




C A P Í T U L O 11

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE BIOCARVÃO E HIDROCARVÃO A PARTIR DA CASCA DE COCO VERDE (*Cocos nucifera* L.)

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.97625170911>

Yasmin Aparecida Martins de Godoy Rocha

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Mato Grosso – Campus Cuiabá – Bela Vista.
Cuiabá – Mato Grosso
<http://lattes.cnpq.br/4575370259128082>

Elaine de Arruda Oliveira Coringa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Mato Grosso – Campus Cuiabá – Bela Vista.
Cuiabá – Mato Grosso
<http://lattes.cnpq.br/3353543328300846>

RESUMO: A pesquisa teve como objetivo caracterizar biocarvão e hidrocarvão obtidos a partir de resíduos de coco verde (*Cocos nucifera* L.) pelo processo de pirólise lenta e hidrotermal, visando avaliar seu potencial como materiais adsorventes. A biomassa da casca de coco verde foi submetida à pirólise lenta em mufla a 500 °C e à carbonização hidrotérmica à 180 °C por 6 h. Os materiais obtidos foram caracterizados quanto ao teor de umidade, cinzas, matéria volátil, carbono fixo, pH, ponto de carga zero (PCZ), análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura e capacidade adsorptiva frente ao corante azul de metileno. O biocarvão apresentou menor umidade e matéria volátil, maior carbono fixo e pH alcalino, enquanto o hidrocarvão manteve características mais oxigenadas. A morfologia (MEV) evidenciou superfície mais porosa no biocarvão. Ambos os materiais removeram eficientemente o corante catiônico, sendo a máxima adsorção observada em pH levemente ácido a neutro. Os resultados demonstram que, mesmo sob condições térmicas moderadas, biocarvão e hidrocarvão derivados de coco verde exibem propriedades físico-químicas distintas e promissoras para aplicações em processos de remediação ambiental, reforçando sua viabilidade como alternativas sustentáveis de valorização de resíduos agroindustriais.

PALAVRAS-CHAVE: Pirólise, Carbonização hidrotermal, Biomassa.

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF BIOCHAR AND HYDROCHAR FROM GREEN COCONUT HUSK (*Cocos nucifera* L.)

ABSTRACT: The research aimed to characterize biochar and hydrochar produced from green coconut waste (*Cocos nucifera* L.) via slow pyrolysis and hydrothermal carbonization, respectively, assessing their potential as adsorbent materials. Green coconut shell biomass was subjected to slow pyrolysis in a muffle furnace at 500 °C and to hydrothermal carbonization at 180 °C for 6 h. The resulting materials were characterized for moisture content, ash content, volatile matter, fixed carbon, pH, point of zero charge (PZC), surface morphology by scanning electron microscopy (SEM), and adsorption capacity toward methylene blue dye. The biochar exhibited lower moisture and volatile matter contents, higher fixed carbon, and an alkaline pH, whereas the hydrochar retained more oxygenated functional groups. SEM analysis revealed a more porous surface in the biochar. Both materials efficiently removed the cationic dye, with maximum adsorption observed under slightly acidic to neutral pH conditions. The results demonstrate that—even under moderate thermal conditions—biochar and hydrochar derived from green coconut waste display distinct and promising physicochemical properties for environmental remediation applications, reinforcing their viability as sustainable alternatives for the valorization of agro-industrial residues.

KEYWORDS: Pyrolysis, Hydrothermal carbonization, Biomass.

INTRODUÇÃO

O coco verde (*Cocos nucifera* L.), também conhecido como coco-da-baía ou coco da praia, é amplamente encontrado em regiões tropicais e gera grande volume de resíduos, especialmente na casca, cuja composição é rica em lignina ($43,9 \pm 0,7\%$) e celulose ($37,4 \pm 0,5\%$), além de hemicelulose, extrativos, cinzas e nutrientes como potássio, cálcio e nitrogênio (MONTEIRO ET AL, 2017). Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e Bebidas Não Alcoólicas (ABIR), em 2020 o Brasil produziu 170.433 litros de água de coco, com crescimento anual de 8%, evidenciando o potencial gerador de resíduos dessa cadeia produtiva.

Diante do aumento da demanda por fontes renováveis e da necessidade de destinação ambientalmente adequada de resíduos, busca-se alternativas que conciliem viabilidade técnica, sustentabilidade e viabilidade econômica. Nesse contexto, a casca de coco verde surge como biomassa promissora para a produção de materiais carbonáceos como biocarvão e hidrocarvão, em virtude de sua abundância e composição lignocelulósica favorável.

O biocarvão é um sólido poroso e rico em carbono, obtido por pirólise de biomassa em ambiente com baixa ou nenhuma disponibilidade de oxigênio, em diferentes temperaturas. É composto predominantemente por carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e cinzas, podendo ser produzido a partir de diversos resíduos, como agrícolas, madeireiros, esterços e lodos (BORDOLOI, 2020; KURNIAWAN et al., 2023; ELKHLIFI et al., 2023). Já o hidrocarvão é um material carbonáceo de coloração escura e estrutura aromática mesoporosa, obtido por carbonização hidrotérmica, processo que converte biomassa úmida em sólido carbonizado, em temperaturas relativamente baixas (80–240 °C) e sob pressão de água subcrítica, gerando também frações líquida e gasosa (VILLAMIL et al., 2020; NADARAJAH et al., 2021). Suas propriedades estruturais conferem potencial como adsorvente, remediador de solos e material catalítico (WU et al., 2024).

Estudos indicam que biocarvão e hidrocarvão podem promover melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas de solos, destacando-se como ferramentas estratégicas para recuperação de áreas degradadas, incremento da produtividade agrícola e remediação ambiental (BLANCO-CANQUI, 2017).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo caracterizar, do ponto de vista físico-químico, o biocarvão e o hidrocarvão obtidos a partir da casca de coco verde (*Cocos nucifera* L.).

MATERIAL E MÉTODOS

Preparo da biomassa

A biomassa utilizada neste estudo foi obtida a partir de resíduos de coco verde (*cocos nucifera* L.) coletados em pontos comerciais do município de Cuiabá (MT). Aproximadamente 20 kg de frutos inteiros foram levados ao Laboratório de Solos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT), *campus* Cuiabá – Bela Vista.

O processamento iniciou-se com o desfibramento manual do fruto, visando à separação do epicarpo (casca externa verde) e endocarpo (casca dura interna), restando o mesocarpo fibroso, principal fração lignocelulósica. O material fibroso foi lavado com água destilada para remoção de impurezas superficiais, seguido de secagem em estufa de circulação de ar (90 °C, 48 h). Após secagem, a biomassa foi triturada em liquidificador e peneirada para obtenção de fração granulométrica a 2 mm. O material foi armazenado em recipientes herméticos, em ambiente seco e protegido da luz, até sua utilização.

Produção do biocarvão e hidrocarvão

O biocarvão foi produzido por pirólise lenta em forno mufla a 500°C (Zezimaq, modelo N1030), seguindo protocolo adaptado de Oliveira (2024), em cadinhos cerâmicos com tampas, inibindo a presença de oxigênio durante o aquecimento. O material resultante foi resfriado em dessecador, macerado para homogeneização e armazenado em dessecador até as análises.

O hidrocarvão foi obtido por carbonização hidrotérmica (HTC) em reator hidrotérmico com revestimento interno de teflon, com capacidade de 100 mL, utilizando a proporção biomassa/água de 1:8 (m/v). O reator foi submetido à estufa com controle de temperatura a 180 °C por 6 h. Após resfriamento natural até temperatura ambiente, o hidrocarvão foi recuperado por filtração a vácuo (funil de Büchner, papel-filtro qualitativo). O sólido retido foi seco em estufa (180 °C, 4 h), macerado e estocado em dessecador.

Caracterização físico-química

O teor de umidade do biocarvão/hidrocarvão foi determinado por secagem direta (Instituto Adolfo Lutz, 2008) a 105 ± 2 °C, até peso constante.

A análise de pH e de condutividade elétrica foram realizadas na solução aquosa na proporção 1:10 (m/v) de biocarvão/hidrocarvão, utilizando-se peagâmetro (Marconi MA-522), calibrado com tampões pH 4,0; 7,0 e 10,0 e condutivímetro calibrado (Marconi MA-521) com solução padrão de $147 \mu\text{S cm}^{-1}$

O teor de cinzas (CZ) foi determinado por calcinação em mufla (690 ± 10 °C, 4 h), conforme norma ASTM D3174-04 (ASTM, 2004). O teor de matéria volátil (MV) foi obtido por aquecimento rápido a 950 ± 20 °C por 6 min, segundo ASTM E872-82 (ASTM, 1998). O carbono fixo (CF) foi calculado indiretamente considerando os resultados obtidos para teor de cinzas (CZ) e material volátil (MV).

O PCZ foi determinado por titulação potenciométrica do biocarvão/hidrocarvão em solução salina de NaCl 0,1 mol L⁻¹, com pH inicial ajustado entre 1,0 e 12,0 com HCl ou NaOH 0,1 mol L⁻¹. Após agitação por 24 horas a 150 rpm, 25 °C, o pH final foi registrado. O PCZ das amostras foi determinado pelo gráfico de ΔpH versus pH inicial da solução.

A morfologia superficial dos materiais foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura - MEV (Tescan VEGA3 LMU), operando a 5,0 kV e 10 pA. As amostras foram fixadas em *stubs* com fita de carbono dupla-face e recobertas com camada fina de ouro (~10 nm, *sputtering*), no Centro de Pesquisa Multiusuário do Araguaia (CPMUA/UFMT).

A capacidade adsortiva foi avaliada frente ao corante catiônico azul de metileno (C.I. 52015, Synth), em ensaios de escala laboratorial. As amostras foram padronizadas para granulometria <0,25 mm. Em tubos de centrífuga (50 mL), foram adicionados 10 mg do adsorvente e 25 mL de solução do corante (6,0 mg L⁻¹), com agitação (150 rpm, SpLab SP180). Foram conduzidos ensaios variando o pH da solução, o tempo de equilíbrio e a massa do adsorvente. Após agitação, as amostras foram centrifugadas (4000 rpm, 5 min) e a concentração residual do corante foi quantificada por espectrofotometria UV-Vis (Kasuaki IL-592, λ = 665 nm), com base em curva analítica do azul de metileno.

A capacidade adsortiva no equilíbrio (q_e , mg g⁻¹) foi calculada segundo a Equação 1:

$$Q_e = (C_o - C_e) \times V / m \quad (1)$$

onde Q_e = quantidade de corante adsorvida, mg/g; C_o = Concentração inicial de corante (mg.L⁻¹); C_e = Concentração de corante no equilíbrio (mg.L⁻¹); V = Volume da solução de azul de metileno (L); m = massa de adsorvente (g).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises de caracterização físico-química do biocarvão e hidrocarvão estão listados na Tabela 1:

Análises	Biomassa	Biocarvão	Hidrocarvão
Umidade %	10	-	-
Ph	4,63 ± 0,01	10,20 ± 0,03	4,48 ± 0,02
Condutividade elétrica (μS/cm)	585,2 ± 25,28	1167 ± 24,53	45,83 ± 2,23
Ponto de carga zero (PCZ)	-	9,05	4,48
Teor de cinzas %	3,99 ± 0,15	-	-
Material volátil %	14,68 ± 12,70	-	-
Carbono Fixo %	81,31 ± 12,72	-	-

Tabela 1. Análise físico-química da biomassa, biocarvão e hidrocarvão.

A biomassa apresentou pH levemente ácido (4,63) e condutividade moderada (585,2 μS/cm). Após o processo de pirólise a 500 °C, o biocarvão tornou-se altamente alcalino (pH 10,2), o que se reflete na elevada condutividade (1167 μS/cm). Já o hidrocarvão, produzido por carbonização hidrotérmica, apresentou pH ácido (4,48) e menor valor de condutividade em relação aos demais produtos (45,83 μS/cm).

O ponto de carga zero (PCZ), parâmetro fundamental para entender a carga superficial de superfície do adsorvente em função do pH, foi determinado em 9,05 para o biocarvão e 4,48 para o hidrocarvão. Isso indica que o biocarvão adquire carga

negativa em pH > 9,05, tornando-se eficaz na adsorção de cátions metálicos apenas em ambientes neutros a alcalinos. Já o hidrocarvão, com PCZ de 4,48, apresenta carga negativa em pH > 4,48, ou seja, em praticamente toda a faixa de pH de solos e efluentes comuns, o que amplia seu potencial de adsorção de cátions, como Pb^{2+} , Cu^{2+} e corantes catiônicos.

O alto teor de carbono fixo da biomassa (81,31%) indica que a casca do coco verde possui uma estrutura rica em compostos aromáticos como a lignina, que são resistentes à degradação térmica e favorecem a formação de estruturas carbonáceas encontradas durante a carbonização (MISHRA et al., 2025).

O baixo teor de cinzas (3,99 %) observado no biocarvão de casca de coco sugere escassa presença de minerais inorgânicos, condição comumente associada a biomassa lignocelulósica de origem lenhosa (PARIYAR et al., 2020).

Já o teor de material volátil (14,68 %) reforça a natureza recalcitrante da casca de coco, onde valores inferiores a 20 % são típicos de biocarvões produzidos acima de 500 °C a partir de matrizes ricas em lignina e celulose cristalina. Esse comportamento está diretamente relacionado à elevada densidade estrutural e ao grau de lignificação característicos de frutos tropicais, que conferem resistência térmica e favorecem a condensação aromática durante a pirólise. (PARIYAR et al., 2020).

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) demonstrou as diferenças morfológicas significativas entre a casca de coco verde (*Cocos nucifera* L.), o biocarvão e o hidrocarvão produzidos a partir desse resíduo.

A biomassa original (Figura 1) apresentou estrutura fibrosa compacta, com pouca porosidade desenvolvida. Já o biocarvão (Figura 2) exibiu superfície altamente porosa, com cavidades e furos bem definidos, resultado da degradação térmica e liberação de compostos voláteis durante a pirólise. O hidrocarvão (Figura 3), embora com menor desenvolvimento de porosidade visível, apresentou superfície rugosa e texturizada, com áreas de agregação e microporosidade, típicas do processo de carbonização hidrotermal.

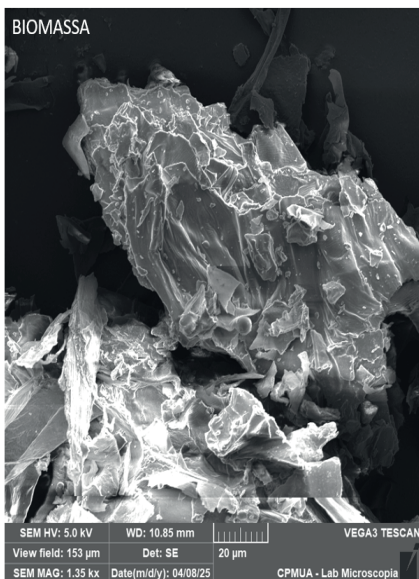
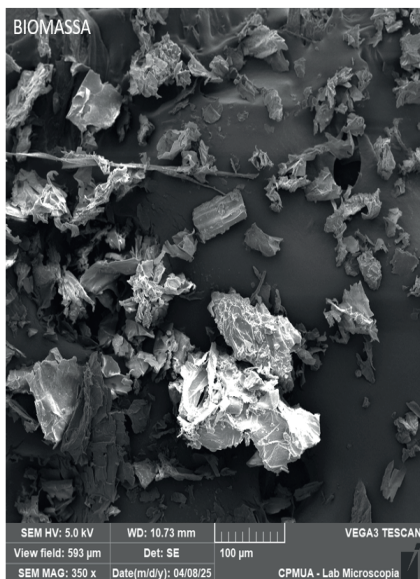


Figura 1: Microscopia de varredura da biomassa casca de coco verde (*Cocos nucifera* L.)

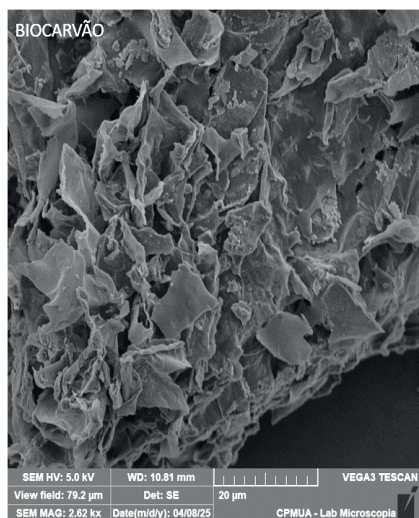
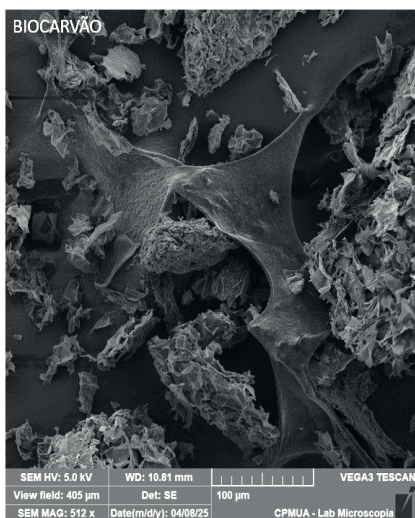


Figura 2: Microscopia de varredura do biocarvão (pirólise 500°C).

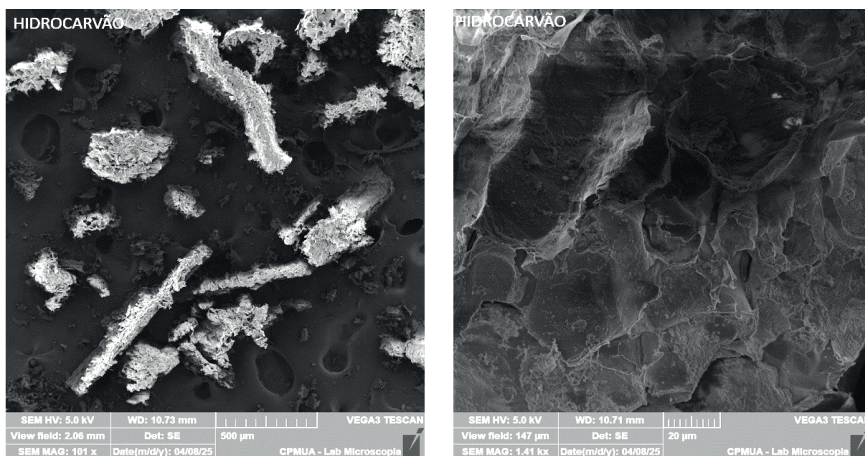


Figura 3: Microscopia de varredura do hidrocarvão (Carbonização hidrotermal 180°C)

As características morfológicas observadas por MEV corroboram tendências descritas na literatura para materiais carbonosos derivados de biomassa lignocelulósica rica em lignina e celulose cristalina, como a casca de coco. A alta porosidade do biocarvão está diretamente associada à pirólise em atmosfera inerte, durante a qual ocorre a ruptura de ligações da lignina e a despolimerização da celulose, gerando voláteis (BIELLECKI et al.,2023).

Por sua vez, a superfície rugosa e texturizada do hidrocarvão, embora aparentemente menos porosa, reflete um mecanismo distinto de formação durante a carbonização hidrotérmica. Essas funcionalidades, embora não gerem porosidade visível em MEV, conferem alta densidade de sítios ativos para interações químicas, como ligação de hidrogênio, atração eletrostática e complexação, tornando o hidrocarvão especialmente eficaz na adsorção de espécies catiônicas e moléculas polares (LI et al.,2021).

Assim, enquanto o biocarvão se destaca por sua *textura*, o hidrocarvão se sobressai por sua *química de superfície*, ampliando as possibilidades de aplicação em remediação ambiental e manejo sustentável de solos.

Os resultados obtidos nas análises de adsorção foram fundamentais para a definição das condições de produção e aplicação de biocarvão e hidrocarvão derivados da casca do coco verde, utilizadas no presente estudo (Tabela 2).

VARIÁVEIS	BIOCARVÃO		HIDROCARVÃO	
	Qe (mg/L)	% Remoção	Qe (mg/L)	% Remoção
pH da solução adsorvente	12,22	81,49	13,01	86,76
Tempo de equilíbrio (min.)	9,01	60,06	9,13	60,86
massa do adsorvente (mg)	2,67	71,13	3,49	93,10

Tabela 2. Ensaios de adsorção do biocarvão e hidrocarvão

Os parâmetros ótimos de pH, tempo de agitação (equilíbrio) e massa do adsorvente foram iguais para o biocarvão e hidrocarvão: pH 12, tempo de 120 minutos e massa ótima de 80 mg, porém com diferentes capacidades adsorventes frente ao corante azul de metileno. No pH e massa ótimos, o hidrocarvão alcançou maior eficiência de remoção em relação ao biocarvão, evidenciando maior densidade de grupos funcionais em ácidos graxos.

A superioridade do hidrocarvão sobre o biocarvão na remoção de azul de metileno, mesmo sob condições operacionais idênticas, está alinhada à literatura, que atribui esse comportamento à maior densidade de grupos oxigenados, derivados da oxidação parcial de ácidos graxos insaturados presentes na casca de coco durante a carbonização hidrotérmica (ISLAM et al, 2017). Assim a complementaridade entre as propriedades texturais do biocarvão e as propriedades funcionais do hidrocarvão permite ajustes direcionados conforme a demanda específica de aplicação.

CONCLUSÃO

A partir de resíduos de coco verde foram sintetizados o biocarvão (por pirólise lenta a 500 °C) e o hidrocarvão (por carbonização hidrotérmica a 180 °C), cujas propriedades físico-químicas revelaram características físico-químicas diferentes. A microscopia eletrônica de varredura confirmou diferenças morfológicas, com o biocarvão exibindo superfície mais porosa em relação ao hidrocarvão.

Ambos os materiais demonstraram capacidade adsorptiva acima de 80% frente ao corante azul de metileno, com destaque para o hidrocarvão, que em condições ótimas de pH e massa, alcançou maior eficiência de adsorção.

Esses resultados indicam que, mesmo sob condições térmicas moderadas, tanto o biocarvão quanto o hidrocarvão derivados de coco verde possuem propriedades estruturais e superficiais favoráveis à aplicação como materiais adsorventes, reforçando seu potencial na valorização de resíduos agroindustriais por meio de rotas termoquímicas controladas.

REFERÊNCIAS

ABIR - Associação Brasileira das indústrias de refrigerantes e de Bebidas não Alcoólicas. 2024. Disponível em: <https://abir.org.br/o-setor/dados/agua-de-coco/>. Acesso em 12 Nov. 2024.

ASTM D 3174-04. Método de Teste Padrão para Cinzas na Amostra de Análise de Carvão e Coque. ASTM international, West Conshohocken, PA, 2004.

ASTM INTERNATIONAL. Método de Ensaio Padrão para Cinzas na Amostra de Análise de Carvão e Coque. Em: Annual Book of ASTM Standards, v.05.06, 1998a.

ASTM INTERNACIONAL. Práticas Padrão para Técnicas Gerais de Análises Quantitativas por Infravermelho (ASTM E168-16). West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: <https://www.astm.org>.

BIELECKI, Marcin; ZUBKOVA, Valentina. Analysis of interactions occurring during the pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Molecules (Basel, Switzerland)**, v. 28, n. 2, p. 506, 2023.

BORDOLOI, S.; NG, CWW Os efeitos de características da vegetação e suas funções de estabilidade em encostas bioengenhiradas: Uma revisão de perspectiva. *Engineering geology*, v. 275, n. 105742, p. 105742, 2020.

BLANCO-CANQUI, Humberto. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v.81, n.4, p.687-711, 2017.

ELKHLIFI Z, IFTIKHAR J, SARRAF M, ALI B, SALEEM MH, IBRANSHAHIB I, BISPO MD, MEILI L, ERCISLI S, TORUN KAYABASI E, ALEMZADEH ANSARI N. Potential Role of Biochar on Capturing Soil Nutrients, Carbon Sequestration and Managing Environmental Challenges: A Review. 15:2527. <https://doi.org/10.3390/su15032527>, 2023.

ISLAM, Md Azharul *et al.* Mesoporous activated coconut shell-derived hydrochar prepared via hydrothermal carbonization-NaOH activation for methylene blue adsorption. **Journal of environmental management**, v. 203, n. Pt 1, p. 237–244, 2017.

LI, Hao-Zhe *et al.* Preparation of hydrochar with high adsorption performance for methylene blue by co-hydrothermal carbonization of polyvinyl chloride and bamboo. **Bioresource technology**, v. 337, n. 125442, p. 125442, 2021.

NADARAJAH, K, Bandala, ER, Zhang, Z, Mundree, S, e Goonetilleke, A. (2021). Remoção de metais pesados da água usando hidrocarvão projetado: cinética e abordagem mecanicista. J. doi:10.1016/j.jwpe.2021.101929 *Water Process Eng.* 40, 101929.

JA Villamil, MA de la Rubia, E. Diaz, AF Mohedano, Capítulo 7 - Tecnologias para utilização de lodos de águas residuais e produção de energia: Carbonização hidrotérmica de biomassa lignocelulósica e lodo de esgoto, em: JA Olivares, D. Puyol, JA Melero, J. Dufour (Ed.), Resíduos de tratamento de águas residuais como recursos para produtos de biorrefinaria e biocombustíveis, Elsevier, 2020, pp. 133–153, doi: 10.1016/B978-0-12-816204-0.00007-2.

KURNIAWAN, T.A.; OTHMAN, M. H.D.; LIANG, X.; GOH, H.H.; GIKAS, P.; CHONG, K.K.; CHEW, K.W. Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. **Journal of environmental management**, v. 332, p. 117429, 2023.

MONTEIRO, Mônica S. *et al.* Wood (*Bagassa guianensis* Aubl) and green coconut mesocarp (*cocos nucifera*) residues as textile dye removers (Remazol Red and Remazol Brilliant Violet). **Journal of environmental management**, v. 204, n. Pt 1, p. 23–30, 2017.

OLIVEIRA, M; Melo I; Belaz K; Costa B; Barbosa G; Coelho L (2024). Uso do Biochar Produzido a partir da Fibra do Coco para Remoção de Íons Pb²⁺ em Meio Aquoso Use of Biochar Produced from Coconut Fiber for Removal of Pb²⁺ ions in Aqueous Medium. *chemical processes magazine*, 2024.

PARIYAR, Priya *et al.* Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. **The Science of the total environment**, v. 713, n. 136433, p. 136433, 2020.

WU, C. *et al.* Adsorption of dye through hydrochar derived from co-hydrothermal carbonization of garden waste and sewage sludge: The adsorption enhancement mechanism of lignin component. *Journal of water process engineering*, v. 67, n. 106233, p. 106233, 2024.