das exportações brasileiras. Dessa forma, visto a importância mineral do Pará citada por Junior (2019), no Anuário mineral do Pará 2018, um estado com potencial enorme para se tornar um dos maiores centros mineradores do mundo que possui dos 143 municípios paraenses, dos quais 34 em 2001, tinham minas, e passou para 46, em 2006, o número de minas em atividade, destacando-se atualmente como o grande polo minerador do país, com uma das maiores reservas de cobre e um dos maiores produtor de ouro e ferro, e também expressividade na produção de cobalto e níquel, a partir disso, teve-se o interesse em buscar alternativas com intuito de otimizar, a produção e reduzir custo e impactos ambientais (JUNIOR, 2019).

Na busca por uma eficaz recuperação do minério e que atendam as demandas de sustentabilidade, apresenta-se os estudos com microrganismos, que segundo Giese *et al.* (2017), durante as últimas décadas, os processos industriais que empregam microrganismos na extração e recuperação de metais não-ferrosos vêm se tornando economicamente atrativos e viáveis

devido a três fatores: melhorias dos processos; necessidades econômicas e busca de uma mineração sustentável. Nesse sentido, Giese *et. al.* (2018), relata que a biohidrometalurgia tem um papel a desempenhar na implementação de uma mineração verde ou responsável, por meio do uso de processos baseados na natureza que operam a temperatura e pressão suaves para a extração de metais. Segundo Bevilaqua (2020), atualmente existe uma demanda para a implantação de processos biotecnológicos visando a reutilização ou a descontaminação de rejeitos industriais.

O processo de biolixiviação tem se difundido e adquirido muitos avanços, buscando estabelecer um novo panorama no contexto mineral, sintetizando as operações de beneficiamento de minérios. A biolixiviação vem sendo utilizada nas últimas décadas e considerada uma tecnologia amigável ao ambiente, rentável e promissora para o processamento metalúrgico (GIESE *et al.*, 2018).

Diante do exposto, visando conhecer o panorama de pesquisas que vêm sendo realizadas na área, torna-se necessário uma revisão bibliográfica a respeito da biolixiviação como técnica de extração de minerais metálicos, no tocante aos fundamentos da técnica e sua aplicação, como uma rota sustentável para o tratamento mineral, e as vantagens e desafios de sua implementação.

1.1 Justificativa da pesquisa

A biolixiviação é uma técnica pesquisada desde o século XIX, que vem ganhando espaço nas últimas décadas. Com os avanços tecnológicos tornou-se uma alternativa para o processamento mineral sustentável, embora pouco difundida e aplicada, isso devido ao setor produtivo de minerais não energéticos ser considerado como um setor “resistente” ao desenvolvimento e à incorporação de inovações tecnológicas (HANAI, 2016). Entretanto, a relação de custos relativamente baixos e menor agressão ao meio ambiente a tornam atrativa. A partir desses pressupostos e uma breve introdução em sala de aula na disciplina de Metalurgia Extrativa sobre a temática biolixiviação, nasceu o interesse em realizar um levantamento bibliográfico acerca do emprego da biolixiviação na indústria mineral. Considerando ainda que o Pará é o maior estado minerador do país, e detentor de substâncias minerais sulfetadas, os quais são passíveis de processamento por biolixiviação. Tais fatores corroboram para a realização deste levantamento para estudo sobre o uso da técnica de recuperação de minerais pelo uso de microrganismos. Nesse sentido é importante salientar que a partir dessa abordagem pretende-se conhecer a eficiência e viabilidade financeira da aplicação da biolixiviação,

verificando se há melhor aproveitamento dos recursos minerais e aumento da vida útil de um empreendimento. Desta forma, a ideia de promover um estudo para futuros pesquisadores é animadora, em virtude de não haver trabalhos abordando esse tema no estado do Pará.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é demonstrar o desenvolvimento do uso da biolixiviação na mineração.

2.2 Objetivo Específicos

- Realizar uma revisão de literatura a respeito da biolixiviação na mineração;
- Fornecer uma visão das vantagens e desafios da implementação da biolixiviação na extração mineral;
- Conhecer os fundamentos da técnica e sua aplicação como uma rota sustentável para o tratamento mineral;
- Identificar projetos de mineração e empresas que têm seus esforços voltados ao uso da biolixiviação;
- Propor o fomenta de estudos que aprimorem o uso da biolixiviação na mineração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Metalurgia Extrativa.

A palavra metalurgia denomina um conjunto de processos e técnicas de extração, fabricação, fundição e tratamento dos metais e suas ligas (FREIRE, 2017). A metalurgia extrativa é uma das grandes áreas da metalurgia que consiste basicamente na obtenção de metais e/ou sais metálicos a partir de fontes minerais, minérios, concentrados e/ou resíduos (OLIVEIRA, [entre 2010 a 2020]).

Oliveira [entre 2010 a 2020] destaca que, as rotas extrativas de metais diferentes serão escolhidas de acordo com (i) a natureza química da matéria prima, (ii) o teor de contaminantes máximo no metal a ser produzido, (iii) o teor do metal de interesse na matéria prima, (iv) a disponibilidade de fontes energéticas necessárias para o processo proposto e etc. Na figura 1, podemos ver de forma simplificada o caminho da metalurgia extrativa.

Figura 1 - Fluxograma simplificado das rotas para metalurgia.



Fonte: Formulação própria.

De acordo com Oliveira [entre 2010 a 2020], através da utilização de processos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos e eletrometalúrgicos, o engenheiro metalúrgico pode criar rotas processuais, isto é, uma sequência de processos unitários que poderão viabilizar a extração do metal de interesse de uma determinada fonte. Conforme Freire (2017 apud BARBOSA et al., 1979), a metalurgia extrativa se classifica como:

Pirometalurgia, hidrometalurgia e eletrometalurgia. De forma geral, na **Pirometalurgia** são aplicadas elevadas temperaturas para extrair metal livre, **Hidrometalurgia** a separação é feita por meio de reações químicas em meio predominantemente aquoso, e utilizando baixas ou médias temperaturas, **Eletrometalurgia** é o processo químico de extração que utiliza a energia elétrica, especialmente a eletrólise, para extrair e refinar os metais (FREIRE, 2017, p. 43 apud BARBOSA et al., 1979, p.7).

Dentre as rotas, a mais usual é a pirometalurgia, e as mais recentes são a hidrometalurgia e biohidrometalurgia. Dessa forma fez se um comparativo quanto aos parâmetros do uso das três técnicas conforme a figura 2.

Figura 2 - Comparação entre diferentes tipos de metalurgia de metais.

Critérios/Parâmetros	Processos metalúrgicos		
	Pirometalurgia	Hidrometalurgia	Biohidrometalurgia
Impacto ambiental	Alto	Médio	Baixo
Emisao de gases toxicos	Alto	Médio	Baixo
Geração de drenagem	Baixo	Alto	Médio
Geração de particulados	Alto	Médio	Baixo
Compatibilidde com meio ambiente	Baixo	Médio	Alto
Investimentos	Alto	Médio	Baixo
Mão de obra e conh. Necessários	Baixo	Médio	Alto
Consumo de energia	Alto	Médio	Baixo
Tempo necessário	Baixo	Médio	Alto
Perda de metal durante recuperação	Médio	Alto	Baixo
Taxa de recuperação	Alto	Médio	Baixo
Potencial corrosivo	Baixo	Alto	Médio
Toxicidade	Baixo	Alto	Médio
Nível de pesquisa	Médio	Alto	Baixo

Fonte: Aatoria própria.  Baixo Médio Alto

3.2 O Processo de Biolixiviação

Os processos biotecnológicos compreendem um conjunto de operações que viabilizam a aplicação industrial de reações ou vias biológicas mediadas por células vivas de animais, plantas, microrganismos ou enzimas sob condições controladas (GIESE, 2015)

A biolixiviação é um processo extrativo de valores metálicos, definida como um processo de dissolução de sulfetos minerais que resulta da ação de um grupo de microrganismos a partir de minérios de baixos teores (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Para Giese (2017), biolixiviação, é um ramo da biohidrometalurgia que utiliza microrganismos para a obtenção de metais a partir de minérios de baixo teor e rejeitos da mineração, diminuindo a geração de resíduos e, conseqüentemente, processos metalúrgicos convencionais. (GIESE, 2018).

Segundo Lopes (2018), a biolixiviação é um processo alternativo realizado com o objetivo de retirar as impurezas dos minérios. Uma de suas principais características é o aproveitamento de rejeitos de minérios com teores reduzidos de metais. Os processos biohidrometalúrgicos para a extração de metais e os que contribuem para extraí-los estão principalmente associados à mineração de ouro e de cobre (SILVA, 2011).

AGI (2022) relata que quando o metal de interesse é dissolvido diretamente, o processo de biomineração é chamado de “biolixiviação”. Podemos ver um exemplo na figura 3, de biolixiviação em pilha através de um esquema simplificado.

Figura 3 - Esquema do processo de biolixiviação em pilha (“*heap leaching*”).



Fonte: Giese (2018).

Lopes (2018), conceitua três maneiras de uso da biolixiviação:

Lixiviação em pilhas - Esse processo aproveita da ação natural das bactérias presentes na pilha de minério e da adição de consórcios microbianos que atuam na aceleração do processo de solubilização dos metais. Os minerais devem ser constituídos de formas reduzidas de enxofre e ferro, os quais serão depositados na forma de pilhas sobre uma base impermeabilizada. Depois a superfície da pilha é irrigada com uma solução ácida, facilitando o aumento da atividade microbiana, o que resulta em uma maior acidez e, conseqüentemente, no favorecimento das reações de oxido redução decorrentes da produção de ácido sulfúrico e na geração de íons de ferro. Com isso, ao final do processo, o metal de interesse é solubilizado e recuperado.

Lixiviação em montes - Essa técnica é baseada no mesmo mecanismo da anterior, entretanto é utilizada em depósitos já existentes de rejeitos minerais próximos às minas, nos quais o teor de metal é baixo demais para o custo de sua recuperação.

Lixiviação em tanques agitados - Neste caso, a interação da superfície mineral e os agentes oxidantes é superior e garante maior eficiência, já que a polpa formada pelo agente lixiviante e a amostra mineral moída é agitada continuamente para evitar a sedimentação de sólidos (LOPES, 2018).

Gonzalez (2017), traz as abordagens para biolixiviação:

In situ. A solução com microrganismos é bombeada para a mina e injetada no minério. O lixiviado resultante é bombeado para a superfície onde o metal é recuperado. **Em rejeitos ou despejos.** O material triturado é pulverizado com água acidificada para garantir o crescimento dos micro-organismos. Os metais são coletados por precipitação a partir do material lixiviado. A solução percolante (sem metal) pode retornar à pilha. **Com biorreatores.** São utilizados tanques de agitação altamente aerados onde o minério finamente moído é tratado. Muitas vezes, os nutrientes são adicionados sendo o biorreator operado de forma contínua. O processo pode levar dias. É ideal para minérios que não podem ser descartados em despejos. (GONZALES, 2017).

Bevilaqua (2020) cita que a biolixiviação ou lixiviação bacteriana pode ser definida como um processo industrialmente explorável que envolve a mobilização de metais a partir de minérios com a mediação de microrganismos. Para Araújo (2014), a biolixiviação consiste na utilização de microrganismos capazes de promover a solubilização de determinados componentes presentes na amostra mineral.

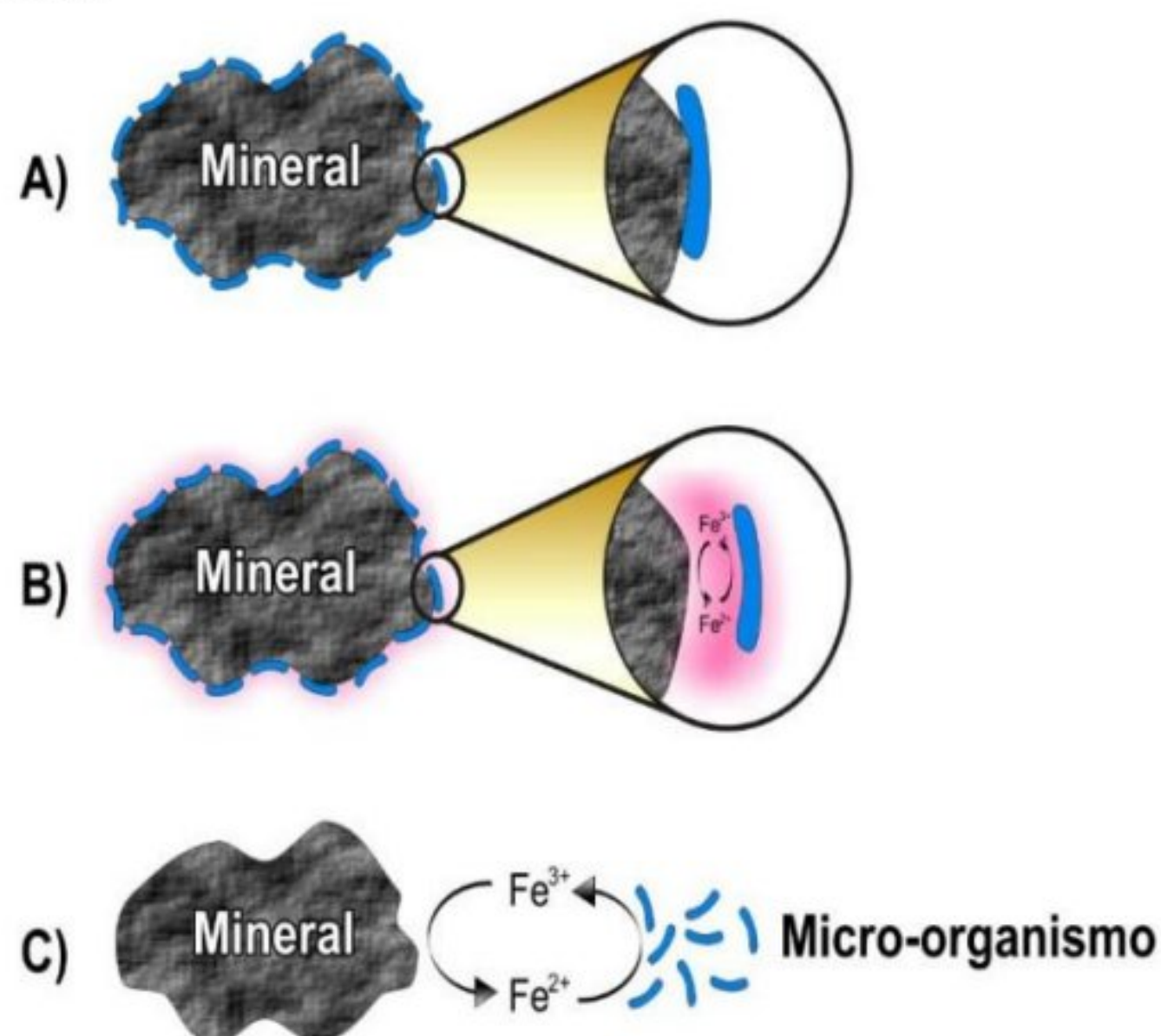
Segundo Araújo (2014), a biolixiviação de sulfetos minerais é reconhecida hoje como uma metodologia interessante, sendo considerada um processo de recuperação de metais mediante ação de microrganismos capazes de utilizar compostos inorgânicos como fonte energética para suas atividades metabólicas.

No modelo proposto por Oliveira (2010), um sistema de biolixiviação podem ocorrer três tipos de mecanismos, que são eles:

a) mecanismo de contato direto: ocorre interação da célula com a superfície do sulfeto mineral, seguindo-se um ataque enzimático aos componentes do mineral susceptíveis de serem oxidados, a exemplo do íon ferroso (Fe^{2+}). Nesse caso, o micro-organismo extrai elétrons diretamente do mineral, os quais são transferidos ao oxigênio (aceptor final de elétrons) após passagens por subseqüentes reações bioquímicas; **b) mecanismo de contato indireto.** Nesse processo a interação entre o micro-organismo e o mineral é mediada por um polissacarídeo extracelular (EPS); **c) mecanismo indireto:** o mineral é oxidado, quimicamente, pelo íon férrico (Fe^{3+}) em solução. Durante a oxidação química do mineral, o íon férrico (Fe^{3+}) é reduzido a íon ferroso (Fe^{2+}). A função do micro-organismo, nesse caso, é oxidar o íon ferroso (Fe^{2+}) a íon férrico (Fe^{3+}), regenerando, dessa forma. (OLIVEIRA, 2010, p. 16-18)

Os mecanismos do sistema de biolixiviação estão representados esquematicamente na figura 4.

Figura 4 - Mecanismos de ação da bactéria na biolixiviação: A) Contato direto; B) Contato indireto; C) Indireto.



Fonte: Oliveira et. al. (2010).

O processo de biolixiviação, como qualquer outro processo que utiliza microrganismos, é influenciado por fatores ambientais, biológicos e físico-químicos. Portanto, é essencial determinar os parâmetros ideais para extração do metal (SICUPIRA, 2011). Araújo (2014) relata os fatores que afetam a biolixiviação: temperatura, pH, pressão osmótica, disponibilidade de nutrientes, disponibilidade de oxigênio, carbono e metais tóxicos afetam o crescimento e a eficiência das bactérias no processo de biolixiviação. Outro parâmetro que pode interferir no processo de biolixiviação é a granulometria do minério que pode afetar a disponibilidade do mineral para a lixiviação. Uma forma eficiente para aperfeiçoar o processo de dissolução dos metais, sem gastos desnecessários com moagem, seria determinar o tamanho de partícula adequado para o ataque microbiano (SICUPIRA, 2011).

Gonzalez (2017) menciona que a biotecnologia aplicada à mineração proporciona métodos mais econômicos que geralmente não produzem emissões nocivas e reduzem a poluição de resíduos contendo metais. O entendimento em um nível fundamental desses mecanismos e, conseqüentemente, da adesão dessas bactérias sobre os substratos minerais é de fundamental importância para a manipulação dos processos aplicados em biolixiviação (HORTA, 2008).

3.3 Microrganismos mineradores

Colling (2014) relata que entre diversos microrganismos, as bactérias são amplamente utilizadas pela facilidade de mobilidade entre os substratos e a alta capacidade de reprodução que é essencialmente por fissão binária. Dessa forma, de acordo com Silva (2014), vários desses microrganismos são utilizados para o processo de recuperação metálica, de modo geral, esses microrganismos são acidófilos, quimiotróficos (obtem sua energia através de compostos inorgânicos) ou autotróficos. Eles são classificados de acordo com a temperatura em que se desenvolvem, distinguindo-se em: mesófilos (se desenvolvem em temperatura entre 15 até 40°C), termófilos moderados (entre 40 a 50°C) e termófilos extremos (entre 55 a 80°C) (SILVA, 2014).

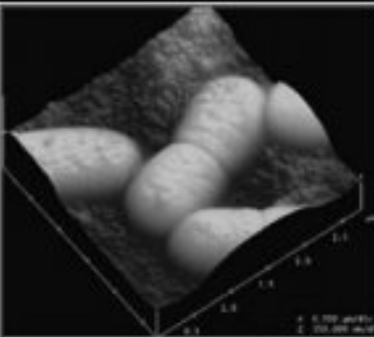

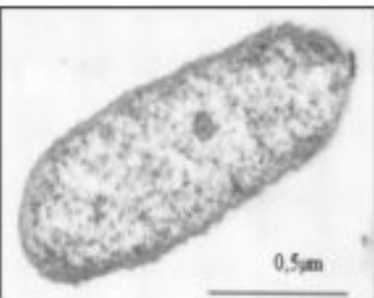
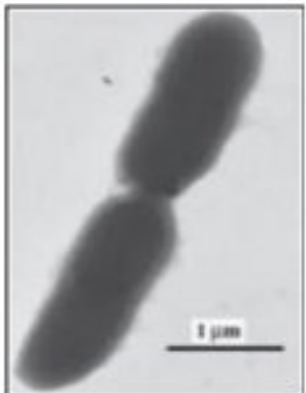
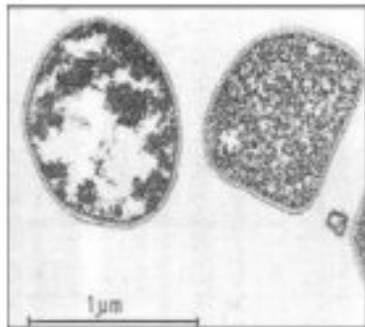
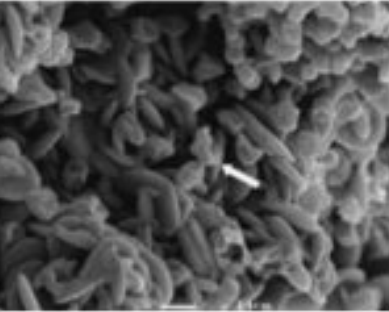
Silva (2014) ainda relata que as bactérias mais frequentemente isoladas e utilizadas são mesófilas e suas linhagens são das espécies *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*. Essas bactérias, geralmente, coexistem intensificando o processo de biolixiviação. Granato (1986), explica que, a bactéria *Thiobacillus ferrooxidans* oxida diretamente os compostos reduzidos de enxofre, incluindo os sulfetos metálicos, além de promover a oxidação Fe^{2+} a Fe^{3+} . O sulfato férrico produzido atua na oxidação de outros compostos, fornecendo Fe^{2+} que é reaproveitado pela bactéria.

Conforme Araújo (2014), vários tipos de bactérias, fungos e algas têm seu habitat em depósitos minerais. A maioria dos organismos presentes são procariontes e muitos de variedade filogenética dos domínios Bactéria e *Archaea*. Bactérias do gênero *Thiobacillus* são encontradas em vários tipos de solos, podendo oxidar, aerobiamente, o tiosulfato, enxofre elementar, tetrionato e tionato (OLIVEIRA, 2017).

Bactérias *Thiobacillus* são uma espécie Gram-negativa, com flagelos polares, autotrófica, incapaz de formar esporos, que cresce rapidamente em meio mineral contendo tiosulfato como fonte de energia e, geralmente, promove a formação de depósito de enxofre elementar. Bactérias heterotróficas dos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas* produzem certos aminoácidos que são capazes de solubilizar o ouro (GRANATO, 1986).

As bactérias são os microrganismos mais usuais na biolixiviação como mencionado anteriormente e sua principal origem vem das drenagens ácidas de minas. Desse modo, Colling (2014) caracterizou as principais bactérias encontradas nesse ambiente conforme pode ser visto na tabela 1.

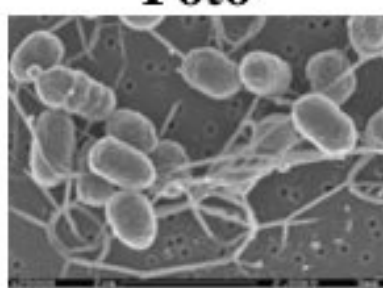
Tabela 1 – Alguns dos principais microrganismos encontrados em drenagens ácidas

Espécie	Foto	Forma	Tipo	Descrição
<i>A. ferrooxidans</i>		Bacilos	Mesófila	Tamanho (µm) 1,0 a 1,7 pH > 2,8 Temp. de crescimento (°C) 30 a 35 São quimiolitotróficas usando formas reduzidas de enxofre inorgânico, íon ferroso e sulfetos minerais como fonte de energia.
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>		Bacilos	Mesófila	Tamanho (µm) 2 pH 2,5 a 3,0 Temp. de crescimento (°C) 27 a 30 São quimiolitotróficos, utilizando formas usando formas reduzidas de enxofre inorgânico, íon ferroso e sulfetos minerais como redução de enxofre inorgânico, mas não uso de ferroso como fonte de energia.
<i>Acidithiobacillus acidophilus</i>		Bacilos	Mesófila	Tamanho (µm) 1,0 a 1,5 pH > 2,8 Temp. de crescimento (°C) 30 a 35 São quimiolitotróficas facultativas usando formas reduzidas de enxofre inorgânico (autotróficas), glicose e alguns sucros orgânicos (heterotróficas), ou a mistura de glicose com enxofre reduzido (mixotróficas).
<i>A. ferrooxidans</i>		Espirilo	Mesófila (ótima) termófila moderada (facultativa)	Tamanho (µm) 1,1 pH > 2,8 Temp. de crescimento (°C) 30 a 45 São organismos quimiolitotróficas, usando íon ferroso, mas não enxofre reduzido como forma de energia.
<i>Sulfobacillus termo-sulfidooxidans</i>		Bacilos	Termófila moderada	Tamanho (µm) 1,0 a 3,0 pH 1,7 a 2,4 Temp. de crescimento (°C) 50 a 55 São quimiolitotróficas facultativas podendo usar materiais sulfúricos, enxofre, íon ferroso (autotrófico) ou glicose, sacarose e ácido glutâmico (heterotrófico).
<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>		Espiroidais	Termófila extrema	Tamanho (µm) 0,8 a 1,0 pH 2 a 3 Temp. de crescimento (°C) 55 a 85 São mixotróficas, utilizando enxofre e heterotróficas com vários componentes orgânicos
<i>Acidianus brierleyi</i>		Espirilo	Termófila moderada a Termófila extrema	Tamanho (µm) 1,0 a 1,5 pH 1,5 a 2 Temp. de crescimento (°C) 45 a 75 São organismos quimiolitotróficas, usando íon ferroso, mas não enxofre reduzido como forma de energia.

Fonte: Editado a partir do estudo de Colling (2014).

Continuação

Tabela 1 – Alguns dos principais microrganismos encontrados em drenagens ácidas

Espécie	Foto	Forma	Tipo	Descrição	
<i>Acidiphilium cryptum</i>		Bacilos	Mesófila	Tamanho (µm)	0,6 a 1,5
				pH	2,5 a 5,9
				Temp. de crescimento (°C)	31 a 41

São quimiolitotróficas, utilizando complexos solúveis de matéria orgânica.

Fonte: Editado a partir do estudo de Colling (2014).

3.4 Meios de cultura de crescimento bacteriano

Os microrganismos lixiviadores são quimiotróficos. Dessa forma, precisam de nutrientes inorgânicos, como nitrogênio (N), fósforo (P), traços de potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca), entre outros. Para isso ao longo do tempo foram criados e patenteados inúmeros meios de cultura de crescimento, temos então assim como as bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que são as mais estudadas e aplicadas na biolixiviação, sendo os meios seletivos 9K, de Silverman & Lundgren (1959), e o T&K, de Tuovinen & Kelly (1973), os meios mais usuais de cultura de cultivo para o crescimento destes microrganismos (OLIVEIRA, 2014). O mesmo autor afirma ainda que, os métodos de cultivo 9K e T&K diferenciam-se, pela modificação ou exclusão de algum dos sais presente nos meios e no pH inicial. Assim como, também de outros meios de cultura de crescimento encontrados na literatura

Oliveira (2014), cita que o meio T&K apresenta uma vantagem em relação ao 9K, pois quase não há formação de precipitado de ferro no meio, uma vez que o pH deste é inferior a 2,0. Podemos ver os componentes dos meios 9K e T&K conforme a figura 5 e figura 6.

Figura 5 - Composição e o modo de preparo do meio 9K

3 g (NH ₄) ₂ SO ₄	}	Solução A pH ajustado para 2,8 com H ₂ SO ₄ Autoclavada à 121°C durante 20 minutos
0,5 g K ₂ HPO ₄		
0,5 g MgSO ₄ .7H ₂ O		
0,1 g KCl		
0,014 g Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O		
700 mL de água destilada		
44,8 g FeSO ₄ .7H ₂ O	}	Solução B pH ajustado para 2,8 com H ₂ SO ₄ Filtrada com membrana de acetato de celulose 0,22 µm
300 mL de água destilada		

Fonte: Oliveira 2014 (a proporção de mistura de solução A e B e 7:3 respectivamente)

Figura 6 - Composição e o modo de preparo do meio T&K.

0,4 g (NH ₄) ₂ SO ₄ 0,4 g K ₂ HPO ₄ 0,4 g MgSO ₄ .7H ₂ O 800 mL de água destilada	<p style="text-align: center;">Solução A</p> <p style="text-align: center;">pH ajustado para 1,8 com H₂SO₄ Autoclavada à 121°C durante 20 minutos</p>
33,4 g FeSO ₄ .7H ₂ O 200 mL de água destilada	<p style="text-align: center;">Solução B</p> <p style="text-align: center;">pH ajustado para 1,8 com H₂SO₄ Filtrada com membrana de acetato de celulose 0,22 µm</p>

Fonte: Oliveira 2014 (a proporção de mistura de solução A e B e 4:1 respectivamente)

3.5 Pesquisa e avanços industriais

No Brasil, o interesse pela biolixiviação começou no início dos anos 1970 com o isolamento de *A. ferrooxidans* em águas de minas. O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) estuda a biolixiviação desde a década de 1980 (OLIVEIRA, 2014). Segundo Gonzalez (2017), na última década, estudos na área de biotecnologia impulsionaram o desenvolvimento da biomineração e recentes avanços em biologia molecular e bioquímica permitiram entender melhor como microrganismos crescem e se adaptam em ambiente hostil. Dentre os estudos de lixiviação bacteriana hoje no Brasil, os maiores esforços da área de biotecnologias, são da Universidade de São Paulo em conjunto com a Vale do Rio Doce Mina do Sossego (Pará) para coleta e seleção de microrganismos capazes de recuperar cobre em rejeitos minerais (ARAÚJO, 2014). E também a parceria pioneira entre a Gencor Industries Inc (empresa de soluções industriais) e a mineração São Bento na aplicação de biorreatores aplicado na mina da São Bento Mineração, no Brasil. O processo já encerrado, destinava-se à minérios refratários de ouro (GONZALEZ, 2017), a qual também é citada por Zaparolli (2020) com a única aplicação em escala industrial de biohidrometalurgia em uma mineradora no Brasil. A operação de extração de ouro ocorreu em Santa Bárbara, em Minas Gerais, com tecnologia utilizada fornecida por sua controladora, a anglo-australiana BHP Billiton.

Outra importante contribuição é citada por Zaparolli (2020) onde informa que a mina de ouro Zé do Vermelho, que está em atividade desde 2015 em Paranaíta, no norte de Mato Grosso, programa instalar até abril de 2021 um sistema que utiliza microrganismos no processo de tratamento do material extraído da jazida, projeto em parceria com a Itatijuca Biotech, que é uma empresa especializada no desenvolvimento de rotas para processamento mineral (IN THE MINE, 2020). A Itatijuca Biotech é a única empresa brasileira com o domínio de rotas biotecnológicas para processos de mineração, que permite a recuperação metais presentes em

minérios oxidados e sulfetados, pré-tratamento de minérios e concentrados refratários (IN THE MINE, 2020).

Em 2001, a divisão de metais-base da mineradora Kumba Resources, com base na África do Sul, iniciou um processo de parceria de tecnologia com a empresa GeoBiotics para desenvolver, em conjunto, uma pilha de biolixiviação para a dissolução de zinco, proveniente de concentrados de sulfetos (SILVA, 2014).

Gonçalves (2015) relata que o aproveitamento de minérios marginais, tratados por biolixiviação, exemplo o depósito de ouro *Jinfeng*, localizado na província de *Guizhou*, na China, e pertencente à Eldorado Gold, consegue uma recuperação de 93 a 94% de ouro. Gonçalves (2015) ainda relata que a planta é projetada para tratar até 790 t/dia de concentrado com um teor de enxofre de 9,37% em dois módulos de oito reatores de biolixiviação de 1.000 m³ cada. O que dá uma dimensão da técnica referente a escala industrial.

Atualmente, as empresas CODELCO e Nippon Metals and Mining, por meio de uma parceria, criaram a empresa BioSigma que investe no desenvolvimento de plantas de biolixiviação de cobre em níveis de escalas piloto e industrial (SILVA, 2014). Já a BHP Billiton está investindo em tecnologia avançada de biolixiviação para atingir diminuições significativas no custo da produção de metais.

Conforme Lins *et al.* (2016), o uso de biorreatores anaeróbicos apresenta-se como uma alternativa tecnológica promissora para o tratamento de efluentes industriais, podendo se tornar uma opção eficaz e economicamente viável na remoção de sulfato e precipitação de metais. Cita o sucesso da primeira planta comercial de biolixiviação na China na Yantai Gold Smeltery (SILVA, 2014). Em todo o mundo as pesquisas sobre biolixiviação tem avançado conforme demarcado no mapa da figura 7, os pontos de locais das principais pesquisas a respeito do uso da biolixiviação.

Figura 7 – Mapa de distribuição das principais pesquisas em biohidrometalurgia.



Fonte: Colling (2014)

O mapa demonstra um grande número de países com interesse no desenvolvimento da biolixiviação.

3.6 Estado do Pará e a Mineração

O Pará é o segundo maior estado territorialmente do Brasil, ficando atrás apenas do Amazonas. Situa-se no centro da região Norte, a economia é baseada na mineração e na agroindústria (SÓ GEOGRAFIA, 2007-2022). A composição da economia do Estado do Pará é diversificada, baseando-se no extrativismo (mineral e vegetal), na agricultura, na pecuária e também na indústria. Na área de mineração destacam-se o ferro, a bauxita, o manganês, o calcário, o ouro e o estanho (SÓ GEOGRAFIA, 2007-2022).

O Estado do Pará destaca-se no contexto nacional por ter uma economia forte, diversificada e multisetorial, com destaque para a mineração. O Produto Interno Bruto (PIB) do Pará, em 2016, foi de R\$138 bilhões, crescendo nominalmente 5,48%. O Pará é a 12ª maior economia do Brasil ao contribuir com 2,2% do PIB nacional e com 43,5% do PIB da Região Norte. (INVESTEPARÁ, 2022).

Conforme Marques (2021), dos 10 municípios com maior área minerada, 9 estão no estado do Pará e apenas um no Mato Grosso. Itaituba, no Pará, é o município com a maior área minerada, com quase 45 mil hectares, seguido por Jacareacanga, também no Pará, com 9.450 hectares, Parauapebas (PA), com 7.558 hectares, Oriximiná (PA), 6.278 hectares e São Félix do Xingu (6.212 hectares). Tendo destaque para Itaituba localizada a província aurífera do Tapajós, e a região mineral de Carajás e no oeste do Pará como produção de bauxita pela

Mineração Rio do Norte e Alcoa. Dentre as minas produtora com destaque estão segundo Sedeme-PA (2020):

As principais minas de minério de cobre concentrado no estado do Pará, todas com ouro associado. Três delas localizadas na região de integração de Carajás, nos municípios de Canaã dos Carajás (Mina do Sossego), Marabá (Mina do Salobo), Curionópolis (Mina do Antas Norte), uma na região de integração do Araguaia, no município de Água Azul do Norte (Mina Pedra Branca) e outra na região de integração do Tapajós, no município de Itaituba (Mina de Palito). As principais minas de minério de ferro em operação no estado do Pará, localizadas na região de integração de Carajás, uma no município de Parauapebas (Mina de Serra Norte), outra em Curionópolis (Mina de Serra Leste), e outra em Canaã dos Carajás (Mina de S11D). As principais minas de bauxita em operação no estado do Pará, duas localizadas na região de integração do Baixo Amazonas, nos municípios de Oriximiná (Mina de Porto Trombetas) e Juruti (Mina de Juruti), e outra na região de integração do Rio Capim, no município de Paragominas (Mina de Paragominas). As minas deste minério, todas na região de integração de Carajás, nos municípios de Parauapebas (Mina do Azul), e Marabá (Mina de Serra da Buritirama e Mina Eagle) e Curionópolis (Mina de Serra do Sereno) (SEDEME-PA, 2020).

Até 2024 a indústria mineral pretende investir R\$ 22,013 bilhões no Pará, outros R\$ 18,863 bilhões serão investidos em infraestrutura, transformação mineral e outros negócios, como a produção de biodiesel. Em números, gera 266 mil empregos diretos e indiretos na cadeia produtiva local e responde por 20% do PIB paraense (SIMINERAL, 2023).

4 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste estudo foi através de revisão bibliográfica ponderando artigos científicos, trabalho de conclusão de curso (TCC), dissertações, teses e livros associados ao uso do tema biolixiviação na mineração. Na pesquisa por trabalhos afins foram usadas as bases de dados de bibliotecas digitais como: Centro de tecnologia mineral (CETEM), Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD), repositório institucionais e *ScienceDirect*. E para isso, buscou-se pelos termos em português: “Biolixiviação”, “Biolixiviação no Pará”, “biohidrometalurgia”, “microrganismos mineradores”, e em inglês a busca pelo termo “*bioleaching*”. Durante a pesquisa os filtros usados foram os padrões. A triagem realizada nos trabalhos publicados, seguiu análise de seleção com os seguintes critérios: a) leitura dinâmica dos resumos; b) publicações que demonstram o desenvolvimento da biolixiviação da mineração assim como seu uso. Posteriormente, os trabalhos selecionados foram organizados na tabela 3, conforme a modalidade da publicação.

Tabela 2 - Número total de trabalhos a respeito do uso de biolixiviação.

Publicação	Número de trabalhos
Artigo científico	15
TCC	0
Livros	1
Dissertações	12
Teses	2

Fonte: Autoria própria.

Tendo como foco a análise dos resultados dos trabalhos acerca do uso da biolixiviação na mineração, uma leitura aprofundada foi realizada em todas as publicações para entender o desenvolvimento da técnica e as perspectivas futuras.

5 RESULTADOS

Este estudo baseou-se em 30 trabalhos publicados, sendo 25 nacionais e 5 estrangeiros, relacionados ao tema biolixiviação, como mostra a identificação cronológica da tabela 4. Procurou-se demonstrar um panorama de origem regional das pesquisas encontradas com identificação no mapa, expostos na figura 9, tendo na região sudeste a maior expressividade de trabalhos, abordando a temática da biolixiviação.

Tabela 3 – Identificação do nome dos estudos encontrados sobre uso da biolixiviação

Autor - ano	Título do trabalho
Oliveira (2006)	Biolixiviação de concentrado de flotação de sulfetos de cobre
Neto (2007)	Biolixiviação de minério de cobre da mina de Sossego, PA - Companhia Vale do Rio Doce
Horta (2008)	Influência da adição da espécie <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> e de íons Cl ⁻ na dissolução da calcopirita (CuFeS ₂)
Oliveira e Sobral (2010)	Biolixiviação de minério primário de cobre
Oliveira <i>et al.</i> (2010)	SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL - Biolixiviação: Utilização de microrganismos na extração de metais
Veloso (2011)	Biolixiviação de sulfetos secundários de cobre a partir da utilização de micro-organismos termófilos extremos”
Santos (2011)	Avaliação da atividade oxidativa do <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> sobre uma mistura composta de diferentes proporções dos sulfetos minerais pirita e calcopirita
Sicupira (2011)	Biolixiviação de Sulfetos Secundários de Cobre por <i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>
Sobral (2012)	Biolixiviação de Minério de Níquel com baixo teor Nesse Metal
Mehta e Pandey (2013)	Cinética de lixiviação por bactéria para a dissolução de cobre de um minério de calcopirita de baixo teor encontrado na Índia
Oliveira e Sobral (2013)	Estudos de biolixiviação de minério primário de cobre nas escalas semipiloto e piloto.
Vaz <i>et al.</i> (2014)	Biolixiviação de Minério Primário de Níquel por <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> -Lr
Oliveira (2014)	Identificação e isolamento de bactérias envolvidas na formação de drenagem ácida mineira na região de Jacobina (Bahia) e o seu uso na biolixiviação de cobre
Santos (2014)	Efeito do potencial de óxido-redução na biolixiviação da calcopirita
Colling (2014)	Biolixiviação para o aproveitamento da pirita presente em rejeitos de carvão mineral
Martins (2015)	Biolixiviação da calcopirita utilizando micro-organismos xerófilos extremos na presença de íons cloreto
Faria (2015)	Análise do desenvolvimento tecnológico a partir de documentos de patentes: um estudo de caso em processos de biolixiviação
Bello <i>et al.</i> (2015)	Estudo da biolixiviação do rejeito da lixiviação convencional de minério intemperizado de cobre visando recuperação desse metal remanescente nas escalas de laboratório e semipiloto.
Viegas (2016)	Avaliação da cinética bacteriana na biolixiviação da calcopirita
Cruz <i>et al.</i> (2017)	Biolixiviação de sulfetos secundários de cobre por
Freire (2017)	Biolixiviação: uma rota biotecnológica para extração da Scheelita
Afonso (2017)	Biolixiviação de cobre a partir de rejeito de processo de flotação de calcopirita empregando consórcio de microrganismos

Continuação

Tabela 3 – Identificação do nome dos estudos encontrados sobre uso da biolixiviação

Oliveira <i>et al</i> (2018)	Lixiviação de minério aurífero: uma abordagem biotecnológica
Porto (2020)	Caracterização de fungos presentes em solos sulfetados da Antártica e sua avaliação para estudos em processos de biolixiviação de metais
Santana e Giese (2020)	Desenvolvimento de um processo de extração de níquel e cobalto em biorreator
Deng <i>et al.</i> (2020)	Applying design of experiments to evaluate economic feasibility of rare-earth element recovery
Zhang <i>et al.</i> (2020)	Bioleaching of cobalt from Cu/Co-rich sulfidic mine tailings from the polymetallic Rammelsberg mine, Germany
Mäkinen <i>et al.</i> (2020)	Bioleaching of cobalt from sulfide mining tailings; a mkjn ini-pilot study
Hao <i>et al.</i> (2021)	Responses of bacterial community to potential heap construction methods of fine-grained copper tailings in column bioleaching system
Jorjani e Sabz Koohi (2022)	Gold leaching from ores using biogenic lixiviantes – A review

Fonte: Autoria Própria.

Figura 8 - Mapa de localização dos estudos encontrados.



Fonte: Autoria própria.

Começando as abordagens a partir do trabalho mais antigo encontrado, Oliveira (2006) analisou a viabilidade do aproveitamento do cobre a partir do concentrado de flotação cuja a composição é 70% de calcopirita e 30% de bornita. A célula bacteriana utilizada foi a *Acidithiobacillus ferrooxidans LR*, cultivada pela cultura T&K. Utilizou-se uma amostra com 60% das partículas acima de 325 mesh, o processo ocorreu sob a atuação de um a temperatura de 30 °C, a rotação de 150 rpm por 2 dias, sendo realizado 4 testes, obtendo se o melhor resultado com uma extração de 67% de cobre, com as amostras inoculadas, o que mostra um ganho superior na extração quanto no concentrado de flotação tínhamos 37% de teor de cobre.

Vale ainda ressaltar que a oxidação biológica se intensificou após 25 dias de ação do agente biológico.

Neto (2007) estudou a biolixiviação com o uso da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans LR*, em uma amostra de minério de cobre proveniente da mina de Sossego no Pará com teor de 0,3%, a uma fração de 65 mesh, os testes foram feitos utilizando a técnica de frascos agitados com erlenmeyer de 250 ml, com microrganismos que foram cultivados pela cultura T&K, sem analisado o crescimento dos microrganismos na presença dos íons Cl^- , Ag^+ e do tensoativo TWEEN 80. O processo de biolixiviação se deu em uma temperatura de 30 °C, uma rotação de 150 RPM, com duração de 5 dias, tendo como melhores resultados a solução normal sem adição de outros componentes e quando há a presença de íons Ag^+ a 0,0001 mol de concentração, rendendo um extração de 35 % de cobre, já quando adicional o TWEEN 80, o rendimento foi de apenas 10 %, constatou-se ainda que quanto maior a concentração do íon prata mas demorada era a oxidação do ferro presente. Horta (2008) também analisou uma amostra de origem da mina de Sossego no Pará, com as mesmas características da usada por Neto (2007), assim como o modo de cultivo da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans LR*, porém em seu estudo a análise foi feita mediante dois tipos de ensaios distintos, eletroquímico e biolixiviação em frascos, com a variação da adição do qual o material seria colocado primeiramente o agente lixivante ou o inibitório, isso ocorreu em ambos ensaios. Dessa forma temos que no teste eletroquímico o material do ensaio foi um copo de vidro pirex de 5 cm de diâmetro acoplado a uma tampa de Teflon para entrada de eletrodos que seguiram com a aplicação em duas séries a primeira adicionado a lixivante a *Acidithiobacillus ferrooxidans LR*, depois de 3 dias das condições de controle seguida de três adição do Cl^- o inibidor, na segunda série do teste eletroquímico, o Cl^- foi adicionado primeiramente após 4 dias às condições de controle, sendo adicionado em uma única fase o agente lixivante, no experimento de biolixiviação com frascos agitados foi executado na temperatura de 30 °C, a uma rotação de 180 rpm, com a adição da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans LR* e os íons de Cl^- adicionados no decorrer do experimento em fases distintas, dessas forma quando o 1 era adicionado primeiro após 12 dias, o segundo era adicionado após 48 dias do início do experimento. Por fim observou se a técnica de biolixiviação em frascos tornou possível a visualização do ganho na extração de cobre quando adicionados os íons de Cl^- e células bacterianas, porém quando os íons eram aplicados primeiro a bactéria não conseguia acessar a superfície das partículas da amostra retardando o processo (HORTA, 2008).

Oliveira e Sobral (2010) executou testes de biolixiviação, em escala laboratorial a partir de uma amostra de minério de cobre proveniente da mina Boa Esperança, contendo um

teor de 3% de cobre em partículas de 150 mesh. Os testes foram feitos em meio tensoativo biológico (ramnolipídio), no qual foram testadas três espécies microrganismos *Acidithiobacillus ferrooxidans*-LR, *Acidithiobacillus thiooxidans*-FG01 e *Leptospirillum ferrooxidans*-ATCC 53992, sendo essas cultivadas pela cultura 9k, seguindo conceitos estabelecidos por pesquisa prévia. Seguindo as dosagens pré estabelecidas, os experimentos ocorreram em frascos de *erlenmeyer* de 500 ml, a uma rotação de 150 rpm, a temperatura de 30 °C, analisados no período de 28 dias, tendo como máxima extração de cobre os ensaios conduzidos com 5 mg/L do ramnolipídio, sendo mínima dosagem deste tensoativo aplicada no processo obtendo 64,6% de cobre após 28 dias.

Oliveira et al. (2010) busca em seu livro demonstrar o desenvolvimento da utilização de microrganismos na extração de metais na indústria mineral, onde primeiramente descreve a biolixiviação como um processo de dissolução de sulfetos pela ação de um grupo de microrganismos, demonstrando suas vantagens na economia em comparativo aos processos metalúrgicos convencionais, como baixo investimento de capital e o baixo uso de energia comparado aos demais processos metalúrgicos. Descreve ainda as principais técnicas utilizadas na biolixiviação, sendo lixiviação em pilhas de lixiviação em monte e lixiviação em tanques agitados. Após a caracterização da técnica, um pouco sobre os agentes lixiviantes nesse contexto descrevendo as principais células bacterianas estudadas como agente da biolixiviação, tendo como principais espécies os microrganismos *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*, sendo essas caracterizadas fisiologicamente, filogenicamente e depositada em coleções de culturas, as mesmas se distinguem de acordo com a temperatura que se desenvolve. Identificou ainda que de modo geral os mecanismos que atuam entre a partícula e os microrganismos define-se em mecanismo de contato direto, mecanismo de contato indireto e mecanismo indireto. Por fim, determinou os fatores que afetam a biolixiviação, citando a evolução do estudo da técnica em busca de tecnologias mais limpas e sustentáveis, competição com os métodos convencionais.

Veloso (2011) buscou em sua pesquisa, estudar a biolixiviação aplicada a sulfetos secundários de cobre em amostras fornecidas pela Vale, contendo material marginal (rejeito), minério de cobre e concentrado de cobre com os respectivos teores 0,73%, 0,99% e 35,8%, sendo a granulometria das partículas superiores a 100 mesh sendo que o concentrado tem 100% acima de 200 mesh, diferentemente das células bacterianas já utilizadas. Neste estudo a biolixiviação foi trabalhada com auxílio de bactérias *sulfolobus acidocaldarius*, microrganismos termófilos extremos que se desenvolvem em temperatura mais altas. Os experimentos executados com as amostras foram biolixiviação em frascos agitados com o uso

de erlenmeyer de 250 ml a temperatura de 67,5 °C com uma rotação de 150 rpm e biolixiviação por em biorreator em erlenmeyer de 2 litros na mesma temperatura, utilizando o meio de cultura DSMZ 88 modificado para o cultivo da espécie microbiana, em todos os experimentos o aproveitamento do cobre foi em média 90%, porém no rejeito é necessário devido ser um material com alto teor contaminante para o microrganismo adição de íons de prata não superior 10 mol-1. No mesmo período Sucupira (2011) também usou seus esforços em avaliar a biolixiviação de sulfetos secundários de cobre, em amostras de minério de cobre e rejeito porém trabalhou com a cepa *sulfobacillus thermosulfidooxidans* cultivada pela cultura DSMZ 9293 adaptada para ferro. Os experimentos aconteceram em teste de biolixiviação em biorreator e frascos agitados, amostras eram granulometria superior a 150 mesh, e no experimento do biorreator foram submetidas a cultura de crescimento de bactérias Norris, no biorreator as condições aplicadas foram de agitação de 300 rpm, a temperatura de 50 °C, já no frasco agitados a agitação foi de 180 rpm a 50 °C, assim foi possível observar a que a razão de extração entre a presença e ausência do microrganismo são, no minério de cobre 100% e 60% e no rejeito 80% e 50%, com ressalva que para extração do minério marginal o uso de íons inibidores devido ao maior número de impurezas que prejudicam a extração do cobre.

Santos (2011) avaliou a biolixiviação entre interações galvânicas de duas amostras de sulfetos metálicos: pirita e calcopirita nas proporções (mP/mC): 1/1; 1/3; 3/1; 1/0; 0/1, que foram fornecidas da mina de Salobo-PA com granulometria maior que 75 mesh. O procedimento experimental foi executado por ensaio de biolixiviação em frascos agitados usando erlenmeyer de 250ml em mesa agitadora com a rotação de 200 rpm, com a temperatura ajustada a 30 °C. No experimento foram utilizadas a linhagem *Acidithiobacillus ferrooxidans* cultivadas pela cultura T&K, sendo que foi feita a adaptação da célula bacteriana à calcopirita substituído gradativamente em 5 etapas de intervalo em média de duas semanas a fonte de energia pelo mineral calcopirita. Os testes foram feitos tanto com meio normal, quanto o meio modificado, o qual mostrou um resultado bem animador na relação aos resultados de outras literaturas com um aumento de 100% no potencial de aproveitamento do cobre passando de 30 para 60%.

Sobral (2012) pesquisou a atuação de consórcios de microrganismos mesófilos e termófilos moderados no processo de biolixiviação do minério de níquel. Em seu estudo o níquel primário utilizado possui uma granulometria superior a 100 mesh, com teor de 0,3% Ni. O processo de biolixiviação *In vitro* utilizada contou com testes em triplicata tanto para os microrganismos adaptados quanto não adaptados, com o uso de erlenmeyer de 500 ml onde eram colocados os 10 ml de cada consórcios sobre a agitação de 150 rpm, os microrganismos

foram cultivados pela cultura 9k, sendo que nos primeiros 15 dias atuaram os consórcio de células bacterianas mesófilas (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*) em temperatura de 30 °C após os 15 dias até o dia 24 atuou o consórcio de bactérias termófilos moderada (*sulfobacillus sp.* e *acidimicrobium sp.*) na temperatura de 50 °C, tendo como resultado da extração 92,33 a cultura adaptada e 77,23 para cultura não adaptada, além de reduzir o consumo de ácido sulfúrico no processo.

Abhilash *et al.* (2013) analisaram a variação de três aspectos no processo extração por biolixiviação, sendo esses adaptação da célula bacteriana, tamanho da partícula temperatura ambiente, os experimentos foram realizados com minério de cobre de baixo teor, composto de quartzo calcopirita e pirita. Oriundo da mina Malanjkhand, Balaghat-Índia, o processo de biodiversidade se deu em frasco de 500 ml, com agitação de 150 rpm, com microrganismos da espécie *Acidithiobacillus ferrooxidans* cultivado em cultura 9k e adaptação da mesma. Com isso verificaram que quanto menor a granulometria maior o contato superficial dos microrganismos as partículas por eles metabolizadas, gerando maior extração verificada no teste com partículas de 270 mesh, o intervalo de temperatura utilizado por se tratar de conjunto de células bactérias mesófilas, foi de 25 °C a 35° C. Com o melhor êxito na extração a 35 °C. O terceiro fator avaliado foi a adaptação da cultura que se demonstrou eficaz na extração, gerando como melhor extração ao final após 35 dias 75,3% usando cultura adaptada, a 35 °C e partículas de 270 mesh.

Oliveira e Sobral (2013) realizaram experimentos em escala piloto e semi-piloto com o uso de biolixiviação em coluna com consórcio de microrganismos mesófilos, termófilos moderados e termófilos extremos, a fim de avaliar o potencial de extração de cobre e cobalto de baixo teor, em um minério primário de calcopirita com intrusões de cobalto com teor de 1% e 0,38% respectivamente, os consórcios de bactérias foram submetidos à cultura de crescimento 9k modificada. No teste em coluna semi-piloto foram utilizados 4,4 kg de minério em uma coluna de 0,6m por 0,10m de diâmetro. nos primeiros 40 dias trabalhou o consórcio de microrganismos mesófilos a temperatura de 30 graus Celsius, do dia 40 até o dia 100 foi utilizado a temperatura de 50 °C para o consórcio terremoto moderado e a partir do dia 100 foram utilizados a temperatura de 70 °C para o consórcio de bactérias termófilas totalizando 143 para obter uma extração de 53,92% de cobre e 65,55% de cobalto. No teste para projeto piloto a coluna possuía dimensões de 4 m de altura por 0,45 m de diâmetro na qual foram inseridas 636 kg de minério, a qual seguiu as mesmas observações de tempo para a ativação dos microrganismos do teste semi-piloto, para os microrganismos mesófilos e termófilos moderados, porém o período de uso dos termófilos extremos durou mais do dia 100 até o 344,

promovendo uma extração de 80,54% de cobre e 52,65% de cobalto demonstrando números atrativos para extração de cobre e cobalto.

Vaz et al. (2014) compararam o potencial de extração da técnica de biolixiviação em frascos agitados com o uso do microrganismo *Acidithiobacillus ferrooxidans*, com a biolixiviação em coluna com consórcio microbiano para extração de níquel. A cultura de crescimento dos microrganismos escolhida foi o T & K. No teste de frascos agitados a temperatura utilizada foi de 30 °C e 50 rpm de rotação, conduzida em frasco de 500 ml durante 30 dias que gerou uma extração de 39,1% em meio de cultura adaptada frente a 24,6 % na cultura não modificada. Para a biolixiviação em coluna foi utilizado recipiente de vidro com (20 x 5 cm) com quatro processos distintos, sendo eles de consórcio de bactérias mesófilas, uso *Acidithiobacillus ferrooxidans* abiótico, uso células imobilizada de *A. ferrooxidans* -LR e MPNi inoculado com *L. ferrooxidans* e *A. thiooxidans* e uso células imobilizada de *A. ferrooxidans*, porém nenhum processo em coluna rendeu extração expressiva em média produziram apenas 20% de extração de níquel.

Oliveira (2014) em seu estudo realizou o isolamento e identificação de bactérias de drenagem ácida para uso como lixiviante na extração de cobre. Primeiramente foi feita a coleta em drenagem ácida de amostras na região mineira da serra de Jacobina na Bahia. Os incrementos foram retirados em uma região de pH 4. Após a etapa de amostragem, seguiu para Biosigma S.A. no Chile para a identificação e caracterização microbiológica. Após a realização da identificação de todo o consórcio microbiano presente isolou-se somente através do cultivo T&K agarose do microrganismo *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Logo após realizou-se o processo de biolixiviação em frascos agitados, do minério de cobre da planta de flotação da Mineração Carnaíba S.A. com concentração de cobre de 0,9%, e 95% das partículas acima de 70 mesh. Sendo realizado os ensaios em erlenmeyer de 250 ml em um processo que durou 60 dias em agitação constante de 130 rpm, a 30 °C de temperatura com uma massa de minério de 37.5g, o ensaio foi realizado de três maneiras distintas com a adição da CEPA isolada, somente com os microrganismos nativos do minério, e sem microrganismo usando formaldeído, destacando que o ensaio com a seta mostrou a melhor extração em média 59%. No mesmo ano, Santos (2014) trabalhou o efeito do uso de íons ferrosos aplicados durante processo de biolixiviação da calcopirita, com uso da cepa *Acidithiobacillus ferrooxidans* LR. O minério utilizado é do município de Cisneros na Colômbia, o mesmo foi cominuído a uma fração de 120 mesh. O meio de Cultura para o crescimento do microrganismo foi o T&K, os quais foram submetidos a ensaios em frascos agitados sobre as condições de 30 °C de temperatura e agitação de 150 rpm, tanto em fase com o meio adaptado aos íons ferrosos quanto ao meio de cultura

T&K normal. Obtendo em média 4 vezes mais de aproveitamento com adição de íons ferrosos tanto na cultura normal quanto adaptada, com uma extração média final 80% de cobre é evidente o potencial da extração utilizado o incremento de íons ferrosos.

Em sua pesquisa investigativa Colling (2014) buscou viabilizar o processo de biolixiviação aproveitando a pirita presente no rejeito de carvão mineral, com foco na produção de insumos, para sulfato ferroso, pigmentos férricos e coagulantes. Para tal, foi feita a investigação em escala de bancada, em planta piloto e planta industrial. o material em estudo é proveniente da região carbonífera de Criciúma- Santa Catarina, sendo reprocessado por jigagem para coleta de amostras, sendo ainda necessário adequação granulométrica para os ensaios de bancada, nos ensaios de planta piloto e planta industrial manteve-se a granulometria original. Os microrganismos cultivados são os mesmos que já estavam juntamente as amostras de minério. Dessa forma foi necessário identificá-los por meio de análise laboratoriais a cultura de crescimento utilizada foi a 9k, mediante a uma temperatura de 30 °C e agitação de 120 rpm, sendo que foram adicionados nutrientes sintéticos e nutrientes naturais, na escala de bancada foram utilizados vidro cilíndrico de 30 cm por 7 cm no qual foram inseridos 1 kg de material vindo da amostra sendo o único material totalmente esterilizado precisamente, O sistema da escala de bancada conta com circuito de fluxo constante, na escala piloto foi utilizado um sistema com caixas d'águas de 1000 L também com fluxo constante onde foram preenchidos com 200 kg de rejeito. Para a escala industrial os ensaios foram conduzidos em uma área de 20m², dentro da carbonífera que cedeu as amostras, a planta conta com capacidade para trabalhar 5 toneladas de rejeito. Embora o estudo não forneça dados de extração final ele cita que a melhor extração ocorreu com o incremento de nutrientes sintéticos e que os resultados obtidos em extração foram positivos, com a ressalva de que o crescimento bacteriano foi insuficiente na planta industrial alcançando rendimento ideal só a partir de 20 dias. Contudo verificou-se o potencial para atender a demanda de sulfato férrico retirado do rejeito, para o tratamento de água para uma cidade de 200 mil pessoas, como todos os ensaios foram feitos em bateladas estima-se que seriam necessários 6,2 ciclos para retirar toda a pirita presente no rejeito.

Bello et al. (2015) apresentou em seu estudo a recuperação de cobre decorrente do rejeito de lixiviação convencional através de biolixiviação em coluna, em escala semi-piloto, usando bactérias gênero *Acidithiobacillus thiooxidans* e consórcio mesófilos, termófilos moderado, termófilos extremos cultivadas em cultura 9k modificada, com a adição de enxofre no processo. Os ensaios foram executados em colunas cilíndricas de 60x10 cm, em todos os testes obteve-se redução no consumo de ácido sulfúrico. Nota-se que o minério intemperizado

com a adição de enxofre, mas a cultura bacteriana de *Acidithiobacillus thiooxidans* promoveram a melhor extração totalizando 51,4%.

Faria (2015) abordou o desenvolvimento da biolixiviação através da perspectiva de pedidos de patentes visto que 70% das inovações são divulgadas desse modo. Em sua análise buscou o mapeamento mundial verificado mercado decorrente do estudo da biolixiviação, assim também com as grandes empresas mineradoras ou desenvolvedora de pesquisa. Entre os maiores solicitadores de patentes estão os países China, Austrália, Estados Unidos, Canadá e Japão equivalentes a 50% das patentes de todo o mundo, porém só Austrália e Canadá são mais abertos a solicitantes estrangeiros em suas terras mostrando ser um mercado de grande importância, quanto ao crescimento da busca por patentes relacionado a tecnologia para biolixiviação iniciado em 1912, começou a se fortalecer nos anos 70 e seguiu horizontalizado até início dos anos 90 chegando ao seu máximo crescimento no início dos anos 2000 até 2010. Os destaques empresariais ficam para BHP Billiton, Beijing Nonferrous Metals, Univ Central Souht e Geobiotcs. O mercado brasileiro está na 15ª posição no ranking mundial sendo que menos de 10% das solicitações de patentes são de origem nacional, dentre os principais pedidos estão relacionados a biolixiviação de cobre e níquel.

Martins (2015) testou a utilização da adição de íons de cloreto na biolixiviação da calcopirita com o uso de termófilos extremos, para os ensaios foi coletada uma amostra de minério concentrado com 75 % calcopirita e de granulometria inferior a 200 mesh, usado a bactéria *Sulfolobus acidocaldarius* cultivados em meio a cultura DSMZ 88 modificado. Os ensaios tiveram a duração de 14 dias. Mantidos em shaker, a uma agitação de 150 rpm, a temperatura de 67,5 °C com dois diferentes experimentos sistema de biolixiviação e sistema de lixiviação convencional ambos possuindo adições de cloreto, tendo como resultado o sistema que teve a melhor extração composto de sistema contendo microrganismos com adicionamento de 1,0 mol/L de Cl, obtendo 100% de concentração do cobre. Viegas (2016) fez uma análise correlata as de Martins, porém com os parâmetros distintos, realizando seus estudos com bactérias mesófilas com adição e sem adição de cisteína no processo de biolixiviação da calcopirita, de uma amostra proveniente do município de Cisneros na Antioquia Colômbia, com a granulometria 100% menor de 12 mesh com 30,86% de cobre. A cultura de crescimento é a T&K usando os microrganismos mesófilos *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* e a mutante da *Acidithiobacillus ferrooxidans* criada através da exposição a raios ultra violeta. Os ensaios foram conduzidos em erlenmeyer de 250 ml, a agitação de 150 rpm, a temperatura de 30°C, embora não haja muita modificação entre os resultados as melhores

condições foram *Acidithiobacillus ferrooxidans* + cisteína e a pior condições *Leptospirillum ferrooxidans*.

Afonso (2017) analisou o uso de consórcio bacteriano da microbiota local da mina de Sossego no Pará na recuperação do concentrado de calcopirita e o rejeito da *Scavenger* após o processo de flotação, o consórcio de células bacterianas foi definido como ABL, sendo cultivado pela cultura 9k, 9K-Fe e 9K-S. A amostra foi submetida a três ensaios distintos biolixiviação em frascos agitados, biolixiviação em biorreator e biolixiviação em biorreator de coluna de bolhas, nas condições de agitação de 130 rpm, partícula no intervalo de 100 a 325 mesh, análise mais evidente do estudo, foi que as partículas no tamanho de 325 mesh geram uma maior extração como foi o caso que aconteceu na biolixiviação dos frascos agitados com 70% de aproveitamento do cobre, quando a amostra se encontrou nesta granulometria, e na biolixiviação em biorreator em batelada que alcançou 58% extração.

Cruz et Al (2017) trabalharam a biolixiviação de sulfetos secundários com o uso da cepa bacteriana *Acidithiobacillus ferrooxidans* em amostra de minério marginal, cedidas pela Vale com granulometria e 200 a 325 mesh com teor de 1,1%, os ensaios foram mantidos em *shaker* termostaticado na modalidade de bateladas em erlenmeyer de 250ml submetidos a agitação de 150 rpm e 30°C de temperatura, sendo ainda empregado a cultura Norris, a extração máxima do experimento foi de 75% que só foram possíveis devido adição de sais de alumínio gerando relações massivas.

Freire (2017) estudou a possibilidade da criação de uma rota biotecnológica para o aproveitamento do rejeito de scheelita para obtenção de tungstênio. A amostra dos experimentos, foi coletada na mina Brejuí em Currais novos - Rio grande do Norte, a partir de pilhas de rejeito com tamanho de 325 mesh, amostra foi submetida a ensaios de biolixiviação em frascos agitados com o uso de bactérias acidófilas mesófilas em meio de Cultura de crescimento conforme os parâmetros estabelecido por (CARVALHO et al., 1990) mantidos em *shaker*, os ensaios foram executados em erlenmeyer de 250ml nas temperaturas 25°C, 30°C, 35°C, pela rotação de 120 rpm durante 5 dias. Apresentando como melhor resultado o ensaio submetido a temperatura de 30°C com 12% de extração, contudo como todos resultados apresentaram crescimento do cultivo de bactérias os resultados são expressivos para tempos maiores de contato entre as bactérias e o minério.

Oliveira et al. (2018) abordou a biolixiviação do ouro pelo cultivo da bactéria *thiobacillus thioparus* a partir de um concentrado aurífero produzido após o processo de pré-tratamento por bioxirredução com o uso de *Leptospirillum ferrooxidans*, a bactéria *thiobacillus thioparus* é isolada a partir de sedimentos de um lago do Cetem, e foi usada nos ensaios de

biolixiviação do concentrado do pré-tratamento na obtenção de ouro dos sulfetos isolados em meio de agitação de 150 rpm e 30 °C de temperatura, o ganho da biolixiviação com o pré-tratamento do concentrado dos sulfetos em relação do não tratado e de 58% estabelecendo uma extração de 28,2% em 28 dias de testes.

Porto (2020) realizou estudo do isolamento e identificação de fungos em amostras de solos sulfetos da Antártida para selecionar propensos e potenciais agentes de biolixiviação de metais industriais, além de padronizar teste em ensaios de biolixiviação. Inicialmente foi feita a coleta das amostras em diferentes pontos da Península Keller na Ilha Rei George, Shetland do Sul, Península Antártica. Os fungos foram isolados mediante a três meios de culturas distintos YM: ágar Extrato de Malte-Extrato de Levedura; DRBC: ágar Dicloran Rosa de Bengala Cloranfenicol Base; DG18: ágar DG18 Dicloran Glicerol. Promovendo a identificação de 85 táxons diferentes, sendo escolhido fungo *Penicillium Chrysogenum* UFMGCB17938 pelo seu crescimento rápido e acentuado em todos os pH testados, para uso nos ensaios de biolixiviação em amostras rejeito de mineração da Mineradora da Barragem de Vargem Grande, Mina do Pico, Itabirito, Minas Gerais, realizadas em frascos Erlenmeyer de 250 mL em duplicata, contendo 150 ml de meio e 7,5g de rejeito, os quais foram incubados a 25 °C sob agitação de 150 rpm por 28 dias. Foram realizados quatro controles para o experimento, que biosorveu em sua matriz extracelular alguns metais de interesse industrial como Estrôncio e Zinco. os valores da concentração do biolixiviado de Ferro e Manganês, não obtiveram altos rendimentos, mas os índices foram significativos para futuras otimizações do processo.

Santana e Giese (2020) propuseram um estudo de avaliação do potencial biolixiviação em escala de bancada por microrganismos heterotróficos, a fim de desenvolver parâmetros para biolixiviação em colunas de escala semi-piloto de níquel e cobalto, as amostras trabalhadas são de níquel lateríticos proveniente de depósitos no Estado de Goiás, como solubilizador foi escolhido o cepa fúngica *Penicillium Simplicissimum* cultivada em meio de Agar Batata Dextrose, cedidas pelo instituto Federal de Geociências e Recursos Naturais em Hannover, Alemanha. Os ensaios se deram em frascos de erlenmeyer e bateladas avaliados estaticamente com essas avaliações, pretendeu-se chegar ao aperfeiçoamento da extração de níquel e cobalto de lateritas, formando parâmetros para um biolixiviação em colunas de escala semi-piloto viável.

Deng et al. (2020) formulou uma estratégia para avaliar o potencial econômico na extração de terras raras por meio da biolixiviação, visando o lucro máximo de mercado. Inicialmente definiu uma estrutura de métodos de planejamento para definir, estimativa de

eficiência de lixiviação elementos terras raras através de modelos de simulação, com intuito de identificar os principais fatores que afetam a rentabilidade do processo. Gerando um mapeamento fatorial com resposta do lucro líquido, onde os dados experimentais são gerados pela simulação de diferentes cenários, o modelo foi testado para avaliar a confiabilidade, obtendo um desempenho econômico robusto sob as variações de preço dos elementos terras raras. Os testes consideraram a concentração de glicose em dois níveis e a densidade da polpa em cinco níveis. Porém uma exploração mais aprofundada do papel dessas variáveis é necessária.

Zhang et al. (2020) realizaram experimentos a fim de determinar a dinâmica de dissolução de metais de rejeitos e rejeitos concentrados por biolixiviação em bancada por frascos agitados e experimentos de biolixiviação em reator tanque. As amostras são de cobalto de rejeitos de minas sulfídricas da mina polimetálica Rammelsberg, Alemanha. O consórcio microbiano de bactérias mesófilas e acidófilas e archaea foi aplicado em frascos de agitação, bem como em reatores de tanque agitado de 2L, para biolixiviação do cobalto e cobre. O consórcio microbiano mesófilo adaptado constituído majoritariamente por *Acidithiobacillus ferrooxidans*, alcançou 91% de cobalto e 57% de extração de cobre dos rejeitos. Os ensaios de biolixiviação com um concentrado de flotação de rejeitos obtiveram recuperação de 66% de cobalto e 33% de cobre. Através da análise mineralógica evidenciou que o cobalto na superfície da pirita framboide, foi lixiviado principalmente por ataque microbiano. Nesse período Mäkinen et al. (2020) também realizaram experimentos de biolixiviação com rejeitos de cobalto, usando ensaios de biolixiviação em tanques com a cultura mista contendo *Marinobacter sp.*, *Acidithiobacillus spp.* (*A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *A. albertensis*, *A. ferrivorans*), *Leptospirillum sp.* (*L. ferrooxidans*), *Cuniculiplasma sp.*, *Nitrosotenus sp.* e *Ferroplasma sp.* O meio de cultura sofreu adaptação da microbiota, para poder ser aplicado no sistema mini piloto instalando, operando em batelada contínua, com aplicação de 10L nos reatores de tanque (30 °C, 100 g/L de conteúdo sólido), agitados orbitalmente por 300 rpm. Tendo como rendimentos da biolixiviação (Co 87%, Zn 100%, Ni 67%, Cu 43%) em aproximadamente 10 dias. O foco maior foi na recuperação do cobalto, referente ao melhor valor econômico agregado que ele possui.

Hao et al. (2021) propuseram a análise comparativa da influência de métodos diferentes tipos de biolixiviação em pilha, por meio de teste de bancada em coluna. os ensaios ocorreram biorreatores de 50 x 7 cm, sendo simulado três métodos de construção de pilhas todos carregados com 13 kg de massa de rejeito provenientes da barragem de rejeito de Lualo na Zâmbia a fração de 325 mesh, operados a uma temperatura de 30 graus durante 83 dias,

seguindo a seguinte estrutura ensaio (A) alternando de camadas de areia de quartzo e rejeito mesma espessura, ensaio (B) composto misto de solução ácido sulfúrico a 10%, com rejeito misturado a granulado, ensaio C) sintetização em pellets de aglomerado de rejeito 1,5 % de bentonita, os microrganismos utilizados no sistema reacional de lixiviação bacteriana foi um consórcio de bactérias acidófilos mesófilos. Ficando nítido o impacto no comportamento da biolixiviação nos diferentes tipos de método verificado pela extração de cobre, nos respectivos resultados dos ensaios A) 60,1% ensaio B) 54,6% e o ensaio C) 43,9%.

Jornais e Sabzkoohi (2022) conduziram um estudo baseado na busca por soluções biotecnológicas concorrentes a principal método hidro metalúrgico de extração de ouro, a cianetação que é altamente difundida devido sua alta solubilização e rendimentos de ouro, porém é identificada com limitações técnicas, econômicas e ambientais. O estudo teve como foco buscar trabalhos desenvolvidos na área de metalurgia do ouro visando comparar os métodos e os resultados alcançados. Com avaliação da cianetação comprovou-se a uma técnica limitada a minerais refratários de ouro, além do seu alto nível de poluição ao meio ambiente com isso verificou-se como lixiviantes concorrente: os biogênicos - bactérias cianogênicas, os iodetos e triiodetos - bactérias *Roseovarius tolerans* e os aminoácidos bactérias mutante *Bacillus* sp. Contudo a biolixiviação do ouro também se mostrou insuficiente para processar minerais refratários necessitando de etapa pré-tratamento, e possuindo alto custo do meio de cultura de crescimento das bactérias para biolixiviação do ouro. Identificando ainda que muitos problemas analisados podem ser solucionados com estudos mais aprofundados visto que ainda há poucos estudos visando sancionar a temática.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A demanda por metais aumentou na última década, as descobertas diminuíram e os depósitos descobertos estão diminuindo em grau de qualidade. As mudanças nas restrições ambientais também são fatores que trazem uma grande aceitação para a biolixiviação ganhando cada vez mais espaço em meio as rotas de transformação e refino de metais na área de metalurgia extrativa. Dessa maneira, ressaltam-se como pontos fortes e fracos, através da leitura dos estudos encontrados que tratam de biolixiviação como exposto a seguir.

Entre os principais destaques estão os ganhos ambientais, oriundos principalmente pela redução de gases nocivos ao meio ambiente e pela significativa redução no uso de ácido sulfúrico no processo e menor gasto de energia no comparativo com as rotas tradicionais.

O isolamento da primeira cepa bacteriana com metabolismo capaz de realizar a oxidação de metais no final da década de 1940, gerou o interesse em meios de uso na operação, na área de tratamento de minérios como uma rota de tecnologia limpa e sustentável.

Ao longo dos anos o desenvolvimento da biolixiviação tem se mostrado como uma técnica bem versátil, podendo estar em todas as etapas metalúrgicas, aplicada a minerais de baixo teor e recuperação de rejeitos.

O principal minério que usa a biolixiviação como forma de obter o metal de interesse é o cobre, porém como observa-se que outros minerais também usam a biolixiviação como forma de concentração como: níquel, cobalto, tungstênio, terras raras e ouro, sendo este último necessário o uso de etapas de pré-tratamento.

Notou-se afinidade de trabalho das bactérias em minerais de baixo teor, que é uma característica de como se apresentam os minerais, que mais usam essa rota de tratamento para obtenção de concentrado.

A *Acidithiobacillus ferrooxidans*, foi o microrganismo minerador mais encontrado nos estudos de biolixiviação, devido ser o mais antigo a ser analisado, tendo aplicabilidade em vários minerais, pois metaboliza óxidos e sulfetos. Tendo os meios de culturas de crescimento dos agentes biológicos mais usuais são a T&K e 9K que geralmente são adaptados ao minério a ser biolixiviado. Nos experimentos que buscavam trabalhar com consórcios de microrganismos tiveram maiores dificuldades em obter bons resultados, tendo melhor aproveitamento quando se trabalha apenas um.

Mesmo com uma grande gama de microrganismos mesófilos, termófilos moderados e termófilos extremos, a busca por novas bactérias lixivadoras, nota-se isso nas pesquisas

voltadas a identificar microrganismos em locais extremos como a antártica e na produção laboratorial criando cepas mutantes.

Os estudos de biolixiviação são em sua maioria bens restritos, estima-se que cerca de 70% das invenções e desenvolvimentos tecnológicos são divulgados apenas por meio de documentos de patentes (FARIA, 2015). No Brasil o estudo da aplicação de biolixiviação tem um acervo pequeno, escasso de materiais concentrado em sua maioria na região sudeste, que usa muito os minerais oriundos do estado Pará, que nesta pesquisa não foram identificados nenhum trabalho com autoria local.

A técnica de biolixiviação é muito complexa e necessita de mão de obra especializada na condução tanto de experimentos, quanto no processo industrial, pois demanda a avaliação de muitos parâmetros de controle dentre os mais importantes estão, a propagação dos microrganismos, grau de solubilização, temperatura, granulometria das partículas, nível do pH, molalidade dos inibidores. Outro fator que ainda restringe muito o uso da técnica é seu alto tempo de ação que não acompanha a velocidade desejada se comparado os demais processos.

A biolixiviação está cada vez mais presente no dia a dia da mineração se contrapondo aos meios convencionais, fortemente influenciada pelo potencial no aproveitamento do rejeito dessa forma considerada uma saída limpa em relação ao meio ambiente.

As empresas de mineração estão cada vez mais cientes dos destaques da biolixiviação, assim investindo em equipamento biolixiviadores, que já estão sendo comercializado por mais de duas décadas, buscando se estabilizar como propensos competidores as rotas dos demais processos. Porém para que as tecnologias voltadas para esse sejam mais amplamente aplicadas comercialmente, eles devem ser demonstrados em escala pilotos de sucesso. Para tal, deve haver mais parcerias entre as empresas de mineração que possuem e exploram os depósitos, e universidades, laboratórios governamentais e empresas de engenharia que desenvolvem produtos e equipamentos para biolixiviação.

REFERÊNCIAS

ABHILASH. MEHTA, K. D. PANDEY, B.D. Cinética de lixiviação por bactéria para a dissolução de cobre de um minério de calcopirita de baixo teor encontrado na Índia. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 66, p. 245-250, 2013. Disponível em: Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672013000200017>. Acesso em 19 de abril de 2023.

AFONSO, Larissa Cardillo. **Bioliexiviação de cobre a partir de rejeito de processo de flotação de calcopirita empregando consórcio de microrganismos**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-15012018-153426/publico/LarissaCardilloAfonsoCorr17.pdf>. Acesso em: 26 de março de 2023.

AMARANTE, Jose Luiz. **Histórico da mineração**. Curso de Introdução à Mineração Para as Embaixadas Brasileiras, 2017. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/451190/Aula+2+-+Hist%C3%B3rico+da+Minera%C3%A7%C3%A3o.pdf/c7e92bde-6632-1851-9ecd-a14a6af41939>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2022.

ARAÚJO, Eudocia Carla Oliveira de. SILVA, Isabella da Rocha. FERREIRA, Janúbia da Silva. CORDEIRO, Maria Lúcia da Silva, COELHO, Glauciane Danusa. Biomineração: extração sustentável e silenciosa de minério. **Revista saúde e ciência**, 2014. Disponível em: <https://www.rsctemp.sti.ufcg.edu.br/index.php/RSC-UFCG/article/view/247/162>. Acesso em: 06 de dezembro de 2022.

BELLO, Naiara Soares. SOBRAL, Luis Gonzaga. Santos. OLIVEIRA, Débora Monteiro de. Estudo da bioliexiviação do rejeito da lixiviação convencional de minério intemperizado de cobre visando recuperação desse metal remanescente nas escalas de laboratório e semipiloto. **In: Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM**, 4. Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1808>. Acesso em: 26 de março de 2023.

BEVILAQUA, Denise. **Bioprocessos aplicados à mineração e ao meio ambiente 2020**. 67 f. Tese de Livre-docência – Apresentada ao Instituto de Química de Araraquara da Universidade Estadual Paulista, Belém ARARAQUARA – SP, 2020. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/235990/bevilaqua_d_ld_araiq.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 28 de novembro de 2022.

COSTA, Fabrizzio Rodrigues. **Caracterização tecnológica do minério de ouro da Mina Morro do Ouro Paracatu, MG**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-22062016-144932/publico/Fabrizzio_Rodrigues_Costa_PPGEMin_corrigida_2016.pdf. Acesso em: 28 de dezembro de 2022.

CRUZ, Flávio Luciano dos Santos. MARTINS, Flávio Luiz. CARVALHO, Liliane Coelho de. OLIVEIRA, Víctor de Andrade Alvarenga. LEÃO, Versiane Albis. **Bioliexiviação de sulfetos secundários de cobre por Acidithiobacillus ferrooxidans**. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 14, n. 3, p. 257-263, jul./set. 2017. Disponível em:

<http://www.tecnologiammm.com.br/files/v14n3/tmm1231.pdf>. Acesso em: 03 de maio de 2023.

Deng, S., Perez-Cardona, J., Huang, A., Yih, Y., Thompson, V. S., Reed, D. W., ... & Sutherland, J. W. **Applying design of experiments to evaluate economic feasibility of rare-earth element recovery**. *Procedia CIRP*, v. 90, p. 165-170, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120300998>. Acesso em: 04 de abril de 2023.

FARIA, Larissa Rosa. **Análise do desenvolvimento tecnológico a partir de documentos de patentes: um estudo de caso em processos de biolixiviação**. 2015. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

FREIRE, Gabriella Cristina de Figueiredo. **Biolixiviação: Uma rota biotecnológica para extração da Scheelita**, 2017. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/1396>. Acesso em: 15 de março de 2023.

GIESE, Ellen Cristine. **Potencial biotecnológico de uso de micro-organismos imobilizados em gel de alginato de cálcio**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015. 47p. (Série Tecnologia Ambiental, 81).

GIESE, Ellen Cristine. Biolixiviação: uma avaliação das inovações tecnológicas na biomineração de minerais sulfetados no período de 1991 a 2015. **Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**. São Paulo, 2017, v. 14, n. 3, p. 192-203, jul./set. 2017. Disponível em: <https://www.tecnologiammm.com.br/article/10.4322/2176-1523.1205/pdf/tmm-14-3-192.pdf>. Acesso em: 15 de fevereiro.

GIESE, Ellen Cristine. Xavier, Lúcia Helena. Lins, Fernando A. Freitas. **O futuro da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos**. *Brasil Mineral*, 2018. Disponível em: <http://adimb.org.br/ADMBLACK/clipping/442.pdf>. Acesso em: 15 dezembro de 2022.

GONZALEZ, Marco. **Minerando com micro-organismos**. *NotasGEO*, 2017. Disponível em: <https://www.notasgeo.com.br/2017/12/minerando-com-micro-organismos.html>. Acesso em: 15 dezembro de 2022.

GRANATO, Marcus. **Metalurgia extrativa do ouro**. CETEM - Brasil. DNPM. Série Tecnologia Mineral; 37. Seção Met. Extrativa; 14. Brasília 1986. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/200/1/stm-37.pdf>. Acesso em: 20 dezembro de 2022.

HANAI, maria. **Novas tecnologias e relações sociais de produção na mineração industrial do ouro**. *Multitemas*, (2016). Disponível em: <https://multitemas.ucdb.br/multitemas/article/view/1256>. Acesso em: 22 dezembro de 2022.

HAO, X. D. LIU, X. D. PING, Z. H. U. LIANG, Y. L. QIU, G. Z. YAN, L. I. U. LIU, H. W. **Responses of bacterial community to potential heap construction methods of fine-grained copper tailings in column bioleaching system**. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 31, n. 6, p. 1796-1805, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632621656170>. Acesso em: 04 de abril de 2023.

HORTA, Daniela Gomes. **Influência da adição da espécie *Acidithiobacillus ferrooxidans* e de íons Cl⁻ na dissolução da calcopirita (CuFeS₂)**. 2008. 100 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/87979>. Acesso 17 de Abril de 2013

IN THE MINE. **Recuperação de ouro com uso de bactérias**. Processamento, 2020. Disponível em: <https://www.inthemine.com.br/site/recuperacao-de-ouro-com-uso-de-bacterias/>. Acesso em: 22 dezembro de 2022.

INVESTEPARÁ. **Pará: maior mercado do norte e porta de entrada para a Amazônia**. Economia forte e diversificada, 2022. Disponível em: <http://investpara.com.br/dados-economicos-do-estado-do-para/#:-text=O%20Par%C3%A1%20%C3%A9%20a%2012%C2%AA.da%20regi%C3%A3o%20norte%20do%20Brasil>. Acesso em: 25 setembro de 2022.

JORJANI, Esmail; SABZKOOHI, Halimeh Askari. **Gold leaching from ores using biogenic lixivants—A review**. *Current Research in Biotechnology*, v. 4, p. 10-20, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590262821000393>. Acesso em: 04 de abril de 2023.

JÚNIOR, José Fernando Gomes. **8º Anuário Mineral do Pará**. 2019, Simineral - Agência EKO, Belém/Pá. Disponível em: https://simineral.org.br/pdf/anuarios/8-desktop_pt-br.pdf Acesso em: 22 de novembro de 2022.

LINS, Fernando A. Freitas. RIZZO, Andrea C. CUNHA, Claudia Duarte. LIMA, Francisco Mariano. Tecnologias para a sustentabilidade ambiental. In: MELFI, Adolpho José. MISI, Aroldo. CAMPOS, Diógenes de Almeida. CORDANI, Umberto G. **Recursos Minerais no Brasil problemas e desafios** – Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. cap. 7, p. 281-287. Tecnologias para a sustentabilidade ambiental Centro de Tecnologia Mineral – CETEM.

LOPES, Marcos. **Processo De Biolixiviação No Beneficiamento Mineral**, 2018. Técnico em mineração – beneficiamento. Disponível em: <https://tecnicoemineracao.com.br/biolixiviacao/>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2023.

MAGALHÃES, M., LEMOS, M., MOREIRA, V., PEREIRA, M., SOUZA, T., & VIEIRA, M. Aplicação da geometurgia para aumento da recuperação de ouro – Santa Bárbara, MG. **Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**. Minas Gerais, 2019. Disponível em: <http://www.entmme2019.entmme.org/trabalhos/019.pdf> Acesso em: 22 abril de 2023.

MÄKINEN, Jarno. SALO, Marja. KHOSHKHOO, Mohammad. SUNDKVIST, Jan-Eric. KINNUNEN, Päivi. **Bioleaching of cobalt from sulfide mining tailings; a mini-pilot study**. *Hydrometallurgy*. (2020), 196. 105418. 10.1016/j.hydromet.2020.105418. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X20304102?via%3Dihub>. Acesso em: 04 de abril de 2023.

MARQUES, Luciano. **Garimpo já ocupa mais área do que a mineração industrial.** 2021. Brasil61. Disponível em: <https://brasil61.com/n/garimpo-ja-ocupa-mais-area-do-que-a-mineracao-industrial-mine210111>. Acesso em 24 de janeiro de 2023.

MARTINS, Flávio Luiz. **Biolixiviação da calcopirita utilizando microorganismos termófilos extremos na presença de íons cloreto.** 2015. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

MINERAÇÃO no Pará, Brasil e no mundo. **Simineral.** 2023. Disponível em: <https://simineral.org.br/mineracao/mineracao-para#:~:text=MINERA%C3%87%C3%83O%20NO%20PAR%C3%81%2C%20BRASIL%20E%20MUNDO>. Acesso em: 25 de março de 2023.

NETO, Wilson Alves Ribeiro. **Biolixiviação de minério de cobre da mina de Sossego, PA - Companhia Vale do Rio Doce.** 2007. 54 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/88037>. Acesso em 19 de fevereiro de 2023.

O QUE é biomineração? **AGI – American Geosciences Institute.** 2022. Disponível em <https://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/what-biomining>. Acesso em: 25 de dezembro de 2022.

OLIVEIRA, Andriela Dutra Norberto de. **Isolamento de bactérias oxidantes de enxofre para posterior utilização em estudos de lixiviação de minério aurífero.** CETEM 2017. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/200/1/stm-37.pdf>. Acesso em: 22 dezembro de 2022.

OLIVEIRA, Andriela Dutra Norberto de. SOBRAL, Luis Gonzaga Santos. OLIVEIRA, Débora Monteiro de. **Lixiviação de minério aurífero: uma abordagem biotecnológica.** CETEM 2017. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2159/3/Lixivia%C3%A7%C3%A3o%20de%20min%C3%A9rio.pdf>. Acesso em: 22 dezembro de 2022.

OLIVEIRA, Débora Monteiro de. SOBRAL, Luis Gonzaga Santos. LIMA, Renata de Barros. **Biolixiviação de concentrado de flotação de sulfetos de cobre. 2006. XIV Jornada de Iniciação Científica – CETEM.** Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/701/1/Debora%20Monteiro.pdf>. Acesso em: 12 de abril de 2022.

OLIVEIRA, Débora Monteiro de; SOBRAL, Luis Gonzaga Santos. Biolixiviação de minério primário de cobre. 2010. **In: Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM, 2.** Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/360>. Acesso em: 12 de abril de 2022.

OLIVEIRA, D. M.; SOBRAL, L. G. S. Estudos de biolixiviação de minério primário de cobre nas escalas semipiloto e piloto. **In: Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM, 3,** Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/360>. Acesso em: 20 de abril de 2022.

OLIVEIRA, D. M., SÉRVULO, E. F. C., SOBRAL, L. G. S., PEIXOTO, G. H. C. **Biolixiviação: utilização de micro-organismos na extração de metais.** Série de Tecnologia Ambiental. Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/317/1/sta-53.pdf>. Acesso em: 12 de abril de 2022.

OLIVEIRA, Débora Monteiro de. *et. al.* **Biolixiviação: Utilização de Micro-organismos na Extração de Metais.** CETEM/MCT. Rio de Janeiro 2010. 40p. (Série Tecnologia Ambiental, n.53). Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/317/1/sta-53.pdf>. Acesso em: 22 dezembro de 2022.

OLIVEIRA, Luiz Eduardo Lacerda de. **Identificação e isolamento de bactérias envolvidas na formação de drenagem ácida mineira na região de Jacobina (Bahia) e o seu uso na biolixiviação de cobre.** 2014.

OLIVEIRA, Vitor A. **Metalurgia extrativa.** SitesGoogle, [entre 2010 e 2020]. Disponível em: <https://sites.google.com/site/metalurgiaextrativa/>. Acesso em: 22 dezembro de 2022.

PARÁ. **Só geografia.** Virtuoso Tecnologia da Informação, 2007-2023. Disponível em: <http://www.sogeografia.com.br/Conteudos/Estados/Para/>. Acesso em: 06 de dezembro de 2023.

PINA, P. S. LEÃO, V. A. SILVA, C. A. SOUZA A. D. FRENAY, J. **Efeito da biolixiviação sobre a cinética de dissolução de um concentrado sulfetado de zinco em soluções ácidas de sulfato férrico.** XXI ENTMMME - Natal-RN, 2005. Disponível em: https://www.artigos.entmme.org/download/2005/hidrometalurgia/1634%20-%20P.S.Pina_V.A.Le%20C3%A3o_C.A.Silva_A.D.Souza_J.Frenay%20-%20Efeito%20da%20biolixivia%C3%A7%C3%A3o%20sobre%20a%20cin%C3%A9tica%20de%20dissolu%C3%A7%C3%A3o%20de%20um%20concentrado%20sulfetado%20de%20zinco%20em%20solu%C3%A7%C3%B5es%20%C3%A1cidas%20de%20sulfato%20f%C3%A9rrico.pdf. Acesso em: 3 de dezembro de 2022.

PORTO, BÁRBARA ALVES. **Caracterização de fungos presentes em solos sulfetados da Antártica e sua avaliação para estudos em processos de biolixiviação de metais.** Dissertação (Mestrado em Microbiologia) - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/34068>. Acesso em 28 de março de 2022.

PORTO, Claudio Gerheim. PALERMO, Nely. PIRIS Roberto Fernando Mendes. **Panorama de exploração e produção de ouro no Brasil.** princípios, tecnologia e meio ambiente. Cap.1. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. p.2-22. Disponível em <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/1216/1/extracao-ouro%20cap.1.pdf>. Acesso em: 14 de dezembro de 2022.

PRIYA, A.; HAIT, S. Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 8, p. 6989–7008, 2017.

ROBERTO, Francisco F. SCHIPPERS, Axel. **Progresso na biolixiviação: parte B, aplicações de processos microbianos pelas indústrias de minerais.** *Appl Microbiol Biotechnol* **106**,

5913–5928 (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12085-9>. Acesso em 10 de dezembro de 2022.

SANTANA, Ana Carolina de Oliveira. GIESE, Ellen Cristine. **Desenvolvimento de um processo de extração de níquel e cobalto em biorreator. Cetem, 2020.** Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2414/1/Ana%20Carolina%20de%20O.%20Santana.pdf>. Acesso em 25 de março de 2022.

SANTOS, Ana Laura Araújo. **Efeito do potencial de óxido-redução na biolixiviação da calcopirita.** Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista. Araraquara. 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/110371>. Acesso em 25 de março de 2022.

SANTOS, Marcelo Souza. **Avaliação da atividade oxidativa do Acidithiobacillusferrooxidans sobre uma mistura composta de diferentes proporções dos sulfetos minerais pirita e calcopirita** [dissertação]. Araraquara: Universidade Estadual Paulista. 2011; 66. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/87967>. Acesso em: 16 de abril de 2023.

(SEDEME) Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Mineração e Energia. **Sinopse da produção mineral do Pará 2020. Principais commodities produzidas no Pará.** Diretoria de geologia, mineração e transformação mineral – DIGEM. 2023. Disponível em: https://sedeme.pa.gov.br/sites/default/files/sinopse_da_mineracao_v2020.pdf. Acesso em: 15 de março de 2023.

SICUPIRA, Lazaro Chaves. **Biolixiviação de sulfetos secundários de cobre por Sulfolobus thermosulfidooxidans.** 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/87966>. Acesso em 15 de março de 2023

SILVA, Daniel Rodrigues da. **Efeito da adição de nanopartículas na biolixiviação da calcopirita ('CU''FE''S IND.2') por Acidithiobacillus ferrooxidans LR.** 2011. 81 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2776>. Acesso em 15 de janeiro de 2023.

SILVA, Jaqueline Carmo da. **Saiba como bactérias podem atuar como mineradores e reduzir o impacto ambiental causado pelos rejeitos da mineração.** BACTERIAS MINERADORAS. Temas atuais em biologia, 2014. Disponível em: <http://www.temasbio.ufscar.br/?q=artigos/bact%20rias-mineradoras>. Acesso em: 3 de dezembro de 2022.

SOARES, T. H.; SOBRAL, L. G. S. **Estudo de solubilização de ouro utilizando tiosulfato produzido por rota biotecnológica = Gold solubilisation study using thiosulphate out of biotechnological route.** In: Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM, 6. Rio de Janeiro. Anais,,Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2017. p.207-212.

SOBRAL, Louise de Aguiar. **Biolixiviação de minério de níquel com baixo teor nesse metal.** In: XX Jornada de Iniciação Científica. Rio de Janeiro, Brasil: CETEM/MCTI, 2013.

Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/116/4/LOUISE%20DE%20AGUIAR%20SOBRAL.pdf>. Acesso em: 19 de abril de 2023.

UBALDINI, Stefano. GUGLIETTA, Daniela. VEGLIÒ, Francesco. GIULIANO Veronica. 2019. **Valorização de Resíduos de Mineração por Aplicação de Lixiviação Inovadora de Tiosulfato para Recuperação de Ouro**. Metais. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met9030274>. Acesso em: 3 de dezembro de 2022.

VAZ, Patrícia Morgado. GIESE, Ellen Cristine. OLIVEIRA, Débora Monteiro **biolixiviação de minério primário de níquel por acidithiobacillus ferrooxidans –LR**. In: XXII Jornada de Iniciação Científica-CETEM. 2014. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1531/1/Patr%C3%ADcia%20Morgado%20Vaz.pdf>. Acesso em: 15 de abril de 2023.

VELOSO, Tácia Costa. **Biolixiviação de sulfetos secundários de cobre a partir da utilização de micro-organismos termófilos extremos**. Ouro Preto: Rede temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto; 2011. 105 p. Disponível em: <https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/2835>. Acesso em: 15 de março de 2023.

VIEGAS, Debora Maria Alves. **Avaliação da cinética bacteriana na biolixiviação de calcopirita**, 2016. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Biotecnologia. Instituto de Química - Campus de Araraquara da Universidade Estadual Paulista. Araraquara, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/138847>. Acesso em: 15 de março de 2023.

ZARAPOLLI, Domingos. **Mineração biotech - Uso de bactérias para tratar minérios em jazida de ouro em Mato Grosso pode reduzir risco ambiental e custos de operação**. Pesquisa FAPESP, 2020. <https://revistapesquisa.fapesp.br/mineracao-biotech/>. Acesso em: 12 de dezembro de 2022.

Zhang, R., Hedrich, S., Römer, F., Goldmann, D., & Schippers, A. **Bioleaching of cobalt from Cu/Co-rich sulfidic mine tailings from the polymetallic Rammelsberg mine, Germany**. Hydrometallurgy, v. 197, p. 105443, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X20302462>. Acesso em: 04 de abril de 2023.