

## 25. Meio ambiente

### **Bionanocompósito à base de resíduo de levedura e magnetita: síntese, caracterização e aplicação na sorção de Cu(II) em meio aquoso**

José, Julia C.; juuliacj@gmail.com; Debs, Karina. B.; kdebs@gmail.com;

Labuto, Geórgia; geolabuto@gmail.com; Carrilho, Elma. N. V. M.; elma.carrilho@gmail.com;

Universidade Federal de São Carlos

#### **Resumo**

Um biossorvente preparado com resíduos de levedura impregnados com nanopartículas de magnetita foi sintetizado, caracterizado e aplicado na sorção de íons Cu(II) em meio aquoso. Este subproduto da indústria sucroalcooleira foi utilizado devido à sua abundância, baixo valor agregado, e à presença de diversos sítios ativos em sua superfície, tornando-o uma alternativa viável para descontaminação de efluentes. O material nanomodificado (NPM) foi obtido pelo método de coprecipitação, no qual sais de Fe(II) e Fe(III) foram titulados com  $\text{NH}_4\text{OH}$ . Após a síntese, a impregnação de magnetita sobre a levedura (BL) foi conduzida adicionando-se esta biomassa na suspensão de NPMs, sob aquecimento e agitação constantes, para formação do bionanocompósito, BL-NPM. Este, assim como BL e NPM puros, foram caracterizados pelas técnicas DRX, FTIR e MEV. Os testes de sorção de Cu(II) com BL, NPM e BL-NPM foram conduzidos em batelada. Nestes, após agitação, houve a separação de fases da mistura Cu(II)-biossorvente para análise do sobrenadante e determinação de Cu por FAAS. Os modelos isotérmicos de Langmuir, Freundlich e Dubinin-Radushkevich foram ajustados aos dados experimentais, e mostraram que a sorção entre biossorvente e Cu(II) foi favorável para todos os materiais, onde NPM e BL apresentaram afinidades semelhantes por Cu(II), e BL-NPM melhor adsorveu o analito. A caracterização por DRX permitiu a determinação das estruturas cristalinas dos nanomateriais, em contraste com a estrutura amorfa de BL. Os espectros de FTIR entre 4000 e 400  $\text{cm}^{-1}$ , indicaram a presença de bandas de N-H, C-H, C=O, N-O, O-H, C-C, e Fe-O (para os nanomateriais). Através das imagens de MEV, 7000X, foi possível verificar a eficiência de síntese de BL-NPM por impregnação de NPM em BL.

**Palavras-chave:** levedura, magnetita, nanocompósito, biossorção.

## Introdução

Principalmente a partir da Revolução Industrial, os problemas ambientais vêm sendo cada vez mais intensos, devido à exploração dos recursos naturais, de maneira vertiginosa, realizada pelo homem (Barbieri, 2004). Com isso, há uma grande quantidade de resíduos produzidos pelas indústrias que vêm sendo destinados de maneira a comprometer grande parte dos ecossistemas. Desta forma, acarretam, dentre outras adversidades, a contaminação de ambientes terrestres e aquáticos por metais pesados, que não podem ser degradados de maneira natural, portanto, ao se acumularem, tornam-se nocivos aos seres vivos por sua potencialidade tóxica (Olaniran et al., 2013). Por isso, foi sendo necessário pensar em maneiras de tratar as matrizes aquosas, por exemplo, visando uma diminuição ou remoção dos íons metálicos presentes, devido à importância da qualidade dos recursos hídricos para a manutenção da vida em geral.

Partindo deste princípio, destaca-se o processo de biossorção, que faz uso de biomassas provenientes de resíduos, tais como as leveduras descartadas por indústrias sucroalcooleiras. Trata-se de uma técnica na qual atuam forças que promovem uma interação entre os íons metálicos e a biomassa, ocasionando uma descontaminação facilitada do meio

aquoso em questão (Volesky, 2004). A biossorção é considerada vantajosa por possuir valor econômico favorável, elevada renovação na natureza, alta capacidade de remoção de íons metálicos e, conseqüentemente, ser um processo pertinente para remediação de ambientes contendo metais potencialmente tóxicos (Volesky, 2004).

Juntamente à técnica de biossorção, o uso de nanopartículas ferromagnéticas, devido às suas propriedades, tem um papel muito útil para a melhoria da capacidade de sorção da biomassa. O superparamagnetismo é uma de suas principais características, fazendo com que, devido ao tamanho menor, as nanopartículas sejam magnetizadas em toda sua estrutura com a mesma intensidade. Com isso, há mais interações entre as partículas e, ao ser aplicado um campo magnético, elas são capazes de responder de maneira integral, também não havendo magnetização residual quando o campo for retirado (Caruntu et al., 2007).

Deste modo, esta pesquisa torna-se relevante porque, além do baixo custo, a biomassa utilizada é um resíduo extremamente abundante e de fácil acesso, com grande importância na descontaminação ambiental, principalmente, após a impregnação de nanopartículas de magnetita, esperando-

se assim, resultados promissores para a progressão no tratamento de efluentes contaminados por metais pesados.

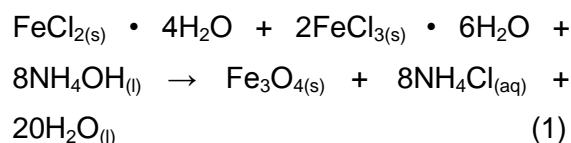
### Objetivos

O trabalho teve como propósito produzir, avaliar e caracterizar um biossorvente a partir de resíduos de leveduras impregnados com nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), para sorção de íons  $\text{Cu(II)}$ . A biomassa em questão foi utilizada devido à sua vasta disponibilidade, ao baixo valor agregado, e à alta quantidade de sítios ativos negativos em sua superfície, o que a torna uma alternativa viável para estudos visando a descontaminação de ambientes aquosos contendo íons metálicos. Visando, ainda, o aumento do potencial adsorptivo do material e a facilidade de remoção do meio, nanopartículas ferromagnéticas foram impregnadas à superfície da biomassa.

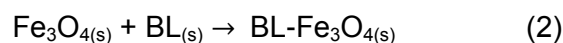
### Material e Métodos

Para a síntese de nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) foi empregado o método de coprecipitação (Labuto et al., 2018; Panneerselvam et al., 2011), em que sais de cloreto de  $\text{Fe(II)}$  e  $\text{Fe(III)}$ , tetra e hexa hidratados, respectivamente, em meio ácido ( $\text{HCl}$ ), foram titulados com solução alcalina de  $\text{NH}_4\text{OH}$ , mantendo constante agitação. A obtenção do material nanomodificado está apresentada

na Reação 1.

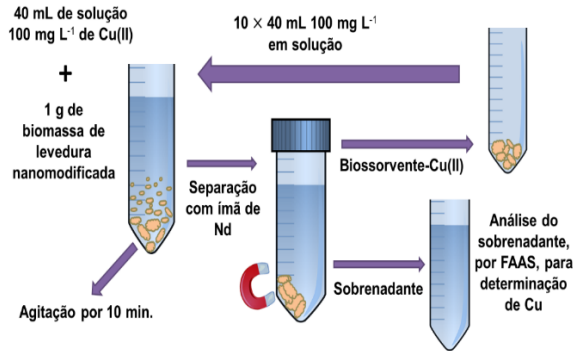


Para a síntese de bionanocompósito à base de levedura, a biomassa foi adicionada à suspensão aquosa, contendo as nanopartículas de magnetita, como indica a Reação 2.



Onde BL representa a biomassa de levedura

Após a síntese do bionanocompósito, uma solução monoelementar de  $\text{Cu(II)}$  foi adicionada ao biossorvente, para os testes de sorção em bateladas, que foram realizados em triplicadas, repetindo o procedimento 10 vezes. Então, a mistura foi agitada para que houvesse interação entre biossorvente-contaminante. Depois, foi possível separar o sobrenadante e analisá-lo para testar a capacidade de sorção do biossorvente para  $\text{Cu(II)}$ . No caso do bionanocompósito, o sobrenadante foi separado com o auxílio de um ímã de neodímio, enquanto para a biomassa *in natura*, uma centrífuga foi utilizada. O procedimento descrito está apresentado na Figura 1.



**Figura 1.** Esquema para a realização do teste de sorção de Cu(II), em bateladas, utilizando biomassa de levedura nanomodificada (BL-NPM) e biomassa de levedura *in natura* (BL).

A partir dos dados de sorção obtidos experimentalmente, foram aplicados diferentes modelos de isotermas de adsorção, que são modelos matemáticos, cujo papel é auxiliar o entendimento dos processos que ocorrem experimentalmente, a fim de descrever os fenômenos ocorrentes mantendo temperatura constante, além de prever, avaliar e comparar o desempenho do adsorvente em questão, buscando otimizar sua capacidade de sorção (Chen, 2015).

Quando o equilíbrio é atingido, tem-se uma concentração de adsorvato remanescente no meio ( $C_e$ ) e uma quantidade de adsorvato retirada do meio pelo adsorvente ( $Q_e$ ). A partir dessas duas grandezas é que as curvas de adsorção são plotadas, de acordo com cada modelo teórico escolhido (Limousin et al., 2007), entre os quais serão empregados os modelos de isotermas de Langmuir, Freundlich e Dubinin-Radushkevich (D-R)

para avaliação dos dados experimentais obtidos.

A isoterma de Langmuir considera que cada sítio de sorção tem a capacidade de adsorver uma molécula em superfícies homogêneas, assim, a adsorção ocorre em monocamada e em sítios específicos do adsorvente (Debrassi et al., 2011).

A equação não-linear do modelo de Langmuir pode ser escrita como na Equação 1:

$$Q_e = \frac{Q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo  $Q_e$  a quantidade de adsorvato retida no equilíbrio ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $Q_m$  a capacidade de adsorção máxima em monocamada ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $C_e$  a concentração de adsorvato presente na solução após a sorção, no equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e  $b$  sendo uma constante relacionada com a energia de sorção ( $\text{L mg}^{-1}$ ).

Ao contrário da isoterma de Langmuir, a de Freundlich permite que o processo de adsorção ocorra em uma superfície heterogênea e em multicamadas. Seu modelo não-linear é representado na Equação 2:

$$Q_e = K_f C_e^{1/n_f} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde  $K_f$  está relacionado à afinidade de sorção ( $\text{L mg}^{-1}$ ) e  $n_f$  tem relação com

heterogeneidade da superfície do material sorvente (adimensional).

O modelo de Dubinin-Radushkevich (D-R) envolve o processo de adsorção em multicamadas, em superfícies homogêneas ou heterogêneas, com interações de Van der Waals entre as moléculas (Chen, 2015; Foo e Hameed, 2010). A expressão não-linear do modelo isotérmico D-R está apresentada na Equação 3:

$$Q_e = Q_{DR} \exp(-B_{DR} \varepsilon^2) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde  $Q_{DR}$  é a capacidade de saturação teórica,  $B_{DR}$  é uma constante de energia relacionada ao processo de adsorção e  $\varepsilon$  é o potencial *Polanyi*.

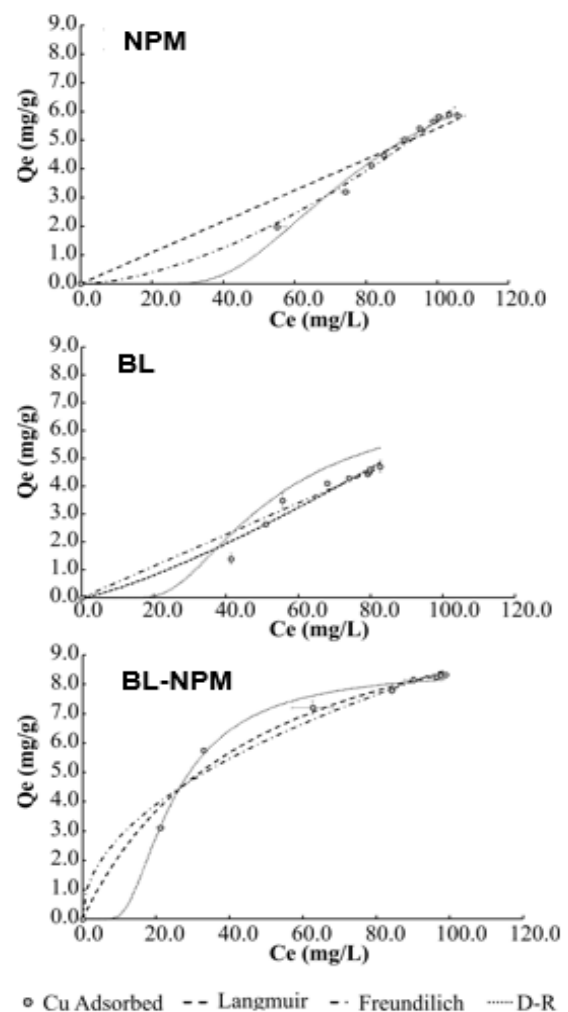
Com isso, foi possível, a partir das isotermas e seus parâmetros, determinar qual dos modelos se ajustou de maneira mais satisfatória aos dados experimentais utilizando biomassa de levedura *in natura* (BL), nanopartículas de magnetita (NPM) e biomassa de levedura nanomodificada magneticamente (BL-NPM).

Além disso, os biossorventes, antes e após a sorção, foram caracterizados utilizando diferentes técnicas (DRX, FTIR e MEV) a fim de auxiliar a compreensão de aspectos relacionados a cada um dos materiais.

## Resultados e Discussão

Os modelos isotérmicos de

Langmuir, Freundlich e Dubinin-Radushkevich (D-R) foram ajustados aos dados experimentais. A Figura 2 mostra as isotermas obtidas e a Tabela 1 mostra os resultados das constantes,  $r^2$  e  $\chi^2$  obtidos para cada modelo teórico avaliado para fins de comparação entre os materiais adsorventes empregados.



**Figura 2.** Curvas de adsorção e isotermas de Langmuir, Freundlich e Dubinin-Radushkevich (D-R) para sorção de Cu(II) por nanopartículas de magnetita (NPM), biomassa de levedura (BL) e bionanocompósito magnético (BL-NPM),  $n = 3$ .

**Tabela 1.** Valores da Capacidade de Sorção Experimental ( $SC_{exp}$ ), parâmetros de isothermas e avaliação do erro do  $\chi^2$  para sorção de Cu por NPM (nanopartículas magnéticas), BL (biomassa de levedura) e BL-NPM (biomassa de levedura nanomodificada). SD = desvio padrão; SE = erro padrão fornecido pela adaptação do modelo aos dados experimentais,  $n = 3$ , d.f. = 9 ( $\alpha = 0,05$ ).

	NPM	BL	BL-NPM
$SC_{exp}$ (mg/g)	$5,85 \pm 0,08$ (SD)	$4,7 \pm 0,20$ (SD)	$8,3 \pm 0,2$ (SD)
<b>Langmuir</b>			
$Q_{max}$ (mg/g)	$6685 \pm 2,2 \times 10^6$ (SE)	$3503 \pm 6,167 \times 10^5$ (SE)	$12,41 \pm 0,98$ (SE)
$b$ (L/g)	$8,1 \times 10^{-6} \pm 268,0 \times 10^{-5}$ (SE)	$1,6 \times 10^{-5} \pm 285,0 \times 10^{-5}$ (SE)	$0,021 \pm 0,004$ (SE)
$r^2$	0,9321	0,9435	0,9834
$\chi^2$	0,2445	0,1445	0,1429
<b>Freundlich</b>			
$K_f$ (L/mg)	$0,029 \pm 0,002$ (SE)	$0,042 \pm 0,006$ (SE)	$0,8 \pm 0,4$ (SE)
$n_f$	$0,61 \pm 0,04$ (SE)	$0,8 \pm 0,1$ (SE)	$2,1 \pm 0,3$ (SE)
$r^2$	0,9889	0,9584	0,97281
$\chi^2$	0,0401	0,1065	0,2334
<b>D-R</b>			
$Q_{DR}$ (mg/g)	$9,8 \pm 0,5$ (SE)	$6,7 \pm 0,3$ (SE)	$8,6 \pm 0,1$ (SE)
$B_{DR}$ (mol <sup>2</sup> /kJ)	$9,1 \times 10^{-4} \pm 6,8 \times 10^{-5}$ (SE)	$3,9 \times 10^{-4} \pm 3,0 \times 10^{-5}$ (SE)	$7,7 \times 10^{-5} \pm 4,6 \times 10^{-6}$ (SE)
$E$ (kJ/mol)	23,44	35,80	80,58
$T$ (K)	298,15	298,15	298,15
$r^2$	0,9879	0,9872	0,9950
$\chi^2$	0,0433	0,0329	0,0427

De acordo com a Figura 2, pode-se inferir que a adsorção entre adsorvente e adsorvato foi favorável para todos os materiais empregados, uma vez que os perfis das curvas são do tipo L (Limousin et al., 2007). Além disso, quanto menor o ângulo entre a faixa inicial da curva e o eixo y, maior a afinidade entre o

adsorvente e o adsorvato (Labuto et al., 2015). Assim, realizando uma avaliação visual da inclinação inicial conclui-se que NPM e BL apresentam afinidade semelhante por Cu(II) enquanto BL-NPM exibe maior afinidade por este íon.

De acordo com a Tabela 1, é importante notar que todos os materiais obtiveram um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) com valores próximos a 1, indicando similaridade entre o modelo e os dados experimentais, sendo que o modelo D-R ajustado para os dados de BL-NPM (0,9950) foi o melhor resultado obtido. O teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) também foi utilizado para avaliar o melhor ajuste dos modelos teóricos não-lineares aos dados experimentais (Foo e Hameed, 2010), e seus pequenos valores indicam maiores semelhanças com as isothermas experimentais, principalmente ao utilizar o modelo D-R

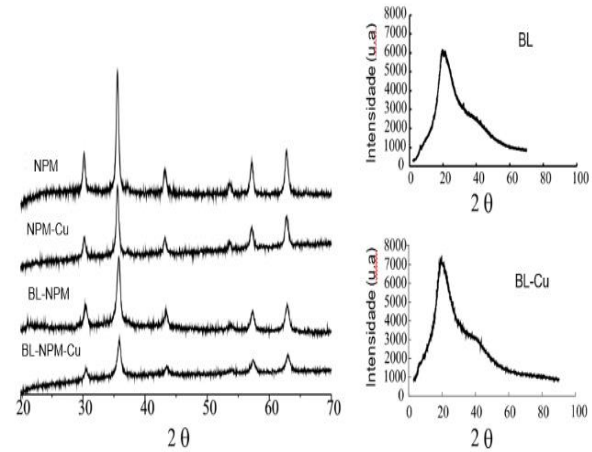
A afinidade entre o adsorvente e o adsorvato é fornecida pelo coeficiente b da equação de Langmuir, e quanto menor a b, maior a afinidade de sorção (Labuto et al., 2015). Entretanto, é impossível comparar os valores do coeficiente b obtidos por Langmuir para todos os materiais, uma vez que esses modelos não se ajustaram bem aos dados experimentais e os erros do parâmetro fornecido foram elevados para NPM e BL.

Alguns parâmetros podem explicar os resultados observados nas isothermas,

como  $n_f$  (2,1 para BL-NPM), do modelo de Freundlich, mostrado na Tabela 1. Como  $n_f$  está entre 1 e 10, indica um processo favorável, enquanto se o valor estivesse fora deste intervalo, seria desfavorável (Liu e Wang, 2013).

Adicionalmente, também foi possível observar que as energias (E) envolvidas no processo de adsorção, segundo o modelo D-R, na Tabela 1, foram 23,44 kJ/mol (NPM), 35,80 kJ/mol (BL) e 80,58 kJ/mol (BL-NPM), o que significa que a sorção de Cu por BL-NPM é um tipo de processo químico relacionado ao seu valor de E ser maior que 40 kJ/mol (Al-Anber, 2011). Este fato justifica a eliminação do modelo de Freundlich para descrever a isoterma de adsorção de Cu(II) pelo NPM, uma vez que esse modelo está relacionado a uma adsorção física e não química (Al-Anber, 2011). Por estas razões, sugere-se que o modelo D-R seja o mais adequado para descrever os fenômenos de adsorção de Cu(II) por todos os materiais estudados.

Além disso, todos os materiais, antes a após a sorção, foram analisados por Difração de Raios-X, para avaliar suas propriedades ao observar o arranjo de seus átomos e outros constituintes estruturais. Estes resultados estão apresentados na Figura 3.



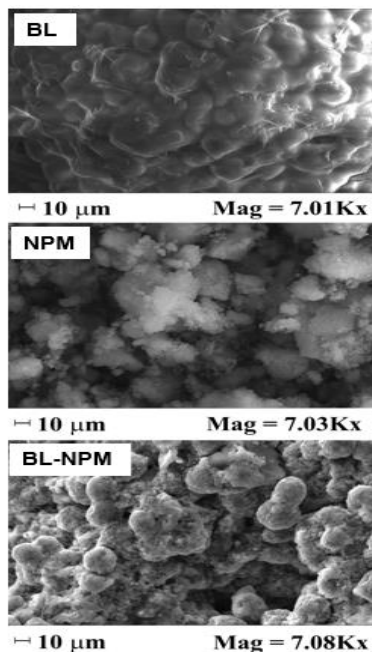
**Figura 3.** Difratomogramas de raios-X de biomassa de levedura antes (BL) e após a sorção de Cu(II) (BL-Cu), nanopartículas de magnetita antes (NPM) e após a sorção de Cu(II) (NPM-Cu), bionanocompósito magnético antes (BL-NPM) e após a sorção de Cu(II) (BL-NPM-Cu). Os difratogramas dos nanomateriais foram deslocados para melhor visualização e comparação dos picos.

Ao observar estes difratogramas, presentes na Figura 3, pode-se perceber que as leveduras BL e BL-Cu não apresentaram picos de reflexão, diferentemente das amostras contendo nanopartículas de magnetita (NPM, NPM-Cu, BL-NPM e BL-NPM-Cu). Isto ocorreu como o esperado, visto que a biomassa de levedura é composta por microrganismos inativos e matéria orgânica e, por isso, possui estrutura amorfa (sem forma definida).

As nanopartículas de magnetita possuem uma estrutura cristalina cúbica indicada pelos picos de reflexão na análise de DRX. Assim, observando a existência desses picos peculiares da

magnetita no difratograma da BL-NPM, pode-se inferir que ocorreu a impregnação da biomassa com a nanopartícula. Os picos refletores que se destacam correspondem aos planos 220, 311, 400, 422, 511 e 440, respectivamente, da esquerda para a direita (Labuto et al., 2018).

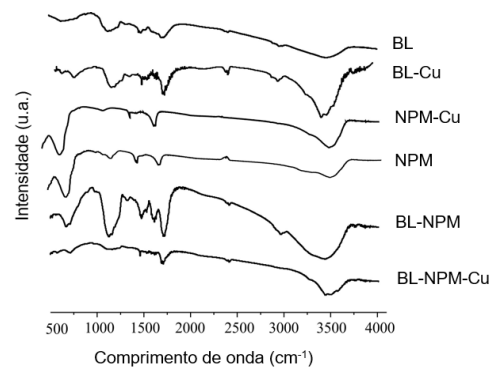
A caracterização dos materiais sintetizados também foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para que as amostras de biomassa de levedura (BL), nanopartícula de magnetita (NPM) e do nanocompósito (BL-NPM) pudessem ser observadas em 7000 vezes de ampliação, para a obtenção de imagens externas e que apresentassem a superfície do material de forma mais detalhada (Figura 4).



**Figura 4.** Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de biomassa de levedura (BL), nanopartículas de magnetita (NPM), e do bionanocompósito (BL-NPM).

Na imagem de BL, na Figura 4, pode-se observar a estrutura externa das células da levedura. Quanto à MEV de NPM, pode-se perceber que as nanopartículas de magnetita estão aglomeradas, devido a suas propriedades magnéticas, o que gera atração entre elas. Na imagem de MEV de BL-NPM mostra que a estrutura externa da biomassa de levedura após a nanomodificação mudou, ou seja, observou-se que a magnetita envolvia a superfície da levedura, mostrando que havia interação entre elas e que, de fato, ocorreu impregnação satisfatoriamente (Labuto et al., 2018).

Além desses dados, a análise FTIR forneceu informações sobre os comprimentos de onda em que os materiais absorveram a radiação infravermelha. A Figura 5 mostra os espectros de transmitância vs. comprimento de onda, possibilitando a discussão sobre os grupos funcionais presentes em cada um dos materiais.



**Figura 5.** Espectro de FTIR de biomassa de levedura antes (BL) e após a sorção de cobre (BL-Cu), nanopartículas de magnetita antes



(NPM) e após sorção de cobre (NPM-Cu), biomassa de levedura nanomodificada antes (BL-NPM) e após sorção de cobre (BL-NPM-Cu).

De acordo com a Figura 5, os espectros de infravermelho de BL e BL-Cu mostram bandas com comprimentos de onda em 1040, 1233, 1402, 1529, 1690, 2924 e 3230  $\text{cm}^{-1}$ , que correspondem respectivamente a grupo -C-C-, estiramento N-O, estiramento OH, dobramento N-H, estiramento C=O, grupo C-H alifático e a última banda pode ser atribuída ao estiramento N-H ou dobramento O-H. (Silverstein et al., 2012).

Assim, observando estes possíveis grupos funcionais em BL e BL-Cu, pode estar implícita a presença de sítios negativos na superfície da biomassa, como hidroxila e carbonila, que estão envolvidos no processo de sorção.

Além disso, percebe-se que NPM, BL-NPM, NPM-Cu e BL-NPM-Cu possuem uma nova banda de estiramento (Fe-O) a 573  $\text{cm}^{-1}$ , relacionada à presença das nanopartículas ferromagnéticas. A banda está presente, também, no bionanocompósito (BL-NPM), devido à interação entre o BL e a nanopartícula, como esperado, indicando alta eficiência do biossorvente sintetizado.

## Conclusão

Com este trabalho, foi possível observar que a massa de Cu retida pelo

biossorvente nanomodificado, no equilíbrio, foi maior que a obtida para os precursores NPM e BL e que houve afinidade entre adsorvente e adsorvato, apresentando resultados favoráveis. Além disso, vale ressaltar que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de D-R para todos os modelos, principalmente para BL-NPM, com um valor de  $r^2 = 0,9950$  e de  $\chi^2 = 0,0427$ .

A partir dos resultados de caracterização, foi possível concluir que houve, de fato, a impregnação de nanopartículas ferromagnéticas à superfície da biomassa, havendo uma melhora do potencial adsorvativo do material e facilitando a retirada de contaminantes do meio aquoso em questão.

## Referências

- Al-Anber, M. A. (2011). *Thermodynamics Approach in the Adsorption of Heavy Metals*. In: *Thermodynamics Interaction Studies - Solids, Liquids and Gases*, Ed. Juan Carlos Moreno Piraján, University of the Andes, IntechOpen.
- Barbieri, J. C. (2004). *Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos*. São Paulo: Editora Saraiva.
- Caruntu, D.; Caruntu, G. e O'Connor, C. J. (2007). Magnetic properties of variable-size  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles synthesized from non-aqueous homogenous solutions of

polyols. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *40*, 5801-5809. doi: 10.1088/0022-3727/40/19/001.

Chen, X. (2015). Modeling of experimental adsorption isotherm data. *Information*, *6*, 14-22. doi:10.3390/info6010014.

Debrassi, A.; Largura, M. C. T. e Rodrigues, C. A. (2011). Adsorção do corante vermelho congo por derivados da o-carboximetilquitosana hidrofobicamente modificados. *Química Nova*, *34*(5), 764-770. doi: 10.1590/S0100-40422011000500007.

Foo, K. Y. e Hameed, B. H. (2010) Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, *156*, 2–10. doi: 10.1016/j.cej.2009.09.013.

Labuto, G.; Trama, B.; Silveira, G. C.; Guarnieri, B. S.; Silva, F. V. e Colazzo, R. (2015). Metals uptake by live yeast and heat-modified yeast residue. *Revista Ambiente e Água*, *10*(3), 510-519. doi: 10.4136/ambi-agua.1577.

Labuto, G.; Cardona, D. S.; Debs, K. B.; Imamura, A. R.; Bezerra, K. C. H.; Carrilho, E. N. V. M. e Haddad, P. S. (2018). Low cost agroindustrial biomasses and ferromagnetic bionanocomposites to cleanup textile effluents. *Desalination and Water Treatment*, *12*, 80–89. doi: 10.5004/dwt.2018.21914.

Limousin G, Gaudet J. P.; Charlet L.; Szenknect S., Barthès V. e Krimissa M. (2007). Sorption isotherms: A review on

physical bases, modeling and measurement. *Applied Geochemistry*, *22*, 249-275. doi:

10.1016/j.apgeochem.2006.09.010.

Liu, J. e Wang, X. (2013). Novel Silica-Based Hybrid Adsorbents: Lead(II) Adsorption Isotherms. *The Scientific World Journal*, *2013*, 1-6. doi: 10.1155/2013/897159.

Milani, P. A.; Debs, K. B.; Labuto, G. e Carrilho, E. N. V. M. (2018). Agricultural solid waste for sorption of metal ions: part I – characterization and use of lettuce roots and sugarcane bagasse for Cu(II), Fe(II), Zn(II), and Mn(II) sorption from aqueous medium. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*, 1–10. doi: 10.1007/s11356-018-1615-0.

Olaniran, A. O.; Balgobind, A. e Pillay, B. (2013). Bioavailability of Heavy Metals in Soil: Impact on Microbial Biodegradation of Organic Compounds and Possible Improvement Strategies. *International Journal of Molecular Sciences*, *14*, 10197–10228. doi: 10.3390/ijms140510197.

Panneerselvam, P.; Morad, N. e Tan, K. (2011). Magnetic nanoparticle (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) impregnated onto tea waste for the removal of nickel (II) from aqueous solution. *Journal Hazardous Materials*, *186*, 160–168. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.10.102.

Silverstein R. M.; Webster F. X.; e Kiemle D. J. (2012) *Spectrometric identification of*

*organic compounds*. 8a ed., New Jersey:  
Wiley.

Volesky, B. (2004). *Sorption and biosorption*. BV-Sorbex, Inc., St.Lambert, Quebec.

### **Financiamento**

As autoras agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Proc. 2016/06271-4) pelo apoio financeiro.

### **Agradecimento**

As autoras agradecem aos técnicos laboratoriais MSc. João Luiz Consonni, MSc. Leonardo J. Hayasida e MSc. Yves Aikawa pela ajuda na aquisição de dados instrumentais deste trabalho.