



Produção e desempenho de carvão ativado fisicamente a partir de *Bambusa vulgaris*

Rayssa de Medeiros Morais¹, Gregório Mateus Santana^{1*}, Roberto Carlos Costa Lelis¹, Juarez Benigno Paes², Maria Vanessa Egger Schueler¹, Fernanda Lago Morbeck¹

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465, Km 07, CEP 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil

²Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Gov. Lindemberg, 316, Centro, CEP 29550-000, Jeronimo Monteiro, ES, Brasil

***Autor correspondente:**

rayssaengflorestal@gmail.com

Termos para indexação:

Adsorventes
Bambu
Gestão de recursos

Index terms:

Adsorbents
Bamboo
Resource management

Histórico do artigo:

Received in 11/07/2018
Accepted in 27/11/2018
Published in 28/03/2019

doi: 10.4336/2019.pfb.39e201801668



Resumo - Foi produzido carvão ativado (CA) a partir de *Bambusa vulgaris* para avaliar seu potencial para adsorção do corante azul de metileno (AM). O CA foi preparado mediante ativação física direta, utilizando como agente ativante o vapor d'água sendo caracterizado quanto ao rendimento gravimétrico em CA, pH do ponto de carga zero, método titulométrico de Boehm, análise de área superficial, volume e diâmetro dos poros e da morfologia superficial. Para aplicação do CA realizou-se estudos de cinética e isotermas de adsorção, tendo aplicados modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich. O material produzido apresentou área superficial de 684,69 m² g⁻¹, pH do ponto de carga zero de 7,32 e predominância de grupos ácidos em sua superfície. Pela análise da micrografia foi possível verificar o desenvolvimento da porosidade do material devido à ativação. A capacidade máxima de adsorção para o corante AM foi de 301,07 mg g⁻¹ com melhor ajuste ao modelo de Langmuir. O CA obtido a partir de *Bambusa vulgaris* apresentou excelentes propriedades texturais e adsorptivas, sendo eficiente na adsorção do corante azul de metileno.

Production and performance of physically activated carbon from *Bambusa vulgaris*

Abstract - Activated carbon (AC) was produced from *Bambusa vulgaris* to evaluate its potential of methylene blue dye (MB) adsorption. AC was prepared by direct physical activation, using the water vapor as activating agent. It was characterized considering the gravimetric yield of AC, the pH point of zero charge, Boehm titration method, surface area, volume and pore diameter analysis and superficial morphology. The application of AC was performed with kinetic studies and adsorption isotherms by the Langmuir and Freundlich isotherm models. The material produced presented surface area of 684.69 m² g⁻¹, pH point of zero charge of 7.32 and predominance of acidic groups on their surface. By the micrographs analysis it was possible to verify the development of the material porosity due to activation. The maximum adsorption capacity for the MB dye was 301.07 mg g⁻¹ the Langmuir model presented the best adjustment. The AC obtained from *Bambusa vulgaris* presented excellent texture and adsorption properties are it was very efficient in MB dye adsorption.

Introdução

O carvão ativado (CA) é considerado um excelente adsorvente, sendo amplamente empregado para remoção

de poluentes orgânicos, como é o caso do corante azul de metileno, proveniente da indústria têxtil (Bhatnagar et al., 2013; Andrade et al., 2015). A sua aplicação em processos de adsorção depende majoritariamente de sua

superfície química e estrutura porosa. Portanto, o método de ativação usado e a natureza do material precursor influenciam consideravelmente nessas características (Bhatnagar et al., 2013).

Apesar de ser um material ideal para a remoção de contaminantes, o uso do CA é limitado devido ao seu alto custo de produção, o que tem oportunizado novas pesquisas com opções mais viáveis para redução dos custos de produção. Uma dessas opções seria através do uso de biomassa como material precursor alternativo aos métodos convencionais de produção do CA que atualmente utiliza carvão mineral (González-García, 2017; Danish & Ahmad, 2018).

Os ciclos curtos de rotação da biomassa florestal a tornam uma fonte sustentável para a produção de CA (Danish & Ahmad, 2018). Como exemplo de espécie promissora para produção de CA tem o bambu. No último estudo de levantamento realizado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, o bambu representava 3,3% da área total de florestas do mundo, isto é, aproximadamente 36 milhões de ha. No Brasil, esta área foi estimada em 447.698 mil ha, representando 2,1% das florestas no país, com destaque para um plantio na região Nordeste com a espécie *Bambusa vulgaris*, empregada para a produção de celulose e papel, que possui cerca de 35.000 a 40.000 ha (Tomazello & Azzini, 1987; Lobovikov et al., 2007).

Por seus valores econômicos e ambientais, o bambu tem sido considerado um complemento à madeira, em decorrência principalmente de suas características de rápido crescimento, curta rotação e elevada produtividade, sendo um recurso abundante e que pode ser usado para a produção de CA (Fang et al., 2018). Trata-se, portanto, de uma planta muito versátil e que tem sido utilizada em várias aplicações (Van-Dam et al., 2018).

Em vista disso, este trabalho teve por objetivo produzir e avaliar a qualidade do CA preparado a partir de *Bambusa vulgaris*, empregando-se o vapor d'água como agente ativante, e aplicar o material obtido para adsorção do corante azul de metileno.

Material e métodos

Foram utilizados cavacos de *Bambusa vulgaris*, provenientes de plantio com dois anos de idade, que seriam destinados à produção de papel e celulose, da empresa Celulose e Papel de Pernambuco S.A.,

Jaboatão dos Guararapes, PE. As amostras com o material foram secas ao ar, trituradas em moinho de martelo e devidamente classificadas em peneiras vibratórias. As frações utilizadas na produção do carvão ativado (CA) foram as que passaram na peneira de 8 mesh e que ficaram retida na peneira de 30 mesh.

Para a produção do CA foi empregado o processo de ativação física direta, isto é, o precursor foi colocado *in natura* no forno de ativação, pelo qual foi eliminada a etapa de carbonização prévia do material, comumente empregada. Utilizou-se como agente oxidante o vapor d'água, em uma planta de forno rotativo semi-industrial. Para o processo de ativação, utilizou-se 100 g de material precursor inseridos em um reator tubular de leito fixo. Ao forno, acoplou-se uma caldeira elétrica para o fornecimento do agente oxidante e um recipiente *dewar* com nitrogênio (N_2) para manter a atmosfera inerte.

No processo de ativação, foi empregada uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$, no intervalo de 25 a $800\text{ }^\circ\text{C}$, sob atmosfera inerte de nitrogênio (N_2), com um fluxo de 80 mL min^{-1} e tempo de residência na temperatura final de 30 min. Somente à temperatura final ($800\text{ }^\circ\text{C}$) e tempo de residência (30 min) foi introduzido o vapor d'água, com fluxo controlado de 100 mL min^{-1} . O CA de bambu obtido foi denominado de CAB.

A área superficial, volume e diâmetro dos poros foram determinadas através da análise Brunauer, Emmett e Teller (BET), que utiliza a técnica de adsorção/dessorção de N_2 , a 77 K, empregando um Microporosímetro (ASAP 2020), conectado a um microcomputador. As amostras de CAB (0,25 g) foram predominante desgaseificadas a vácuo a $300\text{ }^\circ\text{C}$ (Skaar, 1988).

A determinação do pH do ponto de carga zero (pH_{PCZ}) foi realizada pelo método do deslocamento do pH. O método consiste em preparar amostras com quantidades constantes de 0,3 g do adsorvente e colocá-las em contato com 50 mL de soluções de NaCl ($0,10\text{ mol L}^{-1}$) contendo diferentes valores iniciais de pH (de 2 a 11), ajustando o pH com soluções de HCl ($0,50\text{ mol L}^{-1}$) ou NaOH ($0,50\text{ mol L}^{-1}$). As amostras foram colocadas em uma incubadora Shaker, durante 24 h sob temperatura ambiente e agitação constante de 100 rpm. Após esse tempo, foram realizadas leituras do pH final, com auxílio de um pHmetro de bancada.

Os grupos funcionais de superfície foram avaliados pelo método titulométrico de Boehm. Foram pesados 0,25 g de cada amostra; em seguida, adicionados

separadamente 10 mL a 0,05 mol L⁻¹ das soluções de NaOH, Na₂CO₃ e NaHCO₃ e colocadas em uma incubadora durante 24 h sob temperatura ambiente e agitação constante de 100 rpm. Posteriormente, foram filtrados em papel de filtro (80 g m⁻² de gramatura, 205 μm de espessura, 14 μm de poros) e retiradas alíquotas de 5 mL. Em seguida, foram adicionados nas alíquotas de NaOH e NaHCO₃ 10 mL de HCl a 0,05 mol L⁻¹ e na alíquota de Na₂CO₃ adicionados 15 mL da mesma solução de HCl. Após, titulou-se com NaOH (0,05 mol L⁻¹) e padronizou-se o NaOH e HCl, utilizando-se a fenolftaleína como indicador.

O número de grupos ácidos foi determinado, considerando-se: NaOH neutraliza grupos carboxílicos, lactonas e fenólicos; Na₂CO₃ neutraliza apenas os grupos carboxílicos e lactonas; e NaHCO₃ neutraliza só os grupos carboxílicos (Boehm, 2002, 2008).

A análise da morfologia superficial do CAB foi obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada em um aparelho FEI Quanta 450, ao empregar tensão de 20 kv. Para isso, as amostras foram previamente montadas sobre plataforma de alumínio, com o uso de fita de carbono dupla e uma fina camada de ouro depositada por um metalizador.

Estudos de cinética de adsorção foram realizados à temperatura ambiente. Utilizou-se 10 mg de CAB e 10 mL de solução com o corante azul de metileno na concentração de 50 mg L⁻¹. Em intervalos predeterminados de 1, 2, 3, 6, 12 e 24 h, alíquotas da solução, com aproximadamente 3,5 mL, foram retiradas e suas concentrações determinadas. Para a determinação da concentração de equilíbrio, foi utilizado um aparelho espectrofotômetro, para um comprimento de onda de 665 nm, característico para o corante azul de metileno.

A isoterma de adsorção foi obtida ao ser empregado 10 mg de CAB e 10 mL da solução com diferentes concentrações do corante azul de metileno, qual utilizando-se recipientes de 20 mL e mantidos sob agitação de 100 rpm em uma incubadora por 24 h, à temperatura ambiente. A concentração de equilíbrio foi obtida no espectrofotômetro, com o comprimento de onda do corante, em análise pontual de absorbância.

Foram preparadas curvas de calibração de azul metileno nas concentrações 25, 50, 100, 250, 500 e 1000 mg L⁻¹. A quantidade de adsorvato adsorvido, (q_{eq}), por grama de adsorvente, foi calculada de acordo com a Equação 1.

$$q_{eq} = \frac{(C_0 - C_{eq}) * V}{m} \quad (1)$$

Onde: C_0 = concentração inicial do corante azul de metileno (mg L⁻¹); C_{eq} = concentração do corante azul de metileno após atingir o equilíbrio de adsorção (mg L⁻¹); V = volume de adsorvato (L); e m = massa de adsorvente (g).

Os dados obtidos das isotermas foram ajustados de acordo com os modelos de isoterma de Langmuir e de Freundlich. A Equação 2 descreve o comportamento do modelo de isoterma de Langmuir, cuja forma linear consta na Equação 3.

$$q_{eq} = \frac{q_m * K_L * C_{eq}}{1 + K_L + C_{eq}} \quad (2)$$

$$\frac{C_{eq}}{q_{eq}} = \frac{1}{q_m * K_L} + \frac{1}{q_m} * C_{eq} \quad (3)$$

Onde: q_{eq} = quantidade adsorvida (mg g⁻¹) para uma dada concentração do corante; C_{eq} = concentração do corante após ter atingido o equilíbrio (mg L⁻¹); q_m = capacidade máxima de adsorção (mg g⁻¹); e K_L = constante de Langmuir.

A Equação 4 representa o modelo de Freundlich, linearizado pela aplicação de logaritmo nos dois termos, conforme a Equação 5.

$$q_{eq} = K_F * C_{eq}^{1/n} \quad (4)$$

$$\log q_{eq} = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_{eq} \quad (5)$$

Onde: q_{eq} = quantidade adsorvida (mg g⁻¹) para uma dada concentração do corante; C_{eq} = concentração do corante após ter atingido o equilíbrio (mg L⁻¹); K_F = coeficiente de sorção; e $1/n$ = medida da intensidade de sorção.

Resultados

O carvão ativado de bambu (CAB) produzido apresentou uma elevada capacidade de adsorção de N₂ em baixas pressões relativas (P/P_0), indicando que a natureza do mesmo é microporosa (Figura 1). Além disso, pode-se verificar, pelas isotermas de adsorção/dessorção, que o material produzido apresentou também uma pequena região de histerese, revelando a presença

de mesoporos em sua estrutura porosa, aptos para a adsorção de azul de metileno.

Valores quantitativos relativos às propriedades texturais são apresentados na Tabela 1. De maneira geral, o CAB apresentou área superficial BET ($S_{\text{BET}} = 684,69 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, área superficial de microporos = $590,19 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, volume total de poros = $0,33 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ e diâmetro médio de poros = $19,58 \text{ \AA}$.

O CAB apresentou $\text{pH}_{\text{PCZ}} = 7,32$ e dentre os grupos químicos superficiais presentes, os que apresentaram maior quantidade foram os grupos carboxílicos ($0,920 \text{ mmol g}^{-1}$), obtendo uma acidez total para $1,010 \text{ mmol g}^{-1}$. Os grupos lactonas e fenólicos apresentaram $0,059$ e $0,031 \text{ mmol g}^{-1}$, respectivamente.

A morfologia superficial do material produzido foi modificada após o processo de ativação, sendo formada uma rede bem desenvolvida de poros com diferentes tamanhos e formas, sendo ainda bem distribuídos por toda a superfície do material (Figura 2).

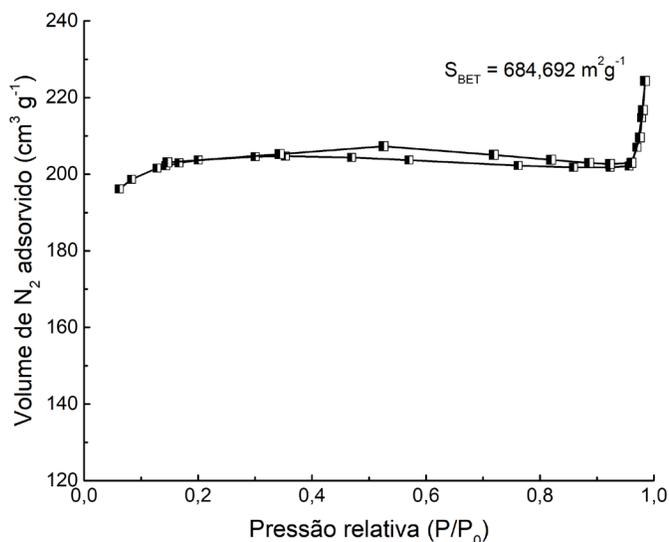


Figura 1. Isotermas de adsorção/dessorção de nitrogênio (N_2), a 77 K, para o carvão ativado de bambu (CAB). S_{BET} = área superficial BET.

Figure 1. Nitrogen adsorption / desorption isotherms (N_2), at 77 K, of activated carbon of bamboo (ACB). S_{BET} = BET superficial area.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos para o estudo de cinética de adsorção do corante azul de metileno (AM) pelo CAB (10 mg de CAB; 10 mL de solução 50 mg L^{-1} ; à temperatura ambiente). Verificouse que em 6 h de reação, mais de 50% do corante AM já havia sido removido e com 24 h o sistema já estava

próximo ao equilíbrio de adsorção, com praticamente todos os sítios ativos do CAB ocupados pelo corante.

Tabela 1. Propriedades texturais obtidas por análise BET do carvão ativado de bambu (CAB).

Table 1. Textural properties obtained by BET analysis of activated carbon of bamboo (ACB).

Análise BET	CAB
Área superficial BET (S_{BET})	$684,69 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$
Área superficial de microporos	$590,19 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$
Área superficial externa	$94,50 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$
Volume total de poros	$0,33 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$
Volume de microporos	$0,27 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$
Volume de mesoporos	$0,04 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$
Diâmetro médio de poros	$19,58 \text{ \AA}$

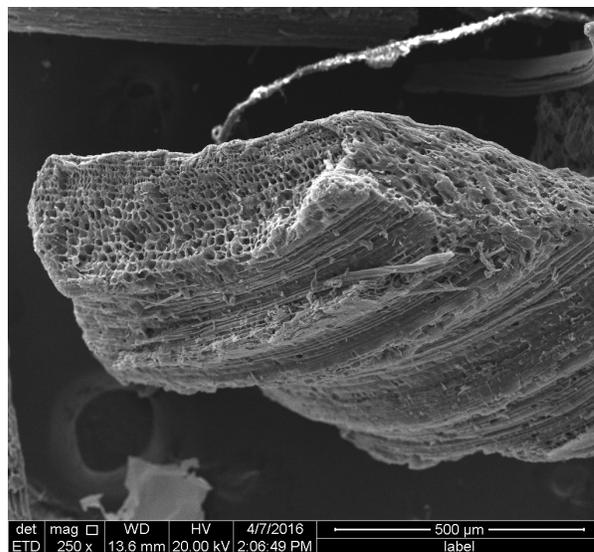


Figura 2. Morfologia superficial de carvão ativado de bambu (CAB).

Figure 2. Surface morphology of activated carbon of bamboo (ACB).

A isoterma de adsorção do corante azul de metileno é apresentada na Figura 3 e os parâmetros físico-químicos de adsorção, obtidos a partir dos ajustes aos modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich, estão descritos na Tabela 3. Pelas isotermas e valores de R^2 , nota-se que o CAB possui melhor ajuste para o modelo de Langmuir. Ademais, obteve elevada capacidade

máxima de adsorção (q_m) para o corante azul de metileno (301,07 mg g⁻¹).

Tabela 2. Cinética de adsorção do azul de metileno (AM) pelo CAB.

Table 2. Adsorption kinetics of methylene blue (MB) by of ACB.

Tempo de contato (h)	Remoção (%)
1	27,60
3	40,43
6	54,23
12	77,06
24	90,34

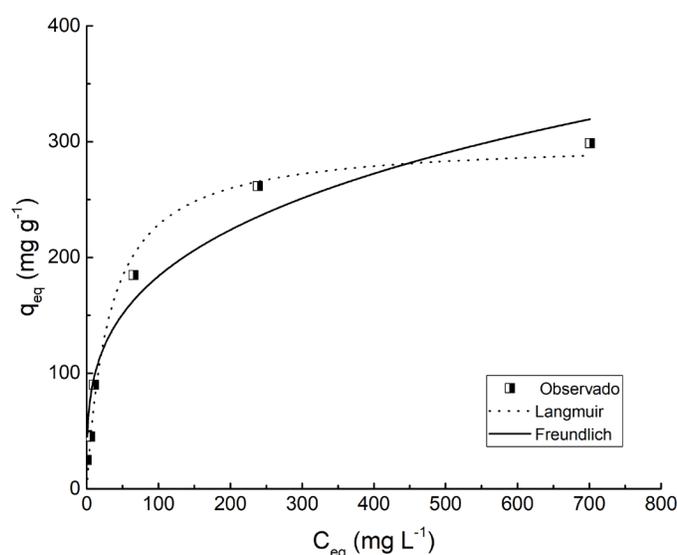


Figura 3. Isotherma de adsorção do azul de metileno (AM) pelo CAB.

Figure 3. Adsorption isotherm of methylene blue (MB) by ACB.

Tabela 3. Parâmetros obtidos para adsorção de azul de metileno (AM) pelo CAB.

Table 3. Parameters obtained for adsorption of methylene blue (MB) by ACB.

Adsorvente	Parâmetros de Langmuir			Parâmetros de Freundlich		
	q_m	K_L	R^2	K_F	$1/n$	R^2
CAB	301,07	0,031	0,973	49,69	0,28	0,921

q_m = capacidade máxima de adsorção (mg g⁻¹); K_L = constante de Langmuir (L mg⁻¹); K_F = constante de Freundlich [(mg L⁻¹)(L mg⁻¹)^{1/n}]; $1/n$ = parâmetro de Freundlich; e R^2 = coeficiente de determinação.

Discussão

A região de histerese apresentada nas isotermas de adsorção/dessorção de N₂ está associada à condensação capilar na estrutura porosa dos carvões ativados (CA) e representa um indicativo da presença de mesoporos (Teixeira et al., 2001; Sales et al., 2015). A presença da mesoporosidade, apesar de limitada, é importante no processo de adsorção de corantes como o azul de metileno, de tamanho molecular maior, e que pode ser utilizada também como poro de transporte (Stavropoulos & Zabaniotou, 2005; Brum et al., 2008).

A ativação física, empregando-se como agente ativante o vapor d'água, propiciou incremento da porosidade e área superficial BET (S_{BET}) do carvão ativado de bambu (CAB), pela qual foi superior aos CAs obtidos a partir de outros materiais precursores disponíveis na literatura (Tabela 4).

Tabela 4. Áreas superficiais BET (S_{BET}) obtidas por diferentes materiais precursores.

Table 4. Superficial areas BET (S_{BET}) obtained by different precursor materials.

Materiais Precursores	Tipo de Ativação	Variáveis do Processo	S_{BET} (m ² g ⁻¹)	Fonte
<i>Bambusa vulgaris</i>	Física com vapor d'água	800 °C por 30 min	684,69	trabalho atual
<i>Bambusa vulgaris</i> var. <i>striata</i>	Física com vapor d'água	650 °C por 2 h	608,00	González & Pliego-Cuervo (2014)
Resíduos de <i>Apuleia leiocarpa</i>	Física com CO ₂ *	850 °C por 1 h	564,90	Nobre et al. (2015)
Palha de cevada	Física com vapor d'água*	700 °C por 1 h	552,00	Pallarés et al. (2018)
Pecíolo de palmeira	Física com CO ₂ *	850 °C por 30 min	546,00	Rezma et al. (2017)
Sabugo de milho	Química com ZnCl ₂	500 °C por 3 h	501,00	Sales et al. (2015)
Casca de nozes	Química com ZnCl ₂ *	600 °C por 2 h	427,00	Costa et al. (2015)

*Processo de ativação precedido da carbonização

Rashidi & Yusup (2017) afirmam que o tempo de ativação prolongado associado aos processos de ativação em duas etapas (etapa de carbonização e etapa de ativação), além do alto consumo de energia, constitui uma limitação para o processo de ativação física. Para a otimização da produção empregou-se nesse estudo um menor tempo de ativação (30 min), quando comparado aos tempos de ativação da literatura (Tabela 4).

Em relação ao pH_{PCZ} , a superfície do CAB é protonada em pH menor que o pH_{PCZ} , o que favorece a adsorção de compostos com carga negativa, e desprotonada para pH maior que o pH_{PCZ} (7,32). Segundo Bautista-Toledo et al. (2005), a importância do pH_{PCZ} no processo de adsorção é que as cargas do adsorvente e do adsorvato devem ser opostas, para que possa ocorrer maior interação eletrostática entre ambas.

O método titulométrico de Boehm demonstrou que o CAB possui funcionalidades ácidas em sua superfície. As características químicas superficiais do carvão ativado influenciam a eficiência dos processos de adsorção, pois carvões com mesma área superficial podem apresentar comportamentos de adsorção diferentes. Observa-se que o CAB apresentou grupos funcionais carboxílicos em maior quantidade, os quais facilitam o processo de adsorção, principalmente se o pH da solução estiver na faixa que favorece a desprotonação destes grupos. Os grupos lactonas e fenólicos são considerados mais fracos e se dissociam em valores de pH mais altos que os grupos carboxílicos (Bueno & Carvalho, 2007).

Os poros produzidos pelo CAB, em forma de favo de mel, são semelhantes aos obtidos a partir de materiais lignocelulósicos, com a estrutura de poros inerente à

origem do precursor (Cherifi et al., 2013; Danish & Ahmad, 2018). Além disso, quanto maior a porosidade, maior a área S_{BET} e, conseqüentemente, melhor a capacidade de adsorção.

A cinética de adsorção mostrou que o preenchimento dos sítios ativos do CAB ocupados pelo corante foi de 90,34% em 24 h (Tabela 2). A molécula de azul de metileno (AM) é relativamente grande e a presença de poros com diâmetros maiores favorece a adsorção desse corante, que é um composto muito usado em ensaios de adsorção (Stavropoulos & Zabaniotou, 2005).

O resultado da interação entre o corante AM (adsorvato) e o CAB (adsorvente) até o ponto de equilíbrio de adsorção é representado pelas isotermas de adsorção. O melhor ajuste obtido (modelo de Langmuir) indica que adsorção do adsorvato na superfície do adsorvente ocorre na forma de monocamada (Attia et al., 2010; Costa et al., 2015).

Finalmente, o valor de q_m obtido para o CAB foi igual ou superior aos CAs obtidos a partir de outros materiais precursores, que variam de 191,94 a 324,50 mg g^{-1} (Tabela 5), o que permite inferir que o CAB obteve elevada capacidade máxima de adsorção para o AM, sendo promissor para o tratamento de corpos d'água com esse corante.

Tabela 5. Capacidade máxima de adsorção (q_m) de azul de metileno (AM) por vários adsorventes.

Table 5. Maximum adsorption capacity (q_m) of methylene blue (MB) by several adsorbents

Material precursor	Tipo de ativação	Variáveis do processo	q_m (mg g^{-1})	Fonte
<i>Bambusa vulgaris</i>	Física com vapor de água	800 °C por 30 min	301,07	Trabalho atual
Candeia	Física com CO_2	800 °C por 1 h	324,50	Borges et al. (2015)
Casca de buriti	Química com ZnCl_2	700 °C por 1,5 h	274,62	Pezoti et al. (2014)
Piaçava	Física com vapor de água	850 °C por 1 h	176,46	Avelar et al. (2010)
Sabugo de milho	Química com ZnCl_2	500 °C por 3 h	128,82	Sales et al. (2015)
Casca de nozes	Química com ZnCl_2	600 °C por 2 h	104,00	Costa et al. (2015)

Conclusões

O *Bambusa vulgaris* e o processo produtivo empregado possibilitaram a produção de um carvão ativado de excelente qualidade, que pode ser usado como adsorvente do corante azul de metileno, apresentando propriedades texturais e adsorptivas desejáveis.

Referências

- Andrade, R. C. et al. Buriti palm stem as a potential renewable source for activated carbon production. **Environmental Technology & Innovation**, v. 3, p. 28-34, 2015. DOI: 10.1016/j.eti.2015.02.002.
- Attia, A. A. et al. Adsorption of chromium ion (VI) by acid activated carbon. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 27, n. 1, p. 183-193, 2010. DOI: 10.1590/S0104-66322010000100016.

- Avelar, F. F. et al. The use of piassava fibers (*Attalea funifera*) in the preparation of activated carbon. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 12, p. 4639-4645, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.01.103.
- Bautista-Toledo, I. et al. Bisphenol A removal from water by activated carbon: effects of carbon characteristics and solution chemistry. **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 16, p. 6246–6250, 2005. DOI: 10.1021/es0481169.
- Bhatnagar, A. et al. An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. **Chemical Engineering Journal**, v. 219, p. 499-511, 2013. DOI: 10.1016/j.cej.2012.12.038.
- Boehm, H. P. Surface chemical characterization of carbons from adsorption studies. In: Bottani, E. J. & Tascón, J. M. D. (Ed.). **Adsorption by carbons**. [S.l.]: Elsevier Science, 2008. p. 301-327.
- Boehm, H. P. Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment. **Carbon**, v. 40, n. 2, p. 145–149, 2002. DOI: 10.1016/S0008-6223(01)00165-8.
- Borges, W. M. S. et al. Carvão ativado de resíduo de madeira de candeia: produção, caracterização e avaliação do potencial adsorptivo. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 6, p. 1952-1967, 2015. DOI: 10.5935/1984-6835.20150115.
- Brum, S. S. et al. Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Química Nova**, v. 31, n. 5, p. 1048-1052, 2008.
- Bueno, C. I. D. C. & Carvalho, W. A. Remoção de chumbo (II) em sistemas descontínuos por carvões ativados com ácido fosfórico e com vapor. **Química Nova**, v. 30, n. 8, p. 1911–1918, 2007.
- Cherifi, H. et al. Kinetic studies on the adsorption of methylene blue onto vegetal fiber activated carbons. **Applied Surface Science**, v. 282, p. 52-59, 2013. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.05.031.
- Costa, P. D. et al. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 4, p. 1272-1285, 2015. DOI: 10.5935/1984-6835.20150070.
- Danish, M. & Ahmad, T. A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 87, p. 1-21, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.02.003.
- Fang, C. H. et al. An overview on bamboo culm flattening. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 65-74, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.085.
- González-García, P. Activated carbon from lignocellulosics precursors: a review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 1, p. 1393-1414, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.117.
- González, P. G. & Pliego-Cuervo, Y. B. Adsorption of Cd (II), Hg (II) and Zn (II) from aqueous solution using mesoporous activated carbon produced from *Bambusa vulgaris striata*. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, n. 11, p. 2715-2724, 2014. DOI: 10.1016/j.cherd.2014.02.013.
- Lobovikov, M. et al. **World bamboo resources: a thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment 2005**. Rome: FAO, 2007.
- Nobre, J. C. R. et al. Produção de carvão ativado de resíduo madeireiro da região Amazônica. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 895-906, 2015. DOI: 10.18671/scifor.v43n108.14.
- Pallarés, J. et al. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. **Biomass and Bioenergy**, v. 115, p. 64-73, 2018. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.04.015.
- Pezoti, O. et al. Adsorption studies of methylene blue onto ZnCl₂-activated carbon produced from buriti shells (*Mauritia flexuosa* L.). **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 6, p. 4401-4407, 2014. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.02.007.
- Rashidi, N. A. & Yusup, S. A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes. **Chemical Engineering Journal**, v. 314, p. 277-290, 2017. DOI: 10.1016/j.cej.2016.11.059.
- Rezma, S. et al. Physically activated microporous carbon from a new biomass source: date palm petioles. **Comptes Rendus Chimie**, v. 20, n. 9-10, p. 881-887, 2017. DOI: 10.1016/j.crci.2017.05.003.
- Skaar, C. **Wood-water relations**. New York: Springer, 1988.
- Sales, P. F. et al. Produção, caracterização e aplicação do carvão ativado obtido a partir do sabugo de milho: a busca pelo reaproveitamento de um resíduo agroindustrial. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 4, p. 1174-1188, 2015.
- Stavropoulos, G. G. & Zabaniotou, A. A. Production and characterization of activated carbons from olive-seed waste residue. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 82, n. 1, p. 79-85, 2005. DOI: 10.1016/j.micromeso.2005.03.009.
- Teixeira, V. G. et al. Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 808-818, 2001. DOI: 10.1590/S0100-40422001000600019.
- Tomazello, M. F. & Azzini, A. Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica de colmos de *Bambusa vulgaris* Schrad. **Instituto de Pesquisas Estudos Florestais**, n. 36, p. 43-50, 1987.
- Van-Dam, J. E. G. et al. Bamboo production for industrial utilization. In: Alexopoulou, E. (Ed.). **Perennial grasses for bioenergy and bioproducts**. [S.l.]: Academic Press, 2018. p. 175-216.