



Adsorção de dióxido de carbono utilizando o biochar produzido a partir de sementes de mangaba (*Hancornia speciosa*)

Adsorption of carbon dioxide using a biochar produced from mangaba seeds (*Hancornia speciosa*)

L. F. S. Moura^{*}; J. J. Marques; J. A. Freitas

Departamento de Engenharia Ambiental/Laboratório de Controle e Poluição do Ar, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-Sergipe, Brasil.

*layfernandes20@gmail.com

(Recebido em 31 de janeiro de 2018; aceito em 12 de março de 2018)

A concentração dos gases de efeito estufa tem aumentado consideravelmente na atmosfera terrestre devido às ações antrópicas, intensificando o aquecimento global e desencadeando mudanças climáticas. Por conta desse cenário, ações estão sendo tomadas para reduzir as emissões desses poluentes, sobretudo o dióxido de carbono, CO₂. O Protocolo de Kvoto (Kvoto, 1997) e a 21^a Conferência das Partes, COP21 (Paris, 2015), são exemplos de acordos globais para a redução das mudanças climáticas. Nesse contexto, tecnologias avançadas para o sequestro de dióxido de carbono estão em desenvolvimento, dentre as quais aquelas baseadas na adsorção física. O estudo integra essa classe de processos e utilizou um *biochar* produzido através da pirólise das sementes da mangaba (*Hancornia speciosa*) como adsorvente. O *biochar* foi caracterizado quanto à área superficial, diâmetro de poros, morfologia e determinação dos grupos funcionais. A adsorção de CO₂ foi realizada utilizando-se a técnica volumétrica estática, variando-se a pressão inicial do sistema que consistiu numa coluna de leito fixo em escala semi-piloto. Os dados experimentais foram ajustados a modelos da literatura. O modelo de Freundlich foi o que melhor se ajustou, constatando a adsorção em multicamadas. A cinética de adsorção seguiu o modelo de difusão intrapartícula, indicando que a difusão é a etapa limitante do processo. O valor máximo de capacidade adsorptiva obtido para o *biochar* foi 5,21 mol CO₂/kg de bioadsorvente.

Palavras-chave: Aquecimento global; adsorção; *biochar*.

The concentration of greenhouse gases has increased considerably in the Earth's atmosphere due to human actions, intensifying global warming and triggering climate change. Because of this scenario, actions are being taken to reduce emissions of these pollutants, especially carbon dioxide, CO₂. The Kyoto Protocol (Kyoto, 1997) and the 21st Conference of the Parties, COP21 (Paris, 2015), are examples of global agreements to reduce climate change. In this context, advanced technologies for the sequestration of carbon dioxide are under development, especially those based on the physical adsorption. This study integrates this class of processes and used a *biochar* produced through the pyrolysis of mangaba seeds (*Hancornia speciosa*) as adsorbent material. *Biochar* was characterized in terms of surface area, pore diameter, morphology and determination of functional groups. The adsorption of CO₂ was performed using the static volumetric technique, by varying the initial pressure of the system, which consisted of a fixed-bed column on a semi-pilot scale. The experimental data were adjusted to models in the literature. The Freundlich model was the best fit, thus confirming the adsorption in multilayers. The adsorption kinetics followed the intraparticle diffusion model, indicating that diffusion is the limiting step of the process. The higher adsorption capacity was verified, with a maximum value of 5.21 mol CO₂ / kg of bioadsorbent.

Keywords: Global warming; adsorption; *biochar*.

1. INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno natural e de extrema importância para o equilíbrio da vida em nosso planeta. Os gases presentes na atmosfera terrestre, também conhecidos como gases de efeito estufa (GEEs), retém o calor irradiado pela superfície da Terra e, com isso, mantém o globo aquecido e propenso à vida [1]. Porém, as ações antrópicas têm causado um aumento na concentração dos GEEs, incluindo principalmente o vapor de água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), ozônio (O₃), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrofluorcarbonetos (HFCs) [1].

Apontados pelos cientistas como os principais responsáveis pela intensificação do aquecimento global, os poluentes gerados em grandes quantidades pela indústria e em outros setores econômicos, são lançados diretamente na atmosfera sem tratamento, o que leva a sérias consequências tanto para o clima quanto para a saúde humana, os ecossistemas, a agricultura e o meio ambiente. Em 2014, o CO₂ contribuiu com 77,7% do total de emissões, seguido do CH₄, com parcela de 14,9%, do N₂O, com 5,1%, e outros gases contribuintes, com 2,5% das emissões totais [2].

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2014), apesar do grande número de políticas de mitigação de emissão de gases de estufa, essas emissões aumentaram significativamente nos últimos anos. No período anterior à Revolução Industrial, o nível atmosférico de dióxido de carbono correspondia a 280 ppm; em 2013, sua concentração foi de 400 ppm, o que correspondeu a um aumento da temperatura global em aproximadamente 0,8°C [3]. Para se atingir a meta de limitação do aumento da temperatura média global para abaixo de 2°C, tornam-se necessários desafios econômicos, tecnológicos e institucionais [4]. Existem tecnologias avançadas que podem ser aplicadas para sequestrar o CO₂ da corrente do gás antes de ser enviado para o transporte, como, por exemplo, absorção, adsorção, separação por membrana, destilação criogênica, dentre outros [5], porém a que tem se mostrado mais eficiente e mais viável economicamente é o processo de adsorção física.

A adsorção pode ser descrita de forma simplificada como sendo a adesão de moléculas a uma superfície. O termo adsorbato se refere às moléculas da fase líquida ou gasosa capturadas, e o termo adsorvente se refere ao sólido que retém o adsorbato [6]. Durante o processo de adsorção existe uma diminuição na energia livre do sistema, sendo o processo espontâneo ($\Delta G < 0$). Como $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, a variação de entalpia geralmente será negativa, implicando que a adsorção é um processo normalmente exotérmico [7]. Esse processo é utilizado em diversas aplicações, a exemplo da recuperação de um produto valioso, da separação de odores e impurezas de gases industriais e até mesmo em aplicações caseiras em ventilação exaustora. Dentre os benefícios de se utilizar o processo de adsorção, encontra-se a durabilidade do adsorvente; a seletividade do adsorvente; a capacidade adsortiva e a estabilidade do adsorvente após muitos ciclos de adsorção/dessorção [8].

A captura do dióxido de carbono por processos de adsorção é principalmente baseada na preferência de adsorção desse gás em um meio poroso. A primeira e mais importante etapa consiste em encontrar um adsorvente adequado. Os materiais mais convencionais são as zeólitas naturais, *biochars*, carvões ativados e materiais baseados em aminas e sítios com basicidade de Lewis. O processo de adsorção física de CO₂ em diversos adsorventes tem despertado o interesse científico pelo conhecimento dos mecanismos e das interações intermoleculares que justificam o sequestro do dióxido de carbono na superfície dos adsorventes [9].

Diante deste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a capacidade adsortiva do *biochar* produzido a partir de sementes de mangaba (*Hancornia speciosa*) frente ao dióxido de carbono, numa coluna de adsorção de leito fixo, visando à captura de CO₂.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O adsorvente escolhido foi um *biochar* - material recentemente patenteado para uso na remoção de óleos e graxas [10]. É um material de origem vegetal que foi produzido a partir de uma fruta de grande ocorrência no Norte e Nordeste do Brasil: a mangaba. Através da pirólise dos caroços de seus frutos, resultou em um tipo de carvão vegetal atualmente mais conhecido como *biochar*. A adsorção foi estudada através de isotermas, que relaciona a quantidade de adsorbato retida pelo adsorvente com a pressão de equilíbrio de adsorção (P). A temperatura (T) e os demais parâmetros mantidos constantes.

Caracterização do adsorvente

O adsorvente foi caracterizado de acordo com sua área superficial, diâmetro dos poros, morfologia e determinação dos grupos funcionais. Para o cálculo da área superficial e do diâmetro dos poros foi usada a técnica baseada na adsorção de N₂ a 77K, tendo sido utilizado um

equipamento de marca NOVA®, modelo 1200e. Para realizar a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), o microscópio eletrônico de varredura utilizado foi da marca JEOL®, modelo JSM-5700, a voltagem utilizada no experimento foi de 5 Kv e a resolução com uma aproximação de 500 vezes. Para a análise espectroscópica por infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), foi utilizada a técnica da pastilha de KBr, o espectrômetro utilizado para realizar essa análise foi da marca SHIMADZU®, modelo IRPrestige-21.

Obtenção das isotermas

A técnica utilizada para obtenção das isotermas foi a volumétrica estática, na qual uma quantidade conhecida de gás foi admitida ao recipiente contendo a massa pré-determinada do adsorvente, mantendo-se a temperatura constante. A quantidade de gás adsorvido é medida conforme a adsorção ocorre, com diminuição da pressão no volume confinado até que o equilíbrio seja estabelecido [11].

O equipamento utilizado para obtenção dos dados encontra-se ilustrado na Figura 1.

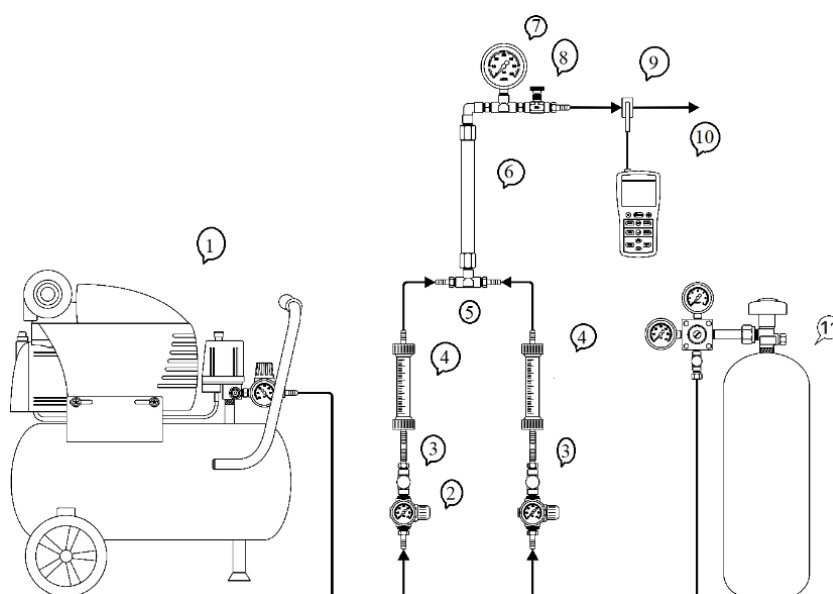


Figura 1- Aparato experimental montado em laboratório para a adsorção de CO₂ em leito fixo

Onde:

1. Compressor de ar;
2. Válvulas reguladoras de pressão que visam manter a pressão de alimentação constante;
3. Válvulas de agulha em latão, cuja finalidade é controlar a vazão do gás;
4. Rotâmetros marca CONAUT® para medição de vazões de gases na faixa de 0 a 10 NL.min⁻¹, calibrado para ar atmosférico.
5. Válvula de agulha em latão;
6. Dimensões: 52,5 cm de comprimento, 52 mm de diâmetro externo e 42 mm de diâmetro interno. O volume total da coluna é de 172 cm³;
7. Um manômetro tipo bourdon, com faixa de pressões de 0 a 10 bar;
8. Válvula de agulha;
9. Um canister em acrílico no qual será inserido o sensor para medição da concentração de dióxido de carbono no gás que sai da coluna;
10. Medidor da concentração de CO₂, marca Instrutherm®, modelo CO₂ Analyzer.
11. Cilindro contendo dióxido de carbono da White Martins®, 99,5% de CO₂.

A quantidade de gás adsorvida à pressão de equilíbrio foi calculada pela diferença entre a quantidade de gás admitida e a quantidade de gás necessária para preencher o espaço em torno do adsorvente, isto é, o espaço morto, à pressão de equilíbrio. A isoterma de adsorção é a curva obtida

na representação gráfica dos pontos obtidos em diversas situações experimentais, admitindo-se cargas sucessivas de gás, medindo-se a pressão de equilíbrio e determinando-se as massas adsorvidas mediante o uso de uma equação de estado. Para o presente trabalho, foi escolhida a equação de Peng-Robinson.

Os dados obtidos experimentalmente foram ajustados a modelos disponíveis na literatura, destacando-se as isotermas apresentadas na Tabela 1, analisando-se a qualidade dos ajustes por meio dos parâmetros estatísticos adequados. Os ajustes desses modelos aos dados experimentais foram realizados com o auxílio do software *Statistica 6.4*. O método de estimação utilizado foi o de Gauss-Newton.

Tabela 1: Isotermas de adsorção no equilíbrio [12]

Isotermas	Não-Linear	Linear	Gráfico
Langmuir	$q_e = q_m K_L \frac{P}{1 + K_L P}$	$\frac{P}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{P}{q_m}$	$\frac{P}{q_e}$ vs P
Freundlich	$q_e = K_f P^{1/n}$	$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln P$	$\ln(q_e)$ vs $\ln P$
Toth	$q_e = \frac{K_T P}{(\alpha_T + P)^{1/t}}$	$\ln\left(\frac{q_e}{K_T}\right) = \ln P - \frac{1}{t} \ln(\alpha_T + P)$	$\ln\left(\frac{q_e}{K_T}\right)$ vs $\ln P$

Onde P é a pressão do sistema, em bar; q_e é a concentração do adsorbato na fase sólida em equilíbrio com a fase fluida, a uma pressão P, em mol.g⁻¹; q_m é a capacidade máxima adsortiva, em mol.g⁻¹; K_L é a constante de Langmuir relacionada à energia de ligação entre o adsorbato e o adsorvente (g.mol⁻¹); K_f é o coeficiente de adsorção de Freundlich, relacionado à capacidade adsortiva (mol.g⁻¹); n é um parâmetro empírico que se relaciona com a intensidade de adsorção; α_T e t são constantes da isoterma de Toth.

Estudo da cinética de adsorção

A cinética de adsorção foi investigada para o *biochar*. A temperatura do sistema foi a ambiente (25 ± 1)°C e o sistema encontrava-se pressurizado a 2 bar. Em intervalos de tempo pré-determinados, a queda de pressão do sistema foi registrada e a sua respectiva capacidade adsortiva foi calculada.

Foram analisados os ajustes dos modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula (Tabela 2), comparando-se os coeficientes de determinação (R²) e a função do erro médio relativo (ARE).

Tabela 2- Modelos cinéticos

Modelos cinéticos	Equação
Pseudo-primeira ordem	$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$
Pseudo-segunda ordem	$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$
Difusão intrapartícula	$q_t = K_{dif} t^{0,5} + C$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área superficial do *biochar* (Tabela 3) foi obtida através da técnica de BET (Brunauer, Emmet e Teller). Percebe-se que a área superficial do *biochar* foi relativamente alta quando comparada com outros dados da literatura (Tabela 4), concluindo-se, portanto, que não há a necessidade de funcionalização do material. Sua área superficial é semelhante à área superficial do *biochar* produzido a partir da pirólise da madeira e da espiga de milho (Tabela 4).

Tabela 3- Caracterização textural do sólido adsorvente.

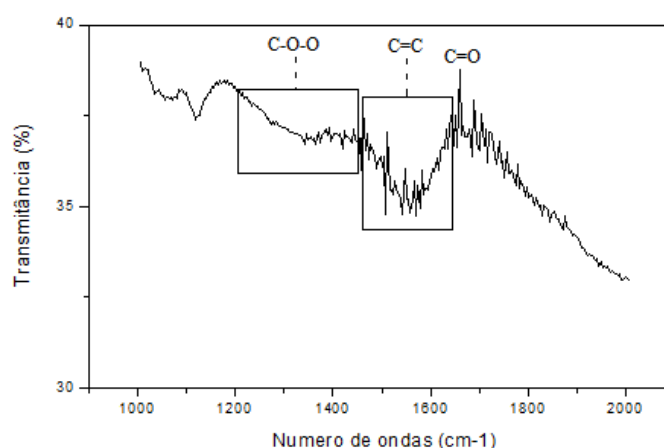
Propriedades	Biochar
Volume total dos poros, $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	0,11
Área superficial, $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	137
Diâmetro médio do poro, Å	16
Diâmetro médio da partícula, mm	0,56
Massa específica real, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,798

Interpretando a caracterização textural (Tabela 3), destaca-se que o material pode ser classificado como microporoso, por possuir um diâmetro médio do poro menor que 20 Å. Baseado nas propriedades dos poros, a temperatura de pirólise de 600°C foi adequada à produção do *biochar*, uma vez que, uma elevada área superficial está conectada a uma boa porosidade e, por consequência, ao aumento da capacidade adsorvente [13].

Tabela 4- Área superficial e temperatura de pirólise de biochars disponíveis na literatura.

Origem do <i>biochar</i>	Temperatura de pirólise, °C	Área superficial, $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	Referência
Lodo de digestão anaeróbia	800	101	[14]
Torta de mamona	400	4	[15]
Torta de mamona	550	3	[13]
Espiga de milho	600	123	[16]
Madeira	600	147	[16]
Casca de arroz	600	11	[16]
Serragem	600	7	[16]
Palha de trigo	700	26	[17]
Sementes de mangaba	600	137	Presente trabalho

A determinação dos grupos funcionais do *biochar* foi realizada através da técnica de FT-IR (Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier). Ampliando-se o espectro nas bandas entre 2000 e 1000 cm^{-1} (Figura 3), constatam-se vibrações aproximadamente perto da banda 1700 cm^{-1} , que estão provavelmente relacionadas a ligações C=O em ácidos carboxílicos [15]. Os estiramentos vibracionais observados entre as bandas 1600 e 1400 cm^{-1} são provavelmente relacionados às ligações C=C e C-C [18].

Figura 2- Espectro de FT-IR para o *biochar*, com aproximação entre as bandas 2000 cm^{-1} e 1000 cm^{-1} .

A caracterização morfológica do material foi realizada através do microscópio eletrônico de varredura. Boa parte da porosidade que pode ser vista na análise morfológica do *biochar* (Figura 4) é resultado da resistência das estruturas dos materiais, como por exemplo as paredes celulares e

os vasos condutores. A alta temperatura (600°C) de pirólise a qual o material foi submetido, proporciona a liberação de material volátil, contribuindo para a formação dos poros [19].

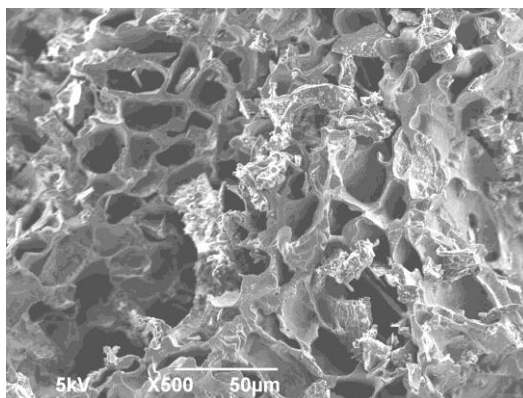


Figura 3- Microscopia eletrônica de varredura do biochar com ampliação de 500 vezes.

As isotermas de equilíbrio de adsorção de CO₂ sobre o *biochar* foram feitas no Laboratório de Controle da Poluição (LCPA) no Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Sergipe. O adsorvente foi previamente regenerado a uma temperatura de 180°C e um tempo de 1 hora com o objetivo de remover a presença da umidade.

Os resultados dos ensaios volumétricos estáticos realizados na coluna de adsorção desenvolvida para o presente estudo com uso do *biochar*, foram convertidos em gráficos relacionando a capacidade de adsorção com a pressão de equilíbrio, para cada pressão inicial (ou massa de CO₂ inicial). Os experimentos estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5- Resultados da capacidade máxima adsortiva para o *biochar*.

Experimento	Pressão inicial (bar)	Temperatura (°C)	Capacidade máxima de adsorção (mol.kg ⁻¹)
1	2,0	25	1,59
2	2,6	25	2,40
3	3,0	25	3,21
4	3,6	25	3,78
5	4,0	25	4,83
6	4,6	25	5,21

Na Figura 5 ilustra-se a isoterma de adsorção para o *biochar* na faixa de pressões de 2 a 4,6 bar. A partir da pressão inicial de 2 bar, a capacidade de adsorção cresceu de modo intenso e aproximadamente linear até a pressão inicial 4,6 bar, com tendência à saturação em pressões mais elevadas. Pode-se observar que a capacidade de adsorção aumenta com o aumento das pressões de equilíbrios na temperatura de 25°C. Esse fator pode ser atribuído à natureza exotérmica do processo de adsorção [20].

A tabela 6 mostra a comparação entre a capacidade adsortiva do *biochar* com outros materiais adsorventes frente ao sequestro de CO₂. A partir desse estudo comparativo, é possível observar que o *biochar* de sementes de mangaba tem uma capacidade adsortiva consideravelmente maior que os materiais que serviram como base de comparação para esse estudo.

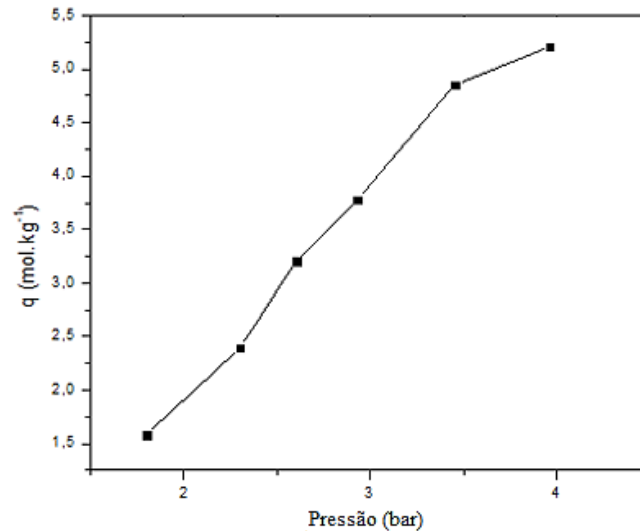


Figura 4- Isoterma de adsorção do CO₂ no biochar para a temperatura do experimento de 25°C.

Tabela 6- Capacidade adsortiva máxima de adsorventes disponíveis na literatura

Biochar	Adsorvato	Temperatura de adsorção (°C)	Capacidade de adsorção (mol.kg ⁻¹)	Referência
Casca de amêndoa	CO ₂	25	2,7	[21]
Serragem	CO ₂	25	3,2	[22]
Bambu	CO ₂	25	4,5	[23]
Caule de algodão	CO ₂	20	2,18	[24]
Madeira	CO ₂	25	1,11	[25]
Caroço de azeitona	CO ₂	0	4,5	[25]
Biochar de sementes de mangaba	CO ₂	25	5,21	Presente trabalho

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de isotermas de Langmuir, Freundlich e Toth e os parâmetros dos ajustes aos modelos e os coeficientes de determinação podem ser vistos na Tabela 7. A indicação da favorabilidade da adsorção pode ser feita através do fator de separação de Langmuir, R_L . Quando $R_L > 1$ a isoterma não é favorável, quando $R_L < 1$ a isoterma é favorável e quando $R_L = 0$, irreversível. O valor do R_L calculado ficou dentro da faixa de 0 a 1, o que sugere que a isoterma seja favorável [26].

Levando em consideração os valores dos coeficientes de determinação (R^2), o modelo de Freundlich (Figura 6) apresenta o melhor ajuste aos dados experimentais, com um R^2 de 0,9658. Esse modelo indica que as moléculas adsorvidas formam camadas sucessivas na superfície do adsorvente, implicando que é provável que a adsorção tenha ocorrido em multicamadas nos poros do biochar à temperatura de 25°C [26].

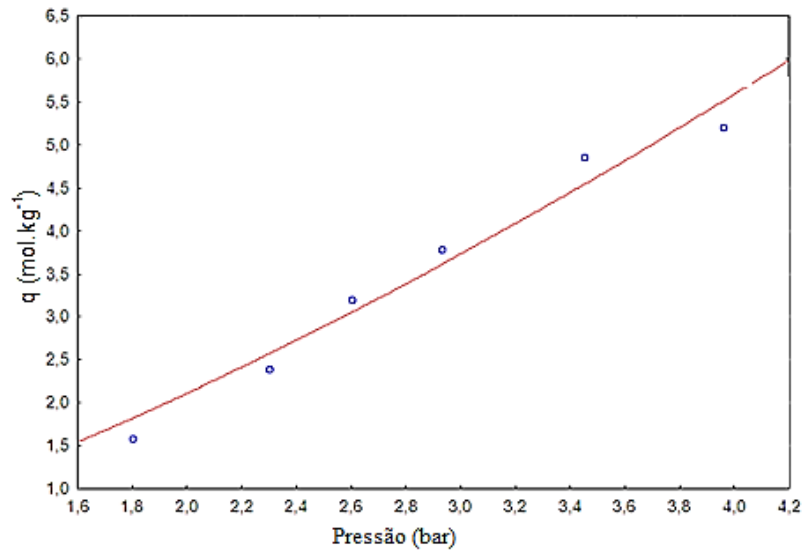


Figura 5- Isoterma de adsorção do CO₂ no biochar ajustada ao modelo de Freundlich.

Tabela 7- Modelos de isotermas e seus respectivos parâmetros e coeficientes de determinação.

Isotermas	Parâmetros	R ²
Langmuir	qm=186,7161 (mol.g ⁻¹) K _L = 0,0067 (g.mol ⁻¹)	0,9413
Freundlich	k= 0,7971 (mol.g ⁻¹) n=0,7120	0,9832
Toth	k= 1,2888 (mol.g ⁻¹) α = 530,68 t= 0,0019	0,9447

O estudo cinético foi realizado a uma temperatura de 25°C, pressão de 2 bar e ajustado aos três modelos cinéticos escolhidos (pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula) para melhor entender o processo que governa a adsorção do adsorvente estudado. Os dados cinéticos experimentais mostram que o equilíbrio foi atingido em menos de 250 minutos, com um suave aumento da capacidade adsorviva a partir de 200 minutos (Figura 7).

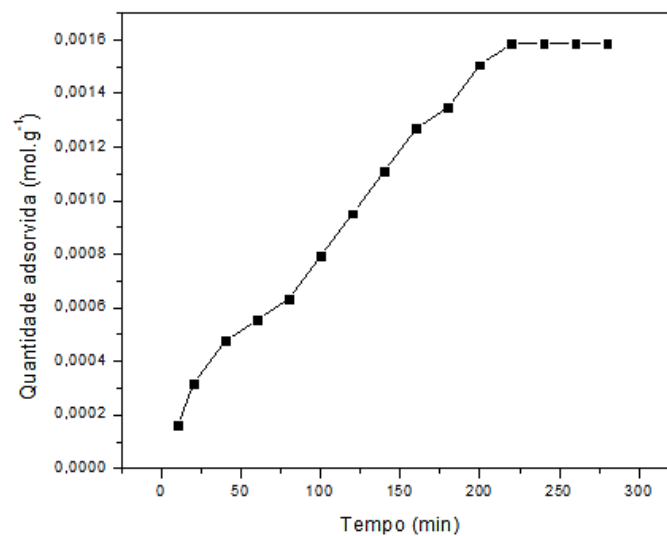


Figura 6- Cinética de adsorção do biochar; temperatura de 25°C e pressão de 2 bar.

Os valores dos parâmetros cinéticos para cada modelo e seus respectivos coeficientes de determinação e porcentagens de erro encontram-se na Tabela 8. Através da análise quantitativa dos coeficientes de determinação e das porcentagens de erro, conclui-se que o modelo de difusão intrapartícula proporciona o melhor ajuste aos dados experimentais.

Os dados obtidos pela técnica de BET e pela microscopia eletrônica de varredura comprovam que o *biochar* possui uma grande área superficial e uma estrutura interna desenvolvida, justificando, portanto, a hipótese de ocorrência da difusão intrapartícula.

Baseado no bom ajuste ao modelo de difusão intrapartícula, conclui-se que o processo de adsorção aconteceu em três etapas: adsorção na superfície, seguida da adsorção gradual, na qual a difusão intrapartícula é etapa limitante e, por último, ocorre a fase do equilíbrio, quando a difusão intrapartícula provoca a redução da velocidade devido à menor quantidade de sítios de adsorção acessíveis.

Tabela 8- Modelos cinéticos com seus respectivos parâmetros, coeficientes de determinação e porcentagens de erro

Modelos cinéticos	Parâmetros cinéticos	R ²	ARE (%)
Pseudo-primeira ordem	$q_e = 0,002245 \text{ (mol.g}^{-1}\text{)}$ $k = 0,004952 \text{ (min)}^{-1}$	0,9900	0,4549
Pseudo-segunda ordem	$q = 0,003527 \text{ (mol.g}^{-1}\text{)}$ $k = 0,938131 \text{ (mol.g}^{-1}\text{min}^{-1}\text{)}$	0,9895	0,3340
Difusão intrapartícula	$K_{dif} = 0,000118 \text{ (mol.g}^{-1}\text{min}^{-0,5}\text{)}$ $C = -0,000282 \text{ (mol.g}^{-1}\text{)}$	0,9865	0,2816

4. CONCLUSÃO

O *biochar* produzido a partir da semente de mangaba (*Hancornia Speciosa*) exibe propriedades que corroboram sua adequação como excelente material adsorvente para CO₂. Os dados experimentais foram ajustados a três tipos diferentes de isotermas: Langmuir, Freundlich e Toth, sendo que a que melhor se ajustou foi a isoterma de Freundlich, reforçando a hipótese de adsorção em multicamadas.

Os experimentos de adsorção do dióxido de carbono no *biochar* mostraram que o mesmo tem uma elevada capacidade adsorvente, atingindo cerca de 5,21 mol.kg⁻¹, o que equivale a 229,24 mg de CO₂.g⁻¹ de carvão, a 25°C, para uma pressão inicial de aproximadamente 4,6 bar. A capacidade máxima adsorvente do *biochar* mostrou-se coerente com os resultados encontrados na literatura. O estudo cinético classificou a difusão intrapartícula como a etapa limitante do processo.

A alta capacidade adsorvente sugere que o *biochar* produzido a partir das sementes de mangaba é um adsorvente promissor para a captura de CO₂.

5. AGRADECIMENTOS

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento disponibilizado à esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Prasad PVV, Thomas JMG, Narayanan S. Global Warming Effects. Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2017 Sep;3:289-299, doi:10.1016/B978-0-12-394807-6.00013-7.
2. National Greenhouse Gas Inventory Data for the period 1990-2014. United Nations. Framework Convention on Climate Change, UNFCCC; 2016.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC; 2014.
4. Conferência sobre Mudanças Climáticas das Nações Unidas – COP 21, Paris; 2015.

5. Leung DYC, Caramanna G.; Maroto-Valer MM. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Nov;39:426–443, doi:10.1016/j.rser.2014.07.093.
6. Mansour RB, Habib MA, Bamidele OE, Basha M, Qasem NAA, Peedikakkal A, Laoui T, Ali M. Carbon capture by physical adsorption: materials, experimental investigations and numerical modelling and simulation- a review. *Applied Energy*, 2016 Jan;161:225-255, doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.011.
7. Ruthven DM. Principles of adsorption and adsorption processes. John Wiley and Sons. 1984;467-524.
8. Songolzadeh M, Ravanchi MT, Soleimani M. Carbon dioxide capture and storage: a general review on adsorbents. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012;6:10.
9. Dias MFC. Estudos De Adsorção De Co2 Gasoso Em Biocarvão (Biochar) [Dissertation]. Coimbra (PT): Universidade de Coimbra; 2014.
10. Leite NS, Silva RR, Marques JJ, Tambourgi EB, Silva GF, Freitas LS, Santos RM, inventores; Universidade Federal de Sergipe, depositante. Uso de um bioadsorvente produzido a partir de sementes de mangaba para a remoção de contaminantes de águas e efluentes líquidos. BR 10 2017 001445 2. 2017 Jan 24.
11. Sing KSW. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure & Applied Chemistry*. 1982;54:2201-2218.
12. Dehghani MH, Dehghan A, Najafpoor A. Removing Reactive Red 120 and 196 using chitosan/zeolite composite from aqueous solutions: Kinetics, isotherms, and process optimization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2017 Mar;51:185–195, doi:10.1016/j.jiec.2017.03.001.
13. Hilioti Z, Michailof CM, Valasiadis D, Iliopoulou EF, Koidou V, Lappas AA. Characterization of castor plant-derived biochar and their effects as soil amendments on seedlings. *Biomass and Bioenergy*. 2017 Oct;105:96-106, doi:10.1016/j.biombioe.2017.06.022.
14. Hung CH, Tsai WT, Chen JW, Lin YQ, Chang, YM. Characterization of biochar prepared from biogas digestate. *Waste Management*. 2017 Aug;66:53-60, doi:10.1016/j.wasman.2017.04.034.
15. Kalinke C, Oliveira PR, Oliveira GA, Mangrich AS, Junior LH, Bergamini MF. Activated biochar: Preparation, characterization and electroanalytical application in an alternative strategy of nickel determination, *Analytica Chimica Acta*. 2017 Aug;983:103-111, doi:10.1016/j.aca.2017.06.025.
16. Kizito S, Luo H, Wu S, Ajmal Z, Lv T, Dong R. Phosphate recovery from liquid fraction of anaerobic digestate using four slow pyrolyzed biochars: Dynamics of adsorption, desorption and regeneration. *Journal of Environmental Management*. 2017 Oct;201:260-267, doi:10.1016/j.jenvman.2017.06.057.
17. Oleszczuk P, Bundyra WC, Bogusz A, Skwarek E, Ok YS. Characterization of nanoparticles of biochars from different biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016 Sep;121:165-172, doi:10.1016/j.jaap.2016.07.017.
18. Luo L, Xu C, Chen Z, Zhang S. Properties of biomass-derived biochars: Combined effects of operating conditions and biomass types. *Bioresource Technology*. 2015 Sep;192:83-89, doi:10.1016/j.biortech.2015.05.054.
19. Taherymoosavi S, Verheyen V, Munroe P, Joseph S, Reynolds A. Characterization of organic compounds in biochars derived from municipal solid waste. *Waste Management*. 2017 Sep;67:131-142, doi:10.1016/j.wasman.2017.05.052.
20. Jedli H, Jbara A, Hedfi H, Bouzgarrou S, Slimi K. Carbon dioxide adsorption isotherm on various cap rock in a batch reactor for CO₂ sequestration processes. *Applied Clay Science*. 2017 Feb;136:199-207, doi:10.1016/j.clay.2016.11.022.
21. Plaza MG, Garcia S, Rubiera F, Pis JJ, Pevida C. Post-combustion CO₂ capture with a commercial activated carbon: Comparison of different regeneration strategies. *Chemical Engineering Journal*. 2010 Sep;163:41-47, doi:10.1016/j.cej.2010.07.030.
22. Sevilla M, Fuertes AB. CO₂ adsorption by activated templated carbons. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2012 Jan;366:147-154, doi:10.1016/j.jcis.2011.09.038.
23. Wei H, Deng S, Hu B, Chen Z, Wang B, Huang J, Yu G. Granular Bamboo-Derived Activated Carbon for High CO₂ Adsorption: The Dominant Role of Narrow Micropores. *ChemSusChem*. 2012 Nov;5:2354-2360, doi:10.1002/cssc.201200570.
24. Zhang X, Zhang S, Yang H, Feng Y, Chen Y, Wang X, Chen H. Nitrogen enriched *biochar* modified by high temperature CO₂-ammonia treatment: Characterization and adsorption of CO₂. *Chem. Eng. J*. 2014 Dec;257:20-27, doi:10.1016/j.cej.2014.07.024.
25. Plaza MG, Previda C, Arias B, Feroso J, Casal MD, Martin CF, Rubiera F, Pis JJ. Development of low-cost biomass-based adsorbents for postcombustion CO₂ capture. *Fuel*. 2009 Dec;88:2442-2447, doi:10.1016/j.fuel.2009.02.025.
26. Rashidi NA, Yusup S, Borhan A. Isotherm and thermodynamic analysis of carbon dioxide on activated carbon. *Procedia Engineering*. 2016;148:630-637, doi:10.1016/j.proeng.2016.06.527.