



## II-490 - APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS NO ESTUDO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO DA BIORSORÇÃO DA MISTURA Cr(III)-Ni(II)

**Tiago Dias Martins<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Químico pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Mestrando em Engenharia Química na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

**Márcia Teresinha Veit**

Doutora pela Universidade Estadual de Maringá

**Márcia Regina Fagundes Klen**

Doutora pela Universidade Estadual de Maringá

**Luiz Gustavo de Lima Vaz**

Engenheiro Químico pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE).

**Edson Antonio da Silva**

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Albert Einstein, 500 – Cidade Universitária "Zeferino Vaz" - Campinas - SP - Caixa Postal 6066 - CEP: 13083-970 - Brasil - Tel: (19) 3521-3968 - e-mail: [tiagodmeq@feq.unicamp.br](mailto:tiagodmeq@feq.unicamp.br)

### RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo o estudo da biossorção binária dos íons  $\text{Cr}^{3+}$  e  $\text{Ni}^{2+}$  utilizando como biossorvente a alga marinha pré-tratada *Sargassum filipendula*. Os experimentos da biossorção binária foram realizados em uma coluna de leito fixo. As condições de operação foram: massa de biossorvente de 8g, pH da solução de alimentação de 3.0, temperatura de 30°C, vazão de 6 mL.min<sup>-1</sup> e concentrações de alimentação de 1, 1.5, 2, 3, 5 e 6 meq/L para a mistura binária com as frações equivalentes de cromo iguais a 0.25, 0.50 e 0.75. A modelagem matemática dos dados experimentais obtidos foi realizada utilizando duas abordagens: isotermas de adsorção, empregando os modelos de Langmuir, Langmuir-Freundlich e Jain e Snoeyink, e redes neurais artificiais. Os resultados mostraram que: i) o íon cromo exerceu na mistura uma grande competitividade com o íon níquel, mesmo em reduzidas quantidades; ii) a isoterma de Langmuir foi a que melhor representou os dados de equilíbrio binário e, iii) a modelagem utilizando as redes neurais artificiais é mais eficiente do que se utilizada isotermas de adsorção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento de efluentes, Remoção de Metais, Modelagem Matemática, Estudo do Equilíbrio.

### INTRODUÇÃO

A tecnologia dos processos de adsorção ainda é pouco desenvolvida se comparada à outros processos de separação, como destilação, absorção, etc., principalmente devido à falta de dados experimentais completos para que se possam desenvolver novos modelos e avaliar aqueles previamente apresentados na literatura (Romanielo, 1999). A compreensão completa sobre a adsorção torna-se mais escassa quando se trata de efluentes líquidos e, muito mais se espécies iônicas estiverem presentes no meio a ser tratado.

O processo de adsorção em sistemas multicomponentes é um fenômeno complexo que requer atenção para o projeto de colunas de remoção de metais pesados de efluentes industriais, visto a grande quantidade de espécies de íons presentes em sua composição e as suas interações.

Os efluentes industriais, em geral, são constituídos por uma mistura de íons que no processo de biossorção competem entre si pelos sítios de ligação do material biossorvente, desta forma é essencial à determinação da seletividade dos íons presentes em solução pela biomassa. Normalmente esta análise é realizada através do estudo de equilíbrio do sistema de interesse, onde os dados experimentais de equilíbrio são representados por meio de modelos de isotermas de adsorção (que são equações matemáticas usadas para descrever em termos quantitativos a adsorção de solutos por sólidos à temperatura e pH constantes). As isotermas de Langmuir e Freundlich são os modelos mais utilizados para representar dados de equilíbrio de biossorção de sistemas monocomponente (Silva et al., 2002).

Os parâmetros obtidos das isotermas em sistema monocomponente quando utilizadas nas isotermas binárias não fornecem bons resultados, na predição das quantidades adsorvidas. Isto ocorre devido a complexidade da competição entre os íons. Portanto, nestes sistemas os parâmetros das isotermas devem ser determinados a partir de dados experimentais dos sistemas multicomponentes.

## ISOTERMAS BINÁRIAS

Na modelagem de dados de equilíbrio de sistemas binários a isoterma de Langmuir é o modelo mais utilizado. A expressão matemática que representa o modelo de isoterma de Langmuir para uma mistura binária é dada pela seguinte equação:

$$q_1^* = \frac{q_m b_1 C_1^*}{1 + b_1 C_1^* + b_2 C_2^*} \quad \text{equação (1)}$$

em que,  $q_m$  e  $b_j$  são constantes da isoterma de Langmuir,  $C_1^*$  e  $C_2^*$  são as concentrações das espécies na fase fluida e  $q_1^*$  é a concentração da espécie 1 na fase sólida. As constantes da isoterma de Langmuir têm significado físico, o parâmetro  $b_j$  representa a razão entre as taxas de sorção e dessorção. Assim sendo, valores elevados desse parâmetro indicam forte afinidade do íon pelos sítios do material adsorvente, enquanto que o parâmetro  $q_m$  representa o número total de sítios disponíveis no material biossorvente (Fagundes-Klen et al., 2007).

Adicionando-se as constantes ( $k_1$ ,  $k_2$ ) na forma de potência ao numerador e ao denominador da isoterma de Langmuir (equação (1)), obtém-se a isoterma do tipo Langmuir-Freundlich (Ruthven, 1984), representada pela expressão:

$$q_1^* = \frac{q_m b_1 C_1^{*k_1}}{1 + b_1 C_1^{*k_1} + b_2 C_2^{*k_2}} \quad \text{equação (2)}$$

No modelo original da isoterma de Langmuir, as espécies químicas 1 e 2 competem pela ocupação do mesmo sítio. Jain e Snoeyink (1973) propuseram um modelo de adsorção para misturas binárias baseado na hipótese de que parte da adsorção ocorre sem competição quando  $q_{m1} \neq q_{m2}$ . Para  $q_{m1} > q_{m2}$ , o número de sítios na qual não existe competição é dada pela diferença ( $q_{m1} - q_{m2}$ ). A representação matemática do modelo proposto por Jain e Snoeyink (1973), é dada por:

$$q_1^* = \frac{(q_{m1} - q_{m2}) b_1 C_1^*}{1 + b_1 C_1^*} + \frac{q_{m2} b_1 C_1^*}{1 + b_1 C_1^* + b_2 C_2^*} \quad \text{equação (3)}$$

$$q_2^* = \frac{q_{m2} b_2 C_2^*}{1 + b_1 C_1^* + b_2 C_2^*} \quad \text{equação (4)}$$

O primeiro termo do lado direito na equação (3) é a expressão da isoterma de Langmuir para o número de moléculas da espécie 1 que adsorve sem competição e é proporcional aos números de sítios ( $q_{m1} - q_{m2}$ ). O segundo termo representa o número de moléculas da espécie 1 que adsorve sobre os sítios  $q_{m1}$  com competição com a espécie 2, baseado no modelo de adsorção competitiva de Langmuir. O termo  $q_2^*$  na equação (3) representa o número de moléculas da espécie 2 que adsorve sobre os sítios  $q_{m2}$  com competição com a espécie 1.

## REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são um algoritmo matemático, baseado na estrutura de um neurônio biológico, que possuem a capacidade de relacionar parâmetros de entrada (variáveis independentes) e saída (variáveis dependentes) aprendendo com exemplos fornecidos (Baughman e Liu, 1995), sem requerer



conhecimento algum acerca da relação entre as variáveis que interferem no processo em questão. Por esse motivo, são conhecidas como aproximadores universais de funções.

As RNAs são formadas por vários elementos, os neurônios artificiais, que procuram simular a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico. O funcionamento de um neurônio artificial é semelhante ao de um neurônio biológico: possui entradas e saídas que são conectadas à entrada do neurônio subsequente. Às variáveis de entradas são associados os pesos sinápticos que as modificam, ponderando sua importância para a unidade de processamento em questão. Esses sinais ponderados são somados, formando o coeficiente de ativação, que é representado pela equação:

$$\alpha_{k_i} = \sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j \quad \text{equação (5)}$$

em que:  $\alpha_{k_i}$  é valor de ativação do neurônio  $i$  da camada  $k$ ,  $w_{i,j}$  é peso da variável  $j$  em relação ao neurônio  $i$ ,  $x_j$  é a variável de alimentação no neurônio e  $n$  é o número de alimentações do neurônio.

A saída do neurônio é calculada por meio de uma função de ativação que pode assumir diversas formas. Recomenda-se a utilização de funções diferenciáveis e que apresentem uma não-linearidade suave. Destacam-se as funções tangente hiperbólica, logística etc. (Haykin, 2005).

As RNAs têm sido aplicadas em diversas áreas da Engenharia Química, dentre elas: estudo de equilíbrio de dados binários de adsorção e troca iônica, estudo de equilíbrio líquido-líquido-vapor, otimização e controle de processos, etc (Canevesi et al., 2008; Corazza, 2004; Fagundes-Klen et al., 2007; Martins et al., 2006; Schmitz et al., 2006). Além disso, têm se mostrado de fácil implementação, robustas no tratamento de dados com ruídos e eficientes, especialmente nos problemas em que não se tem uma formulação analítica adequada ou não se tem um conhecimento explícito acessível sobre os mesmos, ou ainda, naqueles em que os dados estão “contaminados” por ruído ou o próprio problema modifica-se com o tempo (Braga et al., 2000).

O emprego de uma RNA depende da habilidade em adaptá-la ao problema considerado por meio de mudanças nos pesos sinápticos, o que corresponde à etapa de treinamento da rede, de modo a aumentar sua eficiência (Mittal e Zhang, 2000).

Para o treinamento de uma rede neural é necessário um conjunto de dados, que seja suficiente para garantir que a rede realmente aprenda as relações entre as variáveis e não apenas “decore exemplos”. Não existe uma regra que estabeleça quantos pontos são necessários. Espera-se apenas que quanto mais pontos forem usados, menor será o erro na validação.

Os objetivos deste trabalho foram: i) obter os dados do equilíbrio da bioadsorção da mistura binária dos íons  $\text{Cr}^{3+}$  e  $\text{Ni}^{2+}$  pela alga marinha *Sargassum filipendula* em uma coluna de leito fixo nas seguintes condições de operação: 6 mL.min<sup>-1</sup>, 30 °C, pH da solução de alimentação igual a 3.0 e as composições, em fração equivalente de  $\text{Cr}^{3+}$  utilizadas de 0.25, 0.50 e 0.75 e, ii) modelar os dados de equilíbrio utilizando modelos isotermas de adsorção e a técnica alternativa de redes neurais artificiais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A biomassa utilizada foi a alga marinha marrom *Sargassum filipendula*, comumente encontrada na costa litorânea do Brasil. A alga foi lavada com água corrente, enxaguada em água destilada e seca a 60°C por 24 horas. O pré-tratamento químico da biomassa foi feito numa relação segundo Matheickal e Yu (1999), de 25 g de biomassa in natura por litro de solução de cálcio. O tempo de contato entre a biomassa e a solução de cálcio ( $\text{CaCl}_2$  0,2 M) foi de 24 horas, sob baixa agitação e em temperatura ambiente ( $\approx 25^\circ\text{C}$ ). O pH inicial da solução de  $\text{CaCl}_2$  foi ajustada em 5.0 usando HCl 1.0N. Então, a biomassa foi lavada sucessivas vezes com água destilada e seca a 60°C por 24 horas, triturada e separada em diferentes frações de tamanho. As partículas de diâmetro médio de 2.6 mm foram utilizadas para os experimentos em coluna.

Todas as soluções binárias foram preparadas a partir do sal  $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dissolvido em água deionizada.



O módulo experimental utilizado era constituído de uma coluna de aço inoxidável, encamisada, com 2.8 cm de diâmetro interno e 50 cm de altura, acoplada a uma bomba peristáltica e a um banho termostático.

As condições experimentais empregadas foram: altura do leito de 30.6 cm, cerca de 8g de bioissorvente, temperatura da solução metálica de alimentação de 30°C, pH da solução de alimentação ajustado em torno de 3,0 usando HCl concentrado, vazão de 6 mL/min e concentração da solução de alimentação iguais a 1, 1.5, 2, 3, 5 e 6 meq/L. Amostras na saída da coluna foram coletadas regularmente e as concentrações dos íons cromo e níquel determinadas por espectrofotometria de absorção atômica (Varian Spectr AA-10 plus).

A quantidade de íons removidos pelo bioissorvente na coluna foi calculada utilizando a equação:

$$q_{eq} = \frac{C_0 \dot{Q}}{m_s} \int_0^t \left( 1 - \frac{C_{out}}{C_0} \right) dt \quad \text{equação (6)}$$

em que  $q_{eq}$  é a concentração de equilíbrio do íon metálico no bioissorvente (meq/g),  $C_{out}|_{z=L}$  é a concentração do íon metálico na saída da coluna (meq/L),  $C_0$  é a concentração do íon metálico na entrada da coluna (meq/L),  $\dot{Q}$  é a vazão volumétrica (cm<sup>3</sup>/min);  $m_s$  é a massa seca de biomassa (g) e  $t$  é o tempo (min). A integral apresentada  $\left( 1 - C_{out}|_{z=L} / C_0 \right)$  na equação (6) foi resolvida por meio de integração numérica.

Para modelar os dados de equilíbrio, obtidos dos ensaios de adsorção, foram utilizados os modelos de isotermas de adsorção binária citados anteriormente e a técnica alternativa de redes neurais artificiais. Na determinação dos parâmetros das isotermas de adsorção, o método de otimização *Downhill Simplex* (Nelder e Mead, 1965) foi empregado para minimizar a função objetivo:

$$F_{OBJ} = \sum_{j=1}^n \left( q_{1j}^{Exp} - q_{1j}^{Mod} \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left( q_{2j}^{Exp} - q_{2j}^{Mod} \right)^2 \quad \text{equação (7)}$$

em que:  $q_{1j}^{Exp}$  é a concentração de equilíbrio da espécie  $i$  no bioissorvente determinada experimentalmente e  $q_{1j}^{Mod}$  é a quantidade calculada pelo modelo da espécie  $i$  e  $n$  é o número de dados experimentais.

Para a determinação dos pesos sinápticos das redes neurais artificiais, foram testadas diferentes arquiteturas de RNAs com duas camadas intermediárias, variando-se o número de neurônios da camada de entrada e das camadas intermediárias. Os dados de entrada da rede foram as concentrações de equilíbrio da fase fluida e as quantidades adsorvidas no bioissorvente foram utilizadas como variáveis de saída. A função de ativação dos neurônios era a secante hiperbólica. O método *Downhill Simplex* (Nelder e Mead, 1965) foi utilizado para ajustar os pesos sinápticos, minimizando a função objetivo, representada pela equação (7).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo foram realizados 18 experimentos de bioissorção da mistura binária dos íons cromo e níquel, nas diferenciadas frações dos íons, em coluna de leito fixo.

A partir dos dados experimentais das curvas de ruptura obtidos a 30°C e pH 3 para as diferentes concentrações de alimentação, foram calculadas as quantidades removidas dos metais até a saturação da coluna. Três modelos de isotermas multicomponentes, Langmuir, Langmuir-Freundlich e Jay e Snoeyink foram empregados buscando um ajuste que representasse adequadamente o conjunto dos dados experimentais de equilíbrio obtidos. Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros dos modelos, onde os índices 1 e 2 representam os íons cromo e níquel, respectivamente.



Tabela 1 – Resultados obtidos pelo ajuste das isotermas de adsorção

Modelo	Langmuir	Langmuir-Freundlich	Jain e Snoeyink
Parâmetros	$q_m^* = 2.021$ $b_1^* = 60.295$ $b_2^* = 4.491$	$q_m = 1.887$ $b_1 = 3340.11; b_2 = 0.902$ $k_1 = 17.245; k_2 = 0.148$	$q_{m1} = 2.491; q_{m2} = 2.182$ $b_1 = 6.666; b_2 = 0.327$
F <sub>Obj</sub>	1.136	17.623	1.348
Erro Médio (%)	17.478	55.603	19.782

\*  $[q_m] = \text{meq/g}$ ;  $[b_1, b_2] = \text{L/meq}$

Na Tabela 1, pode-se observar que os valores do parâmetro  $b$  obtidos, para os três modelos avaliados, apresentam-se muito maiores para o íon cromo em relação aos do íon níquel. Isto indica uma maior afinidade do íon cromo pelos sítios do material bioissorvente, causando a inibição do íon níquel – o que é comprovado pela Figura 1 (a) e 1(b). Além disso, pode-se perceber que os valores do parâmetro  $q_m$  foram similares para todos os modelos. Resultados semelhantes também foram obtidos para a mesma mistura binária por Seolatto (2003), em seus estudos de bioissorção em sistema batelada empregando a biomassa de alga marinha *Sargassum filipendula*.

No modelo de isoterma de adsorção desenvolvido por Jain e Snoeyink (1973), parte da adsorção ocorre sem competição dos íons presentes na solução binária. Isto é representado pelo primeiro termo do lado direito da equação (3). Quantitativamente, esse valor é proporcional a  $(q_{m1} - q_{m2})$ . Dos resultados apresentados na Tabela 1, pode-se verificar que apenas 12% da bioissorção do íon cromo ocorre sem competição com os íons níquel. O que indica que a maioria dos sítios disponíveis na biomassa possui as mesmas características para a adsorção de cada metal.

Ainda verifica-se que, os modelos de isoterma multicomponente não representaram adequadamente os dados de equilíbrio binário, uma vez que os valores da função objetivo foram altos e do erro médio foram superiores a 15%. Desse modo, buscando um modelo que melhor representasse os dados de equilíbrio obtidos neste trabalho, RNAs foram utilizadas no tratamento desses dados. Neste caso, a determinação dos pesos dos neurônios foi realizada minimizando a função objetivo, dada pela equação (7) empregando o método *Downhill Simplex* (este método é de busca direta, isto é, no procedimento de busca do ponto de mínimo da função são necessários conhecer apenas os valores da função) (Nelder e Mead, 1965).

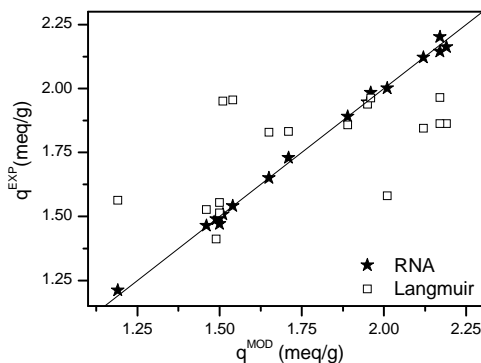
Para simular os dados de equilíbrio utilizando as redes neurais artificiais foi utilizado um conjunto de dados contendo informações a respeito das concentrações de equilíbrio de cada íon na fase fluida, como variáveis de entrada e as concentrações dos íons na fase adsorvida como variáveis de saída. Várias estruturas de rede com duas camadas ocultas foram testadas em busca da melhor combinação de pesos sinápticos tal que fornecessem um menor valor da função objetivo e, também, o menor erro médio.

De acordo com a Tabela 2, que apresenta os valores da função objetivo e os erros médios obtidos para as estruturas testadas, os resultados obtidos com a modelagem dos dados de equilíbrio dinâmico do sistema binário dos íons cromo e níquel pelas RNAs, foram muito superiores daqueles obtidos com a modelagem empregando as isotermas de adsorção, isto pode ser comprovado, comparando-se os valores da função objetivo e dos erros médios absolutos entre as Tabelas 1 e 2.

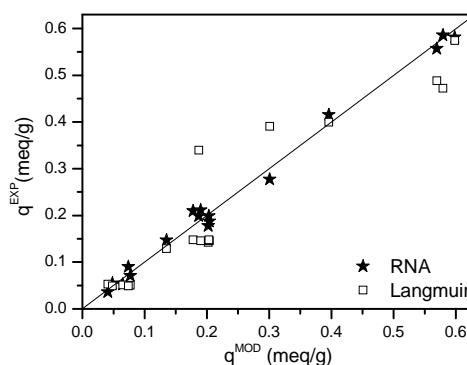
Da Figura 1, onde os resultados obtidos do ajuste da isoterma de Langmuir e da RNA com a estrutura 8-8-8 (que foram os modelos que geraram os melhores resultados) são comparados com os resultados experimentais dos ensaios de adsorção, pode-se confirmar o melhor ajuste das RNAs em relação ao ajuste das isotermas de adsorção.

Tabela 2 – Resultados obtidos pelo ajuste das RNAs

Estrutura	Função Objetivo	Erro Médio (%)
3-3-3	$1.689.10^{-1}$	20.236
5-5-5	$3.539.10^{-1}$	10.241
6-6-6	$2.744.10^{-1}$	28.780
<b>8-8-8</b>	<b><math>9.361.10^{-3}</math></b>	<b>5.068</b>
10-10-10	$7.746.10^{-2}$	13.572



(a)



(b)

**Figura 1 - Comparação entre os valores experimentais e calculados para o íon:**  
(a) Cr(III); (b) Ni(II)

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foram obtidos os dados de equilíbrio da bioadsorção da solução binária dos íons  $\text{Cr}^{3+}$  e  $\text{Ni}^{2+}$  pela alga marinha *Sargassum filipendula* em uma coluna de leito fixo. Os resultados obtidos mostraram que o íon cromo é fortemente bioadsorvido pela biomassa, inibindo a bioadsorção do íon níquel. A modelagem dos dados usando as isotermas de adsorção de Langmuir, Langmuir-Freundlich e Jain e Snoeyink para sistema multicomponente não se mostrou eficiente em representar o equilíbrio dinâmico, gerando valores de erro médio significativos em relação aos dados experimentais. Por outro lado, a modelagem pela técnica de RNAs mostrou-se muito mais eficiente em relação à modelagem convencional na descrição dos dados binários. A estrutura com oito neurônios nas camadas de entrada e intermediárias representou os dados de equilíbrio de forma muito mais eficiente que a modelagem convencional, gerando um erro médio de 5%.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAUGHMAN, D. R., LIU, T. A., Neural Networks in Bioprocess and Chemical Engineering, San Diego, 1995.
2. BRAGA, A. P., CARVALHO, A. P. L., LUDERMIR, T. B., Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações, Rio de Janeiro, 2000.
3. CANEVESI, R. L. S., MARTINS, T. D., BARELLA, R. A., JUNIOR, E. A. Z., SILVA, E. A. Uso da Lei da Ação da Massas e de Redes Neurais Artificiais na Obtenção de Curvas de Equilíbrio de Sistemas Binários de Troca-Iônica. - Anais do III Congresso da Academia Trinacional de Ciências. 2008. Anais. Foz do Iguaçu - PR, 2008.
4. CORAZZA, F. C. Estimativa de Estado e Controle Ótimo em um Secador Industrial de Gelatina – Análise de Viabilidade Técnica. Maringá, 2004. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Química-Universidade Estadual de Maringá, 2004.
5. FAGUNDES-KLEN, M. R., FERRI, P., MARTINS, T. D., TAVARES, C. R. G., SILVA, E. A. Equilibrium study of the binary mixture of cadmium-zinc ions biosorption by the *Sargassum filipendula* species using adsorption isotherms models and neural network. Biochemical Engineering Journal, v. 34, n. 2, p. 136-146, 2007.





6. HAYKIN, S., Neural Networks – A Comprehensive Foundation, Delhi, 2005.
7. JAIN, J. S., SNOEYINK, V. L. Adsorption from bisolute systems on active carbon. Journal of the Water Pollution Control Federation, v. 45, n. 12, p. 2463-2479, 1973.
8. MARTINS, T. D., AWADALLAK, J. A., FAGUNDES-KLEN, M. R., TAVARES, D. R. G., CARDOZO FILHO, L., SILVA, E. A., 2006 Biosorption of the copper, cadmium and zinc onto biomass of alga marine pre-treated *Sargassum* sp. Equilibrium study by using Artificial Neural Network and Isotherm models. - VI EBA - Encontro Brasileiro de Adsorção. 2006. Anais. Maringá - PR, 2006.
9. MATHEICKAL, J. T., YU, Q. Biosorption of lead(II) and copper(II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of Australian marine algae. Bioresource Technology, v. 69, n. 3, p. 223-229, 1999.
10. MITTAL, G. S., ZHANG, J. Prediction of freezing time for food products using a neural network. Food Research International, v. 33, n. 7, p. 557-562, 2000.
11. NELDER, J. A., MEAD, R. A Simplex Method for Function Minimization. The Computer Journal, v. 7, n. 4, p. 308-313, 1965.
12. ROMANIELO, L. L. Modelagem Matemática e Termodinâmica da Adsorção Gasosa. Campinas, 1999. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Química-Universidade Estadual de Campinas, 1999.
13. RUTHVEN, D. M., Principles of adsorption and desorption processes, New York, 1984.
14. SCHMITZ, J. E., ZEMP, R. J., MENDES, M. J. Artificial neural networks for the solution of the phase stability problem. Fluid Phase Equilibria, v. 245, n. 1, p. 83-87, 2006.
15. SEOLATTO, A. A. Biossorção de cromo e níquel por biomassa da alga marinha *Sargassum filipendula*. Maringá, 2003. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química-Universidade Estadual de Maringá, 2003.
16. SILVA, E. A., TAVARES, C. R. G., CARDOZO FILHO, L., RAVAGNANI, T. M. K., COSSICH, E. S. Modelagem da biossorção dos íons cromo e cobre em coluna de leito fixo pela alga marinha *Sargassum* sp. - 5º Encontro Brasileiro sobre Adsorção. 2002. Anais. Rio de Janeiro - RJ, 2002.