

METALURGIA E METAIS TÓXICOS EM ÁGUAS E SOLOS EFEITOS CRÔNICOS, TOXICIDADE E MONITORAMENTO

Igor Saburo Suga*

Leonardo Santos Andrade*

Resumo: A metalurgia e a indústria metalúrgica envolvem uma variedade de atividades de transformação de metais em produtos importantes em nossa sociedade, como é caso do aço e seus derivados e outros metais não ferrosos. A importância desses materiais metálicos está intimamente relacionada à história do nosso país e remonta a época do Brasil colônia e a expansão e ocupação dos interiores pelos bandeirantes. Em 2023, segundo o Anuário Mineral Brasileiro (AMB), o valor da produção de substâncias da classe dos metais totalizou 204 bilhões de reais. Se por um lado a atividade mineradora e a metalurgia geram grandes divisas econômicas ao país, de outro lado temos um grande passivo ambiental dado pela contaminação de solos e corpos d'água por metais tóxicos. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo produzir um material de revisão a respeito da presença de metais tóxicos derivados da atividade metalúrgica no meio ambiente, e seus impactos à saúde humana bem como os métodos analíticos que podem ser utilizados para o monitoramento da presença dessas espécies em água.

Palavras-chave: metalurgia, metais tóxicos, monitoramento, biomonitoramento, espectroscopia, sondas fluorescentes

INTRODUÇÃO

A mineração e a metalurgia são processos de transformações dos materiais conhecidos há muito tempo. Acredita-se que a metalurgia do cobre, feita a partir do mineral malaquita (carbonato de cobre) tenha sido iniciada por volta 4200 a.C. A siderurgia, isto é, a metalurgia do ferro, desenvolveu-se por volta de 1400 a.C., tornando-se o ferro um metal amplamente utilizado (Alfonso-Goldfarb, A. M. et al., 2018)

Atualmente a mineração e a indústria metalúrgica estão envolvidas em uma grande variedade de atividades de grande relevância, fazendo parte daquilo que é

* Instituto de Química – UF CAT: igor.suga@gmail.com; ls_andrade@ufcat.edu.br

conhecido como indústria de base. Assim como o aço e seus derivados, outros metais não ferrosos como o alumínio, cobre e suas ligas, são onipresentes em nosso cotidiano.

A importância desses materiais metálicos está intimamente relacionada com a ocupação do território brasileiro, desde o tempo do Brasil colônia e das atividades expansionistas dos bandeirantes pelos interiores do País.

Para se ter uma ideia da importância da indústria de metais, em 2023, segundo o Anuário Mineral Brasileiro (AMB), o valor da produção de substâncias das classes dos metais totalizou 204 bilhões de reais (Brasil, 2024).

Se por um lado a metalurgia gera grandes divisas econômicas ao País, de outro lado temos um passivo ambiental considerável dado pela contaminação de solos e corpos d'água por metais tóxicos. O setor metalúrgico é responsável por grande parte desta contaminação (Andrade et al., 2009a), sendo gerados vultosos volumes de resíduos poluentes que apresentam, entre outros metais tóxicos, o chumbo (Pb), cádmio (Cd), zinco (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) e cromo (Cr).

Estes metais são tóxicos mesmo em baixas concentrações e estão associados a uma série de problemas que afetam a saúde humana, como as doenças de Alzheimer e Parkinson (McRae et al., 2009), alguns tipos de câncer (INCA, 2024), inflamações crônicas, diabetes, aterosclerose e doenças cardiovasculares. Todas elas relacionadas com a redução na capacidade do organismo em regular o estresse oxidativo e com consequente indução a danos no DNA, à peroxidação lipídica, à modificação de proteínas, entre outros efeitos (Hess, 2022).

O presente trabalho de conclusão de curso visa identificar os principais metais tóxicos relacionados ao processo de mineração e metalurgia no Brasil, as áreas de maior contaminação ambiental, os riscos associados à saúde humana, e as principais técnicas analíticas de identificação e quantificação destes metais no ambiente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, realizou-se pesquisa de artigos científicos, revistas e periódicos, bem como dissertações de

mestrado, para levantamento de dados e informações que pudessem auxiliar no processo de embasamento sobre o assunto de metais tóxicos no ambiente.

Inicialmente as pesquisas estavam voltadas para o reconhecimento da indústria metalúrgica no Brasil e os metais tóxicos oriundos deste tipo de atividade. Em seguida, fez-se o levantamento dos efeitos deletérios dos metais tóxicos relacionados à saúde humana e as principais técnicas utilizadas para a detecção e quantificação destes metais no ambiente.

Para tal, bases de dados como SciELO, PubMed e Google Scholar foram consultadas, utilizando-se termos como “mineração no Brasil”, “contaminação por metal pesado”, “metais tóxicos”, “metais pesados e câncer”, “monitoramento metal pesado”, “heavy metal” e “heavy metal monitoring”, “ICP heavy metal” e “fluorescent probes heavy metals”

Foi feita a leitura dos resumos dos artigos selecionados para identificar se os mesmos se enquadravam no escopo deste trabalho, para então dar sequência à sua leitura integral. Desta forma, foram privilegiados os artigos de revisão e aqueles que apresentavam maiores informações que pudessem embasar o assunto.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Metais tóxicos

Além do termo “metais tóxicos” é possível encontrar na literatura termos como “metais potencialmente tóxicos”, “metais pesados”, “metais traço” e “elementos traço”. Esses termos remetem para uma classe de metais que são persistentes no ambiente, ou seja, aqueles que não sofrem biodegradação, estando relacionados a um potencial de bioacumulação e biomagnificação ao longo das cadeias tróficas (Leitão; Leitão, 2025). Os metais tóxicos estão presentes naturalmente no meio ambiente, sendo impossível viver na sua ausência, sendo diversas as formas como estes ingressam no organismo humano, tais como a ingestão de alimentos e água contaminada, exposição da pele, pelo ar inalado e a geofasia (Hess, 2018). Quando se fala em contaminação por metais tóxicos incluem-se os metais cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e cobre (Cu), podendo ser somados a esta lista o zinco (Zn), níquel (Ni) e também o cromo (Cr) (Santos & Anjos, 2022).

Alguns destes metais apresentam relevância biológica, sendo denominados metais essenciais (cromo e zinco). Por outro lado, os metais não essenciais (cádmio, chumbo e mercúrio) são altamente tóxicos aos seres humanos e ao meio ambiente. É interessante destacar que o termo “metais potencialmente tóxicos” tem sido utilizado para designar os metais que são essenciais mas que em excesso podem causar problemas à saúde (Marzola et al., 2019).

A exposição de seres humanos aos metais tóxicos pode levar a uma redução na capacidade de regulação do estresse oxidativo, resultando em danos ao DNA, à peroxidação lipídica¹, à modificação de proteínas (Hess, 2022), além de outros efeitos que podem resultar em diversos tipos de câncer (INCA, 2024) bem como doenças neurológicas como a doença de Alzheimer e a doença Parkinson (McRae et al., 2009).

Abaixo encontra-se a descrição dos três principais metais tóxicos (cádmio, chumbo e mercúrio) e suas relações com a mineração e a toxicidade aos seres humanos.

Cádmio (Cd)

Metal de transição de número atômico 48, apresenta temperatura de fusão relativamente baixa (321 °C) sendo encontrado na forma de CdS (sulfeto de cádmio) em minérios de zinco como a esfarelita (ZnS). É utilizado como pigmento de tintas a óleo de coloração amarelo claro, mas sua maior aplicação é dada em baterias de níquel-cádmio (NiCd). A principal fonte de contaminação de cádmio no ambiente é dada através de resíduos de mineração de zinco concentrada nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso e Rondônia, e também da extração do caulim ou caulino nos estados do Amazonas, Pará e Amapá, sendo o caulim um tipo de argila branca utilizada em diversos setores industriais como o de papel e celulose, cerâmica, tintas e vernizes. A entrada deste metal no ambiente também pode ocorrer através da deposição de lodos de esgoto ou efluentes urbanos e industriais, aplicação de fertilizantes fosfatados, descarte inadequado de resíduos sólidos como lixo urbano, queima de combustíveis fósseis e incineração, além de atividades industriais como o processo de galvanização de ferro e aço (Hess, 2022). Segundo a (World Health

¹ A peroxidação lipídica é um processo fisiológico que afeta primariamente as membranas celulares sendo considerado um processo irreversível uma vez que o as células não apresentam mecanismos de descarte dos subprodutos gerados neste processo (Bresciani; Cruz; González-Gallego, 2015).

Organization (WHO, 2007) a ingestão tolerável de cádmio é de 25 µg/kg de massa corporal por mês, sendo um elemento tóxico aos rins, sistema esquelético e respiratório, além de ser classificado como carcinogênico. Neste último aspecto, cádmio está relacionado a câncer de pulmão, bexiga, pâncreas, mama, endométrio e próstata.

Os íons de cádmio (Cd^{2+}) além de se ligarem competitivamente com outros cofatores metálicos causando a perda de atividade de proteínas, também tendem a se combinar facilmente com proteínas que apresentam grupos hidroxilas, amino, tios, entre outros grupos, afetando suas atividades. De modo mais importante, o Cd^{2+} no organismo é responsável por induzir a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) no corpo, levando a danos oxidativos aos lipídeos, proteínas e também ao DNA (Pu et al., 2025).

Chumbo (Pb)

Metal de transição pertencente ao grupo 14 da tabela periódica, apresenta número atômico 82, temperatura de fusão também relativamente baixa (291,5 °C) e temperatura de ebulição de 1717 °C, emitindo vapores (fumos) tóxicos a partir de temperaturas de 500 °C e 600 °C. É encontrado naturalmente na forma de sulfeto, no mineral galena (PbS). No Brasil, as principais empresas produtoras deste metal encontram-se em Minas Gerais, Mato Grosso e Rondônia, sendo geralmente um subproduto da lavra² de minério de zinco (esfarelita, ZnS). É um metal de cor cinza azulada, pouco solúvel em água e ácidos diluídos, mas solúvel em ácido nítrico (HNO_3), ácido acético (CH_3COOH) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), concentrados e a quente. Apresenta comumente estado de oxidação +2 em compostos inorgânicos pois apenas dois dos quatro elétrons de valência são facilmente ionizáveis. Acetatos e nitratos são os compostos normalmente encontrados, sendo estes solúveis em água fria. Os cloretos, cromatos e estearatos são moderadamente solúveis. Compostos como carbonatos, óxidos, sulfatos e sulfetos apresentam baixo solubilidade. O chumbo também pode formar compostos orgânicos estáveis como o tetrametilchumbo (Me_4Pb) e tetraetilchumbo (Et_4Pb), sendo estes ligeiramente

² Lavra – conjunto de operações realizadas visando à retirada de minério de um depósito mineral. (Muniz; Oliveira-Filho, 2008)

voláteis e insolúveis em água, mas solúveis em solventes orgânicos, gorduras e lipídeos (Moreira & Moreira, 2004).

O chumbo pode chegar ao solo e aos corpos d'água através da movimentação e lixiviação³ da pilha de rejeitos derivados do processo de mineração, sendo então absorvidos pelos seres humanos pelas vias aéreas superiores, pele e via digestiva. A presença deste metal no organismo humano está associada a uma série de doenças dos sistemas nervoso, renal, hematopoiético (tecidos e células formadores de sangue) e endócrino, sendo relacionada a hiperatividade infantil, déficit de atenção, menor quociente de inteligência (QI) e criminalidade na adolescência. O nível aceitável de chumbo no sangue é de 0,1 mg/L (WHO, 2007), sendo a ingestão diária aceitável menor que 0,3 mg.

Outra importante fonte de contaminação por chumbo no meio ambiente se deu através do uso de compostos orgânicos de chumbo como agente antidetonante de gasolina, para prevenir o processo de combustão incompleta da mistura gasolina/ar. O tetraetilchumbo, descoberto por Charles F. Kettering e Thomas Midgley in 1921, foi introduzido nos Estados Unidos em 1923 sendo então responsável pelo aumento das concentrações globais de chumbo na atmosfera. Em 1965, estudos comparativos utilizando núcleos de gelo (ice core) datados de 800 a.C. demonstram um aumento abrupto na concentração de chumbo na atmosfera entre 1933 e 1965, causado por aerossóis de chumbo (Lacerda et al., 2023).

Na década de 1920 o Brasil seguiu a tendência mundial na adição de tetraetilchumbo à gasolina, sendo que as concentrações deste composto começaram a diminuir como consequência do programa de produção de álcool anidro (Próalcool 1975). A partir do ano de 1993, através da obrigatoriedade da adição de 22% de etanol anidro à gasolina, dada pela lei 7823/93, tornou-se desnecessário a adição de tetraetilchumbo no país (Capitani & Paoliello, 2009).

O tetraetilchumbo na gasolina só deixou de ser utilizado no mundo em agosto de 2021, quando a Argélia (país africano pertencente ao Magreb) parou de fornecer gasolina com chumbo.

³ Lixiviação - processo de solubilização, transporte e liberação de partículas presentes em uma fase sólida para uma fase líquida. (Lunkes et al.)

Segundo Lacerda *et al.* (2023), após a retirada do tetraetilchumbo da gasolina por todos os países, as concentrações de chumbo no sangue humano decaíram exponencialmente, mas a população ainda está exposta a esta espécie.

Mercúrio (Hg)

Mercúrio é um metal de baixa temperatura de fusão ($-33,83\text{ }^{\circ}\text{C}$) e baixa temperatura de ebulição ($356,73\text{ }^{\circ}\text{C}$), apresentando densidade elevada ($13,546\text{ g/cm}^3$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ao contrário dos outros metais, o mercúrio é encontrado líquido sob condições ambientes, mas na natureza encontra-se, predominantemente, na forma de sulfeto (HgS , cinábrio) de cor vermelha ou preta. Além da utilização em termômetros, que foi proibida pela ANVISA em 2019 (RDC 145/2017), o mercúrio é também utilizado em aparelhos eletrônicos, como bactericida, fungicida e inseticida, catalisador na indústria de polímeros, eletrodos na indústria de cloro-álcalis e em algumas ocasiões como amálgama em restaurações dentárias.

O Brasil não é produtor de mercúrio, sendo o metal importado em sua totalidade para o consumo no país. Atualmente a maior fonte de contaminação do meio ambiente por mercúrio é proveniente do garimpo ilegal do ouro. Quando liberado no ambiente, o mercúrio inorgânico pode ser metabolizado por bactérias sofrendo processos de alquilações e transformando-se em mercúrio orgânico (metilmercúrio) que se acumula nos organismos ao longo da cadeia alimentar. Este processo de acumulação ao longo da cadeia alimentar é denominado magnificação trófica ou biomagnificação. Isto ocorre devido ao aumento da lipofilicidade do metilmercúrio que atravessa facilmente as membranas celulares, depositando-se então nos tecidos.

Um dos pontos mais preocupantes é que o mercúrio pode formar facilmente mercaptanas, isto é, compostos que apresentam grupo tiol ($-\text{SH}$) em suas estruturas, e que apresentam alta afinidade por proteínas e enzimas de organismos vivos, causando uma série de desordens no funcionamento celular que estão relacionadas aos problemas de saúde (Pu *et al.*, 2025).

A região amazônica tem sido chamada de “nova Minamata” (Ellwanger & Chies, 2023) em referência à cidade Japonesa que sofreu com a poluição por mercúrio na década de 1950. Nesse evento, causado pela liberação de metilmercúrio por uma indústria química (Chisso Co. Ltd.) de produção de

acetaldeído e compostos vinílicos, vários casos de doenças neurológicas e de desenvolvimento foram relatados. Estes problemas foram causados após a ingestão de peixes e frutos do mar contaminados por metilmercúrio, sendo que o termo “Doença de Minamata” foi estabelecido e é utilizado até hoje para designação de problemas neurológicos causados pela intoxicação por este composto. Desta forma, evidências robustas indicam que as comunidades amazônicas estão cronicamente expostas à contaminação por mercúrio derivada do garimpo ilegal do ouro.

Monitoramento

Por serem metais que se acumulam ao longo da cadeia trófica o monitoramento dos metais tóxicos pode ser realizado através de indicadores biológicos, sendo peixes, moluscos e crustáceos os bioindicadores mais relevantes para análise de água (Leitão; Leitão, 2025) e plantas no caso de análise de solos (Fernandes et al., 2007). Fungos, líquens e musgos também são outros organismos importantes para o biomonitoramento de metais tóxicos no ambiente (Manahan, 2017). O uso de parâmetros biológicos como os citados anteriormente encontra-se fundamentado no conceito de biomonitoramento. A definição mais aceita de biomonitoramento considera o uso sistemático das respostas encontradas nos organismos vivos para avaliação das mudanças ocorridas no ambiente, sendo estas geralmente causadas por ações antropogênicas (Buss; Baptista; Nessimian, 2003)

Em termos de técnicas analíticas, os trabalhos analisados indicam que a espectroscopia atômica é o método mais utilizado para a determinação qualitativa e quantitativa de metais tóxicos presentes no ambiente, com destaque para espectroscopia de emissão com plasma indutivamente acoplado (ICP) (Andrade et al., 2009a; Fernandes et al., 2007; Fortes et al., 2023).

Com relação ao preparo das amostras para a realização da análise por espectroscopia, a extração dos metais da matriz sólida para uma fase líquida é realizada através da técnica de digestão ácida. Nesta técnica, o uso de misturas de ácido nítrico ácido nítrico (HNO_3), ácido clorídrico (HCl) e ácido perclórico (HClO_4) são comumente relatadas nos estudos analisados, estando estes baseados no método padrão EPA 3051A (Andrade et al., 2009b). Segundo Melo et al. (2020), o método EPA 3051A é um dos mais utilizados para se a determinação do conteúdo pseudo-total dos elementos de um solo, fazendo-se a digestão ácida num sistema

fechado com forno de micro-ondas e uso de ácido nítrico (HNO_3) concentrado ou uma mistura de ácido nítrico (HNO_3) e ácido clorídrico (HCl) concentrados na proporção de 3:1 respectivamente (proporção inversa daquela encontrada no método que se utiliza água régia).

O uso do ácido nítrico se dá uma vez que os sais de nitrato formado são bastante solúveis em água e também por ser um agente oxidante (alto potencial de redução do ânion nitrato) que minimiza a formação de sais insolúveis. Para amostras derivadas de plantas que contém silicatos, ácido fluorídrico (HF) pode ser utilizado para dissolução destes compostos; adicionalmente, peróxido de hidrogênio (H_2O_2) pode ser introduzido para a oxidação de compostos orgânicos (Douvris et al., 2023).

Fundamento da Espectroscopia

A espectroscopia, segundo Azevedo, *et al.* (2019), é um ramo da física que lida com o estudo da radiação absorvida, refletida, emitida ou então espalhada quando esta interage com uma substância ou entidade elementar. Durante a primeira metade do século XIX, onde já se conhecia a existência da radiação infravermelho (IV) e ultravioleta (UV), o desenvolvimento de espectrômetros ópticos permitiu a o registro de espectros derivados de chamas e de radiações emitidas por gases submetidos a descargas elétricas. Estes conhecimentos possibilitaram o desenvolvimento da teoria atômica e o surgimento da Mecânica Quântica, sendo que atualmente, as técnicas espectroscópicas são utilizadas para a caracterização de materiais. Desta forma, é possível obter informações sobre as ligações químicas realizadas entre os átomos, a vizinhança atômica desses átomos e a presença e concentrações de determinadas substâncias em amostras (Leite & Prado, 2012).

A espectroscopia atômica, por exemplo, é capaz de detectar concentrações da ordem de partes por milhão (ppm) até partes por bilhão (ppb), sendo uma técnica largamente utilizada para determinação de metais em amostras ambientais (Skoog et al., 2021).

A primeira etapa de qualquer procedimento para a realização da espectroscopia atômica consiste na **atomização**, ou seja, a volatilização da amostra e formação de uma fase gasosa. Nesta fase gasosa estão contidos átomos ou íons elementares que, em níveis de energia excitados, produzem fótons de comprimentos

de onda suficientemente afastados um dos outros, podendo ser detectados por um sensor específico.

A atomização de amostras por plasma indutivamente acoplado (ICP) é utilizado para espectroscopia de emissão e massas, operando em temperaturas típicas de 6000 °C - 8000 °C (Skoog et al., 2021).

Fontes de Plasma

O plasma, considerado como sendo um dos estados físicos da matéria, pode ser definido como sendo uma mistura gasosa condutora que apresenta em sua composição íons e elétrons livres a altas temperaturas e baixas pressões. No caso do plasma de argônio utilizado na espectroscopia atômica, as espécies condutoras presentes no meio são íons de argônio e elétrons. Uma vez formados no plasma, os íons de argônio são capazes de absorverem energia suficiente do meio externo para manterem a temperatura a um nível onde ionizações posteriores mantem o plasma indefinidamente. Temperaturas de cerca de 10000 K são alcançadas desta maneira (Skoog et al., 2021).

Plasma Acoplado Indutivamente (ICP)

O plasma acoplado indutivamente (ICP), termo utilizado em referência a utilização de um gás em fluxo sob condições específicas de temperatura e pressão (Douvris et al., 2023), oferece uma grande vantagem em termos de sensibilidade e ausência de interferências sendo mantida por um gerador de radiofrequência (RF) que irradia de 0,5 kW a 2 kW de potência a frequências de 27,12 MHz ou 40,68 MHz. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático de uma fonte de plasma indutivamente acoplado. Nela pode-se observar a presença de três tubos concêntricos feitos de quartzo por onde se atravessa um fluxo de argônio a uma velocidade total entre 11 L/min e 17 L/min deste gás. O tubo maior apresenta um diâmetro de 2,5 cm. Na parte superior encontra-se a bobina de indução de radiofrequência. A ionização do argônio que flui pelos tubos é iniciada através de uma bobina Tesla. Os íons formados e seus respectivos elétrons provenientes da ionização são colocados para interagirem com o campo magnético (indicação H na Figura 1) produzido pelas bobinas de indução indicadas por I. Essa interação faz com

que os íons e elétrons dentro da bobina fluam nos caminhos fechados anulares representados na figura.

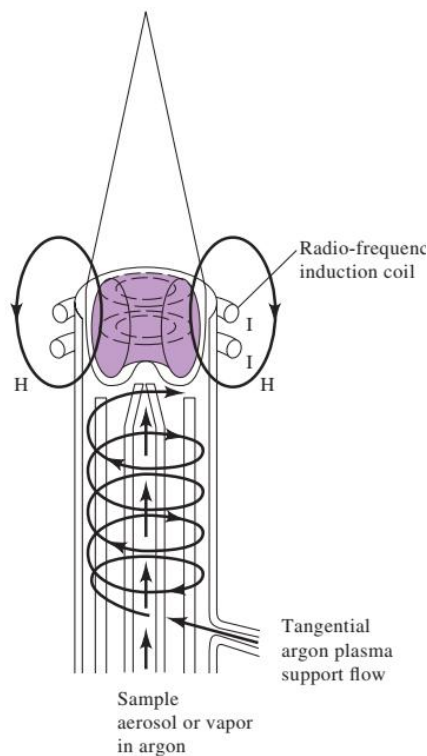


Figura 1 - Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (Skoog *et al.*, 2021)

Introdução da Amostras

As amostras podem ser introduzidas no plasma indutivamente acoplado pelo fluxo de argônio a uma taxa de 1 L/min através do tubo central de quartzo, podendo ser um aerossol, um vapor gerado termicamente ou um pó finamente dividido. A Figura 2 apresenta um nebulizador concêntrico de vidro comumente utilizado para a introdução de amostras.

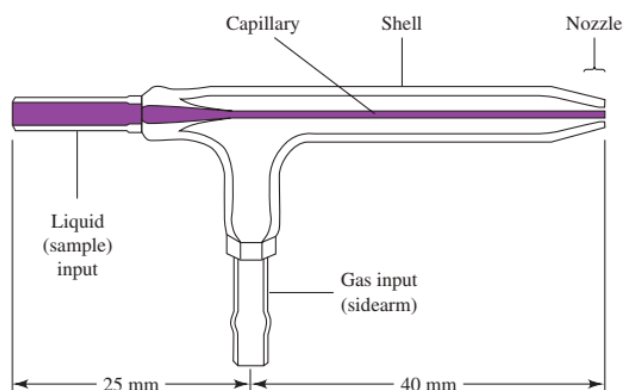


Figura 2 - Nebulizador concêntrico de vidro (Nebulizador Meinhard). (Skoog et al., 2021)

No nebulizador concêntrico, a amostra é transportada do ponto de introdução (input) até a ponta (Nozzle) através do efeito Bernoulli. Segundo o princípio de Bernoulli, um líquido que flui através de um tubo de área restrita, como aquela observada na ponta do nebulizador (Nozzle da Figura 2), aumenta sua velocidade enquanto diminui a pressão. A menor pressão observada na ponta faz com que o líquido seja aspirado para esta região.

Espectrometria de Emissão Atômica (AES)

A energia fornecida pelo plasma no processo de atomização da amostra é capaz de excitar os átomos do analito do seu estado fundamental, onde os elétrons ocupam o orbital de menor energia disponível, para um estado excitado (estado de alta energia). Após alguns nanossegundos depois do processo de excitação, os átomos excitados relaxam para seus estados fundamentais liberando a energia então absorvida na forma de radiação eletromagnética visível (400 nm - 700 nm) ou ultravioleta (160 nm - 800 nm), característica de cada elemento e em certas condições proporcionais à sua concentração. A radiação emitida proveniente do processo de relaxação característico de cada elemento químico é resultado das diferentes transições eletrônicas entre níveis eletrônicos de energia.

Essa radiação atravessa um sistema óptico que pode ser um monocromador, policromador ou um espectrógrafo, que é capaz de separar a radiação em comprimentos de ondas característicos de seus constituintes. A radiação isolada é

então convertida em sinais elétricos por um transdutor que são então processados e analisados por um computador.

Sondas Fluorescentes

As técnicas de espectroscopia, apesar de serem métodos instrumentais tradicionalmente utilizadas para a análise de metais, acabam apresentando algumas limitações. Pode-se citar como limitações para o uso da espectroscopia na análise de metais aspectos como as dificuldades de operações e custos, necessidade de mão de obra especializada, impossibilidade de monitoramento em tempo real, além da necessidade de componentes eletrônicos sensíveis e o fluxo de um gás para carrear a amostra (Li et al., 2024; Wang et al., 2025).

Deste modo, outra técnica que recentemente tem chamado atenção, mas que ainda necessita transpor algumas barreiras está baseada no uso de sondas fluorescentes (fluorescents probes). De acordo com Guo *et al.* (2022) o uso de sondas fluorescentes, quando comparadas à espectroscopia, apresentam uma série de vantagens, como por exemplo, a simplicidade de operação, o baixo custo, a alta sensibilidade e a boa resolução espaço-temporal (análise em tempo real).

Por definição, podemos considerar que as sondas fluorescentes são agentes moleculares (moléculas hospedeiras) que interagem com um analito alvo (no contexto deste trabalho, os metais tóxicos) e exibem simultaneamente alterações espectroscópicas de fluorescência. Baseado nas interações específicas de estímulo e resposta e na consequente alteração na emissão, o analito pode ser identificado. Os princípios de reconhecimento da maioria das sondas baseiam-se na quebra ou formação de ligações covalentes ou de coordenação, que permitem a ativação ou desativação dos sinais fluorescentes (Chen et al., 2022).

Uma série de compostos orgânicos, inorgânicos, híbridos, bem como nanocompósitos, têm sido empregados no desenvolvimento de sondas de alta sensibilidade e seletividade (Wang et al., 2025), sendo que a detecção de diferentes íons de metais tóxicos pode ser detectado por ajustes estruturais nas sondas fluorescentes (Li et al., 2024).

Um dos ajustes estruturais que pode ser considerado é a simulação da região onde as proteínas geralmente se ligam aos metais tóxicos pelo uso de sondas fluorescentes baseadas em peptídeos com aminoácidos ou peptídeos como

molécula hospedeira. Esse tipo de sonda apresenta vantagens na detecção de metais tóxicos decorrente de sua alta solubilidade em água, baixa toxicidade, alta sensibilidade, resposta rápida, baixo custo e detecção visual (Pu et al., 2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As atividades que envolvem a extração e a manipulação de metais são as principais causadoras de contaminação por metais tóxicos de solos e de corpos d'água no Brasil, sendo o norte e o sudeste do país as principais regiões que apresentam áreas contaminadas. Além de gerarem um passivo ambiental considerável, a exposição aos metais tóxicos também acarreta problemas graves de saúde aos seres humanos.

No Brasil, de acordo com os artigos analisados, a contaminação de solos e corpos d'água por metais tóxicos é proveniente das atividades diretas de mineração e também pelo descarte inadequado de rejeitos e rompimento de barreiras. Os principais metais estudados são cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg), mas outros metais como níquel (Ni), zinco (Zn), Cobalto (Co) e arsênio (As), também apresentam lugar de destaque. Observa-se que as maiores concentrações destes metais, encontradas sob a forma de contaminantes ambientais, ocorrem em regiões que apresentam atividades mineradoras, principalmente no norte e sudeste do país. Os estados de Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso e Amazonas são alguns dos que apresentam áreas com forte contaminação, sendo o último caracterizado pelo uso de mercúrio nos garimpos ilegais de ouro. Por serem metais que apresentam bioacumulação, geralmente são utilizados organismos vivos para se avaliar o grau de contaminação de um determinado sítio ou a qualidade do ambiente de um modo geral. Peixes, moluscos, organismos filtradores, fungos, líquens e plantas podem ser utilizados para análise de contaminação de por metais tóxicos no meio ambiente.

Quanto aos aspectos analíticos, a literatura aponta que as técnicas de espectrometria com plasma indutivamente acoplado são as mais tradicionalmente utilizadas para o mapeamento e quantificação de metais tóxicos presentes no ambiente. Porém, nos últimos anos, o uso de sondas fluorescentes vem apresentando papel de destaque para a detecção de metais tóxicos por apresentarem baixo custo de produção, facilidade de manuseio sem a necessidade

de uma mão de obra especializada, alta sensibilidade, além de permitir a análise em tempo real.

Com relação à exposição aos metais tóxicos pelos seres humanos, pode-se destacar desde intoxicações agudas até o desenvolvimento de doenças graves como o câncer, distúrbios neurológicos e danos ao sistema renal e esquelético.

A literatura sobre o assunto é vasta, mas ainda falta uma melhor integração de áreas como a química, geografia, geologia e ciências ambientais para melhor entendimento do problema resultando em ações mitigadoras.

REFERÊNCIAS

- ALFONSO-GOLDFARB, A. M. *et al.* **Percursos de história da química.** [S.l.]: LF Editorial, 2018.
- ANDRADE, Maurício Gomes De *et al.* Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: II - formas e disponibilidade para plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1889–1898, dez. 2009a.
- ANDRADE, Maurício Gomes De *et al.* Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: I - Fitoextração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1879–1888, dez. 2009b.
- AZEVEDO, Aissa L.; SOUSA, Anderson K. S.; CASTRO, Tiago J. Espectroscopia óptica de baixo custo: uma estratégia para a introdução de conceitos de física quântica no ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, p. e20180349, 2019.
- BRASIL. Anuário Mineral Brasileiro - Principais Substâncias Metálicas 2024. Available in: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro-principais-substancias-metalicas-2024>, 2024.
- BRESCIANI, Guilherme; CRUZ, Ivana Beatrice Mânica da; GONZÁLEZ-GALLEGÓ, Javier. Chapter Four - Manganese Superoxide Dismutase and Oxidative Stress Modulation. In: MAKOWSKI, Gregory S. (Org.). *Advances in Clinical Chemistry*. [S.l.]: Elsevier, 2015. v. 68 p. 87–130.
- BUSS, Daniel Forsin; BAPTISTA, Darcílio Fernandes; NESSIMIAN, Jorge Luiz. Bases conceituais para a aplicação de biomonitoramento em programas de avaliação da qualidade da água de rios. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 19, n. 2, p. 465–473, abr. 2003.
- CAPITANI, Eduardo M. De; PAOLIELLO, Mônica M. B. Fontes de exposição humana ao chumbo no Brasil. n. v. 42 n. 3 (2009), 30 set. 2009.

- CHEN, Xingwei *et al.* Small-molecule fluorescent probes based on covalent assembly strategy for chemo selective bioimaging. **RSC Advances**, v. 12, n. 3, p. 1393–1415, 2022.
- DOUVIRIS, Chris *et al.* How ICP-OES changed the face of trace element analysis: Review of the global application landscape. **Science of The Total Environment**, v. 905, p. 167242, dez. 2023.
- ELLWANGER, Joel Henrique; CHIES, José Artur Bogo. Brazil's heavy metal pollution harms humans and ecosystems. **Science in One Health**, v. 2, p. 100019, 2023.
- FERNANDES, Raphael B. A. *et al.* Avaliação da concentração de metais pesados em áreas olerícolas no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 81–93, fev. 2007.
- FORTES, William Manuel Pereira Antunes *et al.* Metal/metalloid bioconcentration dynamics in fish and the risk to human health due to water contamination with atmospheric particulate matter from a metallurgical industrial area. **Science of The Total Environment**, v. 902, p. 166119, dez. 2023.
- GUO, Yifei *et al.* Detection, detoxification, and removal of multiply heavy metal ions using a recyclable probe enabled by click and declick chemistry. **Journal of Hazardous Materials**, v. 423, p. 127242, fev. 2022.
- HESS, Sonia Corina. **Ensaio sobre poluição e doenças no Brasil**. [S.l.]: Expressão Popular, 2022.
- INCA. **Metais Pesados, Câncer e os Riscos Ambientais**. , 2024. Disponível em: <<https://ninho.inca.gov.br/jspui/handle/123456789/15363>>
- LACERDA, Diego *et al.* Global decrease in blood lead concentrations due to the removal of leaded gasoline. **Chemosphere**, v. 324, p. 138207, maio 2023.
- LEITÃO, Rafael Rocha; LEITÃO, Vítor Rocha. Environmental Contamination by Heavy Metals: A Systematic Review of Reviews on Ecotoxicological Impacts, Human Health Risks, and Mitigation Strategies Contaminación Ambiental por Metales Pesados: Una Revisión Sistemática de Revisiones sobre Impactos Ecotoxicológicos, Riesgos para la Salud Humana y Estrategias de Mitigación. v. 1, n. 3, 2025.
- LEITE, Diego De Oliveira; PRADO, Rogério Junqueira. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, jun. 2012.
- LI, Kai *et al.* A lantern-shaped fluorescent probe based on viologen/polyoxometalate for the detection of Ag⁺ in beverages and daily necessities. **Talanta**, v. 280, p. 126786, dez. 2024.
- LUNKES, M. *et al.* TERMINOLOGIA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE MATERIAIS: ANÁLISE DO TERMO “LIXVIAÇÃO”. [S.d.].

MANAHAN, S. E. **Environmental Chemistry**. [S.l.]: CRC Press, 2017.

MARZOLA, Elisabete Leide *et al.* Spatial modeling applied to environmental monitoring: identifying sources of potentially toxic metals in aquatic system. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 41, n. 3, p. 1339–1350, jun. 2019.

MCRAE, Reagan *et al.* In Situ Imaging of Metals in Cells and Tissues. **Chemical Reviews**, v. 109, n. 10, p. 4780–4827, 14 out. 2009.

MELO, Vander Freitas; GUEDES, Lauriane Guidolin. Do Aqua Regia and EPA 3051A methods underestimate the pseudo-total P content in clay soil fraction? **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. e015820, 2020.

MOREIRA, Fátima R.; MOREIRA, Josino C. A importância da análise de especiação do chumbo em plasma para a avaliação dos riscos à saúde. **Química Nova**, v. 27, n. 2, p. 251–260, abr. 2004.

MUNIZ, Daphne Heloisa De Freitas; OLIVEIRA-FILHO, Eduardo Cyrino. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da Saúde**, v. 4, n. 1, p. 83–100, 29 abr. 2008.

PU, Chunmei *et al.* A large Stokes shift peptide-based fluorescent probe for Cd²⁺ and Hg²⁺ detection in aqueous solution and its applications in bioimaging, real sample, logic gate and smartphone device. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 343, p. 126599, dez. 2025.

SANTOS, Aldeneidiane Santana Dos; ANJOS, José Ângelo Sebastião Araújo Dos. Evolução da contaminação do solo por metais tóxicos: o caso da Plumbum Mineração e Metalurgia Ltda, Santo Amaro, Bahia, Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 22, n. 1, p. 109–123, 31 mar. 2022.

SKOOG, D. A. *et al.* **Fundamentals of Analytical Chemistry**. [S.l.]: Cengage Learning, 2021.

WANG, Xinran *et al.* Fluorescent cellulose nanofibrils hydrogels for sensitive detection and efficient adsorption of Cu²⁺ and Cr⁶⁺. **Carbohydrate Polymers**, v. 347, p. 122748, jan. 2025.

WHO. **Health Risks of Heavy Metals from Long-Range Transboundary Air Pollution**. Copenhagen: World Health Organization Regional Office Europe, 2007.