

## CARACTERIZAÇÃO DO BIOCARVÃO ORIUNDO DA PIRÓLISE DA CASCA DE ARROZ E APLICAÇÃO COMO ADSORVENTE DE Cd e Pb: UMA ANÁLISE DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E ENSAIO DE DESSORÇÃO

Mariana Balieiro RODRIGUES<sup>1</sup>; Valéria Guimarães Silvestre RODRIGUES<sup>2</sup>; Silvio CRESTANA<sup>3</sup>

**Resumo** – Neste trabalho buscou-se caracterizar o biocarvão produzido a partir da pirólise da casca de arroz e estudar a viabilidade de utilização desse material para remediação de áreas contaminadas por metais potencialmente tóxicos, como o cádmio (Cd) e chumbo (Pb). Esta abordagem é de extrema importância, pois promove a reciclagem da casca de arroz, que é um resíduo agroindustrial produzido em abundância no Brasil. Assim, realizou-se a determinação do pH, potencial de óxido-redução (Eh), condutividade elétrica (CE),  $\Delta$ pH do biocarvão da casca de arroz pirolizado a 350°C e realizou-se ensaios de adsorção e dessorção do tipo equilíbrio em lote com soluções monoelementares de Cd e Pb. A partir dos dados experimentais, construiu-se isotermas de adsorção para cada uma das soluções e empregou-se regressão linear e não linear para enquadrar aos dados experimentais em um dos modelos teóricos de adsorção, tais como Langmuir, Linear e Freundlich. A partir desse estudo, observou-se que todos os contaminantes apresentaram curva de adsorção bem enquadradas no modelo de isoterma proposto por Langmuir, isto significa que a adsorção ocorre em sítios específicos e, após a formação de uma monocamada de adsorção, o mecanismo cessa. Para a adsorção de Cd o  $R^2$  foi de 0,99995 e a capacidade máxima de adsorção estimada para esse modelo foi de 225,69 mg L<sup>-1</sup>. Já o Pb o valor de  $R^2$  foi de 0,9093 e  $q_{e_{m\acute{a}x}}$  de 10,51 mg L<sup>-1</sup>. Ainda, observa-se que o biocarvão apresenta elevada taxa de retenção.

**Abstract** – The aim of this work was to characterize biochar produced from the pyrolysis of rice husks and to study the feasibility of using this material for remediation of areas contaminated with potentially toxic metals such as cadmium (Cd) and lead (Pb). This approach is interesting because promote the recycling of rice husk, that is organic residue abundant in Brazil. For this purpose, the pH, oxidation-reduction potential (Eh), electrical conductivity (EC),  $\Delta$ pH of the rice husk biochar pyrolysed at 350°C were determined, and batch equilibrium adsorption and desorption tests were performed with mono-elemental solutions of Cd, Pb, and Zn. Based on the experimental data, adsorption isotherms were constructed for each solution, and linear regression and no linear was used to adjust the experimental data in the theoretical adsorption models, as Langmuir, Freundlich and Linear. From the study, it was observed that all the contaminants exhibited well-fitted adsorption curves to the Langmuir isotherm model, indicating that adsorption is likely to occur at specific adsorption sites and achieve a monolayer adsorption mechanism. Adsorption of Cd achieve  $R^2$  0,99995 and  $q_{m\acute{a}x}$  of 225,69 mg L<sup>-1</sup>. Then Pb achieve  $R^2$  0,9093 and  $q_{e_{m\acute{a}x}}$  of 10,51 mg L<sup>-1</sup>. Else, we contested that biochar rice husk had high-level tax of retention.

**Palavras-Chave** – Resíduo agroindustrial; materiais adsorventes; **remediação**; metais potencialmente tóxicos.

<sup>1</sup> Eng., Universidade de São Paulo, (16) 99209-8869, [mariana.balieiro.r@usp.br](mailto:mariana.balieiro.r@usp.br)

<sup>2</sup> Geól., MSc., DSc Universidade de São Paulo, (16) 3373-9506, [valguima@usp.br](mailto:valguima@usp.br)

<sup>3</sup> Fis., MSc., DSc. EMBRAPA: São Carlos – São Paulo, (16) 2107-2800, [silvio.crestana@embrapa.br](mailto:silvio.crestana@embrapa.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Biocarvão, também conhecido pelo termo inglês, *biochar*, é produzido através da pirólise de um material precursor, normalmente orgânico. O processo de queima pirolítica consiste na degradação térmica do material na ausência parcial ou total de um agente oxidante, como o O<sub>2</sub>. Nesta combustão gera-se três produtos, uma parcela sólida que consiste no próprio biocarvão, uma parcela líquida e outra gasosa. Em relação a combustão comum, tal método faz-se interessante pois consegue reter aproximadamente 50% de carbono na fase sólida, enquanto a combustão comum consegue reter cerca de 2 a 3% de carbono. Além disso, as estruturas desenvolvidas na pirólise apresentam maior resistência a degradação biológica do que o material original, criando uma espécie de reservatório de carbono (MANGRICH; MAIA; NOVOTNY, 2011).

A superfície do biocarvão apresenta diferentes grupos funcionais capazes de interagir com alguns íons e elementos químicos presentes no solo (FARIAS NETO et al., 2019; MANGRICH; MAIA; NOVOTNY, 2011). Ainda, a pirólise consegue manter a porosidade e estrutura do material. Dada estas características, o biocarvão torna-se alvo de interesse para aplicação como melhorador de solo, ou mesmo adsorvente de oligoelementos e outros compostos tóxicos, como os metais potencialmente tóxicos (FARIAS NETO et al., 2019; SEVERO, 2019).

Os metais potencialmente tóxicos ocorrem de forma natural, sendo disponibilizados por processos biogeoquímicos (MULLIGAN; YONG, 2004). No entanto, com o advento da indústria, tais metais passaram a ser liberados em grandes quantidades no meio ambiente (MULLIGAN; YONG, 2004). Os metais potencialmente tóxicos estão comumente presentes na mineração de minérios metálicos não ferrosos e em resíduos sólidos urbanos. Em alguns casos, as concentrações destes metais chegam a ultrapassar os limites estipulados pela legislação, tornando-se um grave problema de contaminação ambiental (ADRIANO, 2001).

Outra problemática atual no Brasil é a produção de resíduos agroindustrial, como a casca de arroz. De acordo com o relatório divulgado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente no ano de 2024/2025 a produção de grão em casca foi de 12.142,40 mil toneladas (CONAB, 2024). Sendo que, aproximadamente 20% deste peso correspondem à casca de arroz, que é eliminada durante o processo de beneficiamento do arroz (BAO, 2019; FONSECA, 1999). Com isso, tem-se que anualmente no Brasil produz-se 2,4 milhões de toneladas de casca de arroz. Este resíduo agroindustrial pode ser utilizado em várias aplicações, como a produção de sílica (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001), produção de energia (FOLETTTO et al., 2005), entre outros. Porém, devido à grande quantidade de resíduo produzido anualmente, torna-se de extrema importância o desenvolvimento de técnicas que possibilitem **novas utilizações para este material. Assim, criar formas de aproveitamento da casca de arroz contribuíra** para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, consumo e produção responsável, **dialogando com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS)**.

Dentro deste contexto, o presente estudo buscou avaliar a **capacidade de adsorção e de dessorção de Pb e Cd pelo biocarvão da casca de arroz**.

### 1.1. Objetivos

**Este estudo teve por objetivo principal avaliar a capacidade de adsorção de Cd e Pb pelo biocarvão produzido a partir da pirólise da casca de arroz a 350°C.**

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização do biocarvão da casca de arroz a 350°C

Algumas características são extremamente importantes para avaliar o potencial uso de um material como adsorvente, como: pH,  $\Delta$ pH, potencial de oxidação-redução (Eh), condutividade elétrica (CE). Assim, no biocarvão de casca de arroz foram realizadas aferições de pH, Eh e CE conforme metodologia proposta por Kieh (1985) onde a razão utilizada foi de 1/10. Neste caso usou-se 5 g de biocarvão e 50 mL de água Milli-Q. O  $\Delta$ pH foi obtido a partir da subtração dos valores de pH em KCl com o pH em H<sub>2</sub>O.

## 2.2. Ensaio de adsorção em equilíbrio em lote (*Batch test*)

Realizou-se ensaios de equilíbrio em lote com solução monoelementar dos contaminantes estudados (Cd e Pb), conforme preconizado por Roy et al. (1992). As soluções foram preparadas a partir de sais comerciais, sendo eles: **CdCl<sub>2</sub>.2,5 H<sub>2</sub>O** e **PbCl<sub>2</sub>**. Neste ensaio, adotou-se a razão sólido solução de 1/100 (0,5 g de biocarvão e um volume de solução de 50 mL). As soluções monoelementares foram preparadas visando obter as concentrações de 50 mg L<sup>-1</sup>, 100 mg L<sup>-1</sup>, 300 mg L<sup>-1</sup>, 500 mg L<sup>-1</sup>, 1000 mg L<sup>-1</sup>, 1500 mg L<sup>-1</sup>, 2000 mg L<sup>-1</sup> e 3000 mg L<sup>-1</sup>. Este ensaio foi realizado em triplicata. Adotou-se o tempo de contato de 24h e manteve-se a temperatura constante durante todo o experimento. Após a solução ser colocada em contato com o adsorvente no tubo *falcon* de 50 mL, mediu-se o pH, Eh e CE, agitou-se este material em mesa agitadora por 24 horas. Após agitação, filtrou-se as amostras e mediu-se o pH, Eh e CE novamente. Determinou-se a concentração de íons de metais potencialmente tóxicos presentes na solução filtrada, por Espectrometria de **Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP/OES)** realizado no Departamento de Ciências do Solo (ESALQ-USP).

A partir dos resultados, calculou-se a concentração de soluto adsorvida pelo adsorvente ( $q_e$ ) e a porcentagem de remoção do contaminante (A%) conforme **Equações 1 e 2**. Posteriormente, utilizou-se regressão linear, a partir do método dos mínimos quadrados, e regressão não linear, utilizando os métodos Evolutionary e gradiente reduzido generalizado (GRG) para enquadrar os dados laboratoriais nos modelos teóricos e matemático de Langmuir, Freundlich e Linear (NASCIMENTO et al., 2020).

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{M} \quad (1)$$

$$A\% = \left( \frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) 100 \quad (2)$$

O modelo de isoterma linear, implica que a quantidade de adsorvato adsorvida por unidade de massa de adsorvente é proporcional a concentração de equilíbrio (NASCIMENTO et al., 2014). A Equação 3 é referente ao modelo proposto por Langmuir, já as Equações 4 e 5 consistem no modelo linearizado, sendo utilizado duas técnicas diferentes de linearização. O modelo apresentado por Langmuir considera que a adsorção acontece em sítios específicos de adsorção e as moléculas não interagem entre si. Com isso, a adsorção é máxima quando todos os sítios ativos são preenchidos por um adsorvato (BOHN; MCNEAL; O'CONNOR, 1979), formando uma monocamada de adsorção (LANGMUIR, 1918 apud SELMI et al., 2021).

$$q_e = \frac{q_{e_{m\acute{a}x}} \cdot Kl \cdot C_e}{1 + q_{e_{m\acute{a}x}} \cdot C_e} \quad (3)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \left( \frac{1}{q_{e_{m\acute{a}x}} \cdot Kl} \right) + \frac{1}{q_{e_{m\acute{a}x}}} \cdot C_e \quad (4)$$

$$\frac{1}{q_e} = \left( \frac{1}{q_{e_{m\acute{a}x}} \cdot Kl} \cdot \frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_{e_{m\acute{a}x}}} \quad (5)$$

A Equação 6 representa o modelo preconizado por Freundliche, nesta equação, adota-se a linearização a partir da aplicação da função logarítmica, conforme mostrado na Equação 7. Este modelo consiste em um modelo empírico, que considera que as superfícies de adsorção apresentam diferentes energias de adsorção e os sítios ativos não estão igualmente distribuídos (FREUNDLICH, 1906 apud SELMI et al., 2021).

$$qe = Kf \cdot Ce^n \quad (6)$$

$$\text{Log}(kf) = n \cdot \log(Ce) \quad (7)$$

A última modelagem adotada consiste na isoterma linear, conforme mostrado na Equação 8. Segundo Nascimento et al. (2014), este modelo propõe que a substância adsorvida por unidade de massa é proporcional a concentração de equilíbrio.

$$qe = a \cdot Ce + b \quad (8)$$

A **variável**  $qe$  é a capacidade de adsorção do material em equilíbrio ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $Ce$  é a concentração de adsorvato na solução em equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $V$  é o volume da solução inicialmente adicionada (L),  $Co$  é a concentração inicial de contaminante utilizado ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $M$  é a massa de adsorvente (g),  $qe_{\text{máx}}$  é a quantidade máxima de soluto que pode ser adsorvida pelo adsorvato ( $\text{L mg}^{-1}$ ),  $Kl$  é a constante de Langmuir ( $\text{L g}^{-1}$ ),  $Kf$  é a constante de Freundlich ( $\text{mg g}^{-1}$ ) e  $n$  é um parâmetro empírico da equação de Freundlich.

### 2.3. Ensaio de dessorção

O ensaio de dessorção foi realizado para identificar a capacidade de regeneração e reutilização do biocarvão da casca de arroz. Neste ensaio, utilizou-se o biocarvão utilizado no ensaio de adsorção. O material foi seco em estufa e **foi adicionado em tubos do tipo falcon**. Utilizou-se a mesma razão sólidos/solução que o ensaio de adsorção (1/100), sendo **pesado 0,5 g** de biocarvão e **adicionado** 50 mL de água Milli-Q. Porém, devido à perda de massa de biocarvão durante a manipulação dos ensaios de adsorção, o ensaio de dessorção foi realizado com apenas uma réplica. Após adição da água deionizada na amostra de biocarvão, os tubos *falcon* foram colocados na mesa agitadora e mantidos lá por 24h em temperatura constante, seguindo os mesmos procedimentos adotados no ensaio de adsorção. **As** amostras foram filtradas e o sobrenadante **foi** utilizado para determinar a concentração de metais potencialmente tóxicos liberados na água ( $C_{\text{dessorção}}$ ). A leitura da concentração de metais potencialmente tóxicos em solução foi realizada por **Absorção Atômica** (PinAAcle 900F - PerkinElmer) no Departamento de Geotecnia da EESC-USP. Também foram determinados os valores de pH, CE e Eh antes e após o ensaio de dessorção.

A dessorção consiste na liberação do adsorvato, antes retido no adsorvente, para a solução (PATEL, 2021). Logo, para análise dos resultados, calculou-se o  $\Delta C$  do ensaio de adsorção, conforme mostrado na Equação 9 (PATEL, 2021).

$$\Delta C_{\text{adsorção}} = Co_{\text{adsorção}} - Ce_{\text{adsorção}} \quad (9)$$

Após determinar a  $C_{\text{dessorção}}$  e  $\Delta C_{\text{adsorção}}$  calculou-se a porcentagem de dessorção conforme Equação 10 (PATEL, 2021).

$$\text{Dessorção} = \frac{Ce_{\text{dessorção}}}{\Delta C_{\text{adsorção}}} \times 100 \quad (10)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

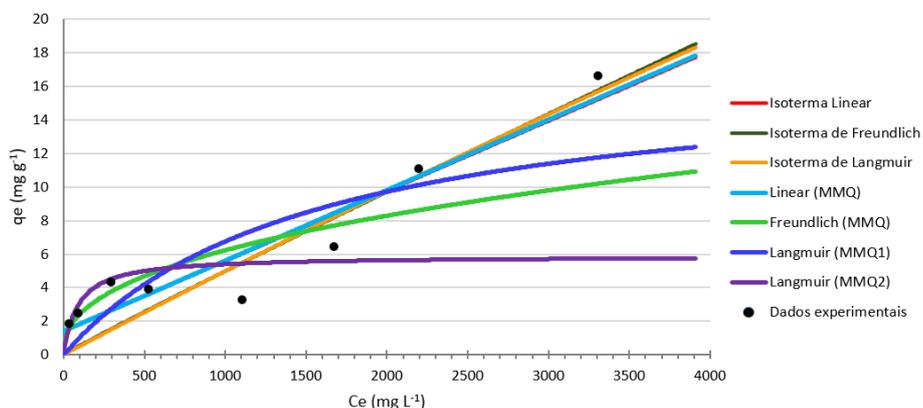
#### 3.1. Caracterização do biocarvão da casca de arroz a 350°C

A partir dos ensaios, determinou-se que o pH do biocarvão é de  $6,89 \pm 0,35$ ,  $\Delta\text{pH}$  é  $-1,53 \pm 0,08$ , o Eh é de  $+ 161,90 \pm 1,15$  mV e o CE é de  $1,67 \pm 0,15$   $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Estas características estão diretamente relacionadas ao processo de fisissorção e quimissorção (MELLO et al., 2013). Por exemplo, pH mais elevados favorecem a sorção dos metais potencialmente tóxicos, enquanto o Eh influencia a valência dos metais (ALLOWAY, 1995). Por fim, o CE refere-se à quantidade de sais dissolvidos na solução (LIMA et al., 2018).

#### 3.2. Adsorção

##### 3.2.1. Isoterma de adsorção

A partir dos resultados experimentais encontrados, percebeu-se que o modelo que melhor se adequou aos dados experimentais obtidos para o Cd foi o modelo de Langmuir. Após aplicar a linearização e a regressão não linear, obteve-se melhor enquadramento a partir do método gradiente reduzido generalizado, não linear ( $R^2$  de 0,9999). O enquadramento ao modelo, possibilita a determinação da capacidade máxima de adsorção do ( $q_{e\text{máx}}$ ) e a constante de Langmuir (kl), sendo obtidos os respectivos valores,  $225 \text{ mg L}^{-1}$  e  $0,00002 \text{ L mg}^{-1}$ . A Figura 1 apresenta todas as regressões utilizadas e as respectivas isotermas. O ajuste dos dados ao modelo prediz que a adsorção é constante e ocorre em um sítio específico de adsorção, sendo  $q_{e\text{máx}}$  atingido, quando todos estes sítios são preenchidos. Outro aspecto importante, consiste no platô observado próximo a concentração de  $300 \text{ mg L}^{-1}$ . O platô pode indicar que, após o preenchimento de uma monocamada de adsorção, ocorre um aumento na capacidade de adsorção do material, relacionado a formação de um novo sítio de adsorção (GILES et al., 1960).



MMQ: Método dos Mínimos Quadrados

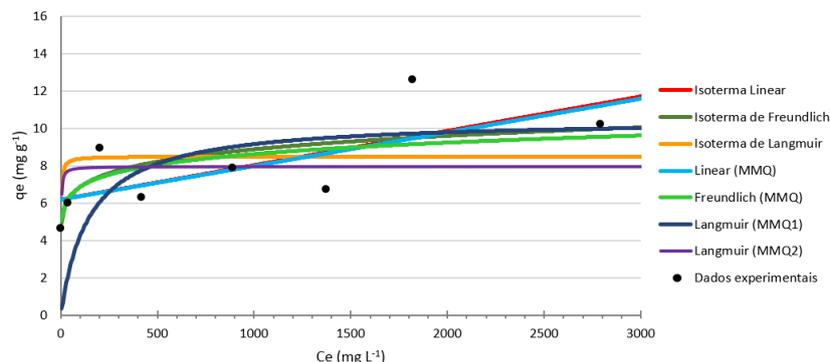
MMQ1: Método dos Mínimos Quadrados para a primeira linearização

MMQ2: Método dos Mínimos Quadrados para a segunda linearização

Figura 1. Isotermas de adsorção do biocarvão 350° para o Cd

O Pb também foi melhor enquadrado na isoterma de adsorção de Langmuir, tendo  $R^2$  de 0,9093 obtido pelo enquadramento realizado a partir da Equação 4. O  $q_{e\text{máx}}$  obtido foi de  $10,51 \text{ mg g}^{-1}$  e a constante de Langmuir (kl) foi de  $0,00672 \text{ L mg}^{-1}$ . As curvas obtidas por diferentes métodos de regressão e os resultados experimentais estão dispostos na Figura 2. Ao relacionar o enquadramento matemático ao modelo, infere-se que a adsorção ocorre em um sítio de ligação específico, apresentando uma superfície de adsorção homogênea, não havendo interação entre as moléculas do soluto. A capacidade máxima de adsorção é atingida após o preenchimento de

uma monocamada sobre a superfície do adsorvente. Por fim, destaca-se que a energia de adsorção é igual em todos os sítios e a adsorção é reversível (BOHN; MCNEAL; O'CONNOR, 1979).



MMQ: Método dos Mínimos Quadrados  
 MMQ1: Método dos Mínimos Quadrados para a primeira linearização  
 MMQ2: Método dos Mínimos Quadrados para a segunda linearização

Figura 2. Isotermas de adsorção do biocarvão 350° obtidas por diferentes métodos para solução de Pb.

### 3.2.2. Variação do pH, Eh e CE durante o ensaio de adsorção

A partir da Figura 3, percebe-se que o pH tende a aumentar quando comparado o valor obtido no início e final do ensaio de adsorção (concentrações 55, 115, 339 e 569 mg L<sup>-1</sup>). No entanto, para as maiores concentrações (2313 e 3745 mg L<sup>-1</sup>) as diferenças entre os valores encontrados para os pH são mínimas. Lima et al. (2018) estudaram a adsorção de Cd, Pb e Zn por composto orgânico, avaliando a adsorção em soluções monoelementares com concentração de 150 mg L<sup>-1</sup> e observaram aumento do pH após as 24h de ensaio. Segundo estes autores, devido o material apresentar ΔpH negativo, o mecanismo de atração eletrostática pode contribuir para o aumento do pH. No ensaio, o Eh apresentou variações, mas manteve-se positivo, indicando característica oxidante do meio (LIMA et al., 2018). Por fim, o CE aumentou após o ensaio, segundo Lima et al. (2018), o aumento do CE pode estar relacionado com o aumento da capacidade de troca catiônica da solução, sendo este fato, promovido pela liberação de cátions antes adsorvidos, para que ocorra a adsorção dos íons metálicos no adsorvente.

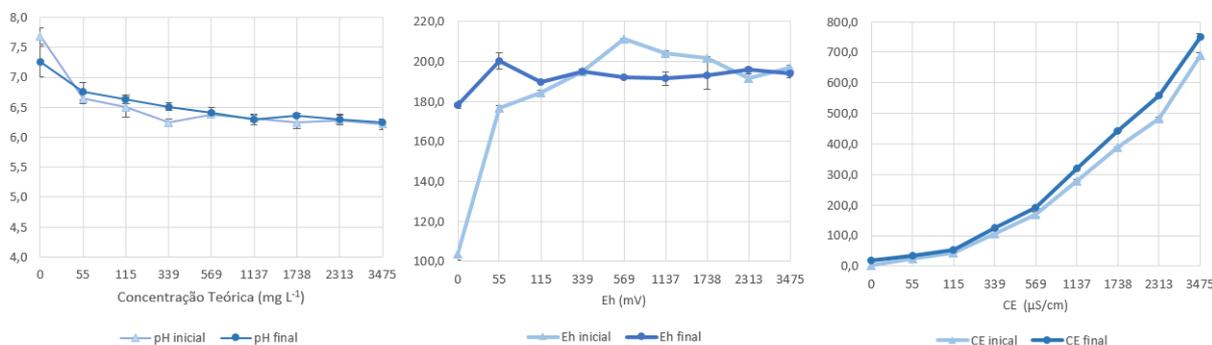


Figura 3. Variação do Ph, Eh e CE no início e no final do ensaio de equilíbrio em lote com o Cd.

Para o Pb, nas concentrações de 49 e 96 mg L<sup>-1</sup> o pH aumentou durante o ensaio de adsorção, resultado semelhante foi encontrado por Lima et al. (2018). As demais concentrações apresentaram tendência de reduzir após o ensaio. O Eh foi sempre positivo, indicando característica oxidante. Semelhante ao observado por Lima et al. (2018) o CE tende a aumentar após o ensaio de adsorção. Os resultados estão dispostos na Figura 4.

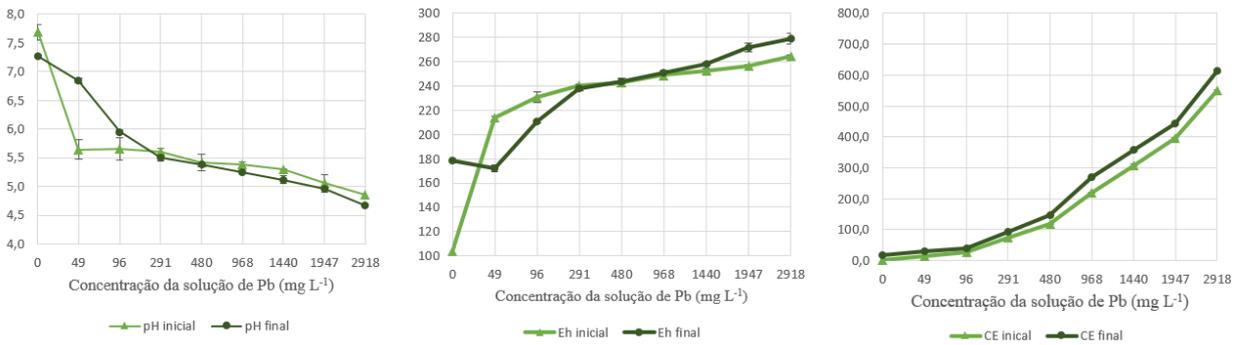


Figura 4. Variação do Ph, Eh e CE no início e no final do ensaio de equilíbrio em lote com o Pb.

### 3.3. Dessorção

#### 3.3.1. Porcentagem de dessorção

A partir da Figura 5, observa-se **que** a dessorção de Cd em água é inferior a 30% para todas as concentrações estudadas, indicando uma alta taxa de retenção (maior que 70%). Além disso, observa-se que, na concentração de 569,03 mg L<sup>-1</sup> ocorre a maior dessorção, de 26,02%, ponto no qual, observa-se o início do platô visto na isoterma de adsorção. Esta hipótese corrobora com a discussão de Giles et al. (1960), em que, após a saturação de uma monocamada de adsorção, pode ocorrer o desenvolvimento de novos sítios de adsorção, com energia de adsorção diferente da primeira. Analisando os dois platôs separadamente, observa-se **tendência** de aumentar a dessorção conforme aumenta a concentração de metais potencialmente tóxicos na solução.

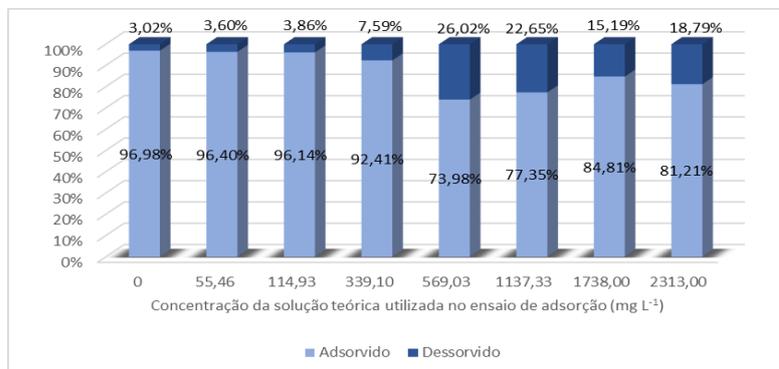


Figura 5. Porcentagem de dessorção do Cd.

A partir da Figura 6, observa-se que o Pb apresenta aumento da dessorção conforme **ocorre aumento de sua concentração**.



Figura 6. Porcentagem de dessorção do Pb.

Mesmo o Cd apresentando eletronegatividade, isto é, tendência de atração de elétrons de **uma ligação menor do que o Pb** (MELO; ALLEONI, 2019), observa-se que o Cd é mais facilmente desorvido do que o Pb. Este resultado pode estar relacionado com a termodinâmica da adsorção de Cd e Pb por biocarvão da casca de arroz. Segundo Ruthven (1984) os mecanismos de adsorção são classificados em fissiosorção e quimiossorção, dependendo do tipo de força intermolecular que ocorre entre o adsorvato e o adsorvente. A fissiosorção ocorre quando a interação molecular é fraca, podendo ser associada a adsorção em mono ou multicamadas, **consistindo** em uma reação rápida e reversível. Ainda, não ocorre a transferência de elétrons e é uma reação exotérmica. Já a quimiossorção está relacionada a alta especificidade, reação lenta, em monocamada, irreversível e com predomínio de interação de Van de Waals ou interação eletrostática (RUTHVEN, 1984). Com isso, pode ser que a adsorção do Pb em BCA **seja do tipo** quimiossorção, promovendo menor tendência de desorção. Porém, para confirmar está relação **seria necessário estudo termodinâmico**.

### 3.3.2. Variação do pH, Eh e CE durante o ensaio de desorção

Foram realizadas medições do pH, Eh e CE das amostras no início e ao final do ensaio de desorção, conforme mostrado na Figura 7 para o Cd e na Figura 8 para o Pb. A desorção de ambos os metais potencialmente tóxico **apresentou** pH maior no início do ensaio **do que no final**. Conforme apontado por Lima et al. (2018), ao final do ensaio a diminuição do pH pode estar relacionado a liberação dos cátions, antes adsorvidos no BCA, para a solução. O Eh apresentou variações, mas manteve-se positivo, caracterizando o mesmo como oxidante. Por fim, o CE aumentou após a desorção, ainda, observa-se o aumento do CE conforme as concentrações utilizadas na adsorção aumentam.

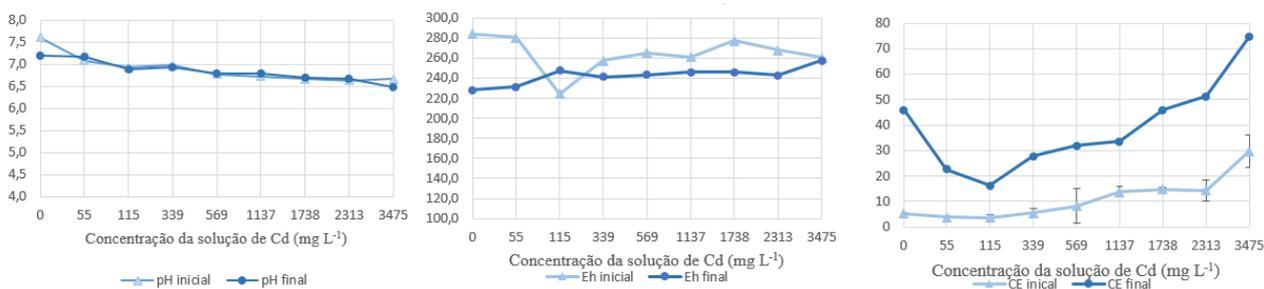


Figura 7. Variação do Ph, Eh e CE no início e no final do ensaio de desorção em lote com o Cd.

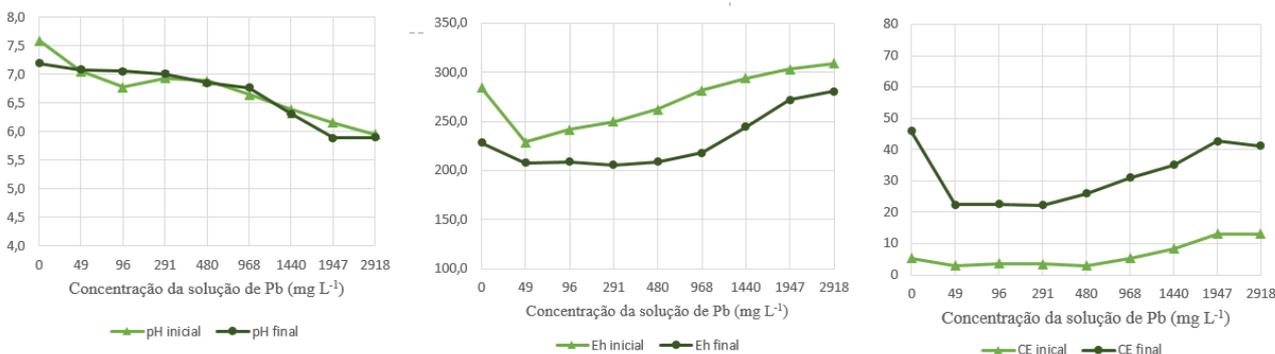


Figura 8. Variação do Ph, Eh e CE no início e no final do ensaio de desorção em lote com o Pb.

## 4. CONCLUSÕES

A partir do estudo concluiu-se que o biocarvão oriundo da pirólise da casca de arroz a 350°C apresenta características favoráveis para adsorção de Cd e Pb. Observa-se pH neutro a básico, que favorecem os mecanismos de sorção. O modelo teórico matemático que melhor se adequou aos dados laboratoriais foi o modelo proposto por Langmuir. Com isso, infere-se que a adsorção no biocarvão estudado ocorre a partir de sítios de adsorção específico e que a adsorção ocorre até que todos estes sítios sejam preenchidos, formando uma monocamada.

Além disso, observa-se que o Cd é mais facilmente dessorvido do que o Pb, indicando uma possível diferenciação entre os mecanismos de adsorção do Cd e do Pb com o BCA. Com isso, destaca-se a necessidade de estudos termodinâmicos para destrinchar a efetividade e os mecanismos de adsorção desses metais potencialmente tóxicos com o biocarvão da casca de arroz a 350°C.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de Iniciação Científica e pelo apoio na realização deste trabalho (processo nº 2021/13624-9). À Embrapa Instrumentação pelo suporte laboratorial.

## REFERÊNCIAS

- ABDELNAEIM, M. Y. et al. Impact of chemical activation on the adsorption performance of common reed towards Cu(II) and Cd(II). **International Journal of Mineral Processing**, v. 157, p. 80–88, 10 dez. 2016.
- ADRIANO, D. C. Trace Elements in Terrestrial Environments. Em: ADRIANO, D. C. (Ed.). **Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals**. New York, NY: Springer, 2001. v. 2p. 677–705.
- BAO, J. (ED.). **Rice: chemistry and technology**. Fourth edition ed. Duxford [England]; Cambridge, MA: Woodhead Publishing / AACC International, 2019.
- BOHN, H. L.; MCNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil Chemistry**. Nova York: John Wiley & Sons, Inc, 1979. v. 3 ed
- BRITO, M. S.; ALFAIA, S. S.; COSTA, F. S. **Balço de cargas elétricas do solo sob plantio direto no Sudoeste da Amazônia brasileira**. . Em: 17º ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. a 03 de dezembro de 2020. Disponível em: <<https://febrapdp.org.br/17enpdp/participante/uploads/poster/1/80604postebRenpdpRmeibianeRsRbbitoRetRalR14R11R2020-pdf.pdf>>. Acesso em: 3 dez. 2025
- CONAB, C. N. DE A. **Perspectivas para a Agropecuária - Volume 12 - Safra 2024/2025**. , 17 set. 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/perspectivas-para-a-agropecuaria>>. Acesso em: 24 jan. 2025
- DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, v. 24, p. 778–782, dez. 2001.
- FARIAS NETO, A. L. DE et al. **Embrapa Agrossilvipastoril: primeiras contribuições para o desenvolvimento de uma agropecuária sustentável**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2019., 2019.
- FOLETTTO, E. L. et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v. 28, p. 1055–1060, dez. 2005.

FONSECA, M. R. G. DA. **Isolante térmico fabricados a partir de cinzas de casca de arroz: obtenção, caracterização de propriedades e sua relação com a microestrutura.** Tese—Porto Alegre: UFRGS, 1999.

GILES, C. H. et al. 786. Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. **Journal of the Chemical Society (Resumed)**, n. 0, p. 3973–3993, 1 jan. 1960.

KIEHL, E. J. Fertilizantes orgânicos. 1985.

LIMA, J. Z. et al. Assessment of the use of organic composts derived from municipal solid waste for the adsorption of Pb, Zn and Cd. **Journal of Environmental Management**, v. 226, p. 386–399, 15 nov. 2018.

MANGRICH, A.; MAIA, C.; NOVOTNY, E. BIOCÁRVÃO: AS TERRAS PRETAS DE ÍNDIOS E O SEQUESTRO DE CARBONO. **CIÊNCIA HOJE**, v. 281, p. 48–52, 1 maio 2011.

MELO, V. DE F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo: Conceitos Básicos e Aplicações.** Viçosa: [s.n.].

MULLIGAN, C. N.; YONG, R. N. Natural attenuation of contaminated soils. **Environment International**, v. 30, n. 4, p. 587–601, 1 jun. 2004.

NASCIMENTO, R. F. DO et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais.** Imprensa Universitária ed. Fortaleza: Imprensa Universitária - Universidade Federal do Ceará, 2014.

NASCIMENTO, R. F. DO et al. **Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais.** 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2020.

PATEL, H. Review on solvent desorption study from exhausted adsorbent. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 25, n. 8, p. 101302, 1 ago. 2021.

ROY, W. R. et al. **Technical Resource Document: Batch-type Procedures for Estimating Soil Adsorption of Chemicals.** [s.l.] Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. Environmental Protection Agency, 1992.

RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption and Adsorption Processes.** [s.l.] John Wiley & Sons, 1984.

SELMİ, T. et al. Dye removal by activated carbon produced from Agave americana fibers: stochastic isotherm and fractal kinetic studies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 34, p. 46580–46591, 1 set. 2021.

SEVERO, F. F. **Biocárvão e cinzas de Casca de arroz: Amenizantes da toxidez de Ferro em cultivos de Arroz Irrigado.** Tese—Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.