

# **Biorreagentes – Aplicações na Remoção de Metais Pesados Contidos em Efluentes Líquidos por Biossorção/Bioflotação**

**Bruno Abreu Calfa**

Aluno de graduação do curso de Engenharia Química  
Departamento de Química  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
E-mail: brunocalfa@qui.puc-rio.br

**Maurício Leonardo Torem**

Professor Associado  
Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
E-mail: torem@dcmm.puc-rio.br

## **Resumo**

Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma análise dos principais aspectos sobre o uso de biomassas como biorreagentes na remoção de metais pesados contidos em efluentes líquidos. As vantagens de se utilizar biossorbentes ao invés de sorbentes convencionais estão notadamente na relação custo-benefício inerente a esta tecnologia contemporânea. Algas, bactérias, fungos e materiais biológicos em geral (casca de coco, madeira, turfa etc.) têm revelado avidéz na captura de íons metálicos em ambientes aquosos, sendo que sua ubiquidade diminui o custo total de sistemas de tratamento. Exemplos de pesquisas e patentes são discutidos, demonstrando o sucesso dessa tecnologia emergente.

**Palavras-chave:** Biorreagentes, biossorção, bioflotação, efluentes líquidos, biomassa, metais pesados, radionuclídeos

## **Abstract**

The objective of this work is to present a review concerning the use of biomasses as bioreagents in the removal of heavy metals in the liquid effluents treatment. The advantages of using these biosorbents instead of conventional sorbents lie on the cost benefit relations inherent in this recent technology. Algae, bacteria, fungi and biological materials (coconuts shells, wood, peat etc.) have shown avidity of metal ions uptaking in aqueous environments and which their ubiquity decreases the treatment systems overall cost. Research and patents examples are discussed, showing the success of this emergent technology.

**Keywords:** Bioreagents, biosorption, liquid effluents, biomass, heavy metals, radionuclides, patents.

## 1. Introdução

Através dos anos, os avanços na tecnologia têm permitido que as áreas de pesquisa e da indústria entendam cada vez mais os fenômenos físicos e químicos. Este melhor entendimento pode ser utilizado para otimizar técnicas, processos e equipamentos. Ao se realizar progressos, inevitáveis danos ambientais são criados ou intensificados, em particular, os efluentes líquidos contendo metais pesados/tóxicos. Portanto, tornou-se extremamente importante, nos anos recentes, a pesquisa de métodos para diminuir os níveis de poluição/contaminação causados pela presença de, principalmente, metais pesados e radionuclídeos em efluentes líquidos, atendendo a legislação ambiental vigente.

Alguns dos processos adotados para o tratamento de efluentes contaminados por metais são: precipitação; oxidação/redução; separação sólido/líquido, tais como sedimentação ou flotação; tecnologia de membrana, troca iônica e adsorção. O tratamento pode ser operado tanto em batelada ou em processo contínuo. A seleção do processo de tratamento do efluente líquido em questão dependerá dos metais e sua respectiva físico-química em soluções aquosas (Wase et al., 1997).

Por biorreagentes, entendem-se biomassas vegetais (plantas), microrganismos, cascas e restos de material biológico em geral, de preferência não patogênicos a fim de evitar a transmissão de doenças no seu manuseio. Estes biorreagentes podem ser empregados vivos ou mortos. Define-se biossorção como a remoção de espécies, compostos ou particulados metálicos em solução por biomassa sem atuação do seu metabolismo. Caso a remoção depender do metabolismo, denomina-se bioacumulação, que somente ocorre se o biorreagente estiver vivo. O uso de biorreagentes mortos torna-se uma vantagem, já que eles não sofrem limitações devido à toxicidade do meio e não requerem renovação do meio de cultura (Kiran et al., 2005).

Este trabalho tem como objetivo revisar o estudo de biorreagentes capazes de remover íons de metais pesados e radionuclídeos de soluções aquosas e também destacar sistemas comerciais que produzem e utilizam biomassa para o tratamento de efluentes líquidos.

## 2. Aspectos Fundamentais da Captação de Metais por Biorreagentes

Grande parte do estudo científico voltado para o estudo da sorção de metais por biorreagentes tem buscado entender mais claramente os mecanismos responsáveis pela captação. Esta busca é necessária, pois tem o intuito de explorar o potencial dos biorreagentes como sorventes de diversos tipos de metais. Em geral, as variáveis mais representativas são: pH, obtenção de isotermas de captação, estudos cinéticos, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de transmissão (MET), medições do potencial zeta e obtenção de espectros de infravermelho (IV).

O estudo da influência do pH do meio na remoção de metais tem o objetivo de determinar a faixa de pH na qual ocorreu maior remoção. Paralelamente, realizam-se medições do potencial zeta da biomassa na presença e na ausência dos metais estudados. Ambos os ensaios podem fornecer dados sobre a carga geral da parede celular do biorreagente, em solução aquosa, em diferentes valores de pH. A composição da camada externa da biomassa, onde ocorrerá a biossorção, varia dentre os diversos biorreagentes estudados. Tsezos et al. (1996) destacam três classes de biopolímeros microbianos que servem de sítios para captação de metais: proteínas, ácidos nucleicos e polissacarídeos. Tais componentes possuem, em sua estrutura, as espécies químicas amina, carboxila, hidroxila, fosfato, sulfato e outros que podem se ligar aos íons metálicos.

A obtenção de isotermas de captação é útil para se modelar a biossorção, ou seja, determinar como a capacidade de biossorção do biorreagente varia de acordo com a concentração de metal no

equilíbrio (Zouboulis et al., 1999). Os modelos de isotermas de captação mais utilizados são o de Langmuir e o de Freundlich (Tabela 2.1).

<b>Tabela 2.1</b> Modelos de Isotermas de Captação	
<p><b>Modelo de Langmuir</b></p> $q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$ <p><b>Linearização:</b></p> $\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_m K_L} + \frac{C_e}{Q_m}$ <p><math>q_e</math> - captura de metal no equilíbrio (mg.g<sup>-1</sup>)  <math>C_e</math> - concentração da espécie metálica em solução no equilíbrio (mg.l<sup>-1</sup>)  <math>Q_m</math> - constante: captação máxima de metal pela biomassa (mg.g<sup>-1</sup>)  <math>K_L</math> - constante: afinidade entre o bioissorvente e o metal (g.mg<sup>-1</sup>)</p>	<p><b>Modelo de Freundlich</b></p> $q_e = K C_e^{1/n}$ <p><b>Linearização:</b></p> $\ln q_e = \ln K + 1/n \ln C_e$ <p><math>q_e</math> - captura de metal no equilíbrio (mg.g<sup>-1</sup>)  <math>C_e</math> - concentração da espécie metálica em solução no equilíbrio (mg.l<sup>-1</sup>)  <math>K</math> - constante: capacidade do adsorvente (mg<sup>1-1/n</sup>.L<sup>1/n</sup>.g<sup>-1</sup>)  <math>1/n</math> - intensidade da adsorção (adimensional)</p>

As análises da cinética da bioissorção informam as expressões da taxa de variação de captação de metal pela biomassa no tempo. Os dados cinéticos auxiliam na identificação do mecanismo da bioissorção e são indispensáveis para o projeto de reatores de uma planta de tratamento. Os modelos cinéticos mais usados são o de pseudo-primeira ordem e o de pseudo-segunda ordem (Tabela 2.2) (Ho e McKay, 1998).

<b>Tabela 2.2</b> Modelos Cinéticos	
<p><b>Modelo de Pseudo-primeira Ordem</b></p> $\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_1 - q_t)$ <p><b>Solução e Linearização:</b></p> $\log(q_1 - q_t) = \log(q_1) - \frac{k_1}{2,303} t$ <p><math>k_1</math> - constante de velocidade (min<sup>-1</sup>)  <math>q_1</math> - quantidade de metal sorvido no equilíbrio (mg.g<sup>-1</sup>)  <math>q_t</math> - quantidade de metal sorvido no tempo <math>t</math> (mg.g<sup>-1</sup>)</p>	<p><b>Modelo de Pseudo-segunda Ordem</b></p> $\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_2 - q_t)^2$ <p><b>Solução e Linearização:</b></p> $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_2^2} + \frac{1}{q_2} t$ <p><math>k_2</math> - constante de velocidade (g.mg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>)  <math>q_2</math> - quantidade de metal sorvido no equilíbrio (mg.g<sup>-1</sup>)  <math>q_t</math> - quantidade de metal sorvido no tempo <math>t</math> (mg.g<sup>-1</sup>)</p>

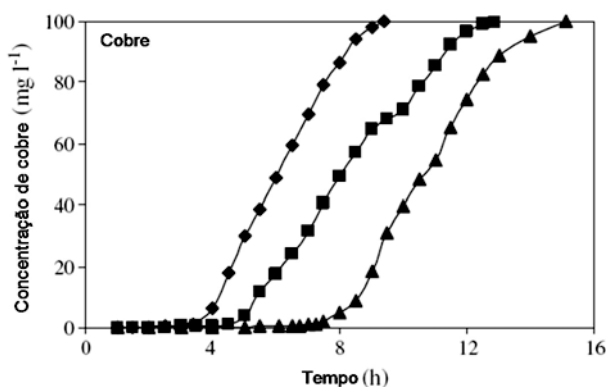
O uso do MEV e do MET auxilia na elucidação dos mecanismos envolvidos na bioadsorção, bem como as características químicas e elementares do biorreagente. O MEV pode ser acoplado ao equipamento EDS (“*Energy Dispersive System*”) o qual possibilita a determinação da composição qualitativa e semi-qualitativa das amostras a partir da emissão de raios-X característicos. Tanto o MEV/EDS e o MET possibilitam uma visualização da morfologia da biomassa antes e após o contato com a espécie metálica estudada e informam a densidade eletrônica nas células microbianas, indicando se houve adsorção, absorção, precipitação (Srivastava e Thakur, 2006; Torem et al., 2006). Os espectros de IV fornecem dados sobre a natureza da interação célula-metal na bioadsorção, ou seja, podem-se verificar quais grupamentos funcionais (carbonila, hidroxila, amino) estão envolvidos na bioadsorção ao se avaliar alterações nos picos obtidos no espectro de IV da biomassa antes e após o contato com o bioadsorvente (Akar e Tunali, 2005; Pan et al., 2006).

Gadd et al. (1995) analisaram exaustivamente os possíveis mecanismos da remoção de metais, metalóides e radionuclídeos por biorreagentes. Para biomassas mortas e seus derivados, alguns mecanismos apontados foram adsorção, troca iônica e seqüestro do sorbato em questão, ao passo que para biomassas vivas, outros mecanismos, dessa vez dependentes do metabolismo, são possíveis, tais como precipitação como sulfetos, complexação por sideróforos e outros metabólitos, seqüestro por proteínas e por peptídeos ligantes de metais e outros.

### 3. Estudo de Casos

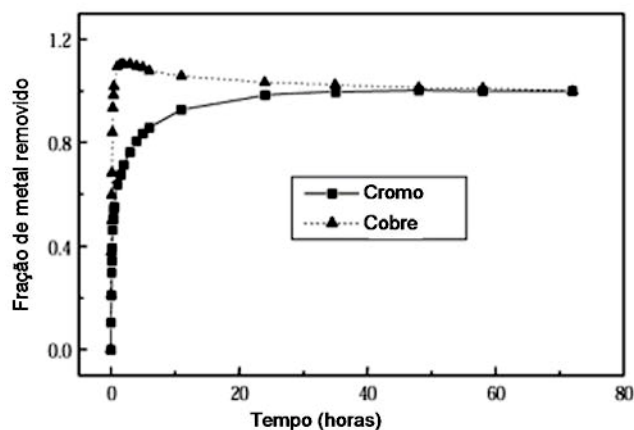
Muitos trabalhos revelam, essencialmente, experimentos realizados em batelada, em escala laboratorial, para avaliar o potencial da biomassa na bioadsorção de metais. Porém, tem aumentado o número de pesquisas que indicam a aplicação dos biorreagentes em sistemas de separação sólido/líquido como flotação e também em colunas de leito fluidizado, empacotado ou fixo. Essa transição da escala de bancada para a industrial é importante e pode ser verificada em algumas patentes de sistemas de bioadsorção já existentes.

Velan et al. (2005) utilizaram a alga marinha *Ulva reticulata* para estudar sua bioadsorção de cobre, cobalto e níquel numa coluna de leito empacotado de fluxo ascendente. Os resultados mostraram que, na altura do leito de 25 cm, a capacidade de captura do metal foi de  $56,3 \pm 0,24$ ,  $46,1 \pm 0,07$  e  $46,5 \pm 0,08$  mg.g<sup>-1</sup> de cobre, cobalto e níquel, respectivamente. A fim de reusar o bioadsorvente, estudos de regeneração da alga foram realizados utilizando-se CaCl<sub>2</sub> e três ciclos de sorção-dessorção. A Figura 3.1 mostra a curva de ruptura para a bioadsorção de cobre. O comportamento de um sistema composto por um sorvente e um poluente numa coluna é representado, graficamente, pela curva de ruptura e esta análise é fundamental para o projeto de uma coluna de bioadsorção.



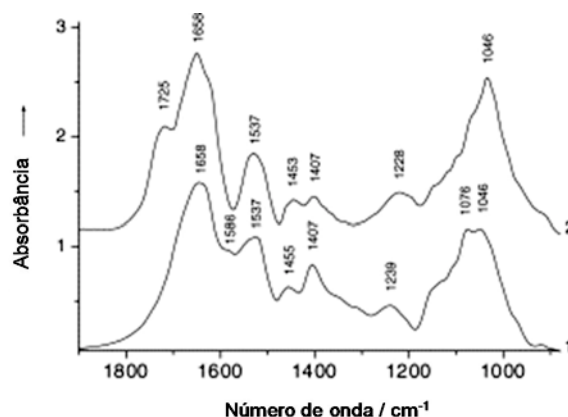
**Figura 3.1** Curva de ruptura para bioadsorção de cobre por *U. reticulata* em diferentes alturas de leito: (◆) 15 cm, (■) 20 cm e (▲) 25 cm. Taxa de fluxo 5 ml.min<sup>-1</sup>, concentração inicial de cobre de 100 mg.l<sup>-1</sup> e pH da solução de cobre de entrada 5,5.

Já a alga marrom *Sargassum sp.*, estudada por Silva et al. (2003), foi submetida a testes de sorção em batelada de íons  $\text{Cr}^{3+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  em pH fixo igual a 3,5. Isotermas de Langmuir (capacidade máxima de captação de 1,30 e 11,08  $\text{mmol.g}^{-1}$  para cromo e cobre, respectivamente) e de Freundlich (capacidade do bioissorvente de 1,11 e 0,86  $\text{mmol.g}^{-1}$  para cromo e cobre, respectivamente) foram obtidas. Os autores também testaram a cinética da bioissorção para os dois metais, concomitantemente, em diferentes concentrações iniciais ( $C_0$ ) (Figura 3.2), verificando que o equilíbrio demorou 48h para ser atingido.



**Figura 3.2** Cinética da bioissorção de cromo e cobre por *Sargassum sp.* ( $C_0 \text{ Cr(III)} = 1,10 \text{ mmol/l}$  e  $C_0 \text{ Cu(II)} = 0,93 \text{ mmol/l}$ ) (Silva et al., 2003)

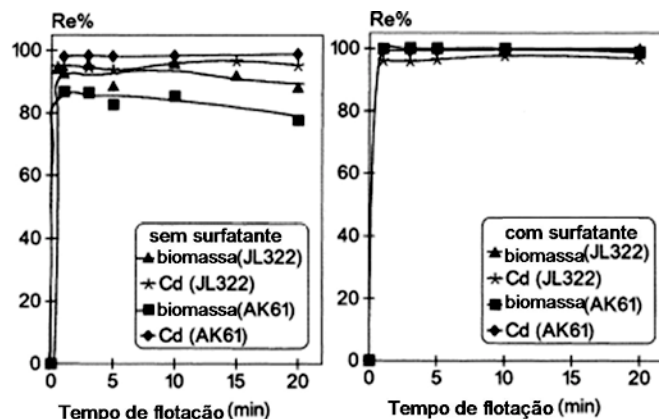
A levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi estudada por Lin et al. (2005) na bioissorção de íons  $\text{Au}^{3+}$ . Os autores verificaram que a captação máxima de metal pela biomassa alcançou 53  $\text{mg.g}^{-1}$  de metal quando 2  $\text{g.l}^{-1}$  da biomassa foram misturados com 1  $\text{mM}$  de  $\text{Au}^{3+}$  por 1 hora a  $30^\circ\text{C}$  e pH igual a 3,0. O objetivo central do trabalho foi estudar a bioissorção através de métodos espectroscópicos, tais como espectroscopia de IV, difração de raios-X e espectroscopia fotoeletrônica de raios-X. A Figura 3.3 exibe o resultado da espectroscopia de IV. Os autores concluíram que as bandas de absorção representaram a presença de grupos amino e carboxílicos, típicos de sacarídeos e peptídeos, que revestem a parede celular da levedura.



**Figura 3.3** Espectro de IV de (1) *S. cerevisiae* na ausência e (2) na presença de  $\text{Au}^{3+}$  por 48h (Lin et al. (2005))

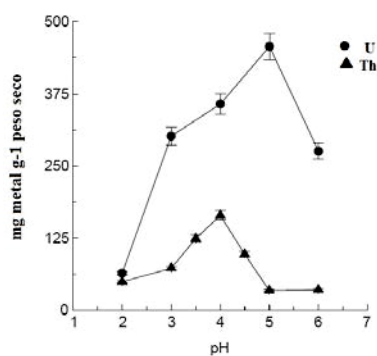
Uma técnica que tem despertado o interesse de vários cientistas no campo da bioissorção é a flotação, que combinada com a bioissorção recebe o nome de bioflotação. Alguns microrganismos possuem alto grau de hidrofobicidade devido à composição de sua parede celular, tornando desnecessária a adição de um surfatante no sistema de flotação. Alguns tipos de flotação, tais como flotação por ar disperso e por ar dissolvido, têm sido empregados nos estudos. Zouboulis et al. (1999) estudaram a bioissorção em batelada de íons cádmio por duas linhagens de actinomicetos

(AK61 e JL322) seguida pela flotação por ar disperso das bactérias carregadas do metal numa coluna. O surfatante catiônico utilizado foi brometo de cetil-trietil-amônio (CTMA-Br), a fim de aumentar a hidrofobicidade do biorreagente. Na bioflotação, dentre outros parâmetros, avaliou-se a influência do tempo de flotação das biomassas em contato com o metal (Figura 3.4) e foi concluído que a bioflotação resultou num processo bastante rápido, atingindo quase 100% de remoção das biomassas carregadas de metal em 1 minuto.



**Figura 3.4** Influência do tempo de flotação das biomassas carregadas de metal sem e com o surfatante CTMA-Br (Zouboulis et al. (1999))

Sar et al. (2004) pesquisaram a bioissorção de radionuclídeos (U e Th) por uma linhagem da bactéria *Pseudomonas*. Dentre outros parâmetros estudados, avaliou-se a influência do pH na bioissorção dos radionuclídeos pela biomassa liofilizada. O resultado está exibido na Figura 3.5. Concluiu-se que condições extremamente ácidas desfavoreceram a bioissorção e, à medida que os valores de pH fossem aumentando, a bioissorção das duas espécies também aumentou, porém estabilizou após atingir condições próximas da neutralidade.



**Figura 3.5** Efeito do pH na bioissorção de U e Th (Sar et al., (2004))

Além de pesquisas em escala de bancada, há evidências de sistemas comerciais de bioissorção que estão disponíveis. Wase et al. (1997) citam alguns sistemas baseados em algas. A companhia Bio-recovery Systems Inc. produz o bioissorvente AlgaSORB<sup>TM</sup>, que é baseado em *Chlorella* imobilizada em géis de sílica ou poliácridamida. Este biorreagente é capaz de remover concentrações de metal de 100 mg.l<sup>-1</sup> até abaixo de 1 mg.l<sup>-1</sup> e pode ser utilizado em mais de 100 ciclos de sorção/dessorção. Outro exemplo de bioissorvente desenvolvido para sistemas industriais é chamado de Bio-fix, criado no antigo U.S. Bureau of Mines. Trata-se de um bioissorvente granulado composto por uma variedade de biomassas, incluindo algas imobilizadas em esferas de polipropileno. Este biorreagente pode ser empregado na remoção de metais alcalino-terrosos e tem sido usado no tratamento de drenagem ácida de minas. Os autores também destacam o processo AMT-Bioclaim<sup>TM</sup> desenvolvido pela Advanced Mineral Technologies Inc., o qual utiliza a bactéria *Bacillus subtilis* como subproduto de um processo de fermentação. Este bioissorvente mostrou ser eficiente na remoção de Ag, Cd, Cu, Pb e Zn. Outros exemplos de sistemas comerciais de

biossorção podem ser encontrados na mesma referência e no website <http://www.patentstorm.us/>, que mostra patentes norte-americanas. Basta inserir palavras-chave, tais como “Biosorption”, “Bioflotation”, “Wastewater Treatment Biomass” e outras do mesmo gênero na lacuna “Search Patents”.

#### 4. Considerações Finais

Este trabalho abordou alguns exemplos do uso de biorreagentes na remoção de metais de efluentes líquidos, tanto em escala de bancada como em sistemas comerciais. A importância dessa nova tecnologia é evidente devido ao baixo custo de sistemas à base de biomassas e à alta eficiência dos biorreagentes para capturarem metais em baixas concentrações de soluções aquosas.

Apesar do grande avanço realizado para uma melhor compreensão dos mecanismos da captação de metais por biomassas, ainda existem muitas investigações a serem feitas à cerca da biossorção dos biorreagentes, tanto no nível molecular (mecanismo) quanto na sua implementação em plantas industriais a fim de tratar efluentes líquidos diretamente.

#### Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao CNPq, CAPES e FAPERJ pelo seu apoio financeiro.

#### Referências Bibliográficas

- AKAR, T., TUNALI, S. Biosorption performance of *Botrytis cinerea* fungal by-products for removal of Cd(II) and Cu(II) ions from aqueous solutions. **Minerals Engineering**. v. 18, n. 11, p. 1099-1109, 2005.
- AXTELL, N. R., STERNBERG, S. P. K., CLAUSSEN, K. Lead and nickel removal using *Microspora* and *Lemna minor*. **Bioresource Technology**. v. 89, n. 1, p. 41-48, 2003.
- CIRELLI, A. F., MIRETZKY, P., SARALEGUI, A. Simultaneous heavy metal removal mechanism by dead macrophytes. **Chemosphere**. v. 62, p. 247-254, 2005.
- FORSTER, C. F., KESKINKAN, O. et al. Heavy metal adsorption properties of a submerged aquatic plant (*Ceratophyllum demersum*). **Bioresource Technology**. v. 92, n. 2, p. 197-200, 2004.
- GADD, G. M., WHITE, C., WILKINSON, S.C. The Role of Microorganisms in Biosorption of Toxic Metals and Radionuclides. **International Biodeterioration & Biodegradation**. v. 35, n. 1-3, p. 17-40, 1995.
- GUIBAL, E., ROULPH, C., LECLOIREC, P. Infrared Spectroscopic Study of Uranyl Biosorption by Fungal Biomass and Materials of Biological Origin. **Environmental Science & Technology**. v. 29, n. 10, p. 2496-2503, 1995.
- HO, Y. S., MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**. v. 34, n. 5, p. 451-465., 1999.
- KIRAN, I., AKAR, T., TUNALI, S. Biosorption of Pb(II) and Cu(II) from aqueous solutions by pretreated biomass of *Neurospora crassa*. **Process Biochemistry**. v. 40, n. 11, p. 3550-3558, 2005.
- KRATOCHVIL, D., VOLESKY, B. Advances in the biosorption of heavy metals. **Trends In Biotechnology**. v. 16, n. 7, p. 291-300, 1998.
- LIN, Z., WU, J., XUE, R., YANG, Y. **Spectrochimica Acta Part A - Molecular And Biomolecular Spectroscopy**. v. 61, n. 4, p. 761-765, 2005.



- LOVLEY, D. R., COATES, J.D. Bioremediation of metal contamination. **Current Opinion In Biotechnology**. v. 8, n. 3, p. 285-289, 1997.
- MATIS, K. A., ZOUBOULIS, A. I. et al. Equilibrium and kinetic modeling of chromium(VI) biosorption by *Aeromonas caviae*. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects**. v. 242, n. 1-3, p. 93-104, 2004.
- MATIS, K. A., ZOUBOULIS, A. I., GRIGORIADOU, A. A. et al. Metal biosorption – flotation. Application to cadmium removal. **Applied Microbiology Biotechnology**. v. 45, p. 569-573, 1996.
- MATIS, K. A., ZOUBOULIS, A. I., HANCOCK, I. C. Biosorptive flotation in metal ions recovery. **Separation Science And Technology**. v. 29, n. 8, p. 1055-1071, 1994.
- MURALEEDHARAN, T. R., PHILIP, L., IYENGAR, L., VENKOBACHAR, C. Application Studies of Biosorption for Monazite Processing Industry Effluents. **Bioresource Technology**. v. 49, n. 2, p. 179-186, 1994.
- OZDEMIR, G., CEYHAN, N., OZTURK, T. et al. Biosorption of chromium(VI), cadmium(II) and copper(II) by *Pantoea* sp. TEM18. **Chemical Engineering Journal**. v. 102, n. 3, p. 249-253, 2004.
- PAGNANELLI, F., PAPINI, M. P., TORO, L. et al. Biosorption of Metal Ions on *Arthrobacter* sp.: Biomass Characterization and Biosorption Modeling. **Environmental Science & Technology**. v. 34, n. 13, p. 2773-2778, 2000.
- PAN, J., GE, X., LIU, R., TANG, H. Characteristic features of *Bacillus cereus* cell surfaces with biosorption of Pb(II) ions by AFM and FT-IR. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**. v. 52, n. 1, p. 89-95, 2006.
- PRISCIANDARO, M., VEGLIO, F., BEOLCHINI, F. Sorption of copper by olive mill residues. **Water Research**. v. 37, n. 20, p. 4895-4903, 2003.
- SAR, P., KAZY, S. K., D'SOUZA, S. F. Radionuclide remediation using a bacterial biosorbent. **International Biodeterioration & Biodegradation**. v. 54, n. 2-3, p. 193-202, 2004.
- SCHNEEGURT, M. A., JAIN, J. C., MENICUCCI, J. A. et al. Biomass Byproducts for the Remediation of Wastewaters Contaminated with Toxic Metals. **Environmental Science & Technology**. v. 35, n. 18, p. 3786-3791, 2001.
- SILVA, E. A., COSSICH, E. S., TAVARES, C. G., FILHO, L. C., GUIRARDELLO, R. Biosorption of binary mixtures of Cr(III) and Cu(II) ions by *Sargassum* sp. **Brazilian Journal Of Chemical Engineering**. v. 20, n. 3, p. 213-227, 2003.
- SMITH, R. W., SCHNEIDER, I. A. H., RUBIO, J. Biosorption of metals onto plant biomass: exchange adsorption or surface precipitation? **International Journal Of Mineral Processing**. v. 62, n. 1-4, p. 111-120, 2001.
- SRIVASTAVA, S., THAKUR, I. S. Biosorption Potency of *Aspergillus niger* for Removal of Chromium (VI). **Current Microbiology**. v. 53, n. 3, p. 232-237, 2006.
- TOREM, M. L., PINO, G. H., MESQUITA, L. M. S., PINTO, G. A. S. Biosorption of cadmium by green coconut shell powder. **Minerals Engineering**. v. 19, n. 5, p. 380-387, 2006.
- TSEZOS, M., REMOUDAKI, E., ANGELATOU, V. A Study of the Effects of Competing Ions on the Biosorption of Metals. **International Biodeterioration & Biodegradation**. v. 38, n. 1, p. 19-29, 1996.
- TÜZÜN, I., BAYRAMOĞLU, G., YALÇIN, E. et al. Equilibrium and kinetic studies on biosorption of Hg(II), Cd(II) and Pb(II) ions onto microalgae *Chlamydomonas reinhardtii*. **Journal of Environmental Management**. v. 77, n. 2, p. 85-92, 2005.
- VELAN, M., VIJAYARAGHAVAN, K., JEGAN, J., PALANIVELU, K. Biosorption of copper, cobalt and nickel by marine green alga *Ulva reticulata* in a packed column. **Chemosphere**. v. 60, n. 3, p. 419-426, 2005.
- VOLESKY, B. Advances in biosorption of metals: Selection of biomass types. **FEMS Microbiology Reviews**. v. 14, n. 4, p. 291-302, 1994.
- VOLESKY, B. Biosorbents for metal recovery. **Trends in Biotechnology**. v. 5, n. 4, p. 96-101, 1987.



- VOLESKY, B., FIGUEIRA, M. M., CIMINELLI, V. S. T. et al. Biosorption of metals in brown seaweed biomass. **Water Research**. v. 34, n. 1, p. 196-204, 2000.
- VOLESKY, B., VIEIRA, R. H. S. F. Biosorption: a solution to pollution? **International Microbiology**. v. 3, p. 17-24, 2000.
- WASE, J., FORSTER, C. et alii. **Biosorbents for metal ions**. Grã Bretanha: Taylor & Francis Ltda, 1997. 238p.
- ZHANG, L., ZHOU, D., GUO, S. L. Mechanisms of lead biosorption on cellulose chitin beads. **Water Research**. v. 39, n. 16, p. 3755-3762, 2005.
- ZOUBOULIS, A. I., KEFALA, M. I., MATIS, K.A. Biosorption of cadmium ions by *Actinomycetes* and separation by flotation. **Environmental Pollution**. v. 104, n. 2, p. 283-293, 1999.
- ZOUBOULIS, A. I., LOUKIDOU, M. X., MATIS, K. A. Biosorption of toxic metals from aqueous solutions by bacteria strains isolated from metal-polluted soils. **Process Biochemistry**. v. 39, n. 8, p. 909-916, 2004.

**Bruno Abreu Calfa**

Aluno de graduação do curso de Engenharia Química  
Departamento de Química  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
Rua Marquês de São Vicente, 225 Gávea Rio de Janeiro RJ  
CEP: 22.453-900  
E-mail: brunocalfa@qui.puc-rio.br

**Maurício Leonardo Torem**

Professor Associado  
Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
Rua Marquês de São Vicente, 225 Gávea Rio de Janeiro RJ  
CEP: 22.453-900  
E-mail: torem@dcmm.puc-rio.br