



**Adsorção competitiva de mercúrio e arsênio em óxido de ferro sintético**

**Isabelle S. M. Costa¹ (G)\*, Daniel K. R. Cardoso¹ (PG), Ludmila F. Gonçalves¹ (G), Isabela C. F. Vasques¹ (PQ), Igor R. de Assis¹ (PQ), Jaime W. V. de Mello¹ (PQ), Claudia C. Windmoeller2 (PQ)**

isabelle.costa@ufv.br

1Universidade Federal de Viçosa, 2Universidade Federal de Minas Gerais



Este estudo avaliou a adsorção competitiva de mercúrio (Hg) e arsênio (As) em goethita sintética, buscando entender a interação entre eles em determinadas condições ambientais. Hg e As são poluentes relevantes em regiões de mineração, como Paracatu (MG). O óxido de ferro sintetizado buscou simular os sedimentos de Paracatu (MG) que foram caracterizados por DRX e testado em diferentes proporções de Hg (10-100 mg·L⁻¹) e As (10-300 mg·L⁻¹) em pH 7. Observou-se maior afinidade por espécies aniônicas de As (H₂AsO₄⁻ e HAsO₄²⁻), já que a superfície da goethita está positivamente carregada. No entanto, em alta concentração, o Hg competiu com o As e reduziu sua adsorção, mesmo predominando em espécies neutras (Hg(OH)₂ e HgClOH). A adsorção competitiva foi influenciada pelas concentrações relativas e das propriedades da goethita influenciadas pelo pH do meio. O estudo reforça a importância de avaliar sistemas multicomponentes para entender o efeito dos garimpos artesanais nesses ambientes ricos em As, como o presente aqui.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_



*Palavras-chave: Goethita, Drenagem Ácida, Contaminação, Sedimentos.*

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*



**Introdução**

O mercúrio (Hg) é um contaminante conhecido pelos malefícios à saúde humana e ao meio ambiente, sendo detectado até em regiões remotas como a Antártica (1). Suas principais fontes estão ligadas ao garimpo, pesticidas usados até a década de 80 e processos industriais (2). No garimpo, o Hg forma amálgama com o ouro, facilitando a extração deste metal, mas ao ser aquecido, se volatiliza e pode se dispersar a longas distâncias (3).

Em Paracatu (MG), o garimpo iniciado nos anos 1980 contribuiu para a presença de Hg na região.

A extração de ouro industrial também mobiliza arsênio (As), presente em minerais sulfetados e classificado como contaminante perigoso pela OMS (4). Estudos apontam a coexistência de Hg e As nos sedimentos da região (5), e a presença de drenagem ácida na localidade, decorrente da oxidação de sulfetos, o que agrava a contaminação ambiental (6).

Análises indicam a presença de óxidos de ferro nos sedimentos da localidade, que são conhecidos por sua alta capacidade de adsorção de metais pesados. Este trabalho investiga a interação entre Hg e As em óxido de ferro sintetizado, avaliando se a presença de As, em concentrações iguais ou menores, interferem na adsorção do Hg.

**Experimental**

*Identificação do óxido*

O óxido de ferro sintetizado foi sintetizado a partir de uma solução concentrada de ferro em pH 12, como metodologia de (7). Maiores detalhes estão em (8). Os óxidos foram caracterizados por difração de raios X (DRX), conduzida à temperatura ambiente com um difratômetro de ânodo de Cu (comprimento de onda: 1,54 Å). Os difratogramas resultantes foram interpretados com base em padrões de referência do banco de dados do Centro Internacional de Dados de Difração (ICDD).confirmando a predominância de goethita, como mostrado em (8).

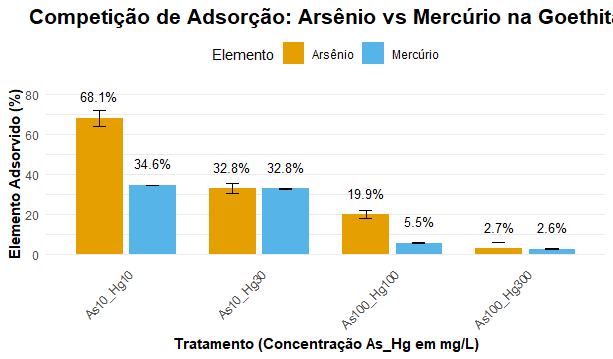
*Ensaios de adsorção*

Para os ensaios, 0,3 g do óxido foram pesados em tubos Falcon com 30 mL de solução de nitrato de sódio 0,1 mol·L⁻¹. As soluções contaminantes foram preparadas utilizando arseniato de sódio (As) e cloreto de mercúrio (II) (Hg). Testaram-se quatro combinações de concentrações (mg·L⁻¹): (i) 10 Hg + 10 As; (ii) 10 Hg + 30 As; (iii) 100 Hg + 100 As; (iv) 100 Hg + 300 As. O pH foi ajustado para 7, seguido de agitação por 4 h a 30 RPM; o pH foi então corrigido novamente e a agitação continuou por mais 20 h. Os experimentos foram realizados em triplicata para comprovar a reprodutibilidade dos resultados.

*Determinação dos contaminantes adsorvidos*

As amostras foram filtradas e os sobrenadantes analisados: arsênio por Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) utilizada em (9) e mercúrio por Análise Direta de Mercúrio (DMA) descrita em (10).

**Resultados e Discussão**

**Figura 1.** Percentual de adsorção de Hg e As em diferentes proporções de contaminantes.

No gráfico é possível observar que, nos tratamentos onde as concentrações dos metais são equivalentes, a adsorção do arsênio prevalece de maneira pontual, o que pode ser observado tanto para o primeiro quanto para o terceiro tratamento, indicando uma predileção do óxido pelas espécies de As. Já nos tratamentos onde a concentração de mercúrio está presente em maior quantidade, a adsorção de As reduz drasticamente, cerca de 35% entre o primeiro e o segundo tratamento e cerca de 17% entre o terceiro e quarto tratamento, evidenciando que, quando o mercúrio está presente em maior quantidade, ele consegue competir de forma mais pronunciada com o As pelos sítios de adsorção da goethita. A eficiente adsorção de arsênio em sedimentos pela goethita também foi descrita anteriormente (11).

Uma especiação realizada com o auxílio do programa Visual MINTEQ apontou que as espécies majoritárias em solução de cada contaminante, em pH 7, são H₂AsO₄⁻ e HAsO₄²⁻ (espécies aniônicas) para o arsênio, e Hg(OH)₂ e HgClOH (espécies neutras) para o mercúrio. O PCZ da goethita pode ser o responsável por essa predileção pelas espécies de As, já que essa propriedade influencia

fortemente a adsorção. O ponto onde cargas positivas e negativas na superfície são iguais é chamado PCZ (ponto de carga zero). Em pHs

mais baixos ou mais altos que o valor do PCZ, a superfície do óxido é respectivamente positiva ou negativa (12). O PCZ para a goethita

é reportado como 9 (13), indicando que podem estar presentes

cargas positivas capazes de interagir com o As.

Mesmo as espécies de mercúrio predominantes nas soluções possuindo carga neutra, o que poderia reduzir a interação com cargas possivelmente presentes na superfície do óxido, estudos demonstraram que essas espécies conseguem interagir com a superfície da goethita mesmo em pH 7 (14). Estudos ainda indicaram que a espécie Hg(OH)₂ foi a que mais contribuiu para a adsorção de Hg.

**Conclusões**

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a goethita sintetizada apresenta maior afinidade por espécies aniônicas de arsênio em pH 7, condição na qual sua superfície está predominantemente carregada positivamente. Essa preferência resulta em elevada eficiência de adsorção de arsênio quando os dois contaminantes estão em concentrações equivalentes. Entretanto, quando o mercúrio está presente em maior concentração, observa-se uma redução considerável na retenção de arsênio, indicando que o Hg²⁺, mesmo predominando em espécies neutras como Hg(OH)₂ é capaz de competir de forma eficaz pelos sítios ativos da goethita. Esses dados evidenciam a complexidade das interações competitivas em sistemas multicomponentes.

Diante disso, estudos futuros podem aprofundar a compreensão dos mecanismos de adsorção, a fim de elucidar as ligações químicas formadas na superfície da goethita. Também seria relevante investigar o desempenho da goethita de amostras reais de sedimento.

**Agradecimentos**

Agradeço ao Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas e às agências de fomento: CAPES, CNPq e FAPEMIG.

**Referências**

1. R. P. de Andrade, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
2. L. D. de Lacerda, Quím. Nova 1997, 20, 196-199.
3. R. C. C. M. Micaroni; M. I. M. S. Bueno; W. F. Jardim, Quím. Nova 2000, 23, 487-495.
4. World Health Organization (WHO), Trace Elements in Human Nutrition and Health, WHO, Geneva, 1996.
5. D. K. R. Cardoso, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 2023.
6. P. S. de Rezende, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
7. U. Schwertmann; R. M. Cornell, Iron Oxides in the Laboratory, Wiley, 2000.
8. D. Kroehling; R. W. Veloso; J. W. V. de Mello; A. M. X. de Carvalho; M. F. de Oliveira; I. C. F. Vasques, Environ. Geochem. Health 2025, 47, 285.
9. L. F. Pereira; A. L. S. da Silva; J. M. O. Sandin; C. V. P. A. Andrade; A. A. Vieira; A. C. Saar; K. D. B. Morais; I. C. F. Vasques, Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2024, 56 (5), 736-751.
10. C. C. Windmöller; N. C. Silva; P. H. M. Andrade; L. A. Mendes; C. M. Valle, Analytical Methods 2017,
11. D. Mohan; C. U. Pittman Jr., J. Hazard. Mater. 2007, 142 (1-2), 1-53.
12. A. B. Henriques, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
13. R. M. Cornell; U. Schwertmann, The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrence, and Uses, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
14. P. Bonnissel-Gissinger; et al., J. Colloid Interface Sci. 1999, 215 (2), 313-322.