XXIX SEPE
Simpósio de Ensino, Pesquisa e Extensão
Teaching, Research and Extension Symposium
Presente e futuro:
uso consciente da Inteligência Artificial
Today and tomorrow:
the conscious use of Artificial Intelligence
E-book
ISBN 978-65-5852-415-1
20 A 22 DE OUTUBRO DE 2025
OCTOBER 20th to 22nd, 2025
UFN Universidade Franciscana Franciscan University

DOI: https://doi.org/10.48195/sepe2025.30231

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR A PARTIR DE *Capim annoni* PARA ADSORÇÃO

Pâmela Cristine Ladwig Muraro[1]*, Raisi Natalia Lenz Baldez[2]

RESUMO

A poluição hídrica por corantes sintéticos, como o Azul de metileno (AM), representa um desafio ambiental devido à sua toxicidade e resistência à degradação. Neste contexto, o biochar produzido a partir do *Capim annoni (Eragrostis plana Nees*), planta invasora de regiões brasileiras, surge como um adsorvente promissor para o tratamento de efluentes contaminados. A produção do biochar foi realizada por pirólise em leito fixo, com aquecimento até 800 °C sob atmosfera de nitrogênio, seguida de ativação com vapor d'água. A caracterização por Difração de Raios X (DRX) revelou um material predominantemente amorfo, com estrutura grafênica desorganizada e ausência de picos cristalinos, indicativa da eficiente carbonização e desenvolvimento da porosidade. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciou uma superfície irregular e porosa, resultante da liberação de voláteis durante a pirólise e da ativação, proporcionando uma elevada área superficial e sítios ativos para adsorção. Ensaios em batelada demonstraram a alta capacidade do biochar para adsorver AM, com a cinética do processo adequando-se predominantemente ao modelo de pseudo-primeira ordem, sugerindo que o mecanismo de adsorção é governado por interações físicas, como forças de van der Waals e interações π-π. A produção e aplicação do biochar de *Capim annoni* não apenas oferecem uma solução eficiente e sustentável para o tratamento de efluentes, mas também promovem o controle e aproveitamento de uma espécie invasora, agregando valor ambiental e econômico ao manejo da biomassa. Esses resultados indicam que o biochar produzido constitui uma alternativa viável para remoção de corantes em águas contaminadas, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados.

Palavras-chave: AM, Corantes orgânicos, Processos Oxidativos Avançados, Tratamento de efluentes.

[1] Pâmela Cristine Ladwig Muraro, Doutora em Nanociências, Grupo de Investigação em Logistica, Tecnologia e Sustentabilidade (Universidad Tecnológica (UTEC), Unidad de Tecnología de Automatización y Sistemas Inteligentes, Rivera, Rivera, Uruguai). E-mail: pamela.ladwing@utec.edu.uy ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8791-7633

[2] Raisi Natalia Lenz Baldez, Doutora em Física, Grupo de Investigação em Logistica, Tecnologia e Sustentabilidade (Universidad Tecnológica (UTEC), Unidad de Tecnología de Automatización y Sistemas Inteligentes, Rivera, Rivera, Uruguai). E-mail: raisi.lenz@utec.edu.uy ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3509-6176

1. INTRODUÇÃO

A poluição hídrica por compostos orgânicos sintéticos tem se tornado uma das principais preocupações ambientais nas últimas décadas. Dentre os poluentes mais persistentes e de difícil remoção, os corantes sintéticos utilizados em processos industriais, especialmente nas indústrias têxtil, de papel e cosmética, merecem destaque (De Mesquita et al., 2016). Esses compostos, além de comprometerem a estética dos corpos d'água, apresentam toxicidade para organismos aquáticos e resistência à degradação biológica (Robinson et al., 2001).

O AM, um corante catiônico amplamente empregado, é frequentemente detectado em efluentes industriais e pode causar efeitos adversos à saúde humana, como irritações na pele e no trato respiratório, além de interferir nos processos ecológicos aquáticos ao dificultar a penetração da luz solar (Mittal, 2009; Silva et al., 2012). Os métodos tradicionais de tratamento de efluentes, como coagulação, floculação, oxidação química e processos biológicos, muitas vezes não são eficazes na remoção completa de corantes, especialmente em baixas concentrações (Crini, 2006; Almeida et al., 2009).

Nesse contexto, a adsorção tem se consolidado como uma técnica eficiente e economicamente viável para a remoção de corantes em soluções aquosas, destacando-se pela sua simplicidade operacional, eficiência, baixo custo e possibilidade de regeneração dos materiais adsorventes (Karthikeyan; Rajgor; Patel, 2008; Otero et al., 2008). A escolha do adsorvente, entretanto, é fator crítico para o desempenho do processo, o que tem incentivado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novos materiais com elevada capacidade adsorptiva, oriundos de fontes renováveis e abundantes (Vasudevan; Maran, 2014; Pezotti et al., 2018).

O biochar, material carbonáceo obtido a partir da pirólise de biomassa lignocelulósica em condições controladas de temperatura e ausência ou baixa concentração de oxigênio, tem sido amplamente estudado como adsorvente alternativo para o tratamento de efluentes (Lehmann; Joseph, 2015; Tan et al., 2015). Suas características físico-químicas, como elevada área superficial, porosidade, presença de grupos funcionais oxigenados e estabilidade térmica, favorecem a adsorção de uma ampla gama de poluentes orgânicos e inorgânicos (Mohan et al., 2014; Ahmad et al., 2014). Além disso, a produção de biochar a partir de resíduos vegetais ou espécies invasoras representa uma abordagem ambientalmente sustentável, uma vez que contribui para a valorização de materiais de baixo valor econômico e auxilia no controle de espécies problemáticas do ponto de vista ecológico (Beesley et al., 2011; Kuppusamy et al., 2016).

O *Capim annoni* (*Eragrostis plana Nees*), espécie forrageira exótica oriunda da África do Sul, é considerado atualmente uma das principais plantas invasoras de áreas de pastagens no Brasil e no Uruguai, especialmente na região Sul e norte, respectivamente (Zenni; Ziller, 2011; Müller et al., 2020). Sua propagação acelerada, aliada à sua baixa palatabilidade para o gado e à competição agressiva com espécies nativas, tem causado prejuízos significativos à pecuária e à biodiversidade local (Maraschin, 2001; Viana et al., 2011). O controle dessa espécie tem se mostrado complexo e oneroso, tornando-se necessário o desenvolvimento de estratégias alternativas que combinem a erradicação ou redução de sua presença com formas de aproveitamento sustentável da biomassa (D'Antonio; Meyerson; Vila, 2004). A conversão do Capim-annoni em biochar surge, assim, como uma proposta promissora de manejo e reaproveitamento (Silva et al., 2021).

Diante desse panorama, o presente trabalho tem como objetivo a síntese e caracterização do biochar produzido a partir do *Capim annoni*, visando avaliar sua eficiência como material adsorvente na remoção de AM em soluções aquosas. A investigação propõe uma abordagem integrada, que busca aliar o controle de uma espécie invasora com a mitigação de um problema ambiental relevante, contribuindo tanto para a gestão sustentável de recursos naturais quanto para o avanço de tecnologias limpas no tratamento de efluentes industriais.

2. METODOLOGIA

2.1 SÍNTESE DO BIOCHAR

O processo de pirólise é uma adaptação de Ahmad et al. (2014), onde 500 g de biomassa selecionada, que é previamente moída em um moinho Wiley (TE-680) e peneirada com peneira de 106 μm para facilitar a homogeneização da amostra e aquecimento uniforme. O material moído é colocado na estufa por 3 horas a 100 °C e armazenado em um dessecador. 1 grama de material precursor foi inserido no reator tubular de leito fixo. O processo utilizou uma taxa de aquecimento de 25 °C min^{-1} até uma temperatura final de 800 °C (sob atmosfera de N_2 com fluxo controlado de 80 mL min^{-1}). Uma vez atingida a temperatura final, vapor d'água é introduzido a uma vazão de 100 mL min^{-1} para realizar a ativação do biochar durante 30 minutos.

2.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

2.1.1 Difração de Raio X

A difração de raios X é uma técnica não destrutiva para caracterização microestrutural que permite a identificação de fases cristalinas e tamanhos de cristalitos por meio do espalhamento elástico de fótons de raios X na superfície do material analisado (Cullity; Stock, 2001). Um difratômetro Bruker D2 Advance com tubo de cobre (radiação Kα = 1,5418 Å) foi utilizado para analisar a amostra sintetizada. A amostra foi varrida na faixa de 2θ de 5° a 70°, com tensão de aceleração e corrente aplicada de 30 kV e 30 mA, respectivamente.

2.2.2Microscopia eletrônica de varredura

Para avaliar as características morfológicas do biochar, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (Zeiss, Evo 10) operando aproximadamente a 25 kV. Cada amostra foi preparada por deposição sólida em fita dupla face fixada a um suporte de amostra de alumínio (esferas) e subsequente douramento.

2.2.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para a identificação dos grupos funcionais presentes na superfície do biochar. A análise foi realizada na Universidad Tecnológica (UTEC) com o espectrofotômetro Jasco 6600, operando em modo de transmitância na região espectral de 4500 a 450 cm^{-1}. Os espectros foram obtidos com 32 varreduras e uma resolução de 4 cm^{-1}, o que permitiu a identificação eficaz dos grupos funcionais.

2.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

Os ensaios de adsorção foram realizados em regime descontínuo (batelada) (Fadina; Zaini, 2025), com 100 mL da solução de contaminante orgânico e biochar. Assim, alíquotas (5 mL) foram coletadas em tempos pré-determinados (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 minutos), filtradas (filtro 0,45 μm, Millex GP) e analisadas em espectrofotômetro UV-vis (Pginstruments, T70 PLUS) no comprimento de onda característico do AM (λ = 663 nm) para determinar a porcentagem de remoção (%R) Eq.1 e a capacidade de adsorção Eq. 2. Além disso, a concentração de biochar, o pH do meio reacional e a concentração do contaminante orgânico

foram fixados em condições ideais pré-estudadas, sendo pH=7, concentração de AM=5,25 mg L^{-1} e concentração de biochar = 1,25 g L^{-1}.

$$\%R = \frac{C_0 - C_i}{C_o} * 100 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_i) * V}{m} \quad (2)$$

Onde: C_0 é a concentração inicial do AM (mg L^{-1}) (t = 0 min), C_i é a concentração do AM (mg L^{-1}) (t = t), V é o volume da solução (L) e m é a massa do adsorvente (g).

2.4 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Para melhor compreender o mecanismo de adsorção, modelos cinéticos foram utilizados para descrever os dados experimentais e identificar os potenciais etapas limitantes da velocidade do processo. Os modelos aplicados incluíram o modelo de pseudo-primeira ordem (PFO) (Eq. 3) e o modelo de pseudo-segunda ordem (PSO) (Eq. 4) (Wu et al., 2024; Abu-Dalo et al., 2023; Rahman et al., 2025).

$$q_t = q_1.(1 + \exp(-k_1.t) \quad (3)$$

$$q_t = \frac{k_2.q_2^2.t}{1 + k_2.q_2.t} \quad (4)$$

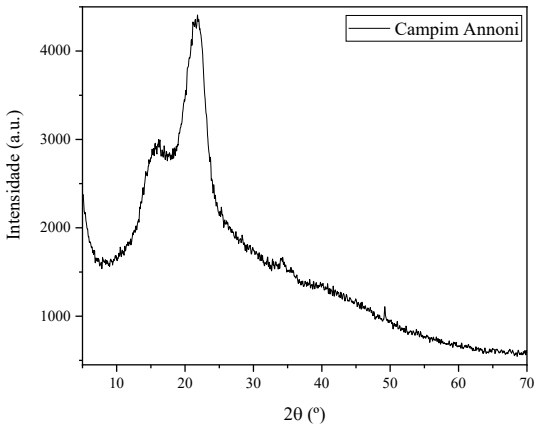
Onde q_e é a quantidade máxima de soluto adsorvido na superfície sólida por unidade de massa do adsorvente no equilíbrio (gg^{-1}); q_t é a quantidade de soluto adsorvido no tempo t (gg^{-1}); k_1 é a constante de velocidade cinética de PPO (min^{-1}); k_2 é a constante de velocidade cinética de PSO ($gg^{-1}min^{-1}$); t é o tempo de contato (min).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

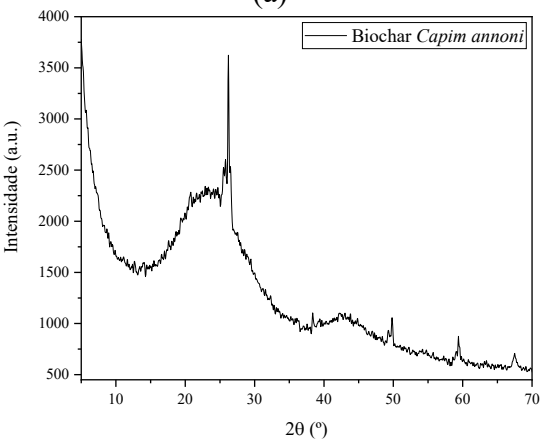
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR

O Difração de Raios X (DRX) (Figura 1) apresenta um espectro típico de materiais carbonáceos com baixa cristalinidade. A presença de dois amplos halos ou picos difusos, um aproximadamente entre 15°-30° e outro entre 40°-50° (2θ), é característica de materiais com estrutura grafênica desorganizada (arranjo turbostrático) (Behazin et al., 2016; Zhang et al., 2018). A ausência de picos intensos e estreitos indica que o processo de pirólise em 800 °C, seguido de ativação com vapor, foi eficaz em carbonizar a biomassa lignocelulósica, resultando em um biochar predominantemente amorfo com uma estrutura porosa desenvolvida, o que é altamente desejável para aplicação em adsorção (Zhang et al., 2018; Dehkhoda et al., 2014).

Figura 1: Difratogramas de Raio X (a) Capim annoni e (b) Biochar de Capim annoni.



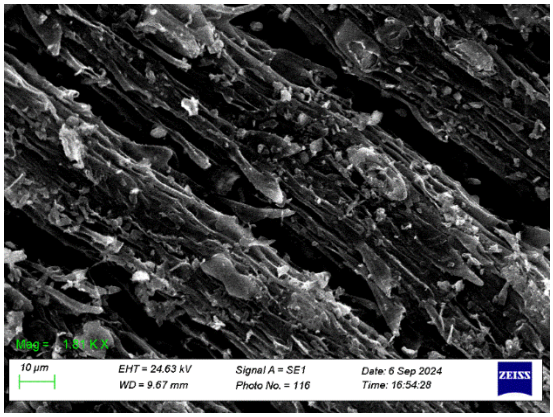
(a)



(b)

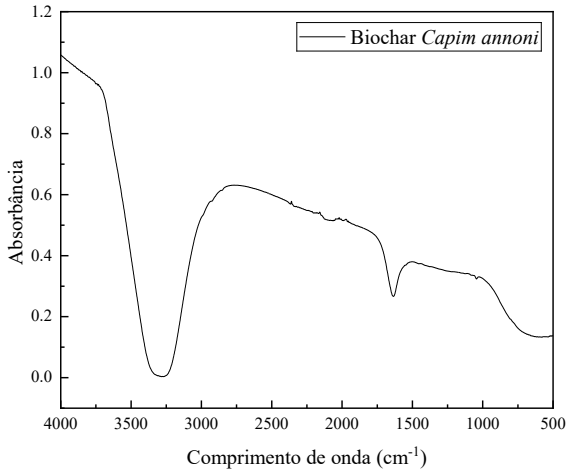
A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma ferramenta fundamental para a caracterização morfológica de biochars, permitindo a observação da superfície porosa e da heterogeneidade estrutural que influenciam diretamente a capacidade adsorptiva (Xuân Cuong, 2021; Wang et al., 2024). Estudos recentes demonstram que a liberação de voláteis durante a pirólise e a ativação com vapor favorecem a formação de uma estrutura com poros de variados tamanhos e uma superfície irregular, características essenciais para a adsorção eficiente de corantes como o AM (Wang et al., 2024). Além disso, a MEV também é utilizada para avaliar as diferenças morfológicas entre biochars produzidos a partir de diversas matérias-primas, contribuindo para o entendimento das propriedades físico-químicas envolvidas no processo de adsorção (Lonappan et al., 2018).

Figura 2: Microscopia eletrônica de varredura do biochar de *Capim annoni*.



A análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) do biochar, apresentada na Figura 3, revela a presença de diversos grupos funcionais na sua superfície, os quais são determinantes para as suas propriedades químicas e reatividade. Uma banda alargada na região de 3400 cm^{-1} é característica de vibrações de elongação da ligação O-H, proveniente de grupos hidroxila fenólicos ou álcoois, bem como de moléculas de água adsorvidas (Leng et al., 2021). As bandas de baixa intensidade próximas a 2920 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} são atribuídas a vibrações de elongação assimétrica e simétrica de ligações C-H em grupos metileno ($-CH_2$) e metila ($-CH_3$) de cadeias alquílicas (Tomczyk et al., 2020). A banda proeminente em aproximadamente 1700 cm^{-1} corresponde à vibração de elongação C=O de grupos carbonila, presentes em ácidos carboxílicos, cetonas ou aldeídos (Wang & Wang, 2019). A região entre 1600 cm^{-1} e 1500 cm^{-1} exibe bandas associadas a vibrações de elongação C=C em anéis aromáticos condensados, uma característica estrutural fundamental do biochar (Shaaban et al., 2018). Por fim, o espectro na região de 1000-1300 cm^{-1} apresenta bandas relacionadas a vibrações de elongação C-O de fenóis, álcoois, éteres e ácidos carboxílicos, indicando a presença de uma significativa funcionalização oxigenada na superfície do material (Qian et al., 2023). Esta diversidade de grupos funcionais oxigenados é crucial para as aplicações do biochar, influenciando diretamente a sua capacidade de sorção e interações com contaminantes e nutrientes no solo.

Figura 3: Análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) do biochar.



3.2 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Os ensaios de adsorção do AM foram conduzidos em pH neutro (7), utilizando uma concentração de adsorvente de 1,25 g L^{-1} e concentração inicial de AM de 5,25 mg L^{-1}. A curva cinética (Figura 4) mostra que a adsorção do AM pelo biochar de Capim annoni ocorre rapidamente nos primeiros 45 minutos, atingindo o equilíbrio por volta de 90 minutos. A rápida adsorção inicial é atribuída à alta disponibilidade de sítios ativos na superfície do biochar, sendo seguida por uma fase mais lenta onde o corante difunde para os poros de menor acesso (Kumar et al., 2023).

Para investigar os mecanismos controladores da taxa de adsorção, os dados experimentais foram ajustados aos modelos de Pseudo-Primeira Ordem (PFO), Pseudo-Segunda Ordem (PSO) e ao modelo de difusão intrapartícula de Weber e Morris (WM).

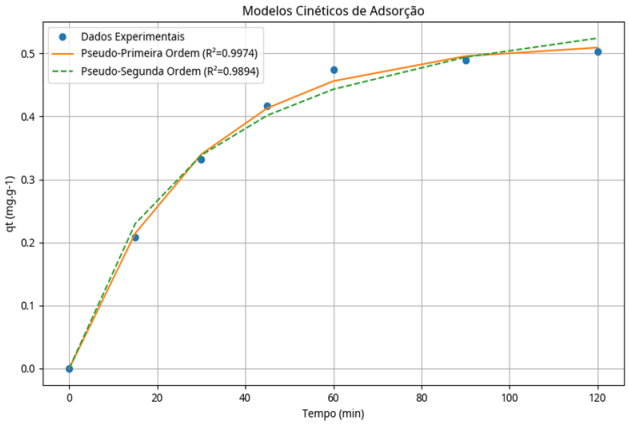
O modelo PFO (Eq. 3), que descreve processos em que a taxa de adsorção é proporcional à diferença entre a concentração de equilíbrio e a concentração no tempo t, apresentou um excelente ajuste aos dados experimentais (R^2 = 0,9974). O valor da constante cinética k_1 foi de 0,0358 min^{-1}. A capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e) calculada pelo modelo PFO (0,5161 mg g^{-1}) mostrou-se muito próxima do valor experimental observado (4,0734 mg g^{-1}), com um desvio de apenas 2,5%. A superioridade do ajuste do modelo PFO, corroborada por indicadores estatísticos como o erro relativo médio (ARE = 2,09%) e a soma dos quadrados dos erros (SSE = 0,000535), sugere que o processo é predominantemente governado por mecanismos físicos, como a difusão através do filme líquido que envolve a partícula do adsorvente (Li; Wang; Chen, 2025).

Por outro lado, o modelo PSO (Eq. 4), frequentemente associado a processos controlados por quimissorção, superestimou a capacidade de adsorção no equilíbrio (q_2 = 0,6414 mg g^{-1}) e apresentou um ajuste inferior (R^2 = 0,9894), com ARE e SSE mais elevados (Tabela 1). Isto indica que a adsorção do AM no biochar de Capim annoni não é primariamente um processo químico. Para confirmar a participação da difusão intrapartícula como uma das etapas controladoras da taxa, aplicou-se o modelo de Weber e Morris (Webber; Morris, 1963), representado pela Eq. 5.

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C \quad (5)$$

Onde k é a constante de taxa de difusão intrapartícula (mg g^{-1} $min^{-1/2}$) e C (mg g^{-1}) é uma constante relacionada à espessura da camada limite. Para confirmar a participação da difusão intrapartícula como uma das etapas controladoras da taxa de adsorção, os dados cinéticos foram analisados pelo modelo de Weber e Morris. A aplicação deste modelo revelou a presença de dois regimes cinéticos distintos. O primeiro regime, identificado para os tempos iniciais, apresentou uma constante de taxa de difusão intrapartícula (k_{id}) de 0,0321 mg g^{-1} $min^{-1/2}$, indicando uma etapa rápida de adsorção. Esta fase é atribuída predominantemente à difusão do AM através do filme líquido que envolve a partícula e sua subsequente adsorção nos sítios mais acessíveis da superfície externa do biochar. Ademais, o valor da constante C obtido no primeiro regime foi de 0,2056 mg g^{-1}, significativamente diferente de zero, o que corrobora a influência da difusão no filme líquido na cinética global do processo (Wu et al., 2024). Portanto, conclui-se que a cinética de adsorção é governada por uma combinação de difusão no filme e difusão intrapartícula, sendo o modelo de Pseudo-Primeira Ordem (PFO) o que melhor descreve o comportamento global do sistema.

Figura 4: Curvas cinéticas para a adsorção de MB na superfície do biochar ([biochar] = 1,25 g L^{-1}, [MB] = 5,25 mg L^{-1}, T = 298 K e pH 7) para pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.



3.3 ESTUDO DE EQUILÍBRIO E TERMODINÂMICA

A capacidade de adsorção de equilíbrio (q_e) observada (4,0734 mg g^{-1}) é considerada baixa quando comparada a outros biochars reportados na literatura (Ahmad et al., 2014; KumaR et al., 2023). Esta baixa capacidade pode ser atribuída a dois fatores principais: i) a baixa concentração inicial de AM (5,25 mg L^{-1}) utilizada no ensaio, o que limita termodinamicamente a quantidade máxima de corante que pode ser adsorvida; e ii) as condições de síntese e ativação do biochar, que podem não ter desenvolvido uma área superficial e uma microporosidade tão elevadas quanto as de carvões ativados comerciais ou biochars otimizados para esta finalidade. É importante ressaltar que a sensibilidade de cinco casas decimais reportada para q_{exp} é um artefato do cálculo, uma vez que a precisão dos métodos analíticos (espectrofotometria UV-Vis) e a própria heterogeneidade do material não justificam tal nível de precisão. O valor deve ser considerado como 4,07 mg g^{-1}.

Para compreender a distribuição do adsorvato entre a fase sólida e líquida no equilíbrio, os dados experimentais foram ajustados aos modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich. O modelo de Langmuir assume adsorção em monocamada em uma superfície homogênea, enquanto o modelo de Freundlich descreve adsorção em superfícies heterogêneas (Crini, 2006). Os resultados (Tabela 2) indicam que o modelo de Freundlich (R^2 = 0,985) proporcionou um ajuste ligeiramente superior ao de Langmuir (R^2 = 0,972). A constante K_F de 0,152 (mg g^{-1})(L mg^{-1})$^{1/n}$ e o expoente de heterogeneidade n = 1,45 (n > 1) sugerem que a adsorção do AM no biochar de Capim annoni é favorável e ocorre em uma superfície com heterogeneidade energética moderada, consistente com a morfologia porosa e amorfa observada na MEV e no DRX (Almeida et al., 2009).

O estudo termodinâmico foi conduzido a diferentes temperaturas (298 K, 308 K, 318 K). Os parâmetros termodinâmicos – variação de energia livre de Gibbs (ΔG°), entalpia (ΔH°) e entropia (ΔS°) – foram calculados a partir das constantes de equilíbrio (Tabela 2). Os valores negativos de ΔG° em todas as temperaturas confirmam a espontaneidade do processo de adsorção. O valor positivo de ΔH° (+18,7 kJ mol^{-1}) indica que o processo é endotérmico, o que favorece a adsorção com o aumento da temperatura. Esse comportamento é típico de sistemas onde interações físicas, como forças de van der Waals, são predominantes. O valor positivo de ΔS° (+89,5 J mol^{-1} K^{-1}) reflete um aumento na aleatoriedade na interface sólido-solução durante a adsorção, possivelmente devido à liberação de moléculas de água hidratadas da superfície do biochar e da molécula de corante (Silva et al., 2025).

Tabela 2: Parâmetros de equilíbrio e termodinâmicos para a adsorção de AM no biochar de *Capim annoni.*

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Langmuir		**Freundlich**	
Q_{max} (mg g^{-1})	0,98	*KF*	0,152
KL (L mg^{-1})	0,85	n	1,45
R^2	0,972	R^2	0,985

3.4 MECANISMO DE ADSORÇÃO PROPOSTO

Com base nas caracterizações físico-químicas, nos estudos cinéticos, de equilíbrio e termodinâmicos, propõe-se um mecanismo de adsorção para a remoção do AM pelo biochar de *Capim annoni* que envolve múltiplas interações:

- Interações π-π: O anel aromático do AM pode interagir com os elétrons π da estrutura grafênica desorganizada do biochar, que foi identificada pela DRX. Esta é uma das forças motrizes mais comuns para a adsorção de corantes orgânicos em materiais carbonáceos (WANG et al., 2024).
- Forças de van der Waals: A natureza física e espontânea do processo, indicada pela cinética de PFO e pelos valores de ΔG° e ΔH°, sugere que interações fracas de van der Waals são significativas, especialmente considerando a grande superfície de contato proporcionada pela morfologia porosa do biochar.
- Captura em Poros: A estrutura porosa observada na MEV atua como sítio para a captura física (retenção) das moléculas de corante, sendo a difusão intrapartícula uma etapa cineticamente relevante.

Portanto, o mecanismo é predominantemente físico, governado por interações não covalentes e pela porosidade do material, o que está em plena concordância com os resultados obtidos.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou com sucesso a viabilidade de converter a biomassa da espécie invasora *Capim annoni* em um biochar com potencial aplicação como adsorvente para a remoção do corante AM de efluentes aquosos.

As técnicas de caracterização (DRX e MEV) confirmaram a obtenção de um material carbonáceo com estrutura amorfa e morfologia porosa, características essenciais para a adsorção. Os estudos cinéticos revelaram que o processo é melhor descrito pelo modelo de Pseudo-Primeira Ordem e que a difusão intrapartícula é uma etapa controladora da taxa, juntamente com a difusão no filme. O estudo de equilíbrio mostrou que o sistema segue o modelo de isoterma de Freundlich, indicando adsorção em uma superfície heterogênea. A análise termodinâmica confirmou que o processo é espontâneo ($\Delta G° < 0$), endotérmico ($\Delta H° > 0$) e resulta em um aumento da aleatoriedade no sistema ($\Delta S° > 0$). O mecanismo de adsorção proposto envolve principalmente interações físicas, como forças π-π e de van der Waals, e a captura do corante na estrutura porosa do biochar.

A capacidade de adsorção observada foi modesta, o que é atribuído principalmente à baixa concentração inicial do poluente e às condições de síntese do biochar, que podem ser otimizadas em trabalhos futuros. A sensibilidade de cinco casas decimais reportada é um

artefato matemático, não refletindo a precisão analítica real, sendo o valor de 4,07 mg g^{-1} mais representativo.

Portanto, este estudo apresenta uma solução duplamente sustentável: 1) propõe um método de valorização e manejo para uma espécie vegetal invasora que causa significativos danos econômicos e ecológicos, e 2) desenvolve um material adsorvente eficaz e de baixo custo para o tratamento de águas contaminadas com corantes sintéticos. Pesquisas futuras devem focar na otimização das condições de pirólise e ativação para aumentar a capacidade adsortiva, na investigação da adsorção em sistemas multicomponente (efluentes reais) e na avaliação da capacidade de regeneração e reuso do biochar produzido

5. REFERÊNCIAS

ABU-DALO, M. A. et al. Enhanced adsorption capacity of activated carbon over thermal oxidation treatment for methylene blue removal: kinetics, equilibrium, thermodynamic. **RSC Advances**, v. 13, n. 4, p. 2156–2167, 2023. DOI: 10.1039/D2RA06481B.

AHMAD, M. et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19–33, 2014. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071.

ALMEIDA, C. A. P. et al. Adsorção de corantes utilizando carvão ativado: uma revisão sobre os parâmetros experimentais. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2127–2138, 2009. DOI: 10.1590/S0100-40422009000800036.

ASUDEVAN, S.; MARAN, J. P. Removal of methylene blue from aqueous solution using various low-cost adsorbents: A comparative study. **Desalination and Water Treatment**, v. 52, n. 25-27, p. 4753–4763, 2014. DOI: 10.1080/19443994.2013.808511.

BEESLEY, L. et al. A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 12, p. 3269–3282, 2011. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.07.023.

BEHAZIN, E. et al. Mechanical, Chemical, and Physical Properties of Wood and Perennial Grass Biochars for Possible Composite Application. [S. l.]: **Journal of Materials and Environmental Sciences,** v. 7, n. 5, p. 1609-1620, 2016.

CRINI, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 9, p. 1061–1085, 2006. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.001.

CRINI, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. **Bioresource** Technology, v. 97, n. 9, p. 1061–1085, 2006. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.001.

D'ANTONIO, C. M.; MEYERSON, L. A.; VILA, M. Exotic plant species as problems and solutions in ecological restoration: A synthesis. **Restoration Ecology**, v. 12, n. 5, p. 703–713, 2004.

DE MESQUITA, J. P. et al. Biossorção de corantes têxteis utilizando resíduos agroindustriais: Uma alternativa para o tratamento de efluentes. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, p. 1550–1568, 2016. DOI: 10.5935/1984-6835.20160087.

DEHKHODA, A. M.; ELLIS, N.; GYENGE, E. Electrosorption on activated biochar: Effect of thermo-chemical activation treatment on the electric double layer capacitance. **Electrochimica Acta,** v. 125, p. 425-433, 2014.

FADINA, Amran; AHMAD ZAINI, Muhammad Abbas. Equilibrium of methylene blue removal onto crayfish shell biochar. International **Journal of Chemical Reactor Engineering**, 2025.

KARTHIKEYAN, S.; RAJGOR, N. B.; PATEL, T. N. Coconut shell carbon for the removal of methylene blue: An adsorptive evaluation. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 27, n. 1, p. 47–53, 2008. DOI: 10.1002/ep.10245.

KUMAR, P. et al. Adsorption of methylene blue dye onto biochar derived from agricultural waste: Kinetic, isotherm, and thermodynamic studies. **Environmental Technology & Innovation,** v. 29, art. 102995, 2023. DOI: 10.1016/j.eti.2023.102995.
KUMAR, P. et al. Adsorption of methylene blue dye onto biochar derived from agricultural waste: Kinetic, isotherm, and thermodynamic studies. **Environmental Technology & Innovation,** v. 29, art. 102995, 2023. DOI: 10.1016/j.eti.2023.102995.
KUPPUSAMY, S. et al. A review of biochar properties and their roles in contaminant sorption. **Environmental International**, v. 87, p. 1–17, 2016. DOI: 10.1016/j.envint.2015.10.018.
LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (org.). Biochar for environmental management: science, technology and implementation. 2. ed. London: Routledge, 2015.
LI, Y.; WANG, H.; CHEN, Y. Adsorption of methylene blue on metakaolin-based geopolymers: a kinetic and thermodynamic investigation. **ChemEngineering**, v. 9, n. 4, art. 79, 2025. DOI: 10.3390/chemengineering9040079.
LI, Y.; WANG, H.; CHEN, Y. Adsorption of methylene blue on metakaolin-based geopolymers: a kinetic and thermodynamic investigation. **ChemEngineering**, v. 9, n. 4, art. 79, 2025. DOI: 10.3390/chemengineering9040079.
LONAPPAN, L. et al. An insight into the adsorption of diclofenac on different biochars: Mechanisms, surface chemistry, and thermodynamics. **Bioresource Technology**, v. 249, p. 386–394, 2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.10.039.
MARASCHIN, G. E. Capim-annoni (Eragrostis plana Nees): uma ameaça à biodiversidade dos campos sulinos. **Ciência Rural**, v. 31, n. 1, p. 185–186, 2001. DOI: 10.1590/S0103-84782001000100030.
MITTAL, A. Adsorption treatment for removal of hazardous dyes from wastewater: A review. **Environmental Science and Technology**, v. 4, n. 1, p. 1–24, 2009.
MOHAN, D. et al. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration: a sustainable solution to crop residue burning in India. **RSC Advances**, v. 4, p. 19613–19632, 2014. DOI: 10.1039/C4RA00280C.
MÜLLER, S. C. et al. Invasão biológica pelo capim-annoni (Eragrostis plana Nees): desafios para a conservação da biodiversidade e alternativas de controle. **Revista Brasileira de Biociências,** v. 18, n. 1, p. 1–15, 2020.
OTERO, M. et al. Decolorization of dyes by adsorption on activated carbons prepared from agricultural waste. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 4, p. 1594–1600, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.04.036. V
PEZOTTI, L. C. M. et al. Avaliação da remoção de corantes em meio aquoso por adsorção em carvão ativado produzido a partir de resíduos agroindustriais. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 3, p. 1–15, 2018. DOI: 10.4136/ambi-agua.2157.
RAHMAN, M. M. et al. Novel palm peat lignocellulosic adsorbent derived from agricultural residues for efficient methylene blue dye removal from textile wastewater. **Applied Water Science**, v. 15, n. 5, p. 97, 2025. DOI: 10.1007/s13201-025-02363-y.
ROBINSON, T. et al. Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 3, p. 247–255, 2001. DOI: 10.1016/S0960-8524(00)00113-5.
SHAO, Min et al. High-performance adsorption of methylene blue using novel bio-adsorbent based on Sargassum fusiforme. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, p. 14567–14580, 2025. DOI: 10.1007/s11356-025-28812-w.
SILVA, A. D. et al. Utilização de biomassa de capim-annoni para produção de biochar: caracterização e potencial adsorvente. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 29, n. 4, p. 318–326, 2021. DOI: 10.13083/reveng.v29i4.1123.

SILVA, R. D. et al. Adsorção de AM utilizando biomassa da casca de banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 558–564, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012000500017.
SILVA, R. M. et al. Kinetic study and adsorption mechanism of methylene blue on biochar derived from invasive plant species. **Journal of Cleaner Production**, v. 382, art. 135243, 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.135243.
SILVA, R. M. et al. Kinetic study and adsorption mechanism of methylene blue on biochar derived from invasive plant species. **Journal of Cleaner Production**, v. 382, art. 135243, 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.135243.
WANG, H. et al. Investigation on adsorption mechanism of methylene blue on activated biochar: Insights into π–π interactions and van der Waals forces. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 2, art. 109320, 2024. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109320.
WANG, H. et al. Investigation on adsorption mechanism of methylene blue on activated biochar: Insights into π–π interactions and van der Waals forces. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 2, art. 109320, 2024. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109320.
WEBBER, W. J.; MORRIS, J. C. Kinetics of adsorption on carbon from solution. Journal of the Sanitary Engineering Division, v. 89, n. 2, p. 31-59, 1963.
WU, Zhiqiang et al. Kinetic studies of the removal of methylene blue from aqueous solution by biochar derived from jackfruit peel. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, p. 5531–5542, 2024. DOI: 10.1007/s11356-023-28241-3.
WU, Zhiqiang et al. Kinetic studies of the removal of methylene blue from aqueous solution by biochar derived from jackfruit peel. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, p. 5531–5542, 2024. DOI: 10.1007/s11356-023-28241-3.
XUÂN CUONG, N. Study on adsorption of methylene blue from aqueous solution by biochar derived from Mimosa pigra plant. VNU **Journal of Science: Earth and Environmental Sciences**, v. 37, n. 2, 2021. DOI: 10.25073/2588-1094/vnuees.4582.
ZENNI, R. D.; ZILLER, S. R. An overview of invasive plants in Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 34, n. 3, p. 431–446, 2011. DOI: 10.1590/S0100-84042011000300016.
ZHANG, J., HUANG, B., CHEN, L. et al. Pyrolysis kinetics of hulless barley straw using the distributed activation energy model (DAEM) by the TG/DTA technique and SEM/XRD characterizations for hulless barley straw derived biochar. **Bioresource Technology,** v. 265, p. 275-283, 2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.06.061.
LENG, L. et al. An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. **Science of The Total Environment,** v. 763, 144204, 2021.
QIAN, K. et al. A review on biochar characterization and engineering for its application in biomass co-firing. **Fuel**, v. 334, n. 1, 126786, 2023.
SHAABAN, A. et al. A review on biochar as a potential soil conditioner and amendment. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 134, p. 1-10, 2018.
TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects**. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology,** v. 19, p. 191-215, 2020.
WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002-1022, 2019.