



## Recursos Minerais, Água e Biodiversidade

**Virgínia S. T. Ciminelli, Francisco A. R. Barbosa, José G. Tundisi, Hélio A. Duarte**

O conceito de qualidade da água é apresentado de forma mais ampla, incluindo os aspectos físicos, químicos e biológicos. O sinergismo entre esses diferentes aspectos é salientada. A importância desse sinergismo é essencial para a compreensão dos ecossistemas aquáticos e como são afetados pelas atividades agrícolas, de mineração e pelas áreas urbanas.

► qualidade de água, biodiversidade, recursos minerais ◀

Recebido em 13/03/2014, aceito em 24/04/2014

39

### Qualidade da água do ponto de vista químico e biológico

A expressão qualidade da água é utilizada em diferentes situações ou contextos, fato que, às vezes, dificulta estabelecer o real significado do que seja qualidade da água.

Para um biólogo especializado em águas continentais, conhecido como limnólogo, a expressão a qualidade da água é uma expressão de qualidade do ambiente aquático, envolvendo aspectos físicos, químicos e biológicos. Todo ambiente aquático tem uma matriz física e química (temperatura, quantidade dissolvida de diferentes compostos e materiais em suspensão), que suporta ou permite a existência de tipos variados de organismos aquáticos, desde bactérias, leveduras, fungos e microcrustáceos, até organismos mais complexos como peixes e plantas aquáticas.

Mais recentemente, esse conceito foi ampliado entre os ecólogos aquáticos para incluir também, no conceito de qualidade de água, a riqueza e a distribuição dos organismos aquáticos, bem como os processos ecológicos responsáveis

pela sua manutenção. Esse conceito foi proposto em 1980 pelo ecólogo americano Thomas Lovejoy, como sendo a diversidade biológica (biodiversidade) de uma dada área ou região. Essa biodiversidade aquática tem fundamental importância para o funcionamento dos ecossistemas, além de suprir alimento para a espécie humana.

Os organismos presentes na água regulam, até certo ponto, a composição química da água. A presença de bactérias afeta processos de decomposição, precipitação e produção de gases como metano e dióxido de nitrogênio. Além disso, todos os organismos consomem oxigênio e produzem

dióxido de carbono pela respiração. Todo o conjunto de atividades dos organismos na água, portanto, altera, acelera ou retarda a composição química e a qualidade da água e do sedimento. A morte dos organismos resulta em uma permanente precipitação de matéria orgânica em decomposição nos ambientes aquáticos e no sedimento.

A presença de organismos em rios, lagos, represas, áreas alagadas, tem, portanto, um papel fundamental no funcionamento dos ecossistemas e na sua autorregulação.

*Em síntese, qualidade da água quer dizer, portanto, o resultado de variáveis físicas, químicas e biológicas. As variáveis físicas consistem na temperatura, luz, material em suspensão e do seu estado físico, enquanto as propriedades químicas estão relacionadas às concentrações de oxigênio dissolvido, nutrientes – como, por exemplo, fósforo e nitrogênio –, clorofila-a e pH. Os tipos de bactérias, cianobactérias, leveduras, fungos, microcrustáceos, moluscos, peixes, plantas aquáticas são as variáveis biológicas.*

Em síntese, qualidade da água quer dizer, portanto, o resultado de variáveis físicas, químicas e biológicas. As variáveis físicas consistem na temperatura, luz, material em suspensão e do seu estado físico, enquanto as propriedades químicas estão relacionadas às concentrações de oxigênio dissolvido, nutrientes – como, por exemplo, fósforo e nitrogênio –, clorofila-a e pH. Os tipos de bactérias, cianobactérias, leveduras, fungos, microcrustáceos, moluscos, peixes, plantas aquáticas são as variáveis biológicas. O resultado das interações de todas as variáveis físicas, químicas e biológicas, em conjunto, é responsável pela manutenção da qualidade dos recursos hídricos bem como a flora e fauna dos ecossistemas aquáticos.

Essa visão ampla do conceito de qualidade de água é essencial para entendermos a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas aquáticos, sem o que a utilização da água e dos recursos hídricos, de forma sustentável, seria muito difícil ou mesmo impossível. Com esse conceito amplo de qualidade de água, podemos entender também alguns processos nos ambientes aquáticos, a começar, por exemplo, pela Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), que indica o consumo de oxigênio por bactérias, fungos e leveduras durante o processo de mineralização do material orgânico até a produtividade primária, ou seja, a fixação de carbono via fotossíntese, que representa a formação de material orgânico novo nos sistemas aquáticos.

Todas as águas continentais estão sujeitas aos efeitos da drenagem do solo que contribui com elementos e substâncias para a deterioração da qualidade da água de rios, represas e lagos. O processo mais comum é o aumento de compostos contendo nitrogênio e fósforo (como fosfatos e nitratos) na água, resultante da drenagem de solos em áreas de mineração, solos agrícolas e de áreas urbanas. Esgotos domésticos não tratados também causam esse processo. O crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas superiores (macrófitas aquáticas) resulta em um aumento de biomassa, a qual, após decomposição, consome oxigênio, levando à anóxia. Essa eutrofização é um processo contínuo que progressivamente deteriora a qualidade da água. Além dessa deterioração, há efeitos na saúde humana. Eutrofização resulta em crescimento excessivo de cianobactérias, algumas das quais produzem cianotoxinas que podem causar doenças no fígado (hepatotoxinas) e no sistema nervoso (neurotoxinas e saxitoxinas). O acúmulo de matéria orgânica nas águas interiores pode causar doenças graves como as enterites em pessoas que utilizem dessa água para consumo.

Particularmente no âmbito industrial, a qualidade de água do ponto de vista químico assume aspectos específicos em função do tipo de atividade industrial considerada. Assim, por exemplo, no âmbito das atividades de mineração, há que

se considerar que os processos envolvidos geram emissões aquosas, sólidas e gasosas. Águas que entraram em contato com os minérios durante a moagem ou nos reatores, onde ocorre a dissolução do metal de interesse; rejeitos contendo minerais sem interesse econômico; gases como o dióxido de carbono ou dióxido de enxofre, que são produzidos na queima de carbonatos e sulfetos, são alguns exemplos das emissões geradas pela indústria mineral e que devem ser tratadas para minimizar os impactos ao meio ambiente (terrestre, aquático e atmosférico). A legislação ambiental estabelece critérios para o descarte das emissões de forma a minimizar o impacto ambiental. Esses critérios visam garantir que resíduos gerados nos processos industriais ao serem depositados, geralmente em barragens de rejeitos, estejam em uma forma química e fisicamente estável para não causar riscos graves à saúde humana e ao meio ambiente.

Tomemos como exemplo uma chaminé que emite quantidades apreciáveis de dióxido de enxofre para a atmosfera. Por meio de reações de oxidação e de hidratação, o dióxido de enxofre pode formar ácido sulfúrico e assim gerar chuva ácida.

Apesar de a chuva ácida ter sido identificada ainda no século XIX, somente em meados da década de 1960 passou a ser uma preocupação da ciência

após os estudos pioneiros de Harold Harvey, ecólogo da Universidade de Toronto, Canadá. Harvey publicou em 1972 um dos primeiros estudos sobre um “lago morto” resultado da precipitação ácida, expressão utilizada para designar esse tipo particular de impacto causado pela formação de óxidos de nitrogênio e/ou enxofre.

Na segunda metade do século XX, o grande público tomou conhecimento da chuva ácida e seus impactos após a publicação pelo New York Times dos estudos conduzidos na Estação Experimental Florestal de Hubbard Brook, Estados Unidos, demonstrando esses efeitos (Likens et al., 1972; 1974). A chuva ácida está relacionada com queima de carvão mineral rico em enxofre, tráfego de veículos e processos industriais que envolvem a queima de minerais ricos em enxofre. Atualmente, existem tecnologias para minimizar esses impactos e até utilizar o enxofre associado à chuva ácida para a produção de ácido sulfúrico para uso industrial.

O dióxido de enxofre é um subproduto valioso da oxidação de sulfetos minerais em um processo chamado ustulação. A necessidade de adequar as emissões de enxofre aos limites estabelecidos pela legislação ambiental incentivou o seu aproveitamento na produção de ácido sulfúrico, que pode ser vendido para a indústria de fertilizantes – grande consumidora para a produção de fertilizantes fosfatados – ou pode ser utilizado no próprio processo industrial como, por exemplo, na etapa de lixiviação/dissolução dos minérios.

*Apesar de a chuva ácida ter sido identificada ainda no século XIX, somente em meados da década de 1960 passou a ser uma preocupação da ciência após os estudos pioneiros de Harold Harvey, ecólogo da Universidade de Toronto, Canadá. Harvey publicou em 1972 um dos primeiros estudos sobre um “lago morto” resultado da precipitação ácida, expressão utilizada para designar esse tipo particular de impacto causado pela formação de óxidos de nitrogênio e/ou enxofre.*

No caso dos particulados atmosféricos, a legislação brasileira estabelece a quantidade total máxima de partículas inaláveis, dentre outros parâmetros (Resolução CONAMA nº 3 de 1990). A tendência observada em outros países é de se estabelecer também níveis máximos para elementos ou substâncias químicas presentes nessas emissões.

Os processos industriais produzem emissões sólidas com diferentes características químicas. Rejeitos da concentração de minérios de ferro são constituídos essencialmente por minerais considerados inertes em condições ambientais como sílica, óxido de ferro, dentre outros. Portanto, a disposição dos rejeitos da mineração de ferro tem como principal preocupação a segurança física do barramento (conhecido como barragem de rejeitos). Por outro lado, o rejeito da produção da alumina no processo Bayer, chamada de lama vermelha, apresenta características de alcalinidade e eventualmente de presença de outros elementos químicos que fazem com que a toxicidade seja também uma preocupação importante.

A estabilidade química das emissões sólidas é avaliada em ensaios padronizados de dissolução, que permitem determinar as concentrações dos elementos dissolvidos em água ou em soluções específicas após um tempo de contato. Dependendo dos valores encontrados, o resíduo é classificado como perigoso, não perigoso ou inerte e essa classificação orienta a forma de disposição do rejeito.

### Processos naturais de remediação de águas

Uma das consequências ruins do lançamento de esgotos domésticos sem tratamento diretamente nos rios e nas represas é a grande alteração da qualidade dessas águas que, como resultado direto da entrada de grandes quantidades de matéria orgânica (esgoto), permitirá o crescimento exagerado de microrganismos (bactérias, fungos, cianobactérias, algas) e outros (microcrustáceos, moluscos, plantas aquáticas).

Numa fase inicial, esse crescimento exagerado gera mais degradação ambiental, já que consome o oxigênio dissolvido existente e, assim, afeta os demais organismos como os peixes, por exemplo, que acabam sendo expulsos desses ambientes para evitar a morte. No entanto, esse processo, com o tempo e dependendo do volume de esgoto aportado ao corpo d'água, acaba permitindo a mineralização da matéria orgânica do esgoto com liberação de elementos nutrientes como o nitrogênio e o fósforo. Estes serão, por sua vez, utilizados para a formação de novos organismos produtores primários (cianobactérias, algas e plantas aquáticas), fechando o ciclo dos materiais, conhecido como ciclo biogeoquímico, designação que demonstra que os diferentes elementos químicos da natureza circulam entre os meios biótico (organismos) e abiótico (elementos químicos na natureza).

Ao final desses processos, um dos resultados importantes para a manutenção dos organismos em condições de equilíbrio com a natureza é a melhoria das condições físicas e químicas das águas. Os elementos químicos em excesso introduzidos com os esgotos são retirados do meio líquido e incorporados, via fotossíntese, aos novos organismos formados, o que permite, por sua vez, o surgimento de outros organismos (consumidores e decompositores) ao longo das redes tróficas.

### Processos industriais em que o conhecimento biológico/químico é utilizado para remediar e tratar os efluentes

As atividades industriais, como praticamente todas as atividades associadas à vida do ser humano, estão associadas a algum tipo de impacto ambiental, cuja magnitude cresce à medida que a população aumenta e concentra-se em algumas regiões do planeta. A remoção e o beneficiamento de grandes volumes de minérios, estéreis e rejeitos que caracterizam as

atividades de mineração podem causar impactos na composição química e biodiversidade do solo e do ambiente aquático. A lavra de minérios para futuro beneficiamento pode produzir impactos devido à toxicidade de alguns elementos que são parte da composição dos minerais que constituem os minérios e que são mobilizados pela atividade de mineração. Assim, arsênio, cádmio, chumbo, mercúrio, zinco podem ser eventualmente mobilizados e disponibilizados,

contaminando águas superficiais e subterrâneas e a biota aquática. Por meio do processo de biodisponibilidade e bioacumulação, esses elementos distribuem-se na cadeia alimentar, podendo conseqüentemente afetar todos os organismos dessa cadeia e, potencialmente, a espécie humana. A correta gestão ambiental deve atuar para prevenir e minimizar esses impactos. Portanto, a prevenção, a remediação e a correção dos efeitos da mineração passam pelos processos químicos e biológicos que são indissociáveis e interdependentes. Um melhor uso dos processos biológicos na mineração pode ser a aplicação da biodiversidade para remover metais e resíduos tóxicos do ambiente (água e solo), seja pela absorção direta e acumulação (em macrófitas aquáticas, vegetação superior) ou pela intermediação de processos biogeoquímicos, os quais podem ser fundamentais na remoção de metais ou na sua transformação em espécies químicas menos tóxicas (UNESCO; UNEP, 2008; Jorgensen et al., 2012).

### Invisíveis, mas presentes em todo lugar

Os microrganismos encontram-se amplamente distribuídos em toda a natureza: na água, nos solos, em depósitos minerais, nas plantas e no corpo humano. Nesses diversos compartimentos participam e interferem em diversas reações

Uma das consequências ruins do lançamento de esgotos domésticos sem tratamento diretamente nos rios e nas represas é a grande alteração da qualidade dessas águas que, como resultado direto da entrada de grandes quantidades de matéria orgânica (esgoto), permitirá o crescimento exagerado de microrganismos (bactérias, fungos, cianobactérias, algas) e outros (microcrustáceos, moluscos, plantas aquáticas).



químicas. Os microrganismos podem se adaptar às condições adversas: espécies podem ser encontradas, por exemplo, em um reator industrial de lixiviação de minérios de ouro – ou seja, na presença de cianeto, uma substância tóxica a diversos seres vivos. Devido à sua dimensão, imperceptível a olho nu, e ao fato de que as reações das quais participam são muitas vezes mais lentas se comparadas às reações de processos químicos convencionais, a presença de microrganismos nem sempre é percebida de forma imediata.

No entanto, sob condições adequadas, as velocidades das reações químicas são aumentadas e se tornam de interesse industrial. Isso ocorre em diversas áreas de aplicação como, por exemplo, na produção de cerveja e vacinas e também na área mineral. Ou seja, existem processos industriais nos quais os microrganismos são utilizados com vistas a gerar produtos de valor econômico.

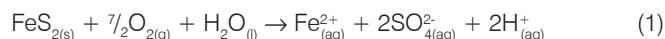
A Figura 1 mostra o exemplo de dois microrganismos (mesófilos e termófilos) que são utilizados na extração de ouro e cobre por meio de biolixiviação de sulfetos minerais.

### Transformando um problema ambiental em um processo industrial para a extração de metais

O papel dos microrganismos nas reações de oxidação de sulfetos metálicos é discutido no artigo “Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina”. Conforme explicado, trata-se geralmente de uma colônia de microrganismos autotróficos ou quimiolitotróficos (que são capazes de sintetizar material orgânico a partir do CO<sub>2</sub> do ar e da energia das reações de oxidação dos sulfetos minerais), acidofílicos (sobrevivem em condições de elevada acidez, e.g. pH 1-2) e aeróbios (requerem a presença do ar). Dentre as espécies mais conhecidas, tem-se *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*.

A extração de metais a partir de seus sulfetos envolve geralmente o aproveitamento de minérios de baixo conteúdo metálico. Por exemplo, o teor do metal no minério de cobre está na faixa de 1% em massa. Consequentemente, grandes quantidades de estéril (material descartado na lavra) ou de rejeitos (material descartado nas operações de tratamento de minérios como flotação ou, na extração

metalúrgica, como lixiviação – ver artigo “Especiação Química e sua Importância nos Processos de Extração Mineral e de Remediação Ambiental”) são gerados e devem ser dispostos adequadamente. Uma pilha de estéril da mineração de minérios sulfetados de cobre pode conter pequenas quantidades de sulfetos como a pirita (FeS<sub>2</sub>), a calcocita (Cu<sub>2</sub>S), a covelita (CuS), dentre outros minerais. Como resultado do intemperismo químico, a partir da exposição ao ar e à água de chuva, tem-se início um processo químico de oxidação da pirita, ilustrado pela reação:



A reação acima aumenta a acidez do meio que, combinada a outros fatores físico-químicos como a temperatura, cria as condições ideais para a proliferação de microrganismos endógenos, ou seja, que já existiam associados à rocha. Dentre estes, tem-se os microrganismos envolvidos nas reações de oxidação dos sulfetos. Esse consórcio de microrganismos, com destaque para a espécie *Acidithiobacillus ferrooxidans*, acelera a oxidação dos sulfetos e a oxidação do Fe(II) a Fe(III).

O ácido sulfúrico produzido na reação representada na Equação 1 e os íons Fe(III), reagentes ácido e oxidante, respectivamente, quando combinados, formam uma solução com elevado poder de lixiviação (dissolução) de sulfetos. A reação de oxidação da pirita passa de um processo inicial predominantemente químico (abiótico) para um processo biótico – sob a ação de microrganismos. Nessas condições, a velocidade da reação cresce exponencialmente fazendo com que a contribuição do processo químico torne-se secundária.

A produção continuada de ácido e íons Fe(III) aumenta a taxa de oxidação dos sulfetos, o que conseqüentemente eleva a concentração de ácido e íons Fe(III). Esse é o princípio da geração da drenagem ácida de rocha (DAR ou, em inglês, ARD – *acid rock drainage*) ou de mina (DAM ou, em inglês, AMD – *Acid Mine Drainage*), discutida no artigo “Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina”. O processo torna-se autossustentável e pode perdurar enquanto os sulfetos existirem. Existem relatos de processos de drenagem ácida originados há milhares de anos, como

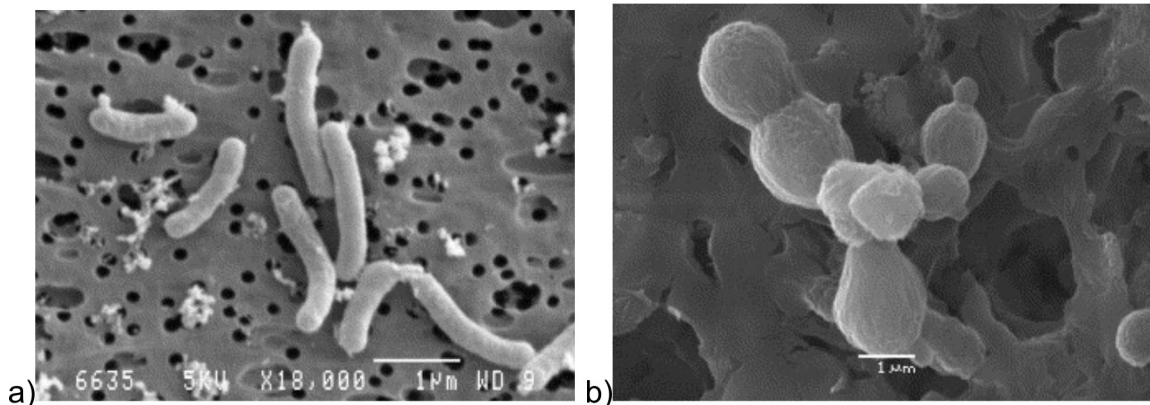


Figura 1: Microrganismos: a) mesófilos e b) termófilos. Figura reproduzida com permissão da editora Elsevier Referência (Clark et al., 2006). Barra na figura indica a dimensão de 1 micrometro.

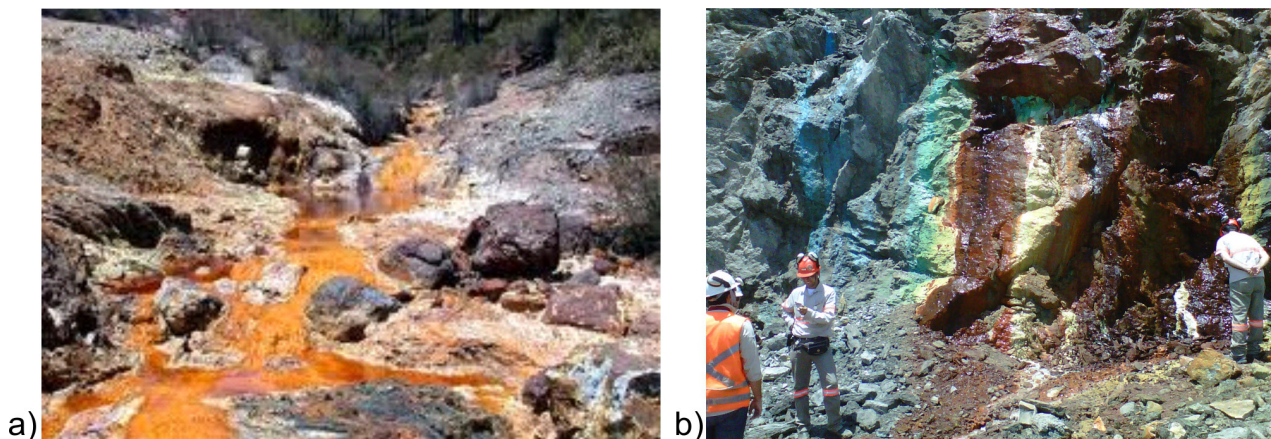
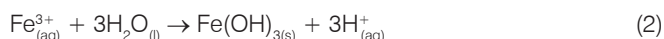


Figura 2: a) Foto do Rio Tinto, Espanha. Reproduzida com permissão Ref. (Davis et al., 2000). b) Drenagem ácida de Mina em depósito de cobre (Foto: L. Bissacot).

é o caso do Rio Tinto, na região de Andaluzia, Espanha. A mineração de cobre e outros metais ao longo do Rio Tinto é anterior à época cristã e continuou no período do Império Romano até a Idade Média com a produção em grande escala ocorrendo a partir da retomada da lavra (mineração) no século XIX. O nome Rio Tinto vem da cor vermelho-cerâmica das suas águas, que é característica dos precipitados de Fe(III) na forma de óxidos e hidróxidos (Figura 2a). A Figura 2b mostra a drenagem ácida em uma região com a presença de minerais sulfetos de cobre e ferro, conferindo uma ampla faixa de cores devido às diferentes fases em que se apresentam.



Observa-se que a reação de precipitação de espécies contendo Fe(III) eleva ainda mais a acidez do meio (ver equação 2). A DAM produz soluções aquosas que contêm, em geral, diversos metais dissolvidos. Além da pirita, outros sulfetos e minerais contendo metais de toxicidade variada podem ser lixiviados e incorporados nas DAM, o que torna ainda mais severo o problema ambiental.

O tratamento da DAM requer a precipitação dos cátions metálicos e a neutralização da acidez. No entanto, dependendo da concentração dos íons metálicos, essa solução pode seguir para etapas de tratamento do licor e de recuperação dos metais presentes na solução da mesma forma como ocorre em um processo de lixiviação em tanques. Esse é o princípio das técnicas de Lixiviação em Pilhas de Estéril e em Pilhas de Minérios.

A Lixiviação em Pilhas de Estéril (*Dump Leaching-DL*) permite recuperar o metal – por exemplo, o cobre – que é lixiviado por meio de reações que seguem os princípios do fenômeno natural de formação de DAM. Contudo, no processo industrial, as condições são controladas de forma

a maximizar a extração do metal. A técnica é utilizada para o tratamento direto de minérios de baixos teores (chamada

*Heap Leaching-HL*). Nas últimas décadas, cerca de 20% do cobre total produzido no mundo foi gerado por lixiviação em pilhas de estéril. A engenharia de construção das pilhas de estéril evoluiu ao longo dos anos. A preparação da base para receber o sólido envolve o uso de membranas poliméricas para reduzir os riscos de contaminação do solo e da água subterrânea a partir da infiltração da solução, o que, por conseguinte, eleva a recuperação

do metal. A distribuição da água ou da solução lixivante foi aperfeiçoada, bem como a aeração da pilha de estéril com microrganismos aeróbios, que necessitam do oxigênio do ar. A Figura 3 mostra exemplos de lixiviação em pilhas de minérios de ouro e urânio.

A biolixiviação em pilhas pode ser utilizada para depósitos de sulfetos polimetálicos e na extração de urânio, situações em que a formação de ácido e íons Fe(III) favorece a lixiviação. No caso de minérios de cobre, o maior desafio é a lixiviação do mineral calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), o mineral mais abundante de cobre. A calcopirita exige condições ainda mais drásticas do que aquelas da biolixiviação convencional, ou seja, temperaturas de 60 a 80 °C, típicas dos microrganismos termófilos.

### **Bioprocessos para tratamento de efluentes da mineração: ação dos microrganismos reconstituindo os depósitos minerais**

As emissões (sólidas, aquosas e gasosas) de uma unidade industrial requerem, geralmente, um tratamento prévio ao descarte ou à disposição para evitar danos ao meio ambiente. A legislação ambiental estabelece padrões mínimos em que os rejeitos devem se enquadrar para serem descartados ou dispostos.

O tratamento da DAM requer a precipitação dos cátions metálicos e a neutralização da acidez. No entanto, dependendo da concentração dos íons metálicos, essa solução pode seguir para etapas de tratamento do licor e de recuperação dos metais presentes na solução da mesma forma como ocorre em um processo de lixiviação em tanques. Esse é o princípio das técnicas de Lixiviação em Pilhas de Estéril e em Pilhas de Minérios.



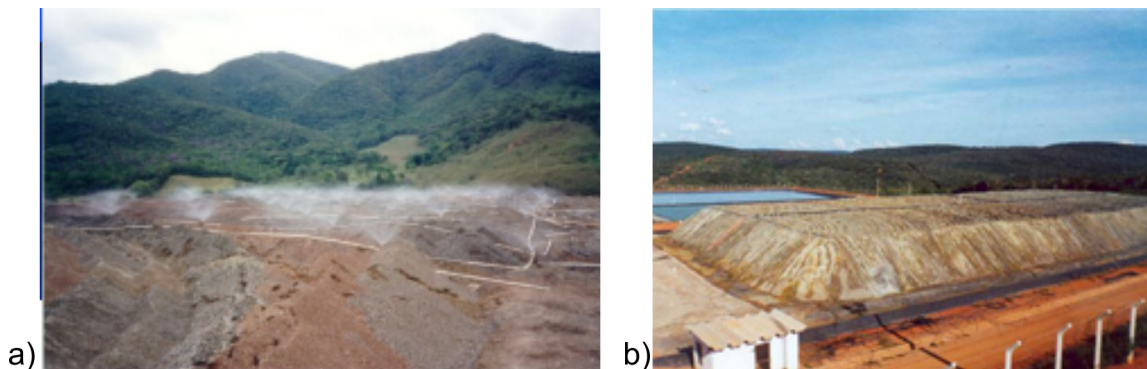
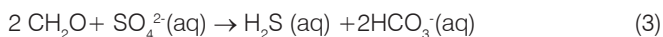


Figura 3: Exemplo de lixiviação em pilhas de minério de ouro (MG) e de urânio (BA). (Figura 3a: Foto: Virginia Ciminelli. Figura 3b: Foto cedida pela Indústrias Nucleares do Brasil – INB).

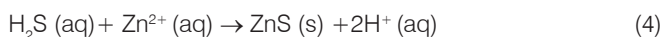
Do ponto de vista de sua composição química, as emissões aquosas de uma indústria mineral são geralmente complexas, pois contêm diversos ânions (sulfatos, fosfatos, cianeto, arsenatos, entre outros) e metais que não podem ser diretamente dispostos no meio ambiente. Bioprocessos – processos que utilizam microrganismos – podem ser utilizados não apenas para a extração de metais, mas também para o tratamento dos efluentes, mitigando, assim, o impacto ambiental do descarte e enquadrando-se às exigências da legislação ambiental.

44

O exemplo discutido a seguir envolve as chamadas bactérias sulfato redutoras, como a *Desulfovibrio spp.*, que reduzem o íon sulfato a sulfeto. Na Equação 3,  $\text{CH}_2\text{O}$  representa material orgânico em geral presente no meio.



Os sulfetos metálicos, em geral, apresentam solubilidade bastante baixa em meio aquoso e, portanto, precipitam segundo a reação:



Condições redutoras favoráveis à proliferação das bactérias sulfatorredutoras são encontradas no fundo de leitos de rios e nos alagados construídos (*wetlands*). Estes constituem uma forma de minimizar o impacto ambiental.

Outros processos industriais utilizam uma fonte de enxofre para a produção de derivados do  $\text{H}_2\text{S}$  em biorreatores. O produto é inserido em reatores onde ocorre a precipitação de sulfetos contendo os cátions metálicos. A reação possibilita a remoção do cátion metálico presente na fase aquosa em uma forma em que o metal possa ser aproveitado. Trata-se, portanto, de um processo de recuperação do metal.

A precipitação de um sulfeto metálico permite retornar o íon metálico à forma original encontrada no depósito mineral ( $\text{ZnS}$  tem a fórmula química do mineral esfalerita).

**Condições redutoras favoráveis à proliferação das bactérias sulfatorredutoras são encontradas no fundo de leitos de rios e nos alagados construídos (*wetlands*). Estes constituem uma forma de minimizar o impacto ambiental.**

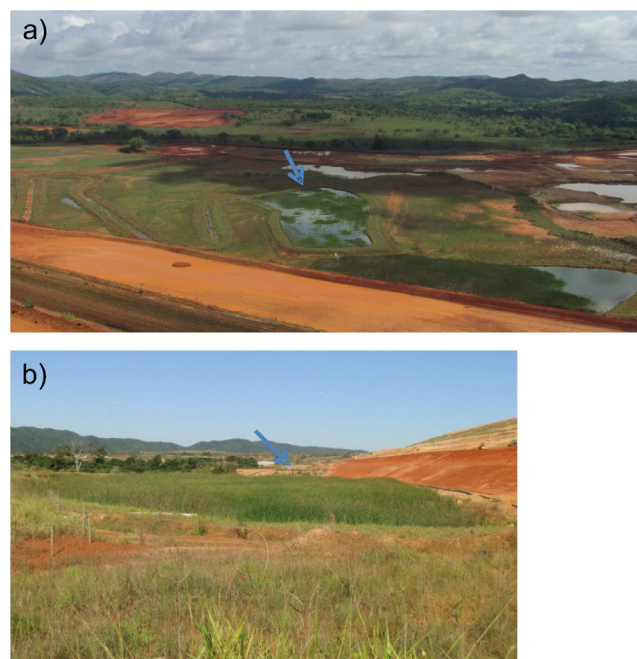


Figura 4: Diferentes vistas de um sistema de tratamento passivo de efluentes industriais. O efluente flui pelas áreas alagadas onde os processos descritos no texto ocorrem (Foto: cedida por Kinross Brasil Mineração).

Dessa forma, o uso de sistemas passivos de tratamento de efluentes (como os alagados construídos) possibilita, de certa forma, a reconstituição do depósito mineral.

Finalmente é importante destacar que, a despeito das várias possibilidades de tratamento de efluentes, uma tendência irreversível é de que todos os processos industriais sejam projetados

cada vez mais com o propósito de minimizar as emissões e aproveitar ao máximo os recursos naturais, sejam eles não renováveis e finitos como os minerais, ou a energia a partir de combustíveis fósseis e a água. Ou seja, é necessário conhecer em detalhes os aspectos físicos, químicos e biológicos do efluente para projetar processos com maior

desempenho ambiental e garantir a qualidade da água nos ambientes aquáticos.

### A importância da visão química e biológica no desenvolvimento sustentável das atividades minerais

Uma das consequências da ampliação do conhecimento científico é a constatação de que há sinergismo entre os processos químicos, físicos e biológicos, as substâncias presentes no meio e a biodiversidade. A biodiversidade é compreendida não apenas como as variedades de organismos presentes, mas também os processos bioquímicos envolvidos. Todas essas variáveis influenciam e são influenciadas pelas outras em um equilíbrio dinâmico. A relação entre a biodiversidade e as propriedades químicas e físicas constitui a essência da ciência conhecida como Ecologia, palavra proposta em 1866 por Ernst Haeckel (Dajoz, 2005, p. 5) para designar a “ciência global das relações dos organismos com o mundo exterior que os envolve, no qual incluímos, em sentido amplo, todas as condições de existência”.

A visão ecológica que engloba aspectos químicos e biológicos é essencial para entendermos o conceito de desenvolvimento sustentável, expressão que aparece pela primeira vez em 1987 no Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, coordenada pela então Primeira Ministra da Noruega Gro Harlem Brundtland, intitulado *Nosso Futuro Comum* e também conhecido como Relatório Brundtland. O conceito de desenvolvimento sustentável foi concebido como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade

das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (United Nations, 1987, p. 34).

Embora não exista, de fato, uma definição de sustentabilidade, o conceito é claro ao explicitar que se trata do desenvolvimento que não ameaça a manutenção dos recursos naturais, a qualidade de vida e a sobrevivência das gerações futuras.

É importante ressaltar que o desenvolvimento sustentável é absolutamente oposto ao desenvolvimento que utiliza os recursos da natureza sem qualquer preocupação em garantir esses mesmos recursos para as gerações

seguintes, sendo, portanto, fadado a se esgotar e deixar de existir com o tempo.

A visão holística do meio ambiente que nos cerca e uma análise rigorosa dos vários processos naturais e antropogênicos e dos seus mecanismos físicos, químicos e biológicos é de suma importância para garantirmos o desenvolvimento sustentável e a prosperidade das gerações futuras.

É importante ressaltar que o desenvolvimento sustentável é absolutamente oposto ao desenvolvimento que utiliza os recursos da natureza sem qualquer preocupação em garantir esses mesmos recursos para as gerações seguintes, sendo, portanto, fadado a se esgotar e deixar de existir com o tempo.

**Helio Anderson Duarte** (duarte@ufmg.br), engenheiro químico, mestre em Química Inorgânica e doutor em Química Teórica, é pesquisador 1B do CNPq e professor titular do Departamento de Química – ICEx da UFMG. Belo Horizonte, MG – BR. **Francisco Antônio Rodrigues Barbosa** (barbosa@ufmg.br), biólogo, mestre em Ecologia e Recursos Naturais-Limnologia e doutor em Ciências-Ecologia, é professor titular do ICB/UFMG. Belo Horizonte, MG – BR. **Virginia S. T. Ciminelli** (ciminelli@demet.ufmg.br), engenheira química, mestre e doutora em Engenharia Metalúrgica e de Minas, é professora titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia/UFMG. Belo Horizonte, MG – BR. **José Galizia Tundisi** (tundisi@iee.com.br), presidente da Associação Instituto Internacional de Ecologia e Gerenciamento Ambiental, é professor honorário do Instituto de Estudos Avançados da USP e professor/orientador do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da UFSCar. São Carlos, SP – BR.

### Referências

CLARK, M.E.; BATTY, J.D.; VAN BUUREN, C.B.; DEW, D.W.; EAMON, M.A. Biotechnology in minerals processing: Technological breakthroughs creating value. *Hydrometallurgy*, 83, 3-9 (2006).

DAJOS, R. *Princípios de ecologia*. Porto Alegre: Artmed, 2005.

DAVIS JR., R.A.; WELTY, A.T.; BORREGO, J.; MORALES, J.A.; PENDON, J.G.; RYAN, J.G. Rio Tinto estuary (Spain): 5000 years of pollution”. *Environmental Geology*, 39(10): 1107-1116, 2000. doi:10.1007/s002549900096.

FIGUEIRA, M.M.; CIMINELLI, V.S.T.; ANDRADE, M.C.; LINARDI, V.R. Cyanide degradation by an *Escherichia coli* strain. *Can. J. Microbiology*, 42, p. 519-523, 1996.

JORGENSEN S.E.; TUNDISI J.G.; MATSUMURA-TUNDISI

T. *Handbook of environmental management of inland waters ecosystems*. Florida: CRC Press, 2012. 431p.

LIKENS, G. E.; BORMANN, F.H. 1974. Acidrain: a serious regional environmental problem. *Science*, 184(4142): 1176-1179, 1974. (apud Wikipedia. Acesso em 29 jan. 2013)

LIKENS, G.E.; BORMANN, F. H.; JOHNSON, N.M. Acidrain. *Environment*, 14(2), p. 33-40, 1972. (apud Wikipedia. Acesso em 29 jan. 2013)

SMITH, R.A. *Air and rain*. The beginnings of a chemical climatology. London: Longmans, Green, 1872.

UNESCO; UNEP. *Water quality for ecosystem and human health*. IAP, ERCE, GEMS, water. 2008. 120 p.

UNITED NATIONS. *Report of the World Commission on Environment and Development*, 1987. [http://conspect.nl/pdf/Our\\_Common\\_Future-Brundtland\\_Report\\_1987.pdf](http://conspect.nl/pdf/Our_Common_Future-Brundtland_Report_1987.pdf); acessado em 05 de Maio de 2014.

**Abstract:** *Mineral Resources, Water and Biodiversity*. The concept of water quality is presented in a broad manner including the physical, chemical and biological aspects. The synergism between these different aspects is highlighted. The importance of this synergism is essential for the understanding of the aquatic ecosystems and how they are affected by the mining and agricultural activities and by the urban areas.

**Keywords:** Water quality, biodiversity, mineral resources.