

## Modelagem matemática da adsorção de ciprofloxacina por biochar de bananeira

## Mathematical modeling of ciprofloxacin adsorption by banana tree biochar

### RESUMO

**Pedro Guilherme Costacurta da Silva**  
[pcostacurta14@gmail.com](mailto:pcostacurta14@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Fabiano Bisinella Scheufele**  
[fabianob@utfpr.edu.br](mailto:fabianob@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Eduardo Ghiraldi Barbosa**  
[eduardobarbosa@alunos.utfpr.edu.br](mailto:eduardobarbosa@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Carlos Eduardo Borba**  
[borba\\_deq@yahoo.com.br](mailto:borba_deq@yahoo.com.br)  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Aparecido Nivaldo Módenes**  
[anmodenes@yahoo.com.br](mailto:anmodenes@yahoo.com.br)  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



O presente trabalho visou a modelagem matemática da adsorção em batelada da ciprofloxacina, CIP, em *biochar* do pseudocaule da bananeira, BC-PCB, bem como a análise fenomenológica do processo, com a resolução de modelos matemáticos para descrição da cinética e equilíbrio do processo, os quais foram codificados e resolvidos em linguagem *open source* Python 3.7. A modelagem consistiu na elaboração de três modelos: RETM, RITM e ASA, sendo os dois primeiros difusionais e o terceiro reacional. Dessa forma, a resolução dos modelos à dados experimentais, obtidos sob diferentes concentrações iniciais de CIP indicou um comportamento de equilíbrio favorável tipo Langmuir. Além disso, o modelo ASA melhor descreveu a cinética o processo, indicando que a adsorção nos sítios controla a cinética do processo. Em geral, observou-se o potencial do BC-PCB para a remoção de micropoluentes como a CIP, bem como, a eficiência da linguagem de programação Python para a resolução de problemas matemáticos complexos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelos Fenomenológicos. Transferência de Massa. Antibióticos.

### ABSTRACT

The present work focused on the mathematical modeling of batch adsorption of ciprofloxacin, CIP, onto banana pseudostem biochar, BP-BC, as well as the phenomenological analysis of the process, through the resolution of mathematical models to describe the kinetics and equilibrium of the process, which were coded and solved in open source Python 3.7 language. The modeling consisted of the elaboration of three models: RETM, RITM and ASA, the two first diffusional ones and the third a reactional model. Therefore, the model's resolution to experimental data, obtained under different initial concentrations of CIP indicated a favorable Langmuir-type equilibrium behavior. Overall, the ASA model best described the process kinetics, evidencing that adsorption on the sites controls the process kinetics. In addition, the potential of the BP-BC for removing micropollutants such as CIP was observed, as well as the efficiency of the Python programming language for solving complex mathematical problems.

**KEYWORDS:** Phenomenological Models. Mass Transfer. Antibiotics.



## INTRODUÇÃO

Um dos problemas mais comuns, consequentes do crescimento populacional e tecnológico, é a contaminação de recursos hídricos a partir de uma extensa variedade de poluentes, sejam eles orgânicos ou inorgânicos. Tais compostos encontrados em quantidades pequenas tendem a oferecer uma determinada resistência a degradação biológica utilizadas em diversos sistemas de tratamento, desse modo, métodos físico-químicos complementares tornam-se necessários. A adsorção se destaca como método de tratamento para poluentes emergentes já que, além de ser uma operação relativamente simples, possui eficiência de remoção sob baixas concentrações à nível traço (ppm ou ppb), valores característicos desta classe de poluentes (NASCIMENTO et al., 2014).

A operação de adsorção, em geral, pode ser governada por três mecanismos, sendo eles: o estérico; de equilíbrio e o cinético. O primeiro caso depende de aspectos morfológicos e texturais (estrutura de poros) do material adsorvente. Já o segundo, depende das propriedades químicas superficiais do material conferindo afinidade à diferentes espécies de adsorvatos. Por fim, o terceiro mecanismo baseia-se nas diferentes difusividades das diversas espécies nos poros do adsorvente. Além disso, por se tratar de um fenômeno superficial, propriedades como a área superficial específica e, ainda, a distribuição do tamanho dos poros em termos de “área superficial disponível”, são de suma importância, pois resistências difusionais podem impactar sobre a performance do adsorvente, sendo imprescindível sua investigação para a viabilização da tecnologia (NASCIMENTO et al., 2014; RUTHVEN, 1984; SEKAR; SAKTHI; RENGARAJ, 2004).

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver a modelagem matemática fenomenológica para a descrição da cinética de transferência de massa e equilíbrio de fases de processos de adsorção em sistema batelada, considerando os fenômenos de transferência de massa e o mecanismo de adsorção envolvidos, por meio da resolução e otimização dos modelos através de um *script* desenvolvido na linguagem *open source* Python 3.7. Posteriormente, visando avaliar a performance dos modelos propostos, estes foram empregados na descrição de dados experimentais de adsorção da ciprofloxacina por *biochars* produzidos a partir do pseudocaule da bananeira.

## METODOLOGIA

Os dados experimentais utilizados para a realização da modelagem estão vinculados ao projeto: “Síntese de carvões ativados a partir de biomassas residuais para a remoção e recuperação de fármacos em solução” (Edital MCTI/CNPq N° 01/2016 – Universal – Processo n° 404420/2016-8), sendo que os dados experimentais foram obtidos em outros Planos de Trabalho vinculados à este projeto. Em que, se produziu um *biochar* do pseudocaule da bananeira visando aplicação como material adsorvente.

No desenvolvimento do modelo matemático considerou-se as seguintes hipóteses simplificadoras: i) Sólido homogêneo; ii) Mistura ideal na fase líquida; iii) Sistema isotérmico e isobárico; iv) Propriedades físicas constantes das fases sólidas e líquida. Em cada modelo foi considerado uma determinada equação para descrever a taxa de transferência de massa (T.M.) entre as fases do sistema,

assumindo diferentes mecanismos envolvidos no processo, sendo eles: (1) RETM (Resistência externa à T.M. – Difusão no filme); (2) RITM (Resistência interna à T.M. – Difusão intrapartícula); (3) ASA (Adsorção nos sítios do adsorvente – Modelo de Thomas). Além disso, a partir dos dados experimentais e da equação de balanço de massa – Eq. (1) – foi possível determinar a concentração na fase sólida a partir da variação de concentração na fase líquida.

$$q(t) = \frac{V(C_0 - C(t))}{m_{ads}} \quad (1)$$

Em que,  $q(t)$  refere-se à concentração da CIP na fase sólida no tempo  $t$  ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $C_0$  à concentração inicial na fase líquida ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $C(t)$  à concentração na fase líquida em um determinado tempo  $t$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $V$  volume da solução (L) e  $m_{ads}$  à massa de material adsorvente (g).

No Modelo (1), descrito pela Eq. (2), a resistência à T.M. está diretamente relacionada com a existência de uma subcamada laminar em torno das partículas adsorventes devido à existência da condição de não deslizamento do fluido na interface com a superfície sólida, consequência das tensões viscosas (i.e. camada limite). A transferência de massa através da camada limite pode ser interpretada como uma difusão unidimensional em camada plana. Portanto, a força-motriz deste processo se dá pela diferença de concentração entre a região próxima à superfície externa do adsorvente ( $C_e$ ) e no seio da solução ( $C$ ) (NEVES et al., 2018).

$$\frac{d\bar{q}(t)}{dt} = \frac{k_f(C(t) - C_e(t))}{\rho_p} \quad (2)$$

Em que,  $C_e(t)$  é concentração de CIP na fase líquida na interface sólido-líquido ( $\text{mg L}^{-1}$ );  $k_f$  trata-se do coeficiente volumétrico de transferência de massa no filme líquido externo ( $\text{h}^{-1}$ ); e, por fim,  $\rho_p$  é a densidade real do adsorvente ( $\text{g L}^{-1}$ ).

Considerando a RETM como etapa limitante, a concentração na interface passa a ser relacionada com um modelo de isoterma de equilíbrio. No caso de adsorção em monocamada, pode ser descrito pela isoterma de Langmuir, Eq. (3). Contudo, caso o equilíbrio ocorra em multicamadas, o processo pode ser descrito pela isoterma BET, conforme Eq. (4).

$$\bar{q}(t) = \frac{q_{max}bC_e(t)}{1 + bC_e(t)} \quad (3)$$

$$\bar{q}(t) = \frac{q_m K_S C_e}{(1 - K_L C_e)[1 + (K_S - K_L)C_e]} \quad (4)$$

Em que,  $q_{max}$  e  $q_m$  é capacidade máxima de adsorção na fase sólida e na saturação da monocamada ( $\text{mg g}^{-1}$ ), respectivamente;  $b$ ,  $K_S$  e  $K_L$  são a constante de afinidade de Langmuir, constante de equilíbrio relativa à adsorção em monocamada; e em multicamada para a isoterma BET ( $\text{L mg}^{-1}$ ), respectivamente;  $C_e$  é a concentração de CIP na fase líquida na condição de equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ ). Além disso, para complementar o modelo, as condições iniciais (CIs) utilizadas para a resolução foram:  $C(0) = C_0$ ;  $\bar{q}(0) = 0$ ;  $C_e(0) = 0$ .

Para o Modelo (2), considerando, como volume de controle, a partícula do material adsorvente como uma esfera perfeita e homogênea e, portanto, empregando-se a Segunda Lei de Fick em coordenadas esféricas, a partir da lei de

conservação de massa para a CIP, obtêm-se a equação que governa o processo RITM, denominado modelo de difusão em sólido homogêneo (HDSM), Eq. (5).

$$\frac{\partial}{\partial t} q(r, t) = \frac{D_{ef}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} q(r, t) \right) \quad (5)$$

Em que,  $q$  é a capacidade de adsorção de CIP no PCB-BC ( $\text{mg g}^{-1}$ ) dependente do raio da partícula ( $r$ ) e do tempo ( $t$ );  $D_{ef}$  é a difusividade no sólido adsorvente ( $\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$ ). Além disso, por se tratar de uma equação diferencial parcial (EDP), a resolução deste modelo depende uma condição inicial (CI),  $q(r, 0) = 0$ , e condições de contorno (CC) representados pelas Eqs. (6) e (7). Caso o processo ocorra em multicamadas é possível substituir a CC dada pela Eq. (7) pela isoterma BET.

$$\frac{\partial}{\partial t} q(r = 0, t > 0) = 0 \quad (6)$$

$$q(r = R, t > 0) = \frac{q_{max} b C(t)}{1 + b C(t)} \quad (7)$$

O Modelo (3), foi proposto por Thomas (1994), que descreve a taxa de adsorção como função da velocidade de adsorção nos sítios do adsorvente, tratando-se de um modelo reacional reversível e é descrito por uma taxa de reação de pseudo-segunda ordem, que se reduz à isoterma de Langmuir na condição de equilíbrio, Eq. (8) (THOMAS, 1944).

$$\frac{d\bar{q}(t)}{dt} = k_a [q_{max} - \bar{q}(t)] C(t) - \frac{k_d}{b} \bar{q}(t) \quad (8)$$

Em que,  $k_a$  é a constante cinética de adsorção ( $\text{L mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ );  $k_d$  a constante cinética de dessorção ( $\text{h}^{-1}$ ), que usa a definição de constante de equilíbrio ( $b = k_a/k_d$ ).

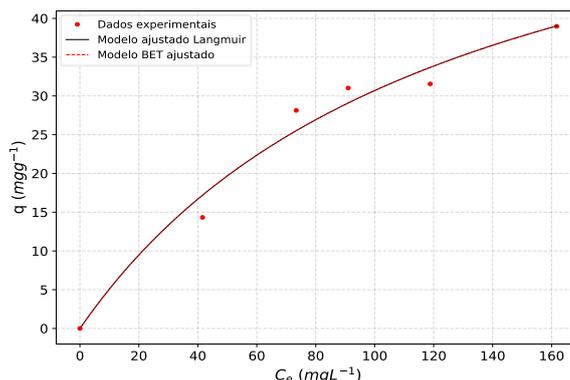
Todos os modelos foram implementados e resolvidos a partir de um *script* escrito na linguagem Python 3.7. Além disso, os ajustes dos modelos foram avaliados a partir das funções objetivos empregadas, coeficiente de correlação ( $r^2$ ), qui-quadrado reduzido ( $\chi^2$ ) e pelo critério de Akaike corrigido (*AICc*), que é válido para pequenos dados amostrais e tende a penalizar modelos com maiores números de parâmetros otimizáveis (HURVICH; TSAI, 1991).

Os modelos de isotermas, foram resolvidos com a rotina de otimização *curve\_fit* presente na biblioteca *scipy.optimize*. Esta rotina utiliza o somatório das diferenças ao quadrado como função objetivo (FO), na qual a busca pela minimização da FO foi realizada pelo algoritmo de otimização Levenberg-Marquardt. Já os modelos diferenciais do processo cinético foram resolvidos a partir da rotina *odeint* presente na biblioteca *scipy.integrate.odeint*, em que, os parâmetros ótimos de cada modelo foram obtidos pela minimização através da somatória do erro relativo, utilizando a função *minimize* presente na biblioteca *scipy.optimize*, a partir do algoritmo de busca *Simplex* desenvolvido por Nelder & Mead (1965) (NELDER; MEAD, 1965). Além disso, o modelo RITM, foi resolvido utilizando o Método das Linhas, em que, a EDP foi discretizada em relação à coordenada radial, gerando um sistema de EDOs em relação ao tempo. A partir disso, o sistema resultante foi resolvido pelo mesmo método dos demais modelos.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados experimentais, realizou-se o ajuste das isotermas de Langmuir e BET, representados pela Figura 1, na qual verifica-se uma isoterma favorável. Os valores dos parâmetros estimados dos modelos de equilíbrio são apresentados na Tabela 1.

Figura 1 – Dados de equilíbrio da adsorção de CIP em PCB-BC ajustados às diferentes isotermas. (Condições experimentais: T = 30°C;  $\omega$  = 150 rpm; pH = 4).



Fonte: Autoria própria (2020).

Analisando-se a Tabela 1, conforme os valores de coeficiente de correlação ( $r^2$ ) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ), verifica-se que ambos os modelos resultaram nos mesmos valores de  $\chi^2$  e  $r^2$ , sendo este um valor próximo a unidade, portanto, descrevendo adequadamente o comportamento dos dados experimentais. Além disso, este resultado mostra uma precisão adequada dos métodos de resolução escolhidos para serem implementados no *script* desenvolvido. A obtenção de valores iguais destes parâmetros indica que, tanto a isoterma de Langmuir quanto BET descrevem matematicamente o processo. No entanto, como o valor de  $K_L$  tende a zero verifica-se que a isoterma de BET se reduz ao modelo de Langmuir, confirmando o melhor ajuste deste modelo, e que o processo se dá em monocamada. Além disso, a partir do  $AICc$ , é possível perceber que a isoterma de Langmuir descreve melhor os dados experimentais por possuir um menor valor (devido ao menor número de parâmetros ajustáveis) e maior simplicidade matemática. E, neste caso, a descrição fenomenológica do equilíbrio do processo. Avaliando-se os parâmetros estimados para a isoterma de Langmuir, é possível observar que o *biochar* apresenta uma considerável capacidade de adsorção da CIP, aproximadamente 70 mg g<sup>-1</sup>.

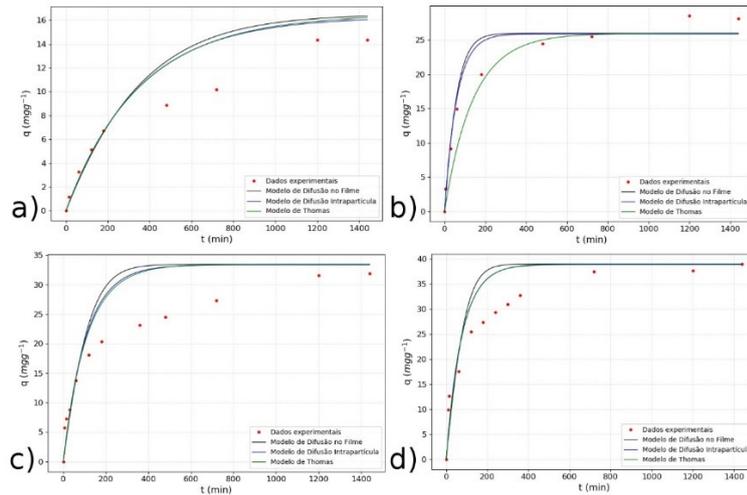
Tabela 1 – Valores dos parâmetros estimados da isoterma de Langmuir e BET do processo de adsorção da CIP no PCB-BC.

Modelo	Variável	Parâmetro	Modelo	Variável	Parâmetro
Langmuir	$q_{max}$ (mg g <sup>-1</sup> )	69,66	BET	$q_m$ (mg g <sup>-1</sup> )	69,63
	$b$ (L mg <sup>-1</sup> )	$7,877 \cdot 10^{-3}$		$K_S$ (L mg <sup>-1</sup> )	$7,881 \cdot 10^{-3}$
	$AICc$	20,14		$K_L$ (L mg <sup>-1</sup> )	$1,560 \cdot 10^{-18}$
	$r^2$	0,9773		$AICc$	48,14
	$\chi^2$	1,079		$r^2$	0,9773
			$\chi^2$	1,079	

Fonte: Autoria própria (2020).

Após a obtenção dos parâmetros de equilíbrio, realizou-se o tratamento dos dados para obtenção dos parâmetros cinéticos. Dessa forma, com os dados experimentais obtidos em diferentes concentrações iniciais de CIP, realizou-se a modelagem cinética. Os dados experimentais, juntamente com os ajustes dos três modelos propostos estão representados na Figura 2 e Tabela 2, respectivamente.

Figura 2 – Experimentos cinéticos e modelos matemáticos da adsorção da CIP no PCB-BC. (a) 50 mg L<sup>-1</sup>; (b) 100 mg L<sup>-1</sup>; (c) 150 mg L<sup>-1</sup>; (d) 200 mg L<sup>-1</sup>. (T = 30°C; ω = 150 rpm; pH = 4)



Fonte: Autoria própria (2020).

A partir da Figura 2, observa-se que um tempo de equilíbrio próximo a 1200 min, e que nos primeiros instantes do processo (< 200 min) há uma elevada taxa de adsorção, apresentando, portanto, uma cinética favorável. Além disso, a partir da interpretação da Figura 2 e da Tabela 2 é possível concluir que, em geral, o modelo ASA melhor descreveu o processo, apresentando menores valores de  $\chi^2$ ,  $AICc$  e maiores valores de  $r^2$ , exceto para a menor concentração (50 mg L<sup>-1</sup>) que foi melhor descrita pelo modelo RTMI. Desta forma, o Modelo de Thomas melhor descreveu a etapa limitante do processo de adsorção da CIP no *biochar* do PCB.

O modelo de Thomas considera que a cinética global do processo de adsorção é controlada pela etapa de adsorção nos sítios. Verifica-se que na menor concentração um menor valor de  $k_a$  foi observado ( $1,23 \cdot 10^{-5}$  L mg<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>), sendo o comportamento cinético descrito pelo modelo RTMI. Desta forma, é possível que nesta concentração as resistências difusionais sejam preponderantes. Em contrapartida, para as maiores concentrações, observou-se um valor de  $k_a$  maior e quase constantes ( $3,03$  a  $3,86 \cdot 10^{-5}$  L mg<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>). Isto pode estar relacionado ao comportamento da molécula CIP em solução, que em altas concentrações pode sofrer a formação de agregados, por meio de interações intermoleculares adsorbato-adsorbato formando agregados moleculares da CIP (COATES, 2008; NEVES et al., 2018; ZHANG et al., 2011). Portanto, o incremento do valor de  $k_a$  nas maiores concentrações pode estar relacionado à maior velocidade de adsorção global de agregados de maior peso molecular.

Além disso, com base nos resultados obtidos neste trabalho, foi possível observar a eficiência da linguagem de programação Python, bem como o conjunto de pacotes e bibliotecas disponíveis para a elaboração de *scripts* de resolução que possibilitem a resolução de problemas complexos de forma gratuita em diversas

áreas do conhecimento, neste caso em problemas de engenharia. Isso se dá, não só pelo motivo de possuir diversas ferramentas que possibilitem estas atividades, mas também pela sintaxe da linguagem ser de fácil aprendizado e intuitiva, possuindo também uma versatilidade e uma excelente curva de aprendizado.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros estimados dos modelos cinéticos aos dados experimentais da adsorção da CIP no PCB-BC em função da concentração inicial.

Modelo	Variável	Parâmetro estimado			
		50 mg L <sup>-1</sup>	100 mg L <sup>-1</sup>	150 mg L <sup>-1</sup>	200 mg L <sup>-1</sup>
RTME	$k_f$ (min <sup>-1</sup> )	1,376	6,866	3,164	3,681
	$FO$	0,5419	0,2814	1,409	1,377
	$AICc$	15,84	17,17	41,67	43,97
	$r^2$	0,9526	0,9512	0,9267	0,9056
	$\chi^2$	4,439	2,821	18,730	18,84
RTMI	$D_{ef}$ (cm <sup>2</sup> min <sup>-1</sup> )	$3,05 \cdot 10^{-8}$	$1,78 \cdot 10^{-7}$	$7,75 \cdot 10^{-8}$	$1,38 \cdot 10^{-7}$
	$FO$	0,3786	0,2329	1,1990	0,7993
	$AICc$	14,01	15,69	39,53	40,43
	$r^2$	0,9565	0,9574	0,9378	0,9251
	$\chi^2$	3,657	2,348	15,670	14,22
ASA	$k_a$ (L mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-5}$	$3,03 \cdot 10^{-5}$	$3,86 \cdot 10^{-5}$
	$FO$	0,5460	0,2208	1,1640	0,7651
	$AICc$	14,26	15,00	39,00	40,34
	$r^2$	0,9588	0,9740	0,9416	0,9274
	$\chi^2$	3,708	3,424	15,020	13,90

Fonte: Autoria própria (2020).

## CONCLUSÃO

Portanto, foi possível verificar o potencial da utilização do *biochar* do pseudocaule da bananeira para a remoção do antibiótico ciprofloxacina, através do processo de adsorção em batelada. Bem como, identificar que o modelo de adsorção nos sítios do material adsorvente (ASA) descreve a cinética do processo, sendo a etapa controladora do processo global de adsorção. A condição de equilíbrio foi descrita pela isoterma de Langmuir, indicando que a adsorção da CIP se dá em uma monocamada sobre a superfície do adsorvente e evidenciando o caráter favorável do sistema CIP-CA em termos de afinidade e capacidade de adsorção. Além disso, o levantamento experimental, juntamente com a modelagem fenomenológica permitiram o levantamento de parâmetros cinéticos e de equilíbrio que podem suportar o *design*, otimização e *scale-up* de processos de adsorção. Dessa forma, também foi possível mostrar a eficiência da linguagem de programação Python na resolução de problemas complexos por ser uma linguagem versátil, de fácil interpretação e com uma extensa gama de ferramentas e métodos de resolução e otimização, além de ser uma ferramenta *open source*.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (Edital MCTI/CNPq N° 01/2016 – Universal - Processo n° 404420/2016-8). O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq – Brasil (Bolsista do CNPq – Brasil).

## REFERÊNCIAS

COATES, E. Aggregation of dyes in aqueous solutions. **Journal of the Society of Dyers and Colourists**, [S. l.], v. 85, n. 8, p. 355–368, 2008. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1969.tb02909.x.

HURVICH, CLIFFORD M.; TSAI, CHIH-LING. Bias of the corrected AIC criterion for underfitted regression and time series models. **Biometrika**, [S. l.], v. 78, n. 3, p. 499–509, 1991. DOI: 10.1093/biomet/78.3.499.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira; LIMA, Ari Clecius Alves; VIDAL, Carla Bastos; MELO, Diego Quadros; RAULINO, Giselle Santiago Cabral. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.13140/RG.2.1.4340.1041.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The Computer Journal**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 308–313, 1965. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308..

NEVES, C. V.; SCHEUFELE, F. B.; NARDINO, A. P.; VIEIRA, M. G. A.; DA SILVA, M. G. C.; MÓDENES, A. N.; BORBA, C. E. Phenomenological modeling of reactive dye adsorption onto fish scales surface in the presence of electrolyte and surfactant mixtures. **Environmental Technology (United Kingdom)**, [S. l.], v. 39, n. 19, p. 2467–2483, 2018. DOI: 10.1080/09593330.2017.1356876.

RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption processes**. New York: John Wiley & Sons, 1984.

SEKAR, M.; SAKTHI, V.; RENGARAJ, S. Kinetics and equilibrium adsorption study of lead(II) onto activated carbon prepared from coconut shell. **Journal of Colloid and Interface Science**, [S. l.], v. 279, n. 2, p. 307–313, 2004. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.042.

THOMAS, Henry C. Heterogeneous ion exchange in a flowing system. **Journal of the American Chemical Society**, [S. l.], v. 66, n. 10, p. 1664–1666, 1944. DOI: 10.1021/ja01238a017.

ZHANG, Qiaoying; DENG, Shubo; YU, Gang; HUANG, Jun. Removal of perfluorooctane sulfonate from aqueous solution by crosslinked chitosan beads: Sorption kinetics and uptake mechanism. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 102, n. 3, p. 2265–2271, 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.10.040.