

Análises ecotoxicológicas em cavas de mineração a céu aberto: uma revisão sistemática

Lagos de mineração, também denominados de cavas ou pit lakes, se formam em minas a céu aberto exauridas. De intensificação numérica recente em diversos países e efeitos ecológicos ainda pouco conhecidos da comunidade científica, são considerados um problema ambiental emergente a nível mundial. Sua gestão se mostra desafiadora se comparada à aplicada a corpos d'água naturais, pois apresentam processos ambientalmente complexos e dinâmicos que demandam ações baseadas em abordagens avaliativas sistêmicas. Uma das áreas do conhecimento capazes de auxiliar na obtenção de respostas para questões de pesquisa dessa natureza é a Ecotoxicologia, contudo, até então são desconhecidos levantamentos bibliográficos destinados ao mapeamento do conhecimento acumulado sobre o tema. Diante desse contexto e a título de análise comparativa, mas sem a pretensão de esgotar o assunto, o presente estudo objetivou realizar uma revisão sistemática dos principais trabalhos publicados que empregaram ensaios ecotoxicológicos para fins de avaliação ambiental de cavas. Para tanto, foram utilizados os termos 'pit lake', 'ecotoxicological' e 'ecotoxicology' na base de dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, ligada ao Ministério da Educação do Brasil, escolhida por compilar centenas de periódicos distribuídos em diversas bases referenciais. Dentre os principais resultados obtidos, destacam-se os seguintes: trabalhos com essa abordagem ainda são recentes e escassos no mundo, notadamente no Brasil, e sua maior parte foi publicada em periódicos científicos europeus. Majoritariamente, os autores estudados desenvolveram ensaios ecotoxicológicos crônicos e uniespécie, voltados para a compreensão de aspectos associados à qualidade das águas e de sedimentos de cavas, embora em menor número neste último caso. Apesar de constatado o crescente interesse de pesquisadores das Ciências Ambientais sobre o tema – devido a uma discreta elevação do número de artigos publicados entre os anos de 2013 e 2019 –, ainda existe um vasto nicho científico a ser explorado na tentativa de melhor compreender o comportamento ecológico de lagos de mineração, o que poderá ser alcançado mediante o estabelecimento de abordagens investigativas integradas visando a obtenção de respostas ambientalmente mais seguras.

Palavras-chave: Avaliação ambiental integrada; Bioensaios; Organismos-teste.

Ecotoxicological analysis in open sky mining caves: a systematic review

Mining lakes, also called pits or pit lakes, are formed in exhausted open pit mines. With recent numerical growth in several countries and ecological effects still little known by the scientific community, are considered an emerging environmental problem worldwide. Its management is challenging compared to that applied to natural water formations, as they present environmentally complex and dynamic processes requiring actions based on systemic evaluative approaches. One of the areas of knowledge capable of assisting in obtaining answers to research questions of this nature is Ecotoxicology, however, until then it is not possible to find bibliographic surveys aimed at mapping the accumulated knowledge on the subject. Given this context, and as a comparative analysis, but without the intention of closing the subject, the present study aimed to carry out a systematic review of the main published works that used ecotoxicological tests for the purpose of environmental assessment of pits. For this purpose, the terms 'pit lake', 'ecotoxicological' and 'ecotoxicology' were used in the database of the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel, linked to the Ministry of Education of Brazil, chosen for compiling hundreds of journals distributed in several referential bases. Among the main results obtained, the following stand out: studies with this approach are still recent and scarce in the world, notably in Brazil, and most of them have been published in European scientific journals. Most of them, the authors developed ecotoxicological tests chronic and unispecies, aimed at understanding aspects associated with water quality and pits sediments, although in less number in this last subject. Despite the growing interest of researchers in Environmental Sciences on the subject – due to a slight increase in the number of articles published between the years 2013 and 2019 –, there is still a vast scientific niche to be explored in an attempt to better understand the behavior of ecology of mining lakes. Which can be achieved through the establishment of integrated investigative approaches aimed at obtaining responses more environmentally safe.

Keywords: Integrated environmental assessment; Bioassays; Test organisms.

Topic: **Desenvolvimento, Sustentabilidade e Meio Ambiente**

Received: **17/03/2020**

Approved: **22/04/2020**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Karina Pinheiro dos Santos 

Instituto Federal de Goiás, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/2299914273390330>

<http://orcid.org/0000-0002-9871-7610>

karina.pinheiro.santos@gmail.com

Rosana Gonçalves Barros 

Instituto Federal de Goiás, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/3009142457782923>

<http://orcid.org/0000-0003-4007-3450>

rosana.ifg@gmail.com

Viníciu Fagundes Bárbara 

Instituto Federal de Goiás, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/3052075493147161>

<http://orcid.org/0000-0001-9243-5543>

viniciu.fagundes@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.003.0025

Referencing this:

SANTOS, K. P.; BARROS, R. G.; BÁRBARA, V. F.. Análises ecotoxicológicas em cavas de mineração a céu aberto: uma revisão sistemática. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.11, n.3, p.317-331, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.003.0025>

INTRODUÇÃO

A exploração mineral é uma das bases econômicas do mundo contemporâneo. Historicamente, a atividade sempre desempenhou papel importante na balança comercial de diversos países, notadamente do Brasil (CARDOSO JÚNIOR et al., 2018), dada a elevada disponibilidade de minérios existentes no território nacional (ARAÚJO, 2016). Contudo, a atuação do setor provoca profundas transformações no meio natural, incluindo a remoção da cobertura vegetal, o deslocamento de grandes volumes de terra, o esgotamento e a poluição de coleções hídricas superficiais e subterrâneas e a modificação da paisagem (NOBRE FILHO et al., 2012; BRAZ et al., 2015). Segundo Guimarães et al. (2018), muitas dessas modificações são definitivas, como no caso das cavas de mineração, também conhecidas como *pit lakes*.

Cavas surgem após o esgotamento de jazidas exploradas a céu aberto, sendo normalmente preenchidas por influxos de águas de origem subterrânea e pluvial, formando lagos artificiais. De acordo com Mollema et al. (2016), *pit lakes* são considerados um problema ambiental emergente e de intensificação crescente em praticamente todos os continentes. Como a exploração mundial de minérios dobrou nos últimos trinta anos e continua crescendo, China, Estados Unidos da América (EUA), Rússia, Austrália, Brasil, Congo, Índia, Canadá, Nova Zelândia, Chile e países africanos deverão passar a contar com mais dessas unidades de origem antrópica em breve (BÁRBARA et al., 2018).

Para o adequado gerenciamento de lagos de mineração, é necessário o estabelecimento de práticas que possibilitem sua destinação a usos diferentes ao do simples abandono (BLANCHETTE et al., 2016). Na Estônia, EUA, Espanha e Holanda, por exemplo, cavas vêm sendo cogitadas para usos mais nobres, como abastecimento público (ERG, 2003; BRANDENBERGER et al., 2004; DELGADO-MARTIN et al., 2013; MOLLEMA et al., 2016, respectivamente). Também há registros de sua destinação para fins de paisagismo e recreação (SHEVENELL, 2000), irrigação (SCHULTZE et al., 2010) e aquicultura (MARQUES et al., 2012; GAMMONS et al., 2003). Contudo, Luek et al. (2014) e Søndergaard et al. (2018) destacam que a qualidade das águas dessas unidades é fator determinante para sua consolidação como importantes ferramentas socioambientais ou como focos de riscos aos seres vivos. Nesse sentido, Marszelewski et al. (2017) destacam que águas acumuladas em *pit lakes* formados em áreas de jazidas de minerais quimicamente inertes como areia, cascalho e argila, normalmente não apresentam problemas qualitativos muito preocupantes, ao contrário do observado em minas de carvão, ouro e prata, por exemplo, cujos volumes hídricos tendem a ser ácidos e a apresentar altas concentrações de metais potencialmente tóxicos dissolvidos, devido ao processo denominado drenagem ácida de mina (DAM) (CASTENDYK et al., 2007; GAMMONS et al., 2009; ROMERO et al., 2010; AYUSO et al., 2013; CÁNOVAS et al., 2015). Adicionalmente, ainda que apresentem qualidade hídrica inicial satisfatória, cavas tendem a passar por mudanças ao longo do tempo que podem tornar suas águas impróprias ao uso e potencialmente tóxicas, exigindo ações prévias de controle e monitoramento.

Embora análises químicas compoñham a metodologia mais utilizada em avaliações ambientais (CALIJURI et al., 2013), costumam apresentar respostas limitadas e pontuais, pois retratam apenas estados qualitativos instantâneos, não sendo capazes de mensurar os possíveis efeitos das substâncias de interesse

sobre organismos específicos. *Pit lakes* se destacam nesse contexto, pois apresentam variabilidade de diversos aspectos que interagem entre si mediante processos químicos, físicos e biológicos associados, principalmente, a mecanismos de condicionamento geológico (interação rocha-água-ar), à sazonalidade e ao tempo (ANTUNES et al., 2007; SÄMY et al., 2010), constituindo-se em unidades demandantes de abordagens avaliativas mais amplas e integradas. Nesse sentido, uma área do conhecimento que pode trazer respostas com maior grau de profundidade para avaliações ecológicas dessa natureza é a Ecotoxicologia, capaz de mensurar a interação sinérgica de compostos químicos de interesse sobre organismos-teste específicos (MARTINEZ-HARO et al., 2015; GERBER et al., 2016), se constituindo em uma opção avançada de monitoramento e avaliação ambiental (SILVA et al., 2015; PALMA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2018).

De acordo com Galvão et al. (2004), é papel da Ciência sistematizar informações sobre um determinado tema que já possua resultados publicados, de forma a facilitar a compreensão dos pesquisadores interessados. Assim, objetivando melhor compreender se e como abordagens investigativas envolvendo o emprego de ensaios ecotoxicológicos para fins de avaliação ambiental de cavas de mineração são empregadas pela comunidade científica mundial, realizou-se uma revisão sistemática exaustiva dos principais trabalhos publicados que tiveram esse enfoque.

METODOLOGIA

Estudos prospectivos voltados para a revisão sistemática de literatura são baratos e relativamente rápidos de serem desenvolvidos, todavia, devem ser elaborados com base em uma sequência protocolar bem definida de passos que busquem sintetizar, rigorosamente, os resultados obtidos. Assim, o presente trabalho consistiu em uma pesquisa exploratória descritiva elaborada com base em análises de ordem qualitativa fundamentadas no uso de elementos quantitativos organizados (LAKATOS et al., 2003).

O recorte metodológico contemplou um levantamento bibliográfico dos artigos científicos disponibilizados na base de dados do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ligada ao Ministério da Educação do Brasil (MEC), que agrega cerca de 45 mil periódicos distribuídos em 130 bases referenciais, incluindo Web of Science, Scopus e Elsevier. Especificamente, no campo 'Busca por assunto' da plataforma¹ foram inseridos, simultaneamente, os termos '*pit lake*', '*ecotoxicological*' e '*ecotoxicology*'. Na sequência, empregou-se a ferramenta 'Expandir meus resultados', objetivando ampliar a abrangência do levantamento, encerrado em 25/09/2019. Os artigos identificados pelo sistema foram triados por intermédio da análise prévia do título, resumo e palavras-chave. Na sequência, os trabalhos selecionados – cujos objetivos e metodologias predominantes eram voltados para a avaliação ecotoxicológica de cavas – foram integralmente lidos, analisados, fichados e organizados. Além das informações referentes aos arranjos experimentais propriamente ditos, também foram identificados os autores e os anos de publicação dos trabalhos; as áreas de desenvolvimento de cada pesquisa; os nomes e fatores de impactos dos periódicos de divulgação; o status de operação das minas (se ativas ou inativas); os

¹ <https://www.periodicos.capes.gov.br>

compartimentos ambientais avaliados (água e/ou sedimento das cavas); os organismos-teste utilizados e os tipos de avaliações ecotoxicológicas realizadas (se testes agudos ou crônicos).

DISCUSSÃO TEÓRICA

O levantamento inicial no portal de periódicos da CAPES resultou em 50 ocorrências, dentre as quais sete trabalhos apresentaram abordagens metodológicas voltadas ao objetivo deste levantamento (Tabela 1).

Tabela 1: Distribuição dos artigos analisados, incluindo as áreas de desenvolvimento dos estudos, os nomes dos periódicos e seus respectivos fatores de impacto.

Autor (ano)	Área do estudo	Nome do periódico (fator de impacto atual) / país de origem
Antunes et al. (2007)	Portugal	Science of the Total Environment (5,589) / Países Baixos
Neil et al. (2009)	Austrália	Ecotoxicology and Environmental Safety (4,527) / Países Baixos
Skipperud et al. (2013)	Tajiquistão	Journal of Environmental Radioactivity (2,179) / Reino Unido
Gagnaire et al. (2015)	França	Ecotoxicology (2,460) / EUA
Harford et al. (2015)	Austrália	Mine Water and the Environment (2,145) / Alemanha
Bárbara et al. (2019)	Brasil	Engenharia Sanitária e Ambiental (0,092) / Brasil
Gámez et al. (2019)	Cuba	Environmental Science and Pollution Research (2,914) / Alemanha

Em termos bibliométricos, os resultados demonstram que ainda há pouca experiência acumulada sobre o tema, pois os trabalhos analisados se mostraram escassos e recentes, com discreto aumento no número de artigos publicados entre os anos de 2013 e 2019. Em termos de distribuição espacial, a maior parte dos estudos foi realizada em países desenvolvidos (Portugal, Austrália e França), e o restante em nações em desenvolvimento: Tajiquistão, Brasil e Cuba. Uma possível explicação para esse cenário é que aqueles apresentam maior tradição de mineração, pois se industrializaram antes e, conseqüentemente, se depararam primeiramente com os impactos do setor, o que certamente os estimulou a desenvolverem pesquisas há mais tempo. Adicionalmente, há maior aporte de recursos financeiros para estudos em países desenvolvidos, favorecendo a realização de trabalhos nessa área, ao contrário do observado em países em desenvolvimento. Especificamente no caso do Brasil, apesar de ser um dos maiores produtores de minérios do mundo, ainda não conta com legislações de disciplinamento específico ou com um levantamento sistematizado das cavas existentes em seu território.

Também foi constatado que os trabalhos se mostraram uniformemente distribuídos entre os periódicos identificados, todos da área ambiental, com uma publicação por revista. Adicionalmente, apenas o estudo de Bárbara et al. (2019) foi divulgado em periódico nacional (Engenharia Sanitária e Ambiental, com fator de impacto de 0,092), enquanto os demais são de origem europeia (Países Baixos, Reino Unido e Alemanha) ou americana, e de elevados fatores de impacto (2,179 – 5,589), o que reforça o entendimento de que nestes países o estímulo à pesquisa, inclusive em termos de publicações, é maior. Segundo Araújo et al. (2017), o caminho natural para disseminar a produção do conhecimento tem sido a busca pela publicação em periódicos científicos especializados depois de vencidas as dificuldades inerentes às diferentes etapas da pesquisa, sendo o objetivo de qualquer pesquisador tornar público o conhecimento que, ao ser socializado, gera novas discussões, avanços e sua validação ou reformulação.

A Tabela 2 apresenta os principais aspectos ecotoxicológicos associados aos trabalhos analisados.

Tabela 2: Aspectos ecotoxicológicos dos trabalhos analisados.

Autor (ano)	Status de operação da mina	Compartimento ambiental avaliado	Espécie (s) utilizada(s)	Tipo de avaliação ecotoxicológica (duração)
Antunes et al. (2007)	Explorada entre 1967 e 1993	Água e sedimentos	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	Aguda (96 horas)
			<i>Daphnia longispina</i> e <i>Daphnia magna</i>	Aguda (48 horas)
Neil et al. (2009)	Explorada durante mais de cem anos, mas desativada atualmente	Água e sedimentos	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	Crônica (24 e 48 horas)
			<i>Chlorella protothecoides</i>	Crônica (72 horas)
			<i>Tetrahymena thermophila</i>	Crônica (24 horas)
Skipperud et al. (2013)	Desativada. Explorada desde 1948, mas sem especificação da data de encerramento	Água	<i>Carassius auratus</i> ; <i>Carassius carpio</i> e <i>Sander lucioperca</i>	Crônica (indefinido)
Gagnaire et al. (2015)	Não informado	Água	<i>Roachus rutilus</i>	Crônica (28 dias)
Harford et al. (2015)	Em operação desde a década de 80	Efluentes de mina e água	<i>Chlorella sp.</i>	Crônica (72 horas)
			<i>Lemna aequinoctialis</i>	Crônica (96 horas)
			<i>Hydra viridissima</i>	Crônica (72 horas)
			<i>Moinodaphnia macleayi</i>	Crônica (de 20 a 144 horas)
			<i>Mogurnda</i>	Aguda (96 horas)
Bárbara et al. (2019)	Desativada na década de 90	Água	<i>Danio rerio</i>	Aguda (48 horas)
Gámez et al. (2019)	Desativada em 2001	Água	<i>Vibrio fischeri</i>	Aguda (5, 15 e 30 minutos)

Praticamente todos os estudos foram desenvolvidos em cavas localizadas em áreas de minas desativas, sendo que o trabalho mais antigo identificado foi o de Antunes et al. (2007), que mensuraram o grau de comprometimento ambiental da antiga mina de extração de urânio (U) Cunha Baixa, localizada em Manqualde, Viseu, no centro de Portugal, inundada por águas da cava na primavera e no outono. Uma das justificativas da pesquisa consistiu no fato de que radionuclídeos tendem a ser transportados para os ecossistemas, podendo alcançar plantas, animais e o homem, problema científico até então não avaliado à luz da Ecotoxicologia. Para tanto, os autores desenvolveram ensaios ecotoxicológicos agudos de águas e sedimentos com a espécie de microalga clorofícia colonial planctônica *Pseudokirchneriella subcapitata*, e dos microscutáceos dulcícolas *Daphnia longispina* e *Daphnia magna*. Os resultados indicaram que os sedimentos não apresentaram contaminantes disponíveis para a biota a ponto de causar toxicidade, diferente da água, que se mostrou tóxica, principalmente no outono. A *Daphnia longispina* revelou ser o táxon mais sensível, e a *Daphnia magna* o mais resistente, o que levou os autores a destacarem que esta última não aparenta ser a mais indicada para ensaios ecotoxicológicos, dada sua maior resistência a poluentes, ao contrário do observado em *Daphnia longispina*, capaz de fornecer informações mais relevantes do ponto de vista ecológico. Como sugestão de trabalhos futuros, foi indicada a necessidade de serem estudados os efeitos subletais das substâncias-teste mediante a combinação de abordagens metodológicas *in situ*, de forma a caracterizar adequadamente os riscos ambientais, inclusive devido ao fato de Portugal possuir cerca de 58 áreas de minas radioativas abandonadas demandantes de intervenção urgente.

Neil et al. (2009) analisaram a efetividade de três diferentes tratamentos para reduzir a toxicidade das águas do lago Kepwari, uma cava australiana surgida após a exploração de carvão. Para tanto, realizaram ensaios ecotoxicológicos crônicos de águas e sedimentos com *Ceriodaphnia dubia*, microcrustáceo dulcícola; *Chlorella protothecoides*, microalga, e *Tetrahymena thermophila*, um gênero de protozoários ciliados não

patogênicos, todos considerados indicadores sensíveis de poluentes e capazes de fornecerem resultados rápidos e baratos. O trabalho resultou na conclusão de que todos os tratamentos de remediação realizados na área da mineração reduziram a toxicidade aos organismos, mas não a curto prazo.

Como parte de um projeto conjunto entre Noruega, Cazaquistão, Quirguistão e Tajiquistão que objetivou identificar o grau de contaminação ambiental por urânio de uma antiga mina pertencente ao programa de armas nucleares da União Soviética, Skipperud et al. (2013) pesquisaram a biomagnificação de substâncias advindas da cava Taboshar, de 600 m de comprimento, 200 m de largura e 150 m de profundidade, aproximadamente. Um pequeno riacho é a única saída do lago, utilizado como fonte de dessedentação por animais selvagens e domésticos e povoado com peixes da espécie *Carassius auratus* pela população local. Enquadrado como um bioensaio crônico, o trabalho consistiu na análise histológica do fígado e de tecidos ósseo e muscular de peixes (*Carassius auratus*) capturados na cava Taboshar e no lago Kairakkum (*Carassius carpio* e *Sander lucioperca*), um grande reservatório de água doce pouco impactado que serviu de referência comparativa. Caracóis e musgos também foram utilizados em análises de isótopos estáveis de carbono e nitrogênio, visando a obtenção de informações do nível trófico basal da área estudada. Os autores comprovaram a ocorrência de processos de biomagnificação no fígado e nos tecidos musculares dos organismos-teste, podendo resultar em riscos à população local, consumidora de pescados contaminados.

Gagnaire et al. (2015) desenvolveram um estudo parecido em minas de urânio da região de Limousin, França, importante área que chegou a contar com mais de 200 minerações durante a segunda metade do século passado. À época da exploração, visando proteger o meio ambiente e as populações humanas contra a exposição à radiação, o Governo francês determinou que fosse feita a coleta, o controle e o tratamento dos efluentes das minerações na tentativa de limitar as liberações ambientais de radionuclídeos, providências que não obtiveram êxito. A principal justificativa do trabalho foi que pesquisas em áreas de minerações de urânio geralmente se limitam a medidas físico-químicas e dosimétricas, sem considerarem efeitos biológicos sobre organismos aquáticos. Especificamente, o objetivo consistiu em caracterizar os riscos ambientais associados à atividade mediante o uso de peixes da espécie *Roachus rutilus*, conhecidos por manterem contato com a lâmina d'água e sedimentos, compartimento ambiental onde costumam ser observadas as maiores concentrações de contaminantes de interesse.

Os testes ecotoxicológicos contemplaram a manutenção de peixes enjaulados diretamente nas águas de duas lagoas – uma contaminada com urânio (Pontrabier) e outra não (Sauvages) – durante 28 dias. Efeitos como estresse oxidativo, biotransformação, neurotoxicidade e parâmetros fisiológicos foram determinados. Uma das principais conclusões dos pesquisadores foi que ensaios de laboratório (*ex situ*) estão longe de serem realistas, dado o fato de as condições experimentais serem controladas, e que quando os bioensaios são realizados *in loco*, os organismos-teste acabam submetidos a todas as variações ambientais locais, apresentado comportamentos que podem ser traduzidos em respostas ecológicas mais realistas, principalmente se associados a análises histológicas e químicas. Segundo Viarengo et al. (2007) e Reynders et al. (2008), a técnica de enjaulamento de peixes promove a padronização dos resultados, tornando mais

fácil a comparação dos efeitos sobre os organismos afetados com os do grupo-controle. Em contrapartida, em ensaios *in situ*, o estabelecimento da relação causa-efeito é complexo, dadas as alterações qualitativas que ocorrem constantemente nos ecossistemas.

Harford et al. (2015) também estudaram os impactos ambientais provocados por uma mina de urânio, a Ranger Uranium, localizada a montante de importantes reservas naturais da Austrália e em operação desde o início dos anos 80. Dentre todos os estudos analisados, o desses autores foi o que utilizou a maior quantidade de organismos-teste em um mesmo processo de investigação ambiental de cavas: a alga verde unicelular *Chlorella* sp.; a lentilha-d'água *Lemna aequinoctialis*, uma pequena espécie de planta flutuante encontrada em regiões de clima subtropical e tropical; a hidra verde *Hydra viridissima*, cnidário dulcícola; o cladóceros *Moinodaphnia macleayi* e o peixe *Mogurnda mogurnda*. A justificativa do trabalho consistiu no fato de que o processo de beneficiamento do minério produzia um efluente tóxico, tratado por processos de microfiltração, osmose reversa de alta densidade e concentradores de salmoura, antes de ser lançado de forma controlada em corpos hídricos receptores; contudo, apesar do tratamento reduzir substancialmente a toxicidade primária das águas de descarte, alguns fatores ainda poderiam contribuir para o surgimento ou a continuidade de consequências ambientais indesejadas, como a persistência de contaminantes residuais em concentrações tóxicas e sua disponibilização a determinadas espécies. Especificamente, os testes ecotoxicológicos foram realizados com águas da cava e efluentes de mineração oriundos do sistema de tratamento, de forma a avaliar se havia a necessidade de manipulação adicional prévia antes de seu despejo em corpos hídricos receptores. Os pesquisadores concluíram que embora as diferentes técnicas de tratamento tenham reduzido substancialmente a toxicidade primária das soluções-teste, poderiam ocorrer efeitos residuais, sendo necessárias estratégias apropriadas para o gerenciamento de efluentes voltadas para a redução dos riscos de toxicidade, principalmente quando o objetivo final é o descarte no meio natural, ainda que controlado.

O único estudo desenvolvido no Brasil identificado foi o de Bárbara et al. (2019), que pesquisaram três lagos de mineração localizados em Mara Rosa, norte de Goiás, abandonadas desde a década de 90 e atualmente utilizadas para lazer, recreação e pesca pela população local. Os autores desenvolveram análises sazonais combinando aspectos químicos, ecotoxicológicos e genotoxicológicos. O organismo-teste escolhido foi o *Danio rerio*, peixe dulcícola normatizado e muito empregado em bioensaios em pesquisas nacionais e internacionais. As águas das Cavas Maior e Menor apresentavam qualidade satisfatória, à exceção da concentração de cloreto para a última. Por sua vez, o Lago Azul indicou elevadas concentrações de alumínio (Al), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn). Os resultados dos bioensaios não demonstraram ecotoxicidade hídrica aparente, mas apenas alterações comportamentais nos organismos-teste expostos às concentrações de 50% e 100% das amostras advindas do Lago Azul, coletadas durante o período de estiagem. Contudo, os testes genotoxicológicos indicaram que as águas do Lago Azul eram prejudiciais aos organismos, e embora as Cavas Maior e Menor não tenham se mostrado qualitativamente alteradas, o comprometimento ambiental de ambas ainda não poderia ser descartado, pois as concentrações de elementos químicos se mostraram predominantemente crescentes no sentido da

superfície ao fundo, indicando que possivelmente os sedimentos estavam comprometidos, hipótese posteriormente comprovada pelos pesquisadores.

Por sua vez, Gámez et al. (2019) estudaram a mina cubana El Cobre, a mais antiga planta de cobre da América Latina. A exploração subterrânea iniciou-se por volta de 1544 e perdurou até 1959. Em 1960, as operações passaram a ser a céu aberto, até 2001, quando as atividades cessaram devido ao esgotamento da jazida. Mais de 400 anos de exploração levaram ao desaparecimento de uma colina e à formação de um grande lago com volume aproximado de 4.000.000 m³ de água. A cava era considerada uma atração turística, sendo que até o momento do estudo nenhuma reabilitação havia sido implementada. Para as análises ecotoxicológicas, os autores utilizaram a bactéria bioluminescente *Vibrio fischeri* em três pontos amostrais da cava, objetivando mensurar seu *status* de poluição e o potencial de implementação de programas de monitoramento e remediação, a fim de minimizar os riscos ambientais. Todas as amostras de água testadas indicaram elevados níveis de ecotoxicidade, atribuída ao alto teor de íons metálicos, como o cobre. Os resultados dos bioensaios e das análises físico-químicas comprovaram uma situação particularmente preocupante em termos de saúde pública, levando os pesquisadores a recomendarem providências imediatas voltadas para a proposição de soluções para o tratamento da água e para a conscientização da população exposta.

De forma geral, praticamente todos os estudos analisados no presente levantamento foram desenvolvidos em cavas formadas devido à exploração de minérios com elevado potencial de causarem degradação ambiental (MKANDAWIRE, 2013), como Cu e ouro (Au), ou de radiação (U). Isso indica que os esforços da comunidade científica para compreender os problemas ambientais associados a cavas de mineração ainda estão voltados para demandas prioritárias. Castro et al. (2000) reforçam está dedução ao destacarem que uma das principais preocupações ambientais dos EUA são lagos de mineração formados devido à exploração de metais nobres, principalmente ouro, dadas as contaminações desencadeadas por processos de DAM. Lottermoser et al. (2005), por sua vez, alertam para a elevada mobilidade física e química de urânio, elemento com grande potencial de degradação ambiental. Entretanto, embora seja natural que os esforços científicos tendam a se voltar primeiramente para demandas de pesquisa prioritárias, impactos gerados por minerações que exploram outros tipos de elementos não devem ser desconsiderados, uma vez que, mesmo minas de materiais inertes podem apresentar problemas significativos em relação ao meio natural, como no caso do lago polonês pesquisado por Czop et al. (2011), formado durante a exploração de calcário. No estudo, os autores constataram que as águas da cava eram alcalinas (pH 11,7 – 13,3) e apresentavam altas concentrações de sulfatos e elementos potencialmente tóxicos, como Al, arsênio (As), crômio (Cr), molibdênio (Mo) e vanádio (V). Conclusão semelhante foi obtida por Schultze et al. (2010) ao investigarem 140 cavas de mineração de carvão da Alemanha, das quais cerca de 50% possuíam águas ácidas, altas concentrações de sólidos dissolvidos e amônia (NH₃). Nacionalmente, Marques et al. (2012) avaliaram a influência química sazonal das águas de quatro lagos artificiais na qualidade hídrica subterrânea da bacia sedimentar da região de Sepetiba, Rio de Janeiro, importante fonte de extração de areia para construção civil do Estado e reconhecidamente o principal passivo ambiental da região. Os lagos apresentaram águas ácidas

e ricas em Al, com potencial de limitação do desenvolvimento de possíveis atividades de aquicultura após o término da exploração mineral e de prejuízo dos usos das águas subterrâneas, importante recurso de abastecimento público local.

Em termos ecotoxicológicos, os resultados expressos na Tabela 2 demonstram que a maior parte dos artigos analisados (SKIPPERUD et al., 2013; GAGNAIRE et al., 2015; BÁRBARA et al., 2019 e GÁMEZ et al., 2019) utilizou apenas um tipo de organismo-teste. Segundo Bertoletti (2009), experimentos com esse contorno metodológico tendem a apresentar resultados ambientalmente mais superficiais, contudo, são baratos e de execução facilitada. Por sua vez, Baun et al. (1999) esclarecem que bioensaios multiespécies são capazes de fornecer respostas ecológicas mais seguras, pois contemplam um espectro amplo de níveis tróficos, apesar de serem mais demorados e complexos do ponto de vista executivo. Isso pode ser explicado porque, dentro da hierarquia da organização biológica de um ecossistema, o comportamento é uma resposta toxicológica que reflete o efeito de todos os níveis de organismos, representando a interação de processos fisiológicos, morfológicos e/ou comportamentais frente aos estímulos ambientais, sejam eles positivos ou negativos.

O levantamento também demonstrou variação dos tipos de organismos utilizados para fins de avaliação ecotoxicológica de cavas, tendo sido selecionadas espécies de microalgas, microcrustáceos e peixes, majoritariamente, e protozoário, cnidário e bactéria em menor número (Tabela 2). Magalhães et al. (2008) salientam que várias espécies representantes de diversos ecossistemas e níveis tróficos têm sido empregadas internacionalmente em bioensaios, gerando importantes subsídios para uma melhor avaliação e caracterização dos efeitos agudos e crônicos dos agentes tóxicos de interesse. Todavia, destacam ser fundamental a escolha de organismos normatizados e suficientemente sensíveis, ou seja, capazes de possibilitar o estabelecimento de claras relações denexo causal mediante respostas advindas da avaliação de aspectos bioquímicos, fisiológicos, morfológicos e comportamentais, fatores que dependem do nível nutricional, idade, sexo, fase de desenvolvimento e características genéticas dos organismos-teste. De acordo com Rand et al. (1985), a seleção das espécies a serem utilizadas em bioensaios deve estar baseada em critérios de escolha como abundância; disponibilidade; significativa representação ecológica; nível de conhecimento da sua biologia, fisiologia e hábitos alimentares; estabilidade genética; uniformidade das populações e facilidade de cultivo em laboratório.

Para além do exposto, verificou-se que a maior parte dos artigos analisados contemplou o desenvolvimento de pesquisas em cavas mediante bioensaios crônicos, ou seja, com exposição dos organismos a doses baixas e por longos períodos de tempo, como no caso de Harford et al. (2015), cujo experimento com exemplares de *Moinodaphnia macleayi* teve 144 horas de duração. Por sua vez, os estudos que desenvolveram bioensaios de caráter agudo (ANTUNES et al., 2007; BÁRBARA et al., 2019 e GÁMEZ et al., 2019), que avaliam respostas rápidas a estímulos que normalmente se manifestam durante curtos períodos de tempo de exposição, tiveram duração de até 96 horas. Segundo Rand et al. (1985), muitas vezes a exposição crônica ao agente tóxico não provoca a morte imediata dos organismos-teste, mas afeta uma ou mais de suas funções biológicas, como crescimento, reprodução e/ou desenvolvimento; nutras, ensaios

agudos já são suficientes para identificar situações de elevado risco ambiental. Isso pode ser explicado pelo fato de ocorrerem transformações no ambiente aquático que promovem modificações de aspectos químicos dominantes da evolução da qualidade da água, como diluição, fotodegradação, biodegradação, de forma que diferentes substâncias são disponibilizadas em concentrações crônicas capazes de manifestar efeitos subletais nos organismos expostos, muitas vezes não perceptíveis em ensaios agudos. O fato de determinado poluente não produzir efeitos tóxicos sobre organismos aquáticos em bioensaios agudos não implica, necessariamente, que não seja tóxico na condição de exposição crônica (COSTA et al., 2008).

É necessário que a definição do tipo de bioensaio a ser desenvolvido (crônico ou agudo) esteja em consonância com o nível de segurança mínimo desejado para as respostas pleiteadas, pois usos hídricos diferem entre si em termos da qualidade exigida, principalmente quando o objetivo é o abastecimento público com águas de cavas (BRANDENBERGER et al., 2004; DELGADO-MARTIN et al., 2013; MOLLEMA et al., 2015), ambientalmente complexas. De acordo com Shevenell (2000), as características ecossistêmicas de ambientes lacustres naturais ou artificiais estão diretamente associadas a aspectos morfométricos, entretanto, no primeiro caso, as condições naturais de formação aliadas ao fator tempo e de forma tendem a contribuir para a ocorrência de lagos mais maduros e relativamente estáveis do ponto de vista ambiental, com melhor qualidade hídrica e maior biodiversidade. No caso das cavas, como suas condições de formação são rápidas se comparadas à escala evolutiva de ambientes naturais, os fatores de forma costumam acentuar suas especificidades ecossistêmicas, tornando-as ambientes singulares e muitas vezes difíceis de serem colonizados por organismos aquáticos. Dessa maneira, a gestão ambiental de lagos de mineração se mostra desafiadora quando comparada à de outros recursos naturais utilizados para a mesma finalidade, como águas superficiais ou subterrâneas, cujo gerenciamento pode ser desenvolvido com base em padrões metodológicos tradicionais de controle e monitoramento ambiental. Indubitavelmente, dado o grau de qualidade hídrica necessário para fins de abastecimento público, associado à reconhecida instabilidade qualitativa de águas de cavas, seus aspectos ambientais necessitam ser analisados de forma ampliada, sob pena de se colocar em risco a saúde pública ou de se encarecer desnecessariamente os processos de tratamento.

Mesmo diante da maior amplitude de respostas que a Ecotoxicologia pode fornecer, é consenso entre a comunidade científica que a maioria das avaliações ambientais de lagos de mineração desenvolvidas no mundo ainda se limita a avaliações ambientais tradicionais, ou seja, a quantificações geoquímicas (SHEVENELL, 2000; ÇOLAK et al., 2003; BRANDENBERGER et al., 2004; SÁNCHEZ-ESPAÑA et al., 2008; CZOP et al., 2011; AYUSO et al., 2013; DELGADO-MARTIN et al., 2013; HRDINKA et al., 2013; GRANDE et al., 2014; CÁNOVAS et al., 2015; MOLLEMA et al., 2015), principalmente de águas e sedimentos. De acordo com Furtado et al. (2002), Jesus et al. (2004), Pereira et al. (2007), Esteves (2011) e Delgado-Martin et al. (2013), devido à sua elevada capacidade de sorção associada à acumulação das partículas, partículas de fundo integram um dos mais importantes compartimentos ambientais associados a ecossistemas aquáticos, pois se constituem em um estoque temporalmente cumulativo de compostos químicos potencialmente tóxicos. Ainda que a princípio a coluna d'água apresente boa qualidade, sedimentos originalmente acomodados

podem ser ressuspensos devido a processos antrópicos, como bombeamento, ou naturais, como estratificação térmica (DENIMAL et al., 2005) e, conseqüentemente, tendem a reintroduzir elementos químicos na água, comprometendo sua qualidade (LACMA et al., 2007).

Estudos desenvolvidos por Levy et al. (1997), Roussel et al. (2000), Bowell et al. (2005), Castendyk et al. (2005), Herzsprung et al. (2005), Lottermoser et al. (2005), Triantafyllidis et al. (2006), Sánchez-España et al. (2008), Czap et al. (2011), Edberg et al. (2012), Koschorreck et al. (2012), Cánovas et al. (2015), Mollema et al. (2015) e Antunes et al. (2016) também buscaram analisar a geoquímica de sedimentos em cavas. Lottermoser et al. (2005), por exemplo, pesquisaram a transferência de contaminantes a partir de depósitos de resíduos de rocha e solo mineralizado em sedimentos e outros compartimentos ambientais de uma mineração de urânio australiana. Os autores constataram a ocorrência de processos de desgaste acelerado de minerais na área como um todo, especialmente em rochas e paredes da mina a céu aberto, o que favoreceu a mobilidade de metais e alterou negativamente a qualidade das águas da cava. Triantafyllidis et al. (2006) analisaram diversas amostras da Mina Kirki, Grécia, incluindo sedimentos, tendo identificado acentuada acidez e altas concentrações de elementos potencialmente tóxicos nas águas e no fundo do lago, tais como ferro (Fe), Pb, Zn, As e Cu. Por sua vez, Mollema et al. (2015) avaliaram o potencial de uma antiga cava holandesa para fins de abastecimento público. Para tanto, desenvolveram uma pesquisa de caracterização da qualidade hídrica e dos sedimentos que lhes possibilitou constatar que as concentrações médias das substâncias químicas de interesse aumentaram consideravelmente entre os anos 2000 e 2010.

Embora ainda não exista consenso entre os pesquisadores sobre o estabelecimento de métodos de análise ambiental de cavas que embasem decisões a respeito de usos hídricos exigentes com a devida segurança, parece minimamente razoável que a compreensão do comportamento dessas unidades necessita estar associada a critérios de decisão embasados, no mínimo, em análises integradas de aspectos químicos e ecotoxicológicos, ou até mesmo em outras abordagens que permitam a obtenção de conclusões ainda mais seguras, como nos citados estudos de Skipperud et al. (2013) e Gagnaire et al. (2015), que incluíram em seus estudos avaliações de aspectos histológicos, oxidativos, de biotransformação e de neurotoxicidade nos organismos expostos. Nesse sentido, a recente pesquisa de Bárbara et al. (2019) foi a única identificada que associou procedimentos investigativos envolvendo análises químicas, ecotoxicológicas e genotoxicológicas, o que representa um avanço da fronteira do conhecimento sobre o tema, pois segundo Valente et al. (2017), biomarcadores de genotoxicidade permitem avaliar os efeitos de exposições em nível metabólico por intermédio, por exemplo, da avaliação de mutação gênica, dano cromossômico ou lesão ao DNA.

CONCLUSÕES

Os trabalhos publicados ao longo dos últimos treze anos que embasaram a elaboração deste artigo demonstram que cavas são consideradas um problema ambiental emergente a nível mundial, de intensificação numérica em praticamente todos os continentes e ainda pouco conhecido dos pesquisadores das Ciências Ambientais. Os impactos desses lagos de origem antrópica se destacam dentre os tradicionalmente desencadeados pelas demais atividades humanas, pois necessitam ser compreendidos pela

perspectiva do sinergismo de processos químicos, físicos e biológicos associados a fatores dominantes da evolução da qualidade hídrica. Como consequência, se constituem em unidades desafiadoras do ponto de vista da gestão ambiental, demandando ações criteriosas de monitoramento embasadas em arranjos metodológicos científicos que contemplem abordagens sistêmicas, notadamente quando o objetivo é implantar usos hídricos selecionados, sob pena de se colocar em risco a saúde pública.

Indubitavelmente, são necessários programas consistentes de gerenciamento ambiental dessas unidades de origem antrópica embasados em avaliações integradas não-tradicionais que contemplem, no mínimo, aspectos químicos e ecotoxicológicos. Neste caso, não é simplesmente (i) a maior quantidade de espécies utilizadas nos bioensaios, (ii) a realização de experimentos *in situ* ou *ex situ* ou (iii) a duração dos testes ecotoxicológicos que garantirá a confiabilidade das respostas desejadas, mas a definição adequada do objetivo da investigação associado ao delineamento metodológico propriamente dito. Parece ser fundamental, contudo, que sejam selecionados organismos-teste normatizados e suficientemente sensíveis. Finalmente, se arranjos com esse contorno investigativo foram associados a avaliações comportamentais, histológicas, neurotoxicológicas, morfológicas e de reprodução dos organismos expostos, a segurança das respostas tende a ser ainda maior.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, S. C.; FIGUEIREDO, D. R.; MARQUES, S. M.; CASTRO, B. B.; PEREIRA, R.; GONÇALVES, F.. Evaluation of water column and sediment toxicity from an abandoned uranium mine using a battery of bioassays. **Science of the Total Environment**, v.374, n.2-3, p.252-259, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.11.025>
- ANTUNES, I. M. H. R.; GOMES, M. E. P.; NEIVA, A. M. R.; CARVALHO, P. C. S.; SANTOS, A. C. T.. Potential risk assessment in stream sediments, soils and waters after remediation in an abandoned W4Sn mine (NE Portugal). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.133, p.135-145, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.045>
- ARAÚJO, E. R.. **Fechamento de minas no Brasil: aspectos legais e consequências sobre o meio ambiente e populações locais**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2016.
- ARAÚJO, R. M.; AZEVEDO, A. K.; VIEIRA, L.; ARAÚJO, M. A. D.; NASCIMENTO, T. C.. Gestão de periódicos: um estudo na área de Administração, Ciências Contábeis e Turismo. **Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, v.22, n.49, p.42-58, 2017. DOI: <http://doi.org/10.5007/1518-2924.2017v22n49p42>
- AYUSO, R. A.; FOLEY, N. K.; SEAL, R. R.; BOVE, M.; CIVITILLO, D.; COSENZA, A.; GREZZI, G.. Lead isotope evidence for metal dispersal at the Callahan Cu-Zn-Pb mine: goose pond tidal estuary, Maine, USA. **Journal of Geochemical Exploration**, v.126-127, p.1-22, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.12.013>
- BÁRBARA, V. F.; TAVARES, M. G. O.; ANTONIOSI FILHO, N. R.. Impactos ambientais de cavas de mineração: uma revisão. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.48, p.80-96, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820180287>
- BÁRBARA, V. F.; TAVARES, M. G. O.; D'ALESSANDRO, N. C.; SILVA, D. M.; ANTONIOSI FILHO, N. R.. Avaliação química, ecotoxicológica e genotoxicológica de águas de cavas de mineração a céu aberto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.24, n.1, p.131-142, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019176320>
- BAUN, A.; KLOEFT, L.; BJERG, P. L.; NYHOLM, N.. Toxicity testing of organic chemicals in groundwater polluted with landfill leachate. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v.18, n.9, p.2046-2053, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5620180924>
- BERTOLETTI, E.. Determinação da toxicidade crônica para Danio rerio. **Jornal da Sociedade Brasileira de Ecotoxicologia**, n.4, p.1-7, 2009. DOI: <https://doi.org/10.5132/jbse.2009.01.001>
- BLANCHETTE, M. L.; LUND, M. A.. Pit lakes are a global legacy of mining: an integrated approach to achieving sustainable ecosystems and value for communities. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v.23, p.28-34, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.11.012>
- BOWELL, R. J.; PARSHLEY, J. V.. Control of pit-lake water chemistry by secondary minerals, Summer Camp pit, Getchell mine, Nevada. **Chemical Geology**, v.215, p.373-385, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.052>
- BRANDENBERGER, J.; LOUCHOUARN, P.; HERBERT, B.; TISSOT, P.. Geochemical and hydrodynamic controls on arsenic and trace metal cycling in a seasonally stratified US sub-tropical reservoir. **Applied Geochemistry**, v.19, n.10, p.1601-1623, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.02.006>

- BRAZ, A.; SOKOLOWSKI, H.. Diagnóstico ambiental e planejamento da paisagem sob uma perspectiva sistêmica: estudo da mineração de areia e brita no Rio Paraná, município de Três Lagoas (MS). **Eletrônica AGB-TL**, n.22, p.121-155, 2015.
- CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F.. **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- CÁNOVAS, C. R.; PEIFFER, S.; MACÍAS, F.; OLÍAS, M.; NIETO, J. M.. Geochemical processes in a highly acidic pit lake of the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). **Chemical Geology**, v.395, p.144-153, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.12.007>
- CARDOSO JÚNIOR, H. M.; LUNAS, D. A. L.. O Estado e o (re) surgimento da mineração no Brasil. **Revista Interdisciplinar Animus**, v.1, n.6, p.68-78, 2018.
- CASTENDYK, D. N.; MAUK, J. L.; WEBSTER, J. G.. A mineral quantification method for wall rocks at open pit mines, and application to the Martha Au-Ag mine, Waihi, New Zealand. **Applied Geochemistry**, v.20, n.1, p.135-156, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.07.001>
- CASTENDYK, D. N.; WEBSTER-BROWN, J. G.. Sensitivity analyses in pit lake prediction, Martha Mine, New Zealand 1: relationship between turnover and input water density. **Chemical Geology**, v.244, n.1-2, p.42-55, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo2007.06.004>
- CASTRO, J. M.; MOORE, J. N.. Pit lakes: their characteristics and the potential for their remediation. **Environmental Geology**, n.39, p.1254-1260, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002549900100>
- COSTA, C. R.; OLIVI, P.; BOTTA, C. M.; ESPINDOLA, E. L. A.. toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação. **Química Nova**, v.31, n.7, p.1820-1830, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000700038>
- CZOP, M.; MOTYKA, J.; SRACEK, O.; SZUWARZYNSKI, M.. Geochemistry of the hyperalkaline Gorka pit lake (pH>13) in the Chrzanow region, southern Poland. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.214, n.1-4, p.423-434, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0433-x>
- ÇOLAK, M.; GEMICI, Ü.; TARCAN, G.. The effects of colemanite deposits on the arsenic concentrations of soil and groundwater in Igdeköy-Emet, Kütahya, Turkey. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.149, p.127-143, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1025642331692>
- DELGADO-MARTIN, J.; JUNCOSA-RIVERA, R.; FALCÓN-SUÁREZ, I.; CANAL-VILA, J.. Four years of continuous monitoring of the Meirama end-pit lake and its impact in the definition of future uses. **Environmental Science and Pollution Research**, v.20, n.11, p.7520-7533, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1618-9>
- DENIMAL, S.; BERTRAND, C.; MUDRY, J.; PAQUETTE, Y.; HOCHART, M.; STEINMANN, M.. Evolution of the aqueous geochemistry of mine pit lakes - blanzly-montceau-les-mines coal basin (massif central, France): origin of sulfate contents; effects of stratification on water quality. **Applied Geochemistry**, n.20, p.825-839, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.11.015>
- EDBERG, F.; ANDERSSON, A. F.; HOLMSTRÖM, S. J. M.. Bacterial community composition in the water column of a lake formed by a former uranium open pit mine. **Microbial Ecology**, v.64, p.870-880, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0069-z>
- ERG, K.. Sulphate balance of lakes and shallow groundwater in the Vasavere buried valley, Northeast Estonia. **Oil Shale**, v.20, n.4, p.477-489, 2003.
- ESTEVEZ, F. A.. **Fundamentos de limnologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
- FURTADO, A. L. S.; CASPER, P.; ESTEVES, F. A.. Methanogenesis in an impacted and two dystrophic coastal lagoons (Macaé, Brazil). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, n.45, p.195-203, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-89132002000200011>
- GAGNAIRE, B.; BADO-NILLES, A.; BETOULLE, S.; AMARA, R.; CAMILLERI, V.; CAVALIÉ, I.; CHADILI, E.; DELAHAUT, L.; KERAMBRUN, E.; ORJOLLET, D.; PALLUEL, O.; SANCHEZ, W.. Former uranium mine-induced effects in caged roach: a multiparametric approach for the evaluation of in situ metal toxicity. **Ecotoxicology**, v.24, n.1, p.215-231, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1374-8>
- GALVÃO, C. M.; SAWADA, N. O.; TREVIZAN, M. A.. Revisão sistemática: recurso que proporciona a incorporação das evidências na prática da enfermagem. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, v.12, n.3, p.549-556, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-11692004000300014>
- GÁMEZ, O. R.; LAFFONT-SCHWOB, I.; PRUDENT, P.; VASSALO, L.; RODRÍGUEZ, I. A.; MACÍAS, R. P.; PETIT, M. E.; IBARRA, A. T. A.; MASOTTI, V.; PERRAUD-GAIME, I.; RODRÍGUEZ, A. A.. Assessment of water quality from the Blue Lagoon of El Cobre mine in Santiago de Cuba: a preliminary study for water reuse. **Environmental Science and Pollution Research**, v.26, n.16, p.16366-16377, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05030-3>
- GAMMONS, C. H.; HARRIS, L. N.; CASTRO, J. M.; COTT, P. A.; HANNA, B. W.. **Creating lakes from open pit mines: processes and considerations, with emphasis on northern environments**. Canadá: Montana Tech Library, 2009.
- GAMMONS, C. H.; WOOD, S. A.; JONAS, J. P.; MADISON, J. P.. Geochemistry of the rare-earth elements and uranium in the acidic Berkeley pit lake, Butte, Montana. **Chemical Geology**, v.198, n.3-4, p.269-288, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00034-2)
- GERBER, M. D.; VARELA JUNIOR, A. S.; CALDAS, J. S.; CORCINI, C. D.; LUCIA JUNIOR, T.; CORRÊA, L. B.; CORRÊA, É. K.. Toxicity evaluation of parboiled rice effluent using sperm quality of zebrafish as bioindicator. **Ecological Indicators**, v.61, p.214-218, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.016>
- GRANDE, J. A.; VALENTE, T.; LA TORRE, M. L.; SANTISTEBAN, M.; CERÓN, J. C.; PÉREZ-OSTALÉ, E.. Characterization of acid mine drainage sources in the Iberian Pyrite Belt: base methodology for quantifying affected areas and for

environmental management. **Environmental Earth Science**, v.71, n.6, p.2729-2738, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2652-0>

GUIMARÃES, C. M.; MORAIS, C. F.. Mineração, degradação ambiental e arqueologia. Minas Gerais, Brasil século XVIII. **Cuadernos de Etnohistoria**, v.26, n.2, p.82-101, 2018.

HARFORD, A. J.; HOGAN, A. C.; JONES, D. R.; VAN DAM, R. A.. Ökotoxikologie von gut gereinigten grubenwässern-erfahrungen von einem Australischen Bergwerk. **Mine Water and the Environment**, v.34, n.1, p.75-86, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-014-0282-8>

HERZSPRUNG, P.; DUFFEK, A.; FRIESE, K.; RECHTER, M.; SCHULTZE, M.; TÜMPLING JUNIOR, W. V.. Modification of a continuous flow method for analysis of trace amounts of nitrate in iron-rich sediment pore-waters of mine pit lakes. **Water Research**, n.39, p.1887-1895, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.02.017>

HRDINKA, T.; SOBR, M.; FOTT, J.; NEDBALOVÁ, L.. The unique environment of the most acidified permanently meromictic lake in the Czech Republic. **Limnologia**, v.43, n.6, p.417-426, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2013.01.005>

JESUS, H. C.; COSTA, E. A.; MENDONÇA, A. S. F.; ZANDONADE, E.. Distribuição de metais pesados em sedimentos do sistema estuarino da ilha de Vitória/ES. **Química Nova**, n.27, p.378-386, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000300004>

KOSCHORRECK, M.; WENDT-POTTHOFF, K.. A sediment exchange experiment to assess the limiting factors of microbial sulfate reduction in acidic mine pit lakes. **Journal Soils Sediments**, v.12, n.10, p.1615-1622, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0547-4>

LACMA, J.; IANNACONE, J.; VERA, G.. Toxicidad del cromo em sedimento usando Donax obesulus Reeve 1854 (pelecypoda: Donacidae). **Ecologia Aplicada**, n.6, p.93-99, 2007.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A.. **Fundamentos de metodologia científica**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LEVY, D. B.; CUSTIS, K. H.; CASEY, W. H.; ROCK, P. A.. A comparison of metal attenuation in mine residue and overburden material from an abandoned copper mine. **Applied Geochemistry**, n.12, p.203-211, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(96\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(96)00064-9)

LOTTERMOSER, B. G.; ASHLEY, P. M.; COSTELLOE, M. T.. Contaminant dispersion at the rehabilitated Mary Kathleen uranium mine, Australia. **Environmental Geology**, v.48, n.6, p.748-761, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0014-2>

LUEK, A.; BROCK, C.; ROWAN, D. J.; RASMUSSEN, J. B.. A simplified anaerobic bioreactor for the treatment of selenium-laden discharges from non-acidic. **Mine Water and the Environment**, v.33, n.4, p.295-306, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-014-0296-2>

MAGALHÃES, D. P.; FERRÃO FILHO, A. S. A.. Ecotoxicologia como ferramenta no biomonitoramento de ecossistemas aquáticos. **Oecologia Brasiliensis**, v.12, n.3, p.355-381, 2008.

MARQUES, E. D.; TUBBS, D.; GOMES, O. V. O.; SILVA-FILHO, E. V.. Influence of acid sand pit lakes in surrounding groundwater chemistry, Sepetiba sedimentary basin, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v.112, p.306-321, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.10.002>

MARSZELEWSKI, W.; DEMBOWSKA, E. A.; NAPIÓRKOWSKI, P.; SOLARCZYK, A.. Understanding abiotic and biotic conditions in post-mining pit lakes for efficient management: a case study (Poland). **Mine Water and the Environment**, v.36, n.3, p.418-428, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0434-8>

MARTINEZ-HARO, M.; BEIRAS, R.; BELLAS, J.; CAPELA, R.; PEDRO, J.; LOPES, I.; MOREIRA-SANTOS, M.; REIS-HENRIQUES, A. M.; RIBEIRO, R.; SANTOS, M. M.; CARLOS, J.. A review on the ecological quality status assessment in aquatic systems using community based indicators and ecotoxicological tools: what might be the added value of their combination? **Ecological Indicators**, v.48, p.8-16, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.024>

MKANDAWIRE, M.. Biogeochemical behaviour and bioremediation of uranium in waters of abandoned mines. **Environmental Science and Pollution Research**, v.20, n.11, p.7740-7767, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1486-3>

MOLLEMA, P. N.; ANTONELLINI, M.. Water and (bio) chemical cycling in gravel pit lakes: a review and outlook. **Earth Science Reviews**, v.159, p.247-270, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.05.006>

MOLLEMA, P. N.; ANTONELLINI, M.; HUBEEK, A.; VAN DIEPENBEEK, P. M. J. A.. The effect of artificial recharge on hydrochemistry: a comparison of two fluvial gravel pit lakes with different post-excavation uses in The Netherlands. **Water (Switzerland)**, v.8, n.9, p.1-17, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8090409>

MOLLEMA, P. N.; STUYFZAND, P. J.; JUHÁSZ-HOLTERMAN, M. H. A.; VAN DIEPENBEEK, P. M. J. A.; ANTONELLINI, M.. Metal accumulation in an artificially recharged gravel pit lake used for drinking water supply. **Journal of Geochemical Exploration**, v.150, p.35-51, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.004>

NEIL, L. L.; MCCULLOUGH, C. D.; LUND, M. A.; EVANS, L. H.; TSVETNENKO, Y.. Toxicity of acid mine pit lake water remediated with limestone and phosphorus. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, n.72, p.2046-2057, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.08.013>

NOBRE FILHO, P. A.; SABADIA, J. A. B.; DUARTE, C. R.; MAGINI, C.; NOGUEIRA NETO, J. A.; SILVA FILHO, W. F.. Sustentabilidade ambiental da extração de áridos: a lavra de areia no canal ativo do rio Canindé-Paramoti-Ceará. **Geociências**, v.24, n.2, p.149-158, 2012.

OLIVEIRA, S. C.; WAGNER, C.; HERMAN, E. D. C.; ROSA, R. B.; PERTILLE, D. C.; VIVIAN, F. T.. Avaliação toxicológica dos efeitos do cobre na espécie *Carassius auratus*. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.7, n.2, p.260-275, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v7e22018260-275>

PALMA, P.; LEDO, L.; ALVARENGA, P.. Ecotoxicological endpoints, are they useful tools to support ecological status assessment in strongly modified water bodies? **Science of the Total Environment**, v.541, p.119-129, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.014>

PEREIRA, R.; RIBEIRO, R.; GONÇALVES, F.. Plan for an integrated human and environmental risk assessment in the S. Domingos mine area (Portugal). **Human and Ecological Risk Assessment**, v.10, n.3, p.543-578, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807030490452197>

RAND, G. M.; PETROCELLI, S. R.. **Fundamentals of aquatic toxicology: methods and applications**. Washington: FMC, 1985.

REYNDERS, H.; BERVOETS, L.; GELDERS, M.; COEN, W. M.; BLUST, R.. Accumulation and effects of metals in caged carp and resident roach along a metal pollution gradient. **Science of the Total Environment**, v.391, n.1, p.82-95, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.056>

ROMERO, F. M.; PROL-LEDESMA, R. M.; CANET, C.; ALVARES, L. N.; PÉREZ-VÁZQUEZ, R.. Acid drainage at the inactive Santa Lucia mine, western Cuba: natural attenuation of arsenic, barium and lead, and geochemical behavior of rare earth elements. **Applied Geochemistry**, v.25, n.5, p.716-727, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.02.004>

ROUSSEL, C.; NÉEL, C.; BRIL, H.. Minerals controlling arsenic and lead solubility in an abandoned gold mine tailings. **The Science of the Total Environment**, n.263, p.209-219, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00707-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00707-5)

SÄMY, C. H.; TORRENS, B. M. O.; MEDEIROS, S. H. W.. Estudo do impacto ambiental na bacia do rio do braço através de análises ecotoxicológicas. **Revista de Ciências Ambientais**, v.4, n.2, p.45-55, 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.18316/84>

SÁNCHEZ-ESPAÑA, J.; PAMO, E. L.; PASTOR, E. S.; ERCILLA, M. D.. The acidic mine pit lakes of the Iberian Pyrite Belt: an approach to their physical limnology and hydrogeochemistry. **Applied Geochemistry**, v.23, n.5, p.1260-1287, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.12.036>

SCHULTZE, M.; POKRANDT, K. H.; HILLE, W.. Pit lakes of the Central German lignite mining district: creation,

morphometry and water quality aspects. **Limnologia**, v.40, n.2, p.148-155, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2009.11.006>

SHEVENELL, L. A.. Water quality in pit lakes in disseminated gold deposits compared to two natural, terminal lakes in Nevada. **Environmental Geology**, v.39, n.7, p.807-815, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002540050497>

SILVA, D. C. V. R.; POMPÊO, M.; PAIVA, T. C. B.. **A ecotoxicologia no contexto atual no Brasil**. São Paulo: USP, 2015.

SKIPPERUD, L.; JØRGENSEN, A. G.; HEIER, L. S.; SALBU, B.; ROSSELAND, B. O.. Po-210 and Pb-210 in water and fish Taboshar uranium mining pit lake, Tajikistan. **Journal of Environmental Radioactivity**, v.123, p.82-89, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.03.013>

SØNDERGAARD, M.; LAURIDSEN, T. L.; JOHANSSON, L. S.; JEPPESEN, E.. Gravel pit lakes in Denmark: chemical and biological state. **Science of the Total Environment**, v.612, p.9-17, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.163>

TRIANAFYLLIDIS, S.; SKARPELIS, N.. Mineral formation in an acid pit lake from a high-sulfidation ore deposit: Kirki, NE Greece. **Journal of Geochemical Exploration**, n.88, p.68-71, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.017>

VALENTE, D.; COSTA-AMARAL, I. C.; CARVALHO, L. V. B.; SANTOS, M. V. C.; CASTRO, V. S.; RODRIGUES, D. R. F.; FALCO, A.; SILVA, C. B.; NOGUEIRA, S. M.; GONÇALVES, E. S.; MOREIRA, J. C.; ANDRÉ, L. C.; TEIXEIRA, L. R.; SARCINELLI, P. N.; SISENANDO, H. A.; OLIVEIRA, M. S.; PERINI, J. A.; MATTOS, R. C. O. C.; LARENTIS, A. L.. Utilização de biomarcadores de genotoxicidade e expressão gênica na avaliação de trabalhadores de postos de combustíveis expostos a vapores de gasolina. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v.42, n.1, p.1-21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-6369000124415>

VIARENGO, A.; LOWE, D.; BOLOGNESI, C.; FABBRI, E.; KOEHLER, A.. The use of biomarkers in biomonitoring: a 2-tier approach assessing the level of pollutant-induced stress syndrome in sentinel organisms. **Toxicology & Pharmacology**, v.146, n.3, p.281-300, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2007.04.011>

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenera Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.