



Produção e caracterização do biocarvão obtido de palha de cana-de-açúcar

Production and characterization of biochar from sugarcane straw

Halax Duart Martins Silva¹ , Giovanni Uema Alcantara¹, Lorrana Zelia Martins de Souza¹, Augusto Cesar da Silva Bezerra² , Erica Pereira Gonçalves³, Gustavo Henrique Gravatim Costa¹, Adriana Barboza Alves¹, Alan Rodrigues Teixeira Machado^{1,3}, Osania Emerenciano Ferreira¹

¹Universidade do Estado de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Avenida Escócia, 1001, Cidade das Águas, 38202-436, Frutal, Minas Gerais, Brasil.

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Avenida Amazonas, 5253, Nova Suíça, 30.421-169, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³Universidade do Estado de Minas Gerais, Departamento de Ciências Exatas, Av. Brasília, 1304, Baú, 35930-314, João Monlevade, Minas Gerais, Brasil.

e-mail: halaxduart@hotmail.com, gigioalcantara@hotmail.com, lorrana.1094553@discente.uemg.br, augustobezerra@cefetmg.br, erica.0616337@discente.uemg.br, gustavo.costa@uemg.br, adriana.alves@uemg.br, alan.machado@uemg.br, osania.ferreira@uemg.br.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi produzir e caracterizar o biocarvão a partir da palha de cana-de-açúcar, bem como investigar possíveis efeitos fitotóxicos às germinações de algodão, milho e soja. Para tanto, o biocarvão foi produzido em forno de duplo tambor e caracterizado por diferentes técnicas. Os ensaios de germinação foram conduzidos in vitro, com doses de biocarvão variando entre 0 e 100 t/ha. O biocarvão foi obtido com rendimento de 40%, pH igual a 9,10, condutividade elétrica de 2,22 dS/m e área superficial específica de 20,3 m²/g. A análise elemental mostrou razões atômicas H/C e O/C de 0,41 e 0,21, respectivamente. A FTIR mostrou a presença de grupos C=C, enquanto a MEV/EDS mostrou estrutura porosa tipo favo de mel e nutrientes, como o Mg, K e Ca. O ensaio de germinação classificou o biocarvão como fitoestimulante para o milho e mostrou ausência de fitotoxicidade para soja. Por outro lado, para o algodão, as doses mais elevadas (50 e 100 t/ha) causaram fitotoxicidade. Os resultados deste trabalho vêm ao encontro das demandas globais por técnicas verdes. O biocarvão feito da palha de cana-de-açúcar é uma tecnologia promissora para melhorar a infertilidade de solos pobres e gerir o sequestro de carbono.

Palavras-chave: Biochar; Resíduos; Pirólise; Fitotoxicidade.

ABSTRACT

The objective of this work was to produce and characterize biochar from sugarcane straw, as well as to investigate possible phytotoxic effects on the germination of cotton, maize, and soybean. To this end, the biochar was produced in a double-drum oven and characterized by different techniques. The germination trials were conducted in vitro, with biochar doses varying between 0 and 100 t/ha. The biochar was obtained with a yield of 40%, pH equal to 9.10, electrical conductivity of 2.22 dS/m and specific surface area of 20.3 m²/g. The elemental analysis showed H/C and O/C atomic ratios of 0.41 and 0.21, respectively. The FTIR showed the presence of C=C groups, while SEM/EDS showed a honeycomb porous structure and nutrients such as Mg, K and Ca. The germination test classified the biochar as a phytonutrient for corn and showed no phytotoxicity for soybeans. On the other hand, for cotton, the highest doses (50 and 100 t/ha) caused phytotoxicity. The results of this work meet the global demands for green techniques. Biochar made from sugarcane straw is a promising technology to improve the infertility of poor soils and manage carbon sequestration.

Keywords: Biochar; Waste; Pyrolysis; Phytotoxicity.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), com cerca de 8.410,3 mil hectares destinados para a colheita dessa gramínea [1]. Com isso, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) prevê a colheita de 637,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar para a safra 2023/24, o que representa um aumento de 4,4% em relação à safra anterior [1]. Isso também resulta na geração de grandes volumes de subprodutos e resíduos, por exemplo, a palha de cana-de-açúcar (PCA). Estima-se que, para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, sejam produzidos cerca de 140 kg de PCA [2]. Mas, infelizmente, em algumas regiões do mundo, a PCA ainda é totalmente queimada no campo [3]. Para evitar o seu descarte inadequado, uma opção é a sua utilização como insumo para a produção de produtos de maior valor agregado, isto é, um dos princípios da Química verde [4]. A PCA pode ser usada, por exemplo, para obter biocarvão [5–7], bio-óleo [7], bioeletricidade e etanol celulósico (segunda geração) [8,9].

O biocarvão é um material obtido pela pirólise da biomassa para uso em práticas agrícolas e ambientais sustentáveis [10]. A pirólise é o processo de decomposição térmica da biomassa na ausência ou em condições limitadas de oxigênio, que produz compostos nas fases gasosa, líquida e sólida [11]. Devido à limitação do oxigênio nesse processo, não há combustão do carbono da biomassa e, dentre os materiais formados, está o biocarvão, material sólido e de cor preta [12]. O biocarvão pode ser considerado uma tecnologia de captura e armazenamento de carbono, que desempenha papel importante na redução dos níveis de CO₂ na atmosfera [13,14]. Além disso, devido à sua capacidade de melhorar a produtividade [15] e a adsorção de poluentes [16], esse material tem se tornado bastante popular nos últimos anos, como substituto para compostos de carbono fóssil em diversas aplicações [17–20]. Dessa forma, vários grupos de pesquisa têm se dedicado à valorização da biomassa residual por meio da conversão em biocarvão. No entanto, ainda que seu principal elemento seja o carbono, a composição elementar do biocarvão é formada de acordo com a matéria-prima e as características do processo de pirólise que são adotadas [12].

Conforme exposto acima, o biocarvão é um produto com composição variada. Para exemplificar essa heterogeneidade, pode-se citar o trabalho de MATOS *et al.* [21], no qual foi verificado o efeito da pirólise a 350 °C, em fornos tubular, rotativo e mufla, do bagaço de cana-de-açúcar, casca da acácia esgotada (*Acacia mearnsii* De Wild) e capim-elefante (*Pennisetum purpureum*). Os autores identificaram biocarvões com diferentes graus de carbonização [21]. Outro estudo realizado por SOUZA *et al.* [22] revelou que biocarvões de borra de café, pirolisados em mufla, a temperaturas que variaram de 300 °C a 1000 °C, têm efeitos estimulantes ou fitotóxicos frente à germinação do milho, a depender da temperatura final de pirólise [22]. Dessa forma, a caracterização do biocarvão é uma etapa importante para melhor aproveitamento dos seus benefícios. Além disso, para sua produção em escala laboratorial, muflas ou fornos tubulares são usados com frequência, devido à simplicidade e ao baixo custo [23]. Por outro lado, a capacidade produtiva desses fornos é um fator que limita a investigação das propriedades do biocarvão nos ensaios em campo ou, mesmo ainda, em casa de vegetação, pois requerem maiores quantidades desse material.

Para contornar esse problema, o sistema de forno de duplo tambor é outra opção que pode ser usada para a produção de biocarvão em pequena escala. Resumidamente, nesse sistema, o tambor de diâmetro menor é preenchido com a biomassa. Em seguida, ele é inserido em outro tambor de diâmetro maior e o volume entre os dois tambores é preenchido com madeira ou outro resíduo orgânico. A combustão da madeira fornecerá energia para pirólise da biomassa contida no tambor menor [24–26]. O'TOOLE *et al.* [24] usaram esse tipo de forno e, a partir de vinte cinco bateladas, tiveram um rendimento médio de $24 \pm 4,7\%$ para a produção do biocarvão a partir da palha de trigo. Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo produzir e caracterizar o biocarvão a partir da palha de cana-de-açúcar utilizando o sistema de forno de duplo tambor. Ademais, o biocarvão produzido também foi caracterizado quanto aos possíveis efeitos fitotóxicos à germinação de algodão, milho e soja.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A PCA (folhas e ponteiros) foi coletada na forma de palhas secas, manualmente, 1 dia após a colheita mecanizada. O material coletado foi seco por 30 h em temperatura ambiente, em seguida, a PCA foi triturada em um triturador elétrico com peneira com espessura de 2 mm.

2.1. Produção do biocarvão a partir da PCA

O biocarvão foi produzido em um forno de duplo tambor seguindo a metodologia adaptada descrita por O'TOOLE *et al.* [24]. Para tanto, utilizou-se um tambor externo de 200 L com 0,88 m de altura e 0,57 m de diâmetro. Já o tambor interno possuía o volume, altura e diâmetro de 30 L, 0,55 m e 0,34 m, respectivamente. Para a realização da pirólise, o tambor interno foi preenchido com 5 kg de PCA e inserido no tambor externo. O volume entre os tambores foi preenchido com lenha de poda de árvore. Em seguida, iniciou a combustão da lenha que foi mantida por um período de 2 h. Após esse período, o tambor interno foi retirado e adicionada água

no biocarvão, com o objetivo de resfriar o material e evitar a sua combustão [27]. O material obtido foi seco em estufa a 100 °C por 72 h, moído e peneirado em peneira com abertura de 0,850 mm (20 mesh). O rendimento gravimétrico (R, %) foi determinado por meio da divisão da massa do biocarvão pela massa seca da PCA e expresso em porcentagem.

2.2. Caracterização do biocarvão feito a partir da PCA

Para determinação do pH, 1,0 g do biocarvão foi misturado com 10 mL de solução de CaCl₂ (0,01 mol/L), em triplicata. Em seguida, as misturas foram agitadas em mesa agitadora a 220 rpm e temperatura ambiente, por 10 min. Após esse procedimento, as misturas foram mantidas em repouso por 30 min. Para a medida do pH, utilizou-se um pHmetro (DM22, Digimed, São Paulo, Brasil). A condutividade elétrica (CE) foi obtida a partir da mistura de 0,5 g do biocarvão com 10 mL de água deionizada, em quintuplicata. As misturas foram agitadas em mesa agitadora a 220 rpm e temperatura ambiente, por 30 s. Após esse período, as amostras foram mantidas em repouso por 30 min. Em seguida, usando medidor de condutividade (W12D, BEL Engineering, Monza, Itália), determinou-se a CE do biocarvão. A análise imediata foi realizada conforme procedimentos descritos por FIGUEIREDO *et al.* [28]. Os teores de matéria volátil (TMV), carbono fixo (TCF) e cinzas (TCZ) foram obtidos a partir dessa análise, enquanto a composição elementar (C, H, N e S) foi obtida em equipamento Perkin Elmer Series II - CHNS/O Analyzer 2400 (Perkin Elmer, Waltham, Estados Unidos). O teor de oxigênio foi calculado por diferença entre o somatório dos teores de C, H, N, S e cinzas. Além disso, as informações texturais foram obtidas a partir da isoterma de adsorção e dessorção de nitrogênio a 77 K (Nova 2200, Quantachrome Instruments, Boynton Beach, Estados Unidos). A área superficial foi determinada usando o método de multiponto de Brunauer, Emmett e Teller (BET), enquanto o volume e o tamanho dos poros foram determinados utilizando a Teoria funcional da densidade não local (NLDFT) [29].

Os grupos funcionais foram investigados usando Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (Cary 630 FTIR, Agilent Technologies, Santa Clara, Estados Unidos), equipado com módulo de Refletância Total Atenuada (ATR). A amostra foi colocada sobre o porta-amostra do instrumento e prensada sobre um cristal de diamante. A medida foi realizada no intervalo de 4000 a 650 cm⁻¹, com resolução espectral de 8 cm⁻¹ e 128 varreduras. Ademais, a característica morfológica e a composição química do biocarvão foram avaliadas em Microscópio Eletrônico de Varredura (Vega 3 LMU, TESCAN, Brno-Kohoutovice, Tchêquia) acoplado a um detector de Energia Dispersiva de Raios X (EDS, X-MaxN, Oxford Instruments, Oxford, Reino Unido) para análises elementares qualitativas. O biocarvão foi depositado sobre fita adesiva de carbono, que foi fixada em stub. Em seguida, as amostras foram metalizadas com uma fina camada de ouro-paládio utilizando um Sputtering (SC7620, Quorum Technologies, Ashford, Reino Unido) e analisadas empregando-se voltagem de 20 kv. Para fins de comparação, essas caracterizações também foram feitas para PCA, preparadas conforme o item 2.

2.3. Ensaio de germinação

O efeito do biocarvão sobre a germinação de algodão, milho e soja foi investigado em placas de Petri seguindo a metodologia proposta por SOLAIMAN *et al.* [30]. Para tanto, as seguintes doses foram avaliadas: 0,00 (referente ao controle, na qual se utilizou água destilada); 0,50; 1,00; 2,50 e 5,00 g de biocarvão por placa, correspondendo aos seguintes valores em t/ha, 0, 10, 20, 50, 100, respectivamente. Os ensaios de germinação foram conduzidos em câmaras de germinação do tipo “Biochemical Oxygen Demand” (BOD), com fotoperíodo de 12 horas, a 25 °C. Para tanto, vinte e cinco sementes de cada cultura foram distribuídas em placas de Petri, em triplicata, sobre uma camada de papel de filtro, umedecido com 20 mL água destilada. Esse procedimento foi repetido adicionando as diferentes doses de biocarvão sobre as sementes. Todas as placas de Petri foram tampadas e incubadas e, aos 4 dias após o início do experimento, determinou-se o número de sementes germinadas e o comprimento médio da radícula por placa. Esses dados foram aplicados para os cálculos da Germinação Relativa (GR), Crescimento Médio Relativo da Radícula (CRR) e Índice de Germinação (IG) conforme descrito na literatura [31,32].

2.4. Análise estatística

Os resultados obtidos para GR, CRR e IG foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de significância, utilizando-se o programa SISVAR [33].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Características do biocarvão feito a partir da PCA

Durante a pirólise, ocorre a decomposição térmica da biomassa, liberando vários gases condensáveis e não condensáveis, isto é, o bio-óleo e o biogás, respectivamente [11]. Dessa forma, a massa da fase sólida é reduzida

ao final do processo, sendo o rendimento gravimétrico um indicador dessa perda. Neste trabalho, com o forno de duplo tambor, obteve-se rendimento gravimétrico de 40,3% (Tabela 1). Esse valor está próximo do valor relatado (36,8%) para a produção do biocarvão da palha de cana-de-açúcar em forno tubular, a 450 °C [6]. É sabido ainda que, durante a pirólise, os grupos funcionais ácidos da biomassa são removidos total ou parcialmente e os sais de elementos alcalinos e alcalino-terrosos são enriquecidos [34]. Por isso, é esperado que o biocarvão possua alta alcalinidade, o que é benéfico em termos de mitigação da acidez e redução do alumínio tóxico no solo [35]. De fato, o pH encontrado para o biocarvão foi de 9,10 (Tabela 1) e elementos alcalinos e alcalino-terrosos puderam ser identificados na sua estrutura com a aplicação da MEV/EDS (Figura 1), o que revela o potencial desse produto como corretivo da acidez de solo. Obviamente, isso é de interesse agrônômico, pois o pH do solo é um importante parâmetro, o qual desempenha um papel crucial na ciclagem de nutrientes e na translocação de elementos potencialmente tóxicos [36]. Além disso, afeta também os organismos presentes no solo e os vegetais [37,38].

Assim como o pH, a CE do biocarvão está relacionada com a matéria-prima e a temperatura da pirólise, sendo um parâmetro usado rotineiramente para avaliar a qualidade desse produto. Por isso, buscou-se também avaliar a CE do biocarvão e o resultado mostrou o valor de 2,22 dS/m (Tabela 1), valor esse considerado alto para o biocarvão feito da PCA [39]. Esse resultado pode limitar a aplicação do biocarvão para plantas sensíveis à salinidade, pois a CE pode ser associada a quantidade de sal solúvel presente no biocarvão e, baseia no princípio de que soluções com concentrações elevadas de sais transmitem melhor a corrente elétrica [40]. A CE também está relacionada com o teor de cinzas (7,43%, Tabela 1). No entanto, deve-se destacar que as cinzas que têm origem na biomassa vegetal são importantes para correção da acidez do solo, pois são fontes de magnésio, potássio e cálcio [41].

Quanto aos TMV e TCF, foram encontrados valores de 56,10% e 36,50%, respectivamente (Tabela 1). O TCF está abaixo do relatado por ALMEIDA *et al.* [6], que encontrou o valor de 49,37% para o biocarvão feito da PCA, pirolisado a 450 °C. Por outro lado, o TCF obtido é cerca de 2,7 vezes maior que o teor de carbono fixo relatado anteriormente para PCA [6], o que demonstra que a pirólise no forno de duplo tambor foi capaz de converter parte do carbono da PCA em carbono recalcitrante [42]. É importante destacar que o TCF não inclui cinzas, mas o seu conteúdo pode conter parte de outros elementos não voláteis. Dessa forma, ele depende, principalmente, do TMV, sendo que a soma desses três teores (TCF, TMV e TCZ) deve ser de 100%. Já o teor de carbono é composto por formas de carbono lábil e não lábil. Ainda é importante mencionar que o alto teor de carbono no biocarvão é desejável para a utilização desse material como tecnologia para o sequestro de carbono. De fato, a análise elementar revelou um elevado teor de carbono (69,58%), além de evidenciar que as razões atômicas H/C e O/C foram iguais a 0,41 e 0,21, respectivamente. Esses resultados reforçam o potencial desse material como condicionante de solo, uma vez que, para essa aplicação, são recomendados valores de H/C < 0,6 e de O/C < 0,4 [43]. Além disso, o potencial do biocarvão para o sequestro de carbono é demonstrado pelo valor da razão O/C, que está entre 0,2 e 0,6, indicando um tempo de meia-vida de 100 a 1000 anos, quando aplicado no solo [44].

Para complementar a caracterização do biocarvão, utilizou-se a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR - Fourier Transform Infrared). A análise do espectro FTIR da PCA também foi realizada para fins de comparação (Figura 2). No espectro da PCA, na região de 3600 cm⁻¹ a 3000 cm⁻¹, há uma banda larga que corresponde aos estiramentos de grupos O-H e N-H [45]. Também foram registradas bandas em 2925 e 2840, que são típicas de vibrações assimétricas do grupo metila (-CH₃) e simétricas do grupo metileno (-CH₂), respectivamente [45]. Outras bandas em 1730 cm⁻¹ e entre 1130 e 890 cm⁻¹ foram atribuídas aos estiramentos vibracionais de C=O e C-O [46], respectivamente. No espectro FTIR do biocarvão (Figura 2), é possível observar o desaparecimento das bandas associadas aos grupos funcionais presentes na PCA. Por outro lado, o aparecimento da banda em 1580 cm⁻¹ pode ser atribuído a ligações C=C de anéis aromáticos [47], evidenciando a aromatização do biocarvão.

Também foram avaliadas a morfologia e a área superficial específica. A Figura 3 apresenta uma comparação entre as micrografias da PCA e do biocarvão, com diferentes ampliações. Para a PCA são observadas partículas heterogêneas, típicas de fibras e células de parênquima, com poucos poros. Por outro lado, após a pirólise no forno de duplo tambor, observou-se uma estrutura semelhante a favos de mel, com macroporos organizados, medindo cerca de 5 a 30 μm de diâmetro e separados por camadas com espessuras de aproximadamente 1 μm. Isso ocorre devido à pirólise, que promove a decomposição térmica, liberando substâncias voláteis. No entanto, é importante destacar que a morfologia do biocarvão é semelhante à da PCA, isto é, não houve decomposição do esqueleto carbônico da biomassa precursora. Isso fica ainda mais evidente quando se analisa as micrografias da PCA obtidas por LIMA *et al.* [48]. Deve-se destacar também que, os macroporos servem como habitat para a microbiota do solo [49].

Tabela 1: Propriedades físico-químicas do biocarvão obtido da palha de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor.

| DESCRIÇÃO | PARÂMETRO | VALOR |
|-------------------------------|---|-------|
| Composição elementar (CHNS-O) | Carbono (% m/m) | 69,58 |
| | Hidrogênio (% m/m) | 2,41 |
| | Nitrogênio (% m/m) | 0,68 |
| | Enxofre (% m/m) | 0,40 |
| | Oxigênio (% m/m) | 19,53 |
| | Razão atômica O/C | 0,21 |
| | Razão atômica H/C | 0,41 |
| Análise imediata | Matéria volátil (% m/m) | 56,10 |
| | Cinzas (% m/m) | 7,40 |
| | Carbono fixo (% m/m) | 36,50 |
| Outras propriedades | Rendimento gravimétrico (% m/m) | 40,30 |
| | pH em CaCl ₂ (0,1 mol/L) | 9,10 |
| | Condutividade elétrica (dS/m) | 2,20 |
| | Área superficial específica (m ² /g) | 20,30 |
| | Volume de poros (cm ³ /g) | 0,02 |
| | Diâmetro médio de poros (Å) | 9,66 |

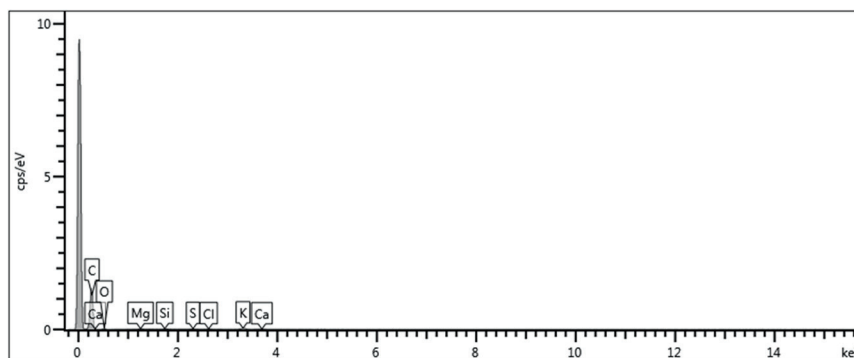


Figura 1: Espectro de Energia Dispersiva de Raios X do biocarvão obtido da palha de cana-de-açúcar em forno de duplo tambor.

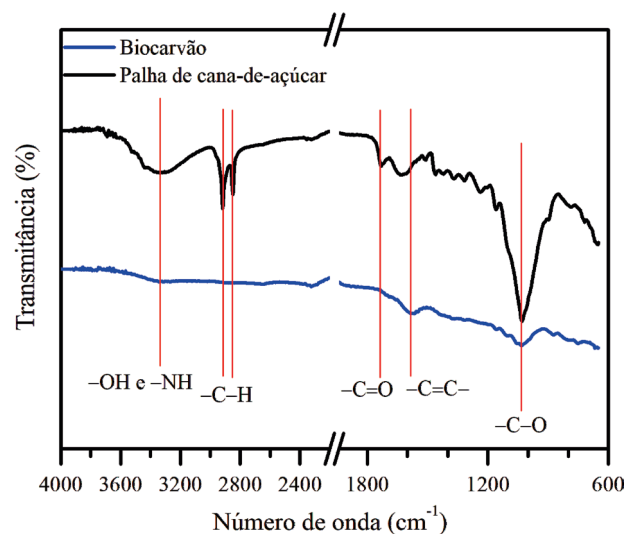


Figura 2: Espectro de infravermelho com transformada de Fourier da palha de cana-de-açúcar e do biocarvão obtido em forno de duplo tambor.

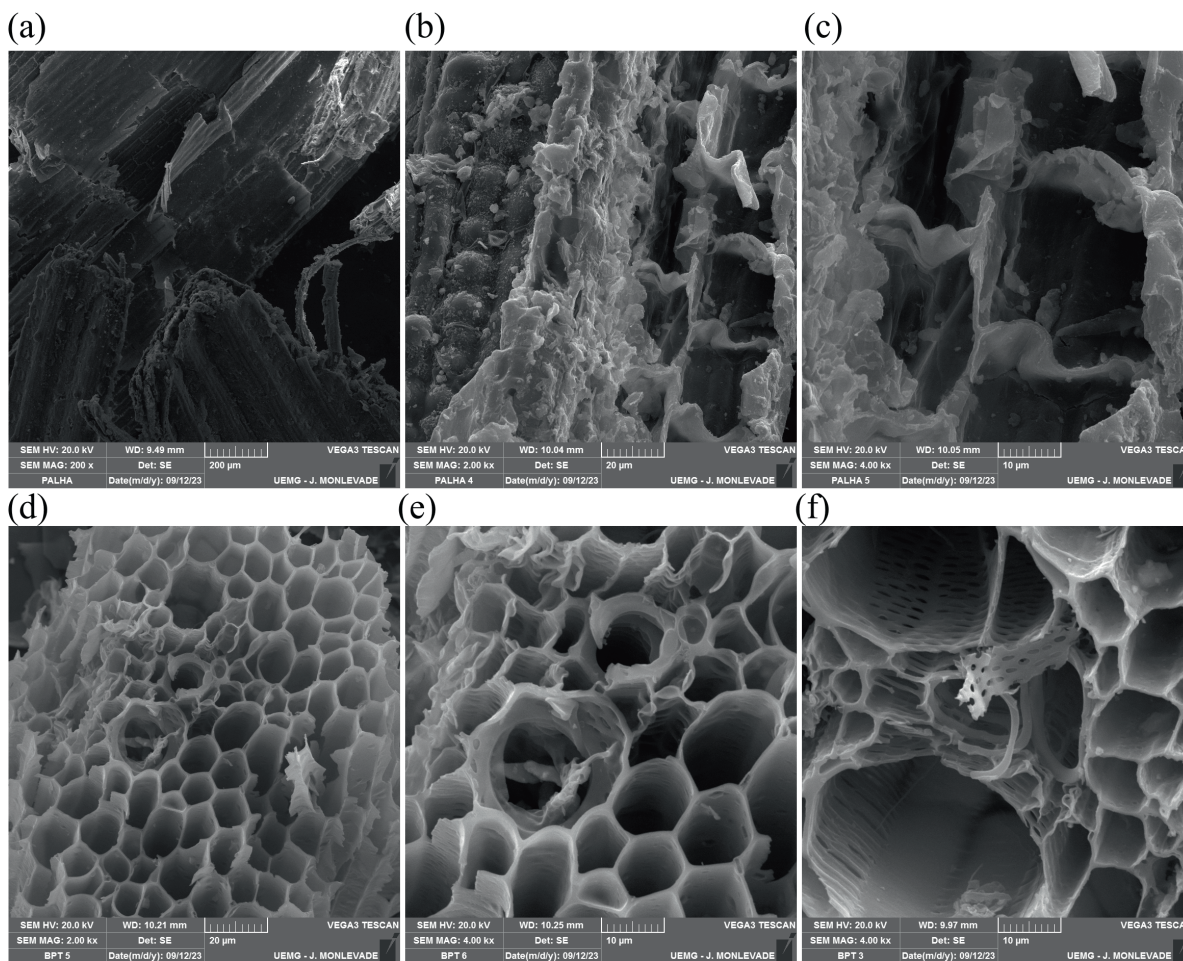


Figura 3: Micrografias da palha de cana-de-açúcar (a, b, c) e do biocarvão (d, e, f), obtido em forno de duplo tambor, com diferentes ampliações.

Ainda sobre o tamanho dos poros do biocarvão, é sabido que ele varia de nanômetros a dezenas de micrômetros, abrangendo microporos (largura <2 nm), mesoporos (2–50 nm) e macroporos (>50 nm) [50]. Por isso, as propriedades texturais foram avaliadas a partir das isotermas de adsorção e dessorção de N₂ sobre o biocarvão, para determinação da área superficial e distribuição de micro e mesoporos. De acordo com a classificação da IUPAC, a isoterma do Tipo II foi a que melhor se adequou ao biocarvão [29]. Esse tipo de isoterma é observado em materiais não-porosos ou macroporosos [29], corroborando com os aspectos morfológicos observados nas micrografias (Figura 3). Outra observação importante é o fato de o loop de histerese não fechar (Figura 4a), sugerindo menor teor de mesoporos [51]. De fato, o biocarvão apresentou área superficial específica baixa (20,30 m² g⁻¹), que está associada com a fração de mesoporos e microporos presentes no material (Figura 4b). Esses poros são essenciais na retenção de água e para o crescimento das raízes no solo [52].

3.2. Efeito do biocarvão sobre a germinação de algodão, milho e soja

O bioensaio em placa de Petri sem solo é indicado para identificar efeitos tóxicos do biocarvão sobre a germinação de sementes e crescimento inicial de plântulas antes da aplicação desse produto em campo, porque é simples, rápido e não exige o uso de solo padronizado [30,53,54]. Por isso, ele foi usado para investigar a germinação de sementes de algodão, milho e soja em água destilada e em diferentes doses de biocarvão. Os resultados mostraram que as doses avaliadas não apresentaram efeitos significativos (p < 0,05) sobre a GR (%), CRR (%) e IG (%) de plântulas de soja (Figura 5), embora uma tendência de aumento tenha sido encontrada para o CRR (%) e IG (%).

Para os ensaios com milho, observou-se um aumento significativo (p < 0,05) da GR, CRR e IG para dose de 100 t/ha (Figura 5), em relação ao controle negativo (água destilada). Também foi possível observar que, com o aumento da dose do biocarvão, houve um aumento linear da GR, CRR e IG. Por outro lado, na

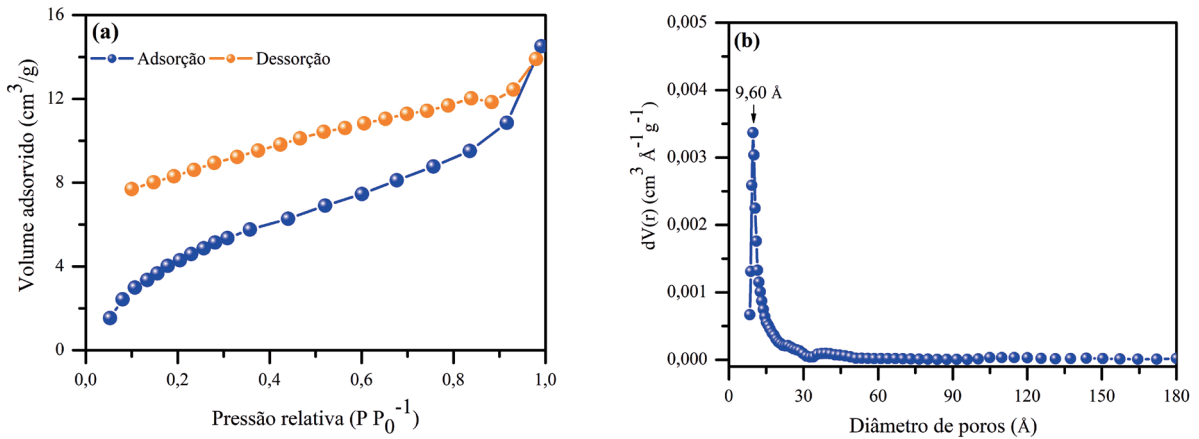


Figura 4: (a) Isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio e (b) distribuição de diâmetro de poros em biocarvão obtido da palha de cana-de-açúcar no forno de duplo tambor.

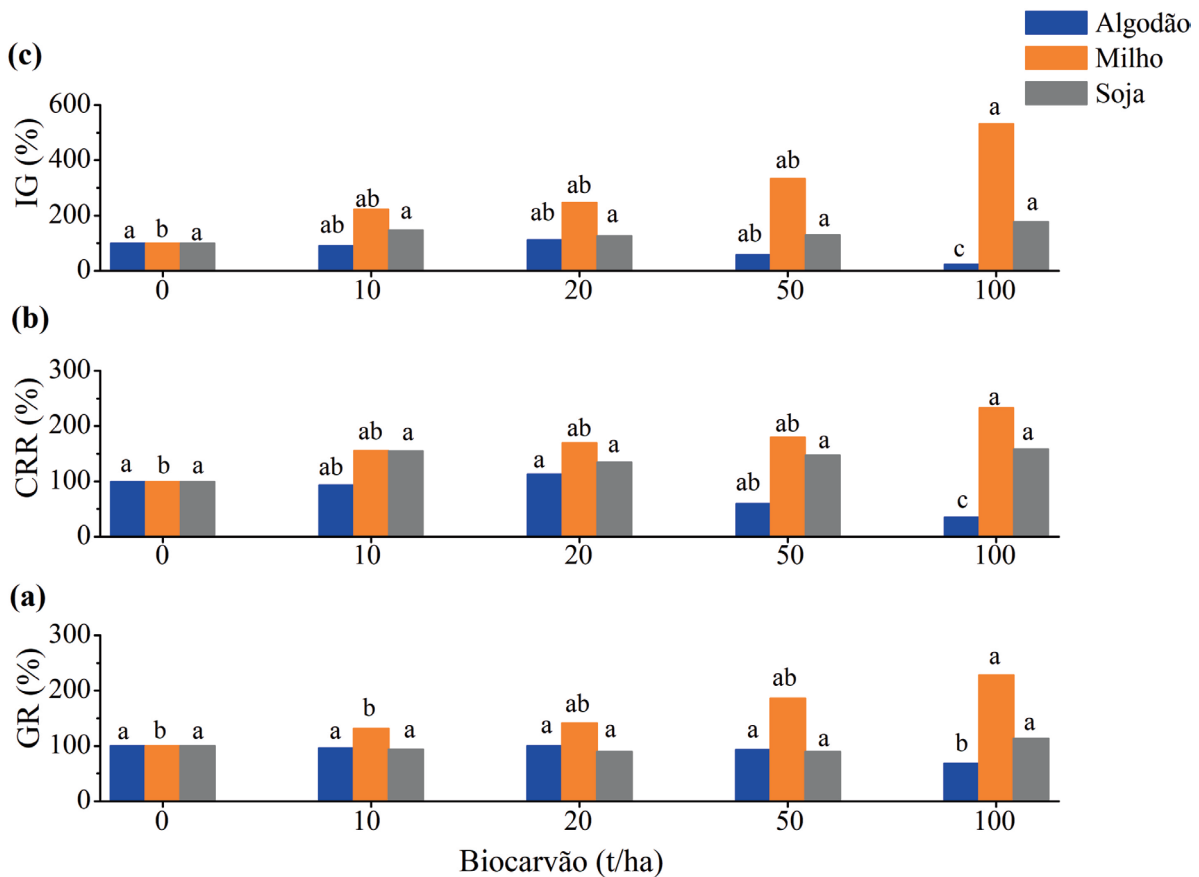


Figura 5: Efeito do biocarvão feito a partir da palha de cana-de-açúcar na (a) Germinação Relativa (GR, %), (b) no Crescimento Médio Relativo da Radícula (CRR, %) e (c) no Índice de Germinação (IG, %) de sementes e algodão (*Cossypium arboreum* L.), milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.). Médias seguidas de mesma letra na barra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

dose de 100 t/ha o biocarvão causou redução significativa ($p < 0,05$) da GR (%), CRR (%) e IG (%) das plântulas de algodão. É possível hipotetizar que essa redução seja decorrente do teor de sais solúveis caracterizado pela análise de CE (Tabela 1), uma vez que a sensibilidade do algodão à salinidade é conhecida. Os valores de IG podem ser usados para classificar o efeito fitotóxico do biocarvão. Quando o valor de IG é menor que 50%, o material tem alta fitotoxicidade. Se o IG apresentar valor entre 50-80%, o material tem fitotoxicidade

moderada. Se o valor de IG é maior que 80%, o material não apresenta efeito fitotóxico e quando o IG excede 100%, o produto pode ser considerado fitonutriente ou fitoestimulante [31,32]. Assim, o biocarvão feito da PCA apresentou alta fitotoxicidade para o algodão quando aplicado nas maiores doses, mas é classificado como fitonutriente para o milho e não apresenta efeito fitotóxico para soja.

Resultados semelhantes aos obtidos neste estudo foram relatados por SOLAIMAN *et al.* [30], os autores mostraram que a germinação de sementes de trigo (*Triticum aestivum* L.) foi afetada pela aplicação de biocarvão e concluíram que as taxas de germinação aumentaram quando as doses de aplicação do biocarvão variaram entre 10 e 50 t/ha e reduziram ou não tiveram efeitos quando as doses foram superiores a 50 t/ha. USLU *et al.* [55] também usaram o bioensaio da placa de Petri sem solo para avaliar o efeito do biocarvão sobre espécies de forrageiras. Eles observaram que a aplicação do biocarvão influenciou positivamente a germinação das sementes e as características de crescimento das plantas na aplicação de até 80 t/ha, mas esses parâmetros foram inibidos em doses maiores. Também vale mencionar que DAS *et al.* [54] mostraram o aumento dos parâmetros de crescimentos de plântulas de milho e grama preta (*Vigna mungo* L.), com a aplicação de 5 t/ha de biocarvão.

4. CONCLUSÕES

O sistema de forno de duplo tambor mostrou-se promissor para a obtenção de biocarvão a partir da palha de cana-de-açúcar, com rendimento de 40%. O biocarvão obtido tem características físico-químicas importantes para o uso como condicionante em solo, como pH alcalino (9,10), nutrientes (magnésio, potássio e cálcio) e razões atômicas O/C e H/C menores que 0,4 e 0,6, respectivamente. Além disso, apresentou alto teor de carbono e uma estrutura que favorece a retenção de umidade no solo. O biocarvão feito da palha de cana-de-açúcar não apresentou efeito fitotóxico na germinação de soja e foi considerado fitonutriente para o milho. Na cultura do algodão, é preciso ter cautela ao trabalhar com doses altas, pois foi encontrada fitotoxicidade, exigindo mais estudos para compreensão desse efeito.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais [processo número APQ-02349-21] e à UEMG (Universidade do Estado de Minas Gerais [Pesquisador de Produtividade da UEMG – PQ/UEMG] pelo apoio financeiro e bolsas.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 11, n. 1, Brasília, DF, CONAB, 2023.
- [2] COSTA, S.M., AGUIAR, A., LUZ, S.M., *et al.*, “Sugarcane straw and its cellulose fraction as raw materials for obtainment of textile fibers and other bioproducts”, In: Ramawat, K., Mérillon, J.M. (eds), Polysaccharides, Cham, Springer, pp. 513–533, 2015. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0_53
- [3] KUMAR, P., KUMAR, S., JOSHI, L., “The extent and management of crop stubble”, In: Kumar, P., Kumar, S., Joshi, L., Socioeconomic and environmental implications of agricultural residue burning, Springer Briefs in Environmental Science, New Delhi, Springer, 2015. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-81-322-2014-5_2
- [4] MUTLU, H., BARNER, L., “Getting the terms right: green, sustainable, or circular chemistry?”, *Macromolecular Chemistry and Physics*, v. 223, n. 13, pp. 2200111, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/macp.202200111>
- [5] PIRES, I.C.S.A., NAKASHIMA, G.T., PADILLA, E.R.D., *et al.*, “Biochar of sugarcane straw: characterization and study of the process”, *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 4, pp. 892–899, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180065>
- [6] ALMEIDA, S.G.C., TARELHO, L.A.C., HAUSCHILD, T., *et al.*, “Biochar production from sugarcane biomass using slow pyrolysis: characterization of the solid fraction”, *Chemical Engineering and Processing*, v. 179, pp. 109054, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2022.109054>
- [7] KUMAR, M., UPADHYAY, S.N., MISHRA, P.K., “Pyrolysis of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) leaves and characterization of products”, *ACS Omega*, v. 7, n. 32, pp. 28052–28064, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.2c02076>. PubMed PMID: 35990475.
- [8] GONZAGA, L.C., ZOTELLI, L.D., CASTRO, S.G.Q., *et al.*, “Implications of sugarcane straw removal for soil greenhouse gas emissions in São Paulo State, Brazil”, *BioEnergy Research*, v. 12, n. 4, pp. 843–857, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-019-10006-9>

- [9] CARVALHO, J.L.N., MENANDRO, L.M.S., CASTRO, S.G.Q., *et al.*, “Multilocation straw removal effects on sugarcane yield in South-Central Brazil”, *BioEnergy Research*, v. 12, n. 4, pp. 813–829, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-019-10007-8>
- [10] MULABAGAL, V., BAAH, D.A., EGIEBOR, N.O., *et al.* “Biochar from biomass: a strategy for carbon dioxide sequestration, soil amendment, power generation, CO₂ utilization, and removal of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the environment”, In: Lackner, M., Sajjadi, B., Chen, WY. (eds), *Handbook of climate change mitigation and adaptation*, New York, USA, Springer, 2021. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-6431-0_80-2
- [11] FÉLIX, C.R. O., AZEVEDO JÚNIOR, A.F., FREITAS, C.C., *et al.* “Pirólise rápida de biomassa de eucalipto na presença de catalisador Al-MCM-41”, *Matéria*, v. 22, e-11915, 2017.
- [12] CERNANSKY, R., “Agriculture: state-of-the-art soil”, *Nature*, v. 517, n. 7534, pp. 258–260, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/517258a>. PubMed PMID: 25592517.
- [13] LEHMANN, J., “A handful of carbon”, *Nature*, v. 447, n. 7141, pp. 143–144, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/447143a>. PubMed PMID: 17495905.
- [14] DING, X., LI, G., ZHAO, X., *et al.*, “Biochar application significantly increases soil organic carbon under conservation tillage: an 11-year field experiment”, *Biochar*, v. 5, pp. 28, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s42773-023-00226-w>
- [15] KÄTTERER, T., ROOBROECK, D., KIMUTAI, G., *et al.*, “Maize grain yield responses to realistic biochar application rates on smallholder farms in Kenya”, *Agronomy for Sustainable Development*, v. 42, n. 63, pp. 63, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-022-00793-5>
- [16] LIU, F., WANG, S., ZHAO, C., *et al.*, “Constructing coconut shell biochar/MXenes composites through self-assembly strategy to enhance U(VI) and Cs(I) immobilization capability”, *Biochar*, v. 5, pp. 31, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s42773-023-00231-z>
- [17] JING, H., JI, L., LI, Z., *et al.*, “Zn/Fe bimetallic modified *Spartina alterniflora*-derived biochar heterostructure with superior catalytic performance for the degradation of malachite green”, *Biochar*, v. 5, pp. 29, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s42773-023-00227-9>
- [18] WANI, I., RAMOLA, S., GARG, A., *et al.*, “Critical review of biochar applications in geoengineering infrastructure: moving beyond agricultural and environmental perspectives”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021. In press. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-021-01346-8>
- [19] DWIVEDI, S., DEY, S., “Review on biochar as an adsorbent material for removal of dyes from waterbodies”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 20, n. 8, pp. 9335–9350, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-022-04364-9>
- [20] LOPES, R.P., GUIMARÃES, T., MORO, M.M., *et al.*, “Magnetic biochar-supported Pd nanoparticles as a peroxidase-like catalyst”, *Waste and Biomass Valorization*, v. 13, n. 8, pp. 3629–3637, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-022-01740-x>
- [21] MATOS, T.T.S., FORNARI, M.R., MANGRICH, A.S., *et al.*, “Low temperature production of biochars from different biomasses: effect of static and rotary lab reactors and application as soil conditioners”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 4, pp. 105472, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2021.105472>
- [22] SOUZA, K.G., OLIVEIRA, M.A., ALCANTARA, G.U., *et al.*, “Effect of pyrolysis temperature on the properties of the coffee grounds biochar and composition of its leachates”, *Chemické Zvesti*, v. 77, n. 7, pp. 3947–3956, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11696-023-02755-x>
- [23] VEIGA, P.A.S., CERQUEIRA, M.H., GONÇALVES, M.G., *et al.*, “Upgrading from batch to continuous flow process for the pyrolysis of sugarcane bagasse: structural characterization of the biochars produced”, *Journal of Environmental Management*, v. 285, pp. 112145, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112145>. PubMed PMID: 33610940.
- [24] O’Toole, A., KNOTH DE ZARRUK, K., STEFFENS, M., *et al.*, “Characterization, stability, and plant effects of kiln-produced wheat straw biochar”, *Journal of Environmental Quality*, v. 42, n. 2, pp. 429–436, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2012.0163>. PubMed PMID: 23673835.
- [25] PINTO, B.C., ALVES, A.B., FERREIRA, O.E., *et al.*, “Biochar influences the cane fields’ microbiota and the development of pre-sprouted sugarcane seedlings”, *Waste Disposal & Sustainable Energy*, v. 5, n. 1, pp. 75–88, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s42768-022-00129-9>
- [26] IBRAHIM, A., MARIE, H.A.M.E., ELFAKI, J., “Impact of biochar and compost on aggregate stability in loamy sand soil”, *Agricultural Research Journal*, v. 58, n. 1, pp. 34–44, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.5958/2395-146X.2021.00005.3>

- [27] TRAZZI, P.A., “*Uso do biocarvão na produção de mudas e no crescimento inicial de Pinus taeda L.*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- [28] FIGUEIREDO, M.E.O., LONGUE JÚNIOR, D., PEREIRA, A.K.S., *et al.*, “Potencial da madeira de *Pterogyne nitens* Tul. (madeira-nova) para produção de carvão vegetal”, *Ciência Florestal*, v. 28, n. 1, pp. 420–431, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509831620>
- [29] THOMMES, M., KANEKO, K., NEIMARK, A.V., *et al.*, “Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)”, *Pure and Applied Chemistry*, v. 87, n. 9–10, pp. 1051–1069, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- [30] SOLAIMAN, Z.M., MURPHY, D.V., ABBOTT, L.K., “Biochars influence seed germination and early growth of seedlings”, *Plant and Soil*, v. 353, n. 1–2, pp. 273–287, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-1031-4>
- [31] GASCÓ, G., CELY, P., PAZ-FERREIRO, J., *et al.*, “Relation between biochar properties and effects on seed germination and plant development”, *Biological Agriculture and Horticulture*, v. 32, n. 4, pp. 237–247, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01448765.2016.1166348>
- [32] EMINO, E.R., WARMAN, P.R., “Biological assay for compost quality”, *Compost Science & Utilization*, v. 12, n. 4, pp. 342–348, 2004. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702203>
- [33] FERREIRA, D.F., “SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs”, *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, pp. 529–535, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- [34] ZHANG, H., SU, L., CHENG, C., *et al.*, “A new type of calcium-rich biochars derived from spent mushroom substrates and their efficient adsorption properties for cationic dyes”, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 10, pp. 1007630, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.3389/fbioe.2022.1007630>. PubMed PMID: 36204471.
- [35] SHETTY, R., PRAKASH, N.B., “Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity”, *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, pp. 12249, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-69262-x>. PubMed PMID: 32704053.
- [36] HARTEMINK, A.E., BARROW, N.J., “Soil pH - nutrient relationships: the diagram”, *Plant and Soil*, v. 486, n. 1-2, pp. 209–215, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>
- [37] WANG, C., ZHOU, X., GUO, D., *et al.*, “Soil pH is the primary factor driving the distribution and function of microorganisms in farmland soils in northeastern China”, *Annals of Microbiology*, v. 69, n. 13, pp. 1461–1473, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13213-019-01529-9>
- [38] ZHONG, Y., YAN, W., CANISARES, L.P., *et al.*, “Alterations in soil pH emerge as a key driver of the impact of global change on soil microbial nitrogen cycling: Evidence from a global meta-analysis”, *Global Ecology and Biogeography*, v. 32, n. 1, pp. 145–165, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/geb.13616>
- [39] CONZ, R.F., ABBRUZZINI, T.F., ANDRADE, C.A., *et al.*, “Effect of pyrolysis temperature and feedstock type on agricultural properties and stability of biochars”, *Agricultural Sciences*, v. 8, n. 9, pp. 914–933, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/as.2017.89067>
- [40] UPADHYAY, K.P., GEORGE, D., SWIFT, R.S., *et al.*, “The influence of biochar on growth of lettuce and potato”, *Journal of Integrative Agriculture*, v. 13, n. 3, pp. 541–546, 2014. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60710-8](http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60710-8)
- [41] SILVA, F.C., CRUZ, N.C., TARELHO, L.A.C., *et al.*, “Use of biomass ash-based materials as soil fertilisers: critical review of the existing regulatory framework”, *Journal of Cleaner Production*, v. 214, pp. 112–124, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.268>
- [42] DEVENS, K.U., PEREIRA NETO, S., OLIVEIRA, D.L.A., *et al.*, “Characterization of biochar from green coconut shell and orange peel wastes”, *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 2, pp. 288–294, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180022>
- [43] SCHIMMELPFENNIG, S., GLASER, B., “One step forward toward characterization: some important material properties to distinguish biochars”, *Journal of Environmental Quality*, v. 41, n. 4, pp. 1001–1013, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2011.0146>. PubMed PMID: 22751042.
- [44] SPOKAS, A.K., “Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios”, *Carbon Management*, v. 1, n. 2, pp. 289–303, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.4155/cmt.10.32>
- [45] SANTANA, A.M., BISINOTI, M.C., MELO, C.A., *et al.*, “Disponibilidade de nutrientes e carbono orgânico em solos contendo carvão hidrotérmico lavado e não lavado e comparação com solos antropogênicos”, *Química Nova*, v. 42, n. 3, pp. 262–272, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170339>

- [46] CALCIOLARI, A.R., PIRES, N.J., TRUGILHO, P.F., *et al.*, “Remoção do corante azul de metileno de solução aquosa usando biomassa de pele prata de café (coffee silverskin) como bioadsorvente de baixo custo”, *Matéria*, v. 27, n. 3, e20220141, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0141>
- [47] FERREIRA, R.C., LIMA, H.H.C., COUTO JUNIOR, O.M., *et al.*, “Utilização de carvão ativado de dendê in natura e funcionalizado em meio ácido na adsorção de paracetamol”, *Matéria*, v. 23, n. 1, e11968, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0304>
- [48] LIMA, C.S., RABELO, S.C., CIESIELSKI, P.N., *et al.*, “Multiscale alterations in sugar cane bagasse and straw submitted to alkaline deacetylation”, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 6, n. 3, pp. 3796–3804, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04158>
- [49] YANG, X., YOU, M., LIU, S., *et al.*, “Microbial responses towards biochar application in potentially toxic element (PTE) contaminated soil: a critical review on effects and potential mechanisms”, *Biochar*, v. 5, n. 1, pp. 57, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s42773-023-00255-5>
- [50] NAKHLI, S.A.A., IMHOFF, P.T., “Models for predicting water retention in pyrogenic carbon (biochar) and biochar-amended soil at low water contents”, *Water Resources Research*, v. 5, n. 11, e2020WR027726, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2020WR027726>
- [51] ZHU, L., ZHAO, N., TONG, L., *et al.*, “Structural and adsorption characteristics of potassium carbonate activated biochar”, *RSC Advances*, v. 8, n. 37, pp. 21012–21019, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1039/C8RA03335H>. PubMed PMID: 35542323.
- [52] LUSTOSA CARVALHO, M., TUZZIN DE MORAES, M., CERRI, C.E.P., *et al.*, “Biochar amendment enhances water retention in a tropical sandy soil”, *Agriculture*, v. 10, n. 3, pp. 62, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture10030062>
- [53] DAS, S.K., GHOSH, G.K., AVASTHE, R., “Evaluating biomass-derived biochar on seed germination and early seedling growth of maize and black gram”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 12, n. 12, pp. 5663–5676, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-020-00887-8>
- [54] DAS, S.K., GHOSH, G.K., AVASTHE, R., “Ecotoxicological responses of weed biochar on seed germination and seedling growth in acidic soil”, *Environmental Technology & Innovation*, v. 20, pp. 101074, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2020.101074>
- [55] USLU, O.S., BABUR, E., ALMA, M.H., *et al.*, “Walnut shell biochar increases seed germination and early growth of seedlings of fodder crops”, *Agriculture*, v. 10, n. 10, pp. 427, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture10100427>