v7.n7.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

EFEITOS DE EXTRATOS DE BIOCARVÕES NA GERMINAÇÃO E NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DE *LACTUCA SATIVA L.*

EFFECTS OF BIOCHAR EXTRACTS ON GERMINATION AND EARLY DEVELOPMENT OF LACTUCA SATIVA L.

EFECTOS DE EXTRACTOS DE BIOCARBONES SOBRE LA GERMINACIÓN Y EL DESARROLLO INICIAL DE LACTUCA SATIVA L.

Ana Lara Araújo Santos[1], Mikael Barreto de Jesus[2], Ariovaldo Antonio Tadeu Lucas[3], Denise Conceição de Gois Santos Michelan[4]

e778435
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i7.8435

PUBLICADO: 07/2026

RESUMO

A crescente demanda por sustentabilidade agrícola tem impulsionado a busca por materiais e tecnologias que reduzam impactos ambientais e melhorem o desempenho dos cultivos. Contudo, a germinação de sementes pode ser influenciada por fatores ambientais e pelas características dos insumos utilizados, incluindo o tipo de semente e os materiais aplicados. Com base neste enfoque, avaliou-se o desempenho germinativo, por meio de teste de ecotoxicidade, de sementes de alface (*Lactuca sativa* L.) peletizadas e não peletizadas, submetidas às soluções de extração de biocarvões produzidos com diferentes condições de temperatura e tempo, a partir de diferentes biomassas: cascas de batata (*Solanum tuberosum*), cascas de amendoim (*Arachis hypogaea*) e cacto palma (*Opuntia ficus-indica*), para uso na produção de mudas. Assim, os testes de germinação indicaram desempenho satisfatório para todas as sementes e biocarvões avaliados, com estímulo ao crescimento radicular em 100% das amostras em relação ao controle negativo, sem diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Portanto, os resultados evidenciaram o potencial uso agrícola dos biocarvões estudados, especialmente como insumos alternativos e sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura sustentável. Ecotoxicidade. Peletização de sementes. *Solanum tuberosum*. *Arachis hypogaea*. *Opuntia ficus-indica*.

ABSTRACT

The growing demand for agricultural sustainability has driven the search for materials and technologies that reduce environmental impacts and improve crop performance. However, seed germination can be influenced by environmental factors and by the characteristics of the inputs used, including seed type and applied materials. Based on this approach, germination performance was evaluated through an ecotoxicity test using pelleted and non-pelleted lettuce seeds (Lactuca sativa L.), exposed to extract solutions of biochars produced under different temperature and time conditions, from different biomasses: potato peels (Solanum tuberosum), peanut shells (Arachis hypogaea), and prickly pear cactus (Opuntia ficus-indica), for use in seedling production. Germination tests indicated satisfactory performance for all evaluated seeds and biochars, with stimulation of root growth in 100% of the samples compared to the negative control, with no statistically significant differences among treatments.

[1] Engenheira Civil pela Universidade Federal de Sergipe (UFS), Mestra em Engenharia Civil pela UFS e Doutoranda em Recursos Hídricos pela UFS.
[2] Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Sergipe (UFS) e Mestre em Engenharia Civil pela UFS.
[3] Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de São Carlos, Mestre em Irrigação e Drenagem pela ESALQ/USP e Doutor em Ecologia Aplicada pela ESALQ/USP. Docente da Universidade Federal de Sergipe (UFS).
[4] Engenheira Civil pela Universidade Federal de Sergipe (UFS), Mestra em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP) e Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Docente da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Therefore, the results demonstrated the agricultural potential of the studied biochars, especially as alternative and sustainable inputs.

KEYWORDS: *Sustainable agriculture. Ecotoxicity. Seed pelleting. Solanum tuberosum. Arachis hypogaea. Opuntia ficus-indica.*

RESUMEN
La creciente demanda por la sostenibilidad agrícola ha impulsado la búsqueda de materiales y tecnologías que reduzcan los impactos ambientales y mejoren el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, la germinación de semillas puede verse influenciada por factores ambientales y por las características de los insumos utilizados, incluyendo el tipo de semilla y los materiales aplicados. Con base en este enfoque, se evaluó el desempeño germinativo, mediante pruebas de ecotoxicidad, de semillas de lechuga (Lactuca sativa L.) peletizadas y no peletizadas, expuestas a soluciones de extracción de biocarbones producidos bajo diferentes condiciones de temperatura y tiempo, a partir de distintas biomasas: cáscaras de papa (Solanum tuberosum), cáscaras de maní (Arachis hypogaea) y nopal (Opuntia ficus-indica), para su uso en la producción de plántulas. Así, las pruebas de germinación indicaron un desempeño satisfactorio para todas las semillas y biocarbones evaluados, con estimulación del crecimiento radicular en el 100% de las muestras en relación con el control negativo, sin diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. Por lo tanto, los resultados evidenciaron el potencial uso agrícola de los biocarbones estudiados, especialmente como insumos alternativos y sostenibles.

PALABRAS CLAVE*: Agricultura sostenible. Ecotoxicidad. Peletización de semillas. Solanum tuberosum. Arachis hypogaea. Opuntia ficus-indica.*

1. INTRODUÇÃO

A Agenda 2030 das *United Nations* (UN) constitui um plano de ação global voltado à promoção do desenvolvimento sustentável, fundamentada nos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Dentre esses objetivos, o ODS 12 destaca-se por abordar o consumo e a produção responsáveis, contemplando metas relacionadas ao uso eficiente e consciente dos recursos naturais, bem como à redução da geração de resíduos por meio de práticas como a reutilização e a reciclagem (UN, 2025).

Nesse sentido, a crescente preocupação com a sustentabilidade dos sistemas agrícolas tem impulsionado a busca por materiais e tecnologias capazes de melhorar a qualidade do ambiente de cultivo e, simultaneamente, reduzir os impactos ambientais associados às práticas agrícolas tradicionais, especialmente aquelas relacionadas ao manejo inadequado de resíduos e ao uso intensivo de insumos. Assim, o biocarvão, material rico em carbono obtido por meio da pirólise da biomassa por conversão termoquímica (Sun *et al*., 2025; Souza *et al*., 2025), tem demonstrado elevado potencial quando aplicado no solo, estando associado a benefícios agronômicos e ambientais, como maior retenção de água e nutrientes, melhoria da estrutura do solo, aumento da capacidade de troca catiônica (Dangana *et al*., 2025), além da redução da emissão de gases de efeito estufa e do aumento do sequestro de carbono (Bu *et al*., 2022).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Desse modo, o biocarvão apresenta-se como uma alternativa promissora aos corretivos tradicionais, como compostos orgânicos e fertilizantes químicos, especialmente quanto à sustentabilidade a longo prazo e ao impacto ambiental (Shyam *et al*., 2025). Contudo, as propriedades e os efeitos do biocarvão dependem da matéria-prima utilizada e das condições de produção, como temperatura e tempo de pirólise, o que pode resultar em respostas ecotoxicológicas variadas (Coelho *et al*., 2025). Assim, apesar das vantagens supracitadas, é fundamental avaliar a segurança ambiental do biocarvão, uma vez que, durante seu processo de produção e aplicação, podem ser liberadas substâncias potencialmente tóxicas (Dong *et al*., 2025).

Apesar de se enquadrar no estado físico de agregação da matéria como material sólido, o biocarvão pode ser avaliado na forma de extrato aquoso, pois, em contato com a água, parte de seus constituintes será mobilizada e liberada, tornando-se potencialmente capaz de ocasionar efeitos adversos (Buss; Mašek, 2014), como na germinação e no desenvolvimento de organismos vegetais (Oh *et al*., 2012). Além disso, esse procedimento está de acordo com a *United States Environmental Protection Agency* – USEPA (2012), que recomenda soluções de teste, nas quais a substância esteja dissolvida ou suspensa em água, permitindo exposição adequada dos organismos-teste e a avaliação de possíveis efeitos tóxicos.

No contexto das análises de ecotoxicidade, sementes de *Lactuca sativa* L. (alface) apresentam características que a tornam adequada como bioindicador, possibilitando a avaliação de impactos ambientais por meio de alterações em seu desenvolvimento (Araújo; El-Deir; Tavares, 2021). Ademais, ressalta-se que fatores relacionados à qualidade e às características físicas das sementes assumem papel relevante, uma vez que podem influenciar o desempenho inicial das plântulas. Sementes peletizadas, por apresentarem revestimento, constituem alternativa para superar limitações associadas ao tamanho reduzido, achatado ou irregular das sementes de alface (Jeephet *et al*., 2022), enquanto as não peletizadas são utilizadas em sua forma natural.

Desse modo, dado o crescente uso de biocarvão na agricultura, torna-se importante avaliar seus efeitos sobre a germinação e o desenvolvimento inicial de mudas de hortaliças, etapas fundamentais para o estabelecimento das culturas. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar efeitos ecotoxicológicos de extratos de biocarvões produzidos a partir de diferentes biomassas sobre o desempenho germinativo de sementes de *Lactuca sativa* L., considerando variações na concentração dos extratos (1% e 3%) provenientes de biocarvões de cascas de batata (BCB), cascas de amendoim (BAM) e cacto palma (BCA), aplicados em duas categorias de sementes: peletizadas (P) e não peletizadas (NP), com foco no cultivo agrícola.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2. METODOLOGIA

Para a avaliação dos efeitos ecológicos, foram utilizadas sementes de alface (*Lactuca sativa* L.) como bioindicador (USEPA, 1996), em virtude da sua sensibilidade e utilização em ensaios de germinação (Oh *et al*., 2012; Gryczak *et al*., 2018; Michelan *et al*., 2021; Santos; Araújo; Michelan, 2025). Os biocarvões utilizados foram obtidos a partir de cascas de batata (*Solanum tuberosum*), na temperatura de pirólise de 350 °C por 25 minutos, cascas de amendoim (*Arachis hypogaea*), com pirólise de 450 °C por 25 minutos, e cacto palma (*Opuntia ficus-indica*), com pirólise de 450 °C por 30 minutos.

Ressalta-se que o estudo possui caráter preliminar, visando gerar dados iniciais sobre a resposta das sementes às condições experimentais avaliadas. Nesse sentido, não foi realizado cálculo do tamanho amostral, uma vez que esse procedimento requer estimativas prévias da variabilidade dos dados e do efeito esperado, ainda indisponíveis na literatura para a condição estudada. Desse modo, o número de amostras foi definido com base na natureza exploratória do estudo e na viabilidade experimental. Ainda, foram utilizadas sementes comerciais, submetidas à seleção visual prévia para descarte de unidades com danos mecânicos ou outras alterações físicas visíveis, para maior uniformidade do material experimental.

Preparação do extrato e germinação das sementes

De acordo com as determinações da USEPA (1996) e USEPA (2012), que definem a solução de teste como a substância de ensaio dissolvida ou suspensa no meio diluente, e seguindo a metodologia proposta por Oh *et al*. (2012), três gramas de cada biocarvão, separadamente, foram acondicionados em frascos erlenmeyer, e cada frasco recebeu a adição de 100 mL de água destilada (Figura 1a). Cada mistura foi agitada por 2 h, na rotação de aproximadamente 120 rpm, em ambiente escuro (Figura 1b). Transcorrido esse período, os materiais foram filtrados inicialmente em papel de filtro Whatman nº 2 e, posteriormente, em membrana filtrante com poros de 0,45 µm. O líquido resultante desse processamento foi denominado de extrato aquoso (Figura 1c) e foi estudado nas concentrações: 1% e 3% (v/v).

Os diferentes extratos aquosos foram adicionados em placas de Petri contendo papel de filtro Whatman nº 2, sobre o qual foram colocadas vinte sementes de alface (Oh *et al*., 2012), conforme a Figura 1d. As placas foram incubadas a 25 °C, em ambiente escuro (Figura 1e), sendo a água destilada utilizada como tratamento controle. Transcorridas 120 h de incubação do cultivo, foram avaliados a germinação das sementes e o comprimento da raiz das plântulas em

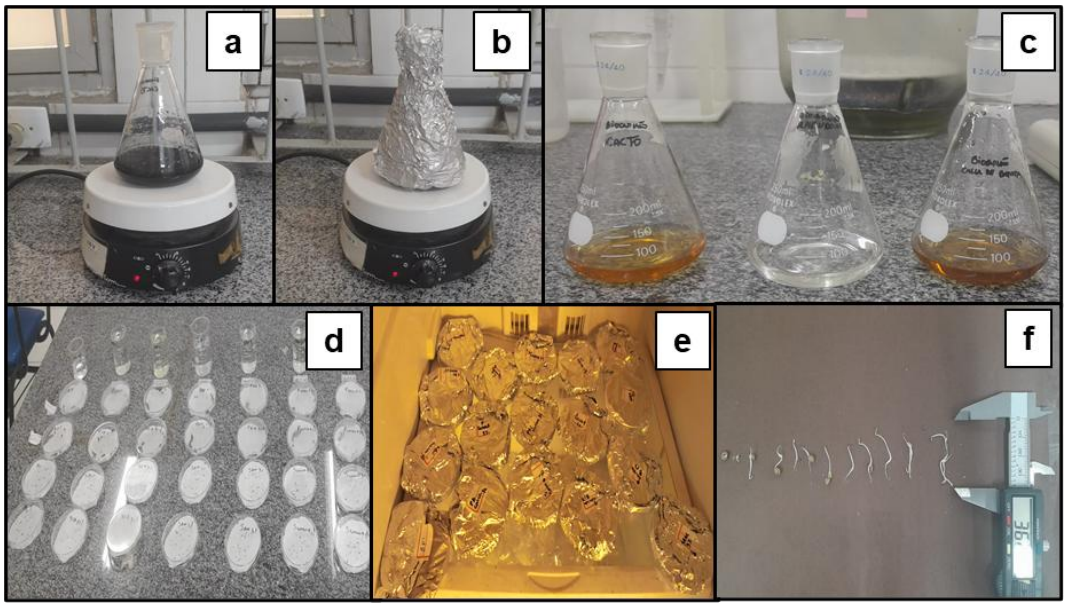
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

todas as amostras (Figura 1f). O experimento foi conduzido em duplicata para cada tratamento, conforme descrito na literatura para ensaios de germinação de alface (Michelan *et al*., 2021; Santos; Araújo; Michelan, 2025), sendo cada placa umedecida com 2 mL de cada concentração.

Vale mencionar que, embora a umidade relativa exerça influência sobre o processo de germinação, essa variável não foi mensurada no presente estudo, tendo em vista que todas as unidades experimentais foram mantidas simultaneamente sob as mesmas condições ambientais, minimizando possíveis variações entre os tratamentos. Além disso, as sementes foram previamente submetidas à embebição em água destilada durante 1 h, garantindo condições hídricas iniciais semelhantes entre as unidades experimentais.

Ademais, os ensaios foram conduzidos em placas de Petri fechadas, o que contribui para a manutenção de um microclima, mantendo a umidade relativa próxima da saturação. Dessa forma, eventuais efeitos da umidade relativa ocorreram de maneira uniforme em todos os tratamentos, incluindo o controle, não comprometendo as comparações estatísticas entre os diferentes extratos de biocarvão.

Figura 1. Biocarvão e água destilada no erlenmeyer (a); erlenmeyer envolto em papel alumínio (b); soluções extraídas dos biocarvões (c); sementes de alface distribuídas nas placas (d); placas armazenadas para incubação (e) e sementes germinadas (f)



Fonte: Autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Índices avaliados

A partir da avaliação das raízes que apresentaram crescimento e da medição dos respectivos comprimentos, determinou-se o Índice de Crescimento Radicular (ICR) e o Índice de Germinação (IG), por meio das equações 1 e 2, respectivamente, conforme Gryczak *et al*. (2018):

$$\mathrm{ICR} = \frac{\mathrm{CRA}}{\mathrm{CRC}} \quad (1)$$

$$\mathrm{IG} = \mathrm{ICR} * \left(\frac{\mathrm{SGA}}{\mathrm{SGC}}\right) * 100 \quad (2)$$

Em que ICR: índice de crescimento radicular; CRA: comprimento radicular da amostra (mm); CRC: comprimento radicular do controle negativo (mm); IG: índice de germinação (%); SGA: número de sementes germinadas na amostra e SGC: número de sementes germinadas no controle negativo.

Destaca-se que, para os controles negativos deste estudo (amostras controle), em que as sementes foram germinadas sem a adição dos extratos, evidenciou-se que as sementes não peletizadas atingiram crescimento médio de 14,814 mm, enquanto as sementes peletizadas alcançaram comprimento médio de 13,856 mm, sendo esses valores considerados como ICR de 1 e IG de 100%, para fins de comparação com amostras cultivadas com as diferentes concentrações dos extratos dos biocarvões.

Young *et al*. (2012) consideraram uma amostra tóxica quando favorece inibição do crescimento das sementes, ou seja, quando o IG é inferior a 80%, enquanto taxas superiores a 120% indicam estimulação do crescimento e valores entre 80% e 120% são interpretados como efeitos não significativos.

Comparação dos resultados analíticos

A USEPA (1996) considera a germinação relevante quando a raiz primária do bioindicador atinge 5 mm de comprimento. Assim, a avaliação do comprimento radicular permitiu verificar se os extratos de biocarvões de casca de batata (BCB), casca de amendoim (BAM) e cacto palma (BCA) favoreceram o desenvolvimento inicial da planta.

Ressalta-se que a ausência de estímulo ao crescimento não indica necessariamente toxicidade, podendo refletir condições de ensaio desfavoráveis no período de incubação (120 h), tendo em vista que o biocarvão, obtido a partir de biomassa vegetal, tem sido descrito como um material promissor devido ao seu potencial de melhorar a disponibilidade de nutrientes e propriedades físico-químicas do ambiente de cultivo, sem apresentar toxicidade significativa quando utilizado em condições adequadas (Zhao *et al*., 2022).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Adicionalmente, as diferenças estatisticamente significativas nos valores de ICR e IG entre as concentrações avaliadas e os biocarvões testados, considerando duas categorias de sementes, foram analisadas por meio de inferência estatística, com nível de confiança de 95%, utilizando-se o teste de Kruskal–Wallis seguido de comparações múltiplas entre os grupos.

Além disso, realizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) para avaliar a relação entre os parâmetros físico-químicos (pH, condutividade elétrica e temperatura) das extrações e os índices analisados, tendo em vista que a avaliação integrada desses parâmetros fornece informações essenciais sobre a qualidade do meio de cultivo e orienta o manejo agrícola (Patel; Patel; Maitrey, 2022). Destaca-se que, para a aplicação da PCA, todas as variáveis foram previamente padronizadas por meio do Z-score, a fim de reduzir os efeitos de escala. Adicionalmente, a viabilidade da aplicação da PCA foi avaliada por meio do teste de esfericidade de Bartlett, o qual verifica a existência de correlações suficientes entre as variáveis (valor-p < 0,05), e do índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), utilizado para avaliar a adequação da amostra à análise (KMO ≥ 0,5).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teste de ecotoxicidade

A Tabela 1 apresenta os valores do comprimento médio da raiz (mm) de *Lactuca sativa* L. cultivada com extratos obtidos de biocarvões produzidos a partir de casca de batata (BCB), casca de amendoim (BAM) e cacto palma (BCA), para ambos os tipos de sementes.

Tabela 1. Comprimento médio da raiz (mm)

Concentração	Categoria das sementes	Materiais	Nomenclatura	Comprimento médio (mm)
1%	Não Peletizada (NP)	BCA	BCANP1	16,545
		BAM	BAMNP1	18,984
		BCB	BCBNP1	18,335
3%	Não Peletizada (NP)	BCA	BCANP3	15,634
		BAM	BAMNP3	18,613
		BCB	BCBNP3	18,965
1%	Peletizada (P)	BCA	BCAP1	18,438
		BAM	BAMP1	19,155
		BCB	BCBP1	18,985
3%	Peletizada (P)	BCA	BCAP3	14,477
		BAM	BAMP3	17,351
		BCB	BCBP3	15,504

Fonte: Autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Sendo assim, conforme apresentado na Tabela 1, todos os resultados foram superiores ao valor de referência estabelecido (5 mm) (USEPA, 1996), indicando que 100% das situações avaliadas apresentaram efeito positivo quanto ao crescimento radicular.

Vale ressaltar que a taxa média de germinação do controle para as sementes peletizadas foi de 60%, valor inferior ao considerado favorável, uma vez que a recomendação que o teste estabelece é de pelo menos 65% de germinação do controle (USEPA, 1996). No entanto, com o uso de sementes não peletizadas, obteve-se taxa média de germinação no controle de 67,5%, representando resultado positivo.

Embora o aumento da concentração de biocarvão possa resultar em redução do vigor de sementes de *Lactuca sativa* L., sugerindo possível potencial tóxico nas fases iniciais do desenvolvimento vegetal (Alixandre *et al.*, 2023), no presente estudo foi observado comportamento oposto, uma vez que em 100% das amostras avaliadas (Tabela 1) houve estímulo ao crescimento radicular em comparação ao controle negativo, tanto para sementes peletizadas quanto não peletizadas, em todas as soluções de teste. Esses resultados corroboram a informação que a peletização, quando adequadamente formulada, não promove alterações significativas na germinação, sugerindo que seus efeitos estão majoritariamente associados a modificações físicas, sem comprometimento da viabilidade fisiológica das sementes (Jeephet *et al*., 2020).

A Tabela 2 apresenta os valores de ICR e IG das amostras analisadas. Desse modo, conforme Young *et al*. (2012), observa-se que 58,3% das análises apresentaram valores de IG superiores a 120%, representando estímulo ao crescimento do bioindicador, enquanto os outros 41,7% das análises permaneceram entre 80% e 120%, indicando efeitos tóxicos não significativos. Quanto ao ICR, todas as situações avaliadas apresentaram valores superiores aos dos controles negativos.

Tabela 2. ICR e IG

Materiais	ICR	IG (%)
BCANP1	1,117	119,960
BAMNP1	1,282	142,391
BCBNP1	1,238	123,768
BCANP3	1,055	97,718
BAMNP3	1,256	148,915
BCBNP3	1,280	113,795
BCAP1	1,331	144,161
BAMP1	1,382	115,203
BCBP1	1,370	165,565

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

BCAP3	1,045	104,484
BAMP3	1,252	140,880
BCBP3	1,119	144,531

Fonte: Autores (2026).

Segundo Ronquim (2010), o desenvolvimento das plantas depende de nutrientes que podem ser classificados como macronutrientes (cálcio, enxofre, fósforo, magnésio, nitrogênio e potássio) e micronutrientes (boro, cobre, cloro, ferro, molibdênio, manganês, zinco). Contudo, ainda que a concentração de determinados elementos, em razão de processos de volatilização e transformações químicas, influencie a composição do biocarvão (Sawargaonkar *et al*., 2024), a presença de nutrientes essenciais em formas químicas diversificadas presentes nos biocarvões pode ter favorecido o crescimento do bioindicador.

Assim, as propriedades do biocarvão dependem do teor e da natureza química dos componentes orgânicos e inorgânicos presentes em sua matriz; de modo geral, a fração orgânica do biocarvão é composta por carbono, oxigênio, hidrogênio, enxofre e nitrogênio, enquanto os elementos minerais, como sílica, alumínio, cálcio, magnésio, fósforo, sódio e potássio, encontram-se majoritariamente concentrados na fração de cinzas (Jindo *et al*., 2020).

No que se refere à composição específica dos biocarvões, observa-se que aqueles obtidos a partir de casca de batata apresentam fósforo, potássio, cálcio e magnésio (Vilakazi; Muchaonyerwa; Buthelezi-Dube, 2023). De forma semelhante, os biocarvões produzidos a partir da casca de amendoim também apresentam ampla diversidade de elementos, incluindo carbono, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, zinco, boro, ferro, cobre, manganês e sódio (Sawargaonkar *et al*., 2024). Já os biocarvões derivados de cacto palma evidenciam a presença de carbono, oxigênio, magnésio, cloro, cálcio e potássio (Santos, 2025).

Dessa forma, tendo em vista que o desenvolvimento das plantas depende da presença de macronutrientes e micronutrientes essenciais (Ronquim, 2010), observa-se que os biocarvões analisados podem conter, ainda que em proporções distintas, diversos nutrientes que contribuem para o desenvolvimento do bioindicador. Como exemplo, destacam-se o potássio e o cálcio, que são elementos apontados em todos os biocarvões citados. Sendo o potássio essencial ao crescimento das plantas, atuando na ativação enzimática, na regulação do equilíbrio hídrico e na tolerância a estresses abióticos e ao estresse oxidativo (Johnson *et al*., 2022), e o cálcio desempenhando papel fundamental na estrutura celular, na sinalização fisiológica e nas respostas ao estresse (Wdowiak; Podgórska; Szal, 2024).

Logo, a origem da matéria-prima, os tipos de plantas e as doses de aplicação constituem fatores importantes na avaliação dos benefícios potenciais do biocarvão sobre o crescimento

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

radicular e a qualidade do meio de cultivo (Zou *et al*., 2021). Nesse sentido, Oh *et al*. (2012) avaliaram o efeito do extrato aquoso de biocarvões produzidos a partir de casca de laranja, madeira residual e lodo de estação de tratamento de água sobre a germinação e o crescimento inicial de plântulas de alface (*Lactuca sativa* L.). Para os extratos estudados, observou-se que a resposta das plantas variou conforme a concentração do extrato, sendo que concentrações mais baixas (1%) favoreceram a germinação e o desenvolvimento das plântulas, enquanto concentrações mais elevadas (3%) mostraram efeitos inibitórios mais expressivos.

Esse comportamento pode estar relacionado à composição química dos extratos e à maior concentração de compostos com potencial alelopático em doses mais elevadas, o que pode intensificar efeitos inibitórios sobre processos fisiológicos iniciais da germinação (Arruda; Silva, 2022). Além disso, variações na composição dos diferentes extratos, mesmo em pequenas variações de concentração, podem resultar em respostas fisiológicas distintas nas plantas, influenciadas por fatores como método de extração, espécie vegetal e condições de obtenção dos compostos (Silva *et al*., 2024).

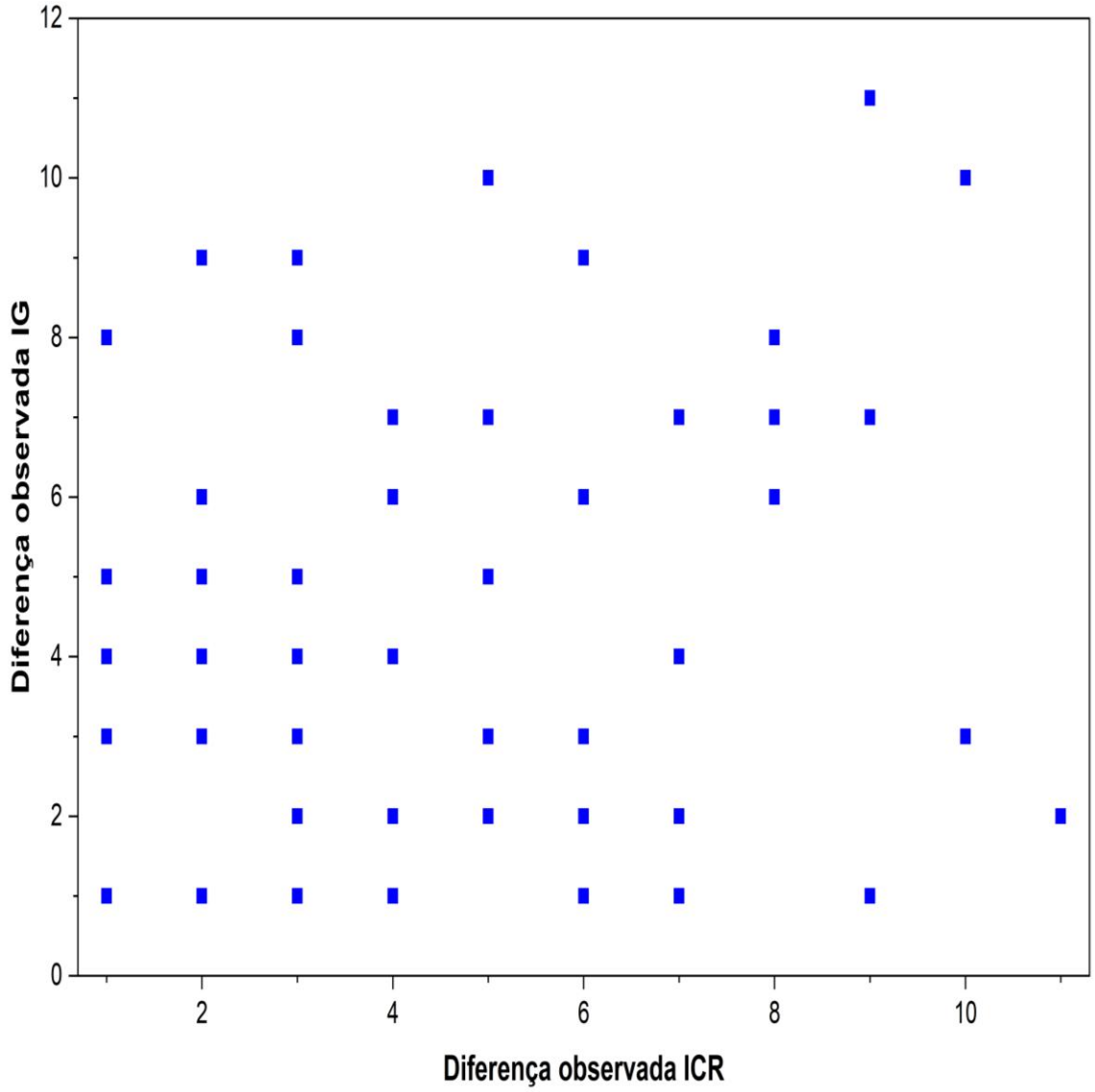
De forma complementar, Coelho *et al*. (2025) analisaram biocarvões produzidos a partir de acácia, poda de videira e bagaço de azeitona, obtidos sob diferentes condições de pirólise, quanto à fitotoxicidade e às taxas de germinação de *Lactuca sativa* L. Os resultados evidenciaram que, quando adequadamente incorporados ao meio de cultivo, especialmente nas doses de 3 a 5%, os biocarvões reduziram os efeitos fitotóxicos e promoveram a germinação e o desenvolvimento radicular.

No presente estudo, para todos os tipos de sementes, a resposta positiva no desenvolvimento radicular com a aplicação dos biocarvões avaliados reforça o potencial desses materiais como componentes de substratos agrícolas, estando em consonância com evidências científicas que apontam sua eficiência na mitigação de efeitos fitotóxicos e na promoção do crescimento inicial das plantas (Oh *et al*., 2012; Milon; Chang; Ravindran, 2022; Helaoui *et al*., 2023; Coelho *et al*., 2025).

Ademais, os resultados do teste de Kruskal-Wallis ($p > 0,05$) indicaram que, para todos os fatores comparados, tanto o ICR quanto o IG não apresentaram diferenças significativas ao nível de confiança de 95%. Frisa-se que a máxima diferença observada, apresentada na Figura 2, foi de 11,0, valor inferior à diferença crítica de 17,2 obtida para todas as comparações múltiplas. Sendo assim, o teste inferencial demonstrou que não houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos quanto ao crescimento radicular ou à germinação das sementes.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Resultados das diferenças observadas para os índices

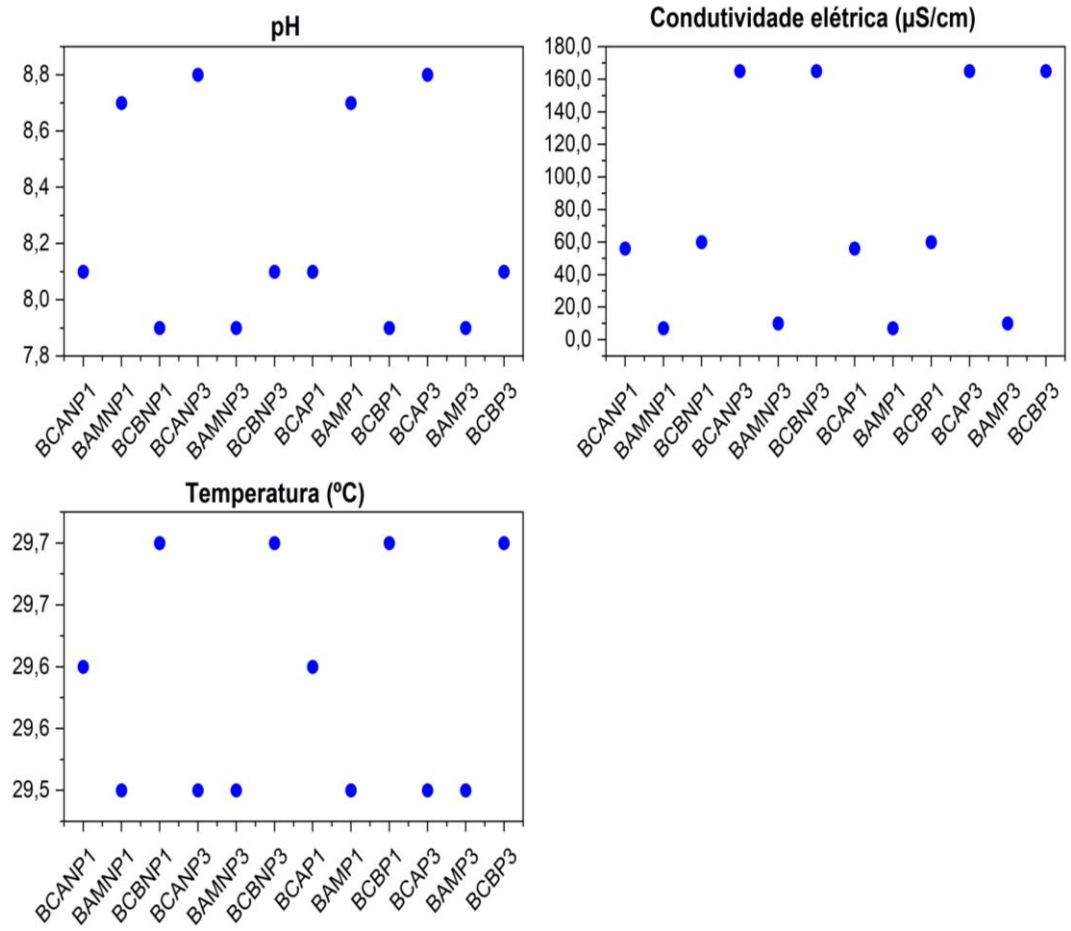


Fonte: Autores (2026).

Quanto aos parâmetros físico-químicos (pH, condutividade elétrica e temperatura) das extrações analisadas (Figura 3), verificou-se que valores de pH e condutividade elétrica foram mais elevados na concentração de 3%. Esse comportamento pode estar relacionado ao maior aporte da fração mineral do biocarvão na solução, uma vez que os elementos inorgânicos se concentram predominantemente na fração de cinzas do material (Jindo *et al*., 2020), favorecendo o aumento da carga iônica do meio.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Resultados dos parâmetros físico-químicos das extrações avaliadas



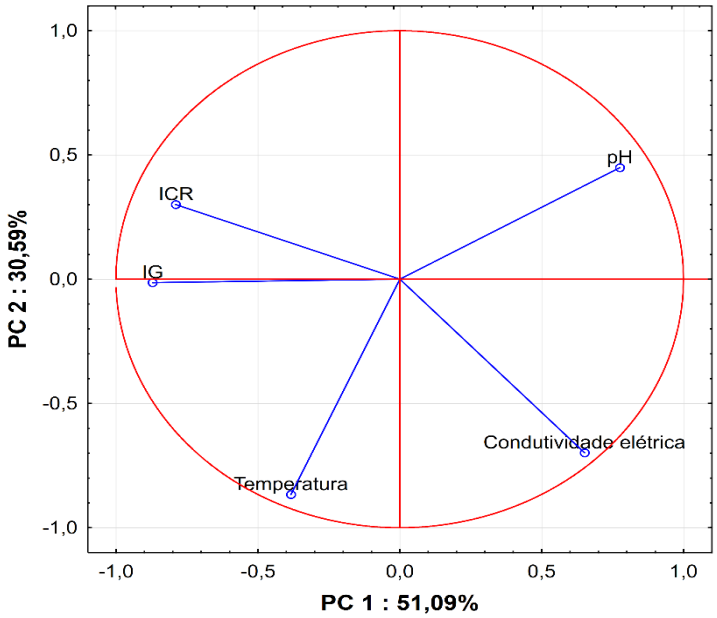
Fonte: Autores (2026).

O teste de esfericidade de Bartlett (p = 0,009) indicou a existência de correlações entre as variáveis para a aplicação da PCA. O índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) global foi de 0,50, indicando nível aceitável para a realização da análise fatorial.

Assim, ao avaliar os parâmetros físico-químicos das extrações e os índices, a análise de componentes principais (Figura 4) mostrou que o Componente Principal 1 (PC1) e Componente Principal 2 (PC2) explicaram 81,7% da variância total, evidenciando que o plano bidimensional retém parcela substancial da variabilidade original do conjunto de dados. Nesse contexto, constatou-se relação entre temperatura, IG e ICR, evidenciada pela proximidade e orientação semelhante dos vetores no biplot. Em contraste, pH e condutividade elétrica não apresentaram relação significativa com IG, ICR e temperatura, sugerindo comportamento independente ou inverso, no caso do pH.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 4. Análise de Componentes Principais: ICR; IG; pH; condutividade elétrica e temperatura



Fonte: Autores (2026).

O pH apresentou cargas positivas em PC1 (0,775) e PC2 (0,449), indicando associação positiva com esses componentes principais, em contraste com IG, ICR e temperatura, que apresentaram cargas de sinal oposto, sugerindo padrões de variação inversa ao longo desses eixos.

Tabela 3. Autovalores

Variável	PC1	PC2
ICR	-0,789	0,301
IG	-0,871	-0,014
pH	0,775	0,449
Condutividade elétrica	0,651	-0,700
Temperatura	0,384	-0,866
Autovalores	2,554	1,530
Variância total (%)	51,09	30,59
Variância acumulada (%)	51,09	81,70

Fonte: Autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Ressalta-se que a associação entre IG, ICR e temperatura corrobora o entendimento fisiológico de que a temperatura desempenha papel central na germinação, ao regular a atividade enzimática e a mobilização de reservas nas etapas iniciais do processo (Sghaier *et al*., 2022). Além disso, condições térmicas adequadas e estáveis favorecem o desempenho germinativo ao evitar estresses que possam comprometer a atividade metabólica das plantas (Suo *et al*., 2023; Guo *et al*., 2024). Sendo assim, na presente pesquisa, as soluções de extração apresentaram temperaturas entre 29,50 e 29,70 °C, o que pode ter proporcionado condições térmicas homogêneas durante os ensaios e contribuído para o positivo desempenho germinativo.

Uso do biocarvão na produção de mudas

O uso do biocarvão no cultivo agrícola tem sido investigado devido ao seu potencial em promover sistemas produtivos mais sustentáveis, contribuindo para a redução de impactos ambientais (Zhao *et al*., 2022; Shyam *et a*l., 2025; Dangana *et al*., 2025) e para a melhoria do desempenho agronômico das culturas, como crescimento, produtividade e eficiência no uso de nutrientes (Xiao *et al*., 2024; Kesamreddy *et al*., 2025). Essa abordagem está diretamente alinhada à Agenda 2030 das Nações Unidas, especialmente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao favorecer práticas agrícolas ambientalmente responsáveis, o reaproveitamento de resíduos e o sequestro de carbono (UN, 2025).

Nessa conjuntura, o biocarvão insere-se nos princípios da economia circular, uma vez que possibilita a valorização de biomassas residuais, transformando resíduos orgânicos e subprodutos agroindustriais em insumos com potencial agronômico (Marin *et al*., 2025). Ademais, a crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis tem ampliado o interesse no biocarvão como corretivo, especialmente frente à aplicação extensiva de fertilizantes químicos, historicamente responsável pelo aumento da produtividade agrícola, mas também associada a problemas agronômicos e ecológicos (Amalina *et al*., 2025).

Nesse contexto, destaca-se o reaproveitamento de biomassas residuais amplamente geradas pela agroindústria e frequentemente subutilizadas, como as cascas de batata (Marulanda-Toro *et al*., 2025) e cascas de amendoim (Putra *et al*., 2023). A conversão desses materiais em biocarvão representa uma alternativa sustentável, agregando valor aos resíduos e mitigando impactos ambientais da disposição inadequada. De forma complementar, a utilização da biomassa de cacto como biocarvão amplia as possibilidades de aplicação de espécies vegetais abundantes em determinadas regiões, conferindo outras finalidades ao material.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Frisa-se que a manutenção da composição mineral é essencial para a sobrevivência e o desenvolvimento das plantas, o que reforça a relevância de materiais como o biocarvão, cuja composição pode influenciar diretamente as condições do meio de cultivo. Além disso, diversos fatores, como o tipo de substrato, podem afetar o crescimento das mudas durante a fase inicial (Silva *et al*., 2018). Dessa maneira, devido à sua incapacidade de locomoção, as plantas estão diretamente condicionadas às características químicas e físicas do solo ou do substrato no qual as sementes germinam (Wdowiak; Podgórska; Szal, 2024).

Nesse contexto, o biocarvão pode atuar como um condicionador do meio de crescimento de mudas, influenciando positivamente a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes (Natalli *et al*., 2024; Mei *et al*., 2025), além de otimizar a composição do substrato e promover a atividade de microrganismos benéficos, sendo a determinação da dose ideal, considerando espécie, manejo e proporção de insumos, essencial para assegurar a produção de mudas de qualidade significativa (Souza; Passos; Gonçalves, 2023). Essas alterações favorecem a qualidade das mudas, refletindo em desenvolvimento inicial mais expressivo, incluindo altura, diâmetro do caule e área foliar (Natalli *et al*., 2024).

Em sistemas de produção de mudas de alface, por exemplo, a incorporação de biocarvão tem sido associada à melhoria das propriedades físicas do substrato e ao aumento da fertilidade, constituindo uma alternativa sustentável à turfa e aos substratos convencionais (Silva *et al*., 2022; Picca *et al*., 2025; Fan *et al*., 2025).

Desse modo, o biocarvão atua como componente adequado para substratos de germinação, destacando a importância da realização de testes de germinação e ensaios ecotoxicológicos para a seleção do material com melhor desempenho, de acordo com a cultura-alvo (Carril *et al*., 2023). No presente estudo, o ensaio de ecotoxicidade evidenciou efeitos positivos sobre os parâmetros avaliados, indicando ausência de toxicidade e potencial benefício ao desenvolvimento inicial das mudas.

Assim, o uso de biocarvões obtidos a partir de casca de batata, casca de amendoim e biomassa de cacto demonstra-se uma alternativa viável para aplicações agrícolas, especialmente nas etapas iniciais de desenvolvimento vegetal, reforçando seu potencial no contexto de sistemas produtivos sustentáveis. Portanto, a aplicação do biocarvão na produção de mudas de hortaliças configura-se como estratégia promissora, capaz de otimizar o desempenho agronômico e promover a sustentabilidade quando incorporado ao substrato.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do biocarvão em escala de campo deve ser precedida de análise detalhada, contemplando o tipo de biomassa empregada e suas propriedades. Nesta pesquisa, os biocarvões produzidos a partir de casca de batata, casca de amendoim e biomassa de cacto promoveram respostas germinativas expressivas em sementes de alface, tanto peletizadas quanto não peletizadas, indicando ausência de efeitos fitotóxicos nas condições experimentais.

Ademais, em 100% das amostras avaliadas, observou-se estímulo ao crescimento radicular quando comparado ao controle negativo, sem diferenças estatisticamente significativas. A estabilidade térmica das soluções durante os ensaios contribuiu para o adequado desempenho germinativo observado, minimizando possíveis interferências ambientais no processo.

Portanto, esses achados evidenciam o potencial dos biocarvões avaliados para aplicação agrícola, especialmente para aplicações relacionadas à germinação e às fases iniciais do desenvolvimento vegetal de mudas. Adicionalmente, o aproveitamento dessas biomassas favorece a destinação adequada de resíduos agroindustriais, fortalece os princípios da economia circular e contribui para a adoção de práticas agrícolas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ALIXANDRE, R. D.; LIMA, P. A. M.; ALMEIDA, T. F. R.; OLIVEIRA, J. S.; PEREIRA, M. B.; ALIXANDRE, F. T.; JACOMINO, G. R. L.; DIAS, R. S.; ALEXANDRE, R. S.; FERREIRA, A.; PASSOS, R. R.; LOPES, J. C. Potential of coffee straw biochar as a substrate conditioner in seed lettuce and sorghum germination and vigor. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e277437, 2023. DOI: 10.1590/1519-6984.277437

AMALINA, F.; NASRULLAH, M.; ZULARISAM, A. W.; AZIZ, M. A. A. Biochar-driven nutrient enhancement: A sustainable pathway for soil fertility and crop productivity. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 141, p. 104168, 2025. DOI: 10.1016/j.pce.2025.104168

ARAÚJO, M. P. de; EL-DEIR, S. G.; TAVARES, R. G. Lactuca sativa como bioindicador da contaminação por alumínio do lodo de Estação de Tratamento de Água. **Revista S&G**, v. 16, n. 2, p. 178-186, 2021. DOI: 10.20985/1980-5160.2021.v16n2.1717

ARRUDA, A. G. M. de; SILVA, V. N. Efeito alelopático de extratos de Crotalaria e Milheto em sementes de tomate. **Revista Fitos**, v. 16, n. 4, p. 456-464, 2022. DOI: 10.32712/2446-

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4775.2022.1402 BU, F.; NAN, Q.; LI, W.; BOLAN, N.; SARKAR, B.; MENG, J.; WANG, H. Meta-analysis for quantifying carbon sequestration and greenhouse gas emission in paddy soils one year after biochar application. **Agronomy**, v. 12, n. 12, p. 3065, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12123065

BUSS, W.; MAŠEK, O. Mobile organic compounds in biochar–a potential source of contamination–phytotoxic effects on cress seed (Lepidium sativum) germination. **Journal of Environmental Management**, v. 137, p. 111-119, 2014. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.01.045

CARRIL, P.; GHORBANI, M.; LOPPI, S.; CELLETTI, S. Effect of biochar type, concentration and washing conditions on the germination parameters of three model crops. **Plants**, v. 12, n. 12, p. 2235, 2023. DOI: 10.3390/plants12122235

COELHO, L.; CANEDO, J. N. G. V.; CUSTÓDIO, M.; FLORES, D.; MOURAO, P.; PALMA, P.; PRATS, S. A. Feedstock and pyrolysis conditions of biochars: influence on soil phytotoxicity and water ecotoxicity. **Soil Biology and Biochemistry**, p. 109935, 2025. DOI: 10.1016/j.soilbio.2025.109935

DANGANA, R. S.; SANUSI, I. O.; OKON, M. B.; TERKIMBI, S. D.; AYIM, G.; IBITOYE, O. A. Comprehensive evaluation of biochar influence on soil microbial diversity, nutrient cycling and contaminant remediation using systematic review and meta-analysis. **Discover Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 1354, 2025. DOI: 10.1007/s43621-025-02238-x

DONG, M.; JIANG, M.; HE, L.; ZHANG, Z.; GUSTAVE, W.; VITHANAGE, M.; HE, F. Challenges in safe environmental applications of biochar: identifying risks and unintended consequence. **Biochar**, v. 7, n. 1, p. 12, 2025. DOI: 10.1007/s42773-024-00412-4

FAN, X.; WEI, Y.; SONG, D.; ZHOU, T.; LI, R.; SU, X.; ZHANG, T.; CHENG, S.; XIAO, R. Biochar enhanced co-composting for peat-free seedling substrate: A win-win solution for sustainable development of modern vegetable industry. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 194, p. 1504-1514, 2025. DOI: 10.1016/j.psep.2024.12.076

GRYCZAK, M.; KILIPPER, J. T.; COSTA, P. D. de; MACCARI, A. Sementes de Lactuca Sativa como bioindicador de toxicidade em resíduos de construção civil. **Tecnologia e Ambiente**, v. 24, p. 233–242, 2018. DOI: 10.18616/ta.v24i0.4406

GUO, M.; ZONG, J.; ZHANG, J.; WEI, L.; WEI, W.; FAN, R.; ZHANG, T.; TANG, Z; ZHANG, G. Effects of temperature and drought stress on seed germination and seedling growth of Lilium concolor. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1462655

HELAOUI, S.; BOUGHATTAS, I.; MKHININI, M.; CHEBBI, L.; ELKRIBI-BOUKHRIS, S.; ALPHONSE, V.; LIVET, A.; BANNI, M.; BOUSSERRHINE, N. Biochar amendment alleviates heavy metal phytotoxicity of Medicago sativa grown in polymetallic contaminated soil: Evaluation of metal uptake, plant response and soil properties. **Plant Stress**, v. 10, p. 100212, 2023. DOI: 10.1016/j.stress.2023.100212

JEEPHET, P.; ATNASEO, C.; HERMHUK, S.; KANGSOPA, J. Effect of seed pelleting with different matrices on physical characteristics and seed quality of lettuce (Lactuca sativa). **International Journal of Agricultural Technology**, [S. l.], v. 18, n. 5, p. 2009–2020, 2022.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

JINDO, K.; AUDETTE, Y.; HIGASHIKAWA, F. S.; SILVA, C. A.; AKASHI, K.; MASTROLONARDO, G.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. Á.; MONDINI, C. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 7, n. 1, p. 15, 2020. DOI: 10.1186/s40538-020-00182-8

JOHNSON, R.; VISHWAKARMA, K.; HOSSEN, M. S.; KUMAR, V.; SHACKIRA, A. M.; PUTHUR, J. T.; ABDI, G.; SARRAF, M.; HASANUZZAMAN, M. Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 172, p. 56-69, 2022. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.01.001

KESAMREDDY, L.; EAGAN, S.; NDUNGU, S. M.; RAMANUJAM, K.; CHEN, S. Y.; PAWERA, L. Biochar enhances growth, yield and nutrient use efficiency of okra under organic and mineral nutrient management. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 9, p. 1718301, 2025. DOI: 10.3389/fsufs.2025.1718301

MARIN, F.; TANISLAV, O. M.; CONSTANTINESCU, M.; ROMAN, A.; BUCURA, F.; OANCEA, S.; ZAHARIOIU, A. Biochar for Soil Fertility and Climate Mitigation: Review on Feedstocks, Pyrolysis Conditions, Functional Properties, and Applications with Emerging AI Integration. **Agriculture**, v. 15, n. 22, p. 2345, 2025. DOI: 10.3390/agriculture15222345

MARULANDA-TORO, J. A.; SOLARTE-TORO, J. C.; HOYOS-LEYVA, J. D; ALONSO-GÓMEZ, L. Valorizing Potato Peel Waste Biorefinery Concept. RIVAR, v. 12, n. 35, p. 16-34, 2025. DOI: 10.35588/jsq04z36

MEI, C.; XIE, G.; HAN, Y.; PENG, M. Biochar improves lettuce seedling growth by influencing the nutrient content of simulated lunar soil. **Iscience**, v. 28, n. 9, 2025. DOI: 10.1016/j.isci.2025.113327

MICHELAN, D. C. G. S.; SANTOS, W. N. A.; ROSA, T. S.; SANTOS, D. G.; JESUS, R. C. S. de. Uso do coagulante/floculante emergente à base de moringa no tratamento de água com verificação da composição e toxicidade do lodo produzido: tratamento de água com moringa e toxicidade do lodo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, p. 955-963, 2021. DOI: 10.1590/S1413-415220200314

MILON, A. R.; CHANG, S. W.; RAVINDRAN, B. Biochar amended compost maturity evaluation using commercial vegetable crops seedlings through phytotoxicity germination bioassay. **Journal of King Saud University-Science**, v. 34, n. 2, p. 101770, 2022. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101770

NATALLI, L. H.; HILLIG, E.; LOMBARDI, K. C.; GODINHO, M.; NUÑEZ, R. P. Use of biochar as a component of substrates in horticulture and forestry: A review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. e0240027, 2024. DOI: 10.36783/18069657rbcs20240027

OH, T. K.; SHINOGI, Y.; CHIKUSHI, J.; LEE, Y. H.; CHOI, B. Effect of Aqueous Extract of Biochar on Germination and Seedling Growth of Lettuce (Lactuca sativa L.). **Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka**, v. 57, n. 1, p. 55-60, 2012. DOI: 10.5109/22048

PATEL, A.; PATEL, R.; MAITREY, B. A REVIEW – Importance of physico-chemical properties in soil quality. **VIDYA – A Journal of Gujarat University**, v. 1, n. 2, p. 51–54, 2022. DOI: 10.47413/vidya.v1i2.60

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

PICCA, G.; GONI-URTIAGA, A.; SOSA, L. L. de; RODRIGUEZ, M. V. C.; NAVARRO, I. F.; PLAZA, C.; PANETTIERI, M. Sustainability in urban agriculture: The role of biochar in enhancing the productive capacity of compost-based growing media for rooftop farming**. Urban Forestry & Urban Greening**, v. 107, p. 128774, 2025. DOI: 10.1016/j.ufug.2025.128774

PUTRA, N. R.; RIZKIYAH, D. N.; YUNUS, M. A. C.; AZIZ, A. H. A.; YASIR, A. S. H. M.; IRIANTO, I.; JUMAKIR, J.; WALUYO, W.; SUPARWOTO, S.; QOMARIYAH, L. Valorization of peanut skin as agricultural waste using various extraction methods: A review. **Molecules**, v. 28, n. 11, p. 4325, 2023. DOI: 10.3390/molecules28114325

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Campinas, v. 8, n. 1, p. 1–26, 2010.

SANTOS, A. L. A. **Aplicação de técnicas alternativas no tratamento de água subterrânea para comunidades rurais.** 2025. 119f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2025.

SANTOS, A. L. A.; ARAÚJO, T. D.; MICHELAN, D. C. de G. S. Toxicity of sludge from water treatment using natural coagulants/floculants. **Journal of Water Process Engineering**, v. 77, p. 108644, 2025. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.108644

SAWARGAONKAR, G.; PASUMARTHI, R.; KALE, S.; CHOUDHARI, P.; RAKESH, S.; MUTNURI, S.; SINGH, A.; SUDINI, H.; RAMARAJU, M.; SINGH, R.; PADHEE, A. K.; JAT, M. L. Valorization of peanut shells through biochar production using slow and fast pyrolysis and its detailed physicochemical characterization. **Frontiers in Sustainability**, v. 5, p. 1417207, 2024. DOI: 10.3389/frsus.2024.1417207

SGHAIER, A. H.; TARNAWA, Á.; KHAEIM, H.; KOVÁCS, G. P.; GYURICZA, C.; KENDE, Z. The effects of temperature and water on the seed germination and seedling development of rapeseed (Brassica napus L.). **Plants**, v. 11, n. 21, p. 2819, 2022. DOI: 10.3390/plants11212819

SHYAM, S.; AHMED, S.; JOSHI, S. J.; SARMA, H. Biochar as a Soil amendment: implications for soil health, carbon sequestration, and climate resilience. **Discover Soil**, v. 2, n. 1, p. 18, 2025. DOI: 10.1007/s44378-025-00041-8

SILVA, J. G.; LOPES, K. P.; PAIVA, F. J. S.; RODRIGUES, M. H. B. S.; NOBREGA, J. S. Effect of the substrate and containers in the initial growth of seedlings of Physalis peruviana L. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 8, p. 314, 2018. DOI: 10.5539/jas.v10n8p314

SILVA, J. L. da; BUENO, A. B.; SOUZA, D. M. de; MODOLO, R. C. E.; KAPPLER, G.; MORAES, C. A. M. Uso de biocarvão como substrato na produção de mudas a partir de duas biomassas diferentes. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 18, n. 53, p. 237-248, 2022. DOI: 10.3895/rts.v18n53.15768

SILVA, L. E. D.; MARCATTO, G. Z.; GALLO, A. D. S.; FORTI, V. A. Plants extracts as germination and seedling establishment promoters in lettuce and maize. **Ciência Rural**, v. 54, n. 11, p. e20230436, 2024. DOI: 10.1590/0103-8478cr20230436

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

SOUZA, C. de O.; PASSOS, R. R.; GONÇALVES, E. de O. Biochar as substrate conditioner for the production of seedling of native forest species. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 9, p. 1-10, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i9.43156

SOUZA, D. C. S. de; FREIRE, J. V. de A.; SILVA, L. F. da; SILVA, P. P. da; ANTUNES, L. F. de S.; SOUTO, A. G. de L.; VALENÇA, R. D.; FERNANDES, B. C. C.; LIMA, A. E. de O.; SANTOS, J. C. S. dos; SILVA, D. V.; CARMO, F. R. do; MELO, R. L. F. Carbon Sequestration with Biochar: Global Trends, Knowledge Gaps, and Future Directions. **ACS ES&T Water**, v. 5, n. 11, p. 6479-6502, 2025. DOI: 10.1021/acsestwater.5c00606

SUN, L. M.; MCINTYRE, S. R.; IACOMI, P.; EVERDEN, K.; WILLIAMS, P. T.; ZONG, S.; LIU, X.; ZHU, X.; YANG, Y.; LI, S.; WU, G.; HUANG, F.; LIU, L.; YUAN, X.; ZHANG, H.; ZHANG, J.; YANG, H.; CHEN, W.; SUN, H.; CAO, Y.; FENG, D.; CHENG, Z.; ZHANG, X.; LIANG, D.; LIU, S.; ZHANG, X.; ZHU, X.; ZHANG, Y. S.; YAN, Y.; ZHA, J.; QIAO, Y.; SOLTANI, S. M.; ZHANG, N.; YI, S.; WU, C. Biochar production, activation, and applications: a comprehensive technical review. **Carbon Capture Science & Technology**, p. 100421, 2025. DOI: 10.1016/j.ccst.2025.100421

SUO, B.; ZHANG, H.; LIU, Y.; et al. Effects of temperature on seed germination and early seedling growth of soybean (Glycine max). **Canadian Journal of Plant Science**, v. 103, n. 1, p. 13–28, 2023. DOI: 10.1139/cjps-2022-0111

UN. United Nations. **Sustainable Development Goals.** The United Nations in Brazil, 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 03 de fevereiro de 2026.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Ecological Effects Test Guidelines: OPPTS 850.4200 – Seed Germination/Root Elongation Toxicity Test.** Washington, D.C.: U.S. EPA, April 1996.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Ecological Effects Test Guidelines: OPPTS 850.4000 – Background and Special Considerations: Tests with Terrestrial and Aquatic Plants, Cyanobacteria, and Terrestrial Soil-Core Microcosms.** Washington, D.C.: U.S. EPA, June 2012.

VILAKAZI, S. P.; MUCHAONYERWA, P.; BUTHELEZI-DUBE, N. N. Characteristics and liming potential of biochar types from potato waste and pine-bark. **PLoS ONE**, v. 18, n. 2, e0282011, 2023. DOI: 10.1371/journal.pone.0282011

WDOWIAK, A.; PODGÓRSKA, A.; SZAL, B. Calcium in plants: an important element of cell physiology and structure, signaling, and stress responses. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 46, art. 108, 2024. DOI: 10.1007/s11738-024-03733-w

XIAO, L.; LIN, Y.; CHEN, D.; ZHAO, K.; WANG, Y.; YOU, Z.; ZHAO, R.; XIE, Z.; LIU, J. Maximizing crop yield and water productivity through biochar application: A global synthesis of field experiments. **Agricultural Water Management**, v. 305, p. 109134, 2024. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109134

YOUNG, B. J.; RIERA, N. I.; BEILY, M. E.; BRES, P. A.; CRESPO, D. C.; RONCO, A. E. Toxicity of the effluent from an anaerobic bioreactor treating cereal residues on Lactuca sativa. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 82, p. 182–186, 2012. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2011.09.019

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ZHAO, Y.; LI, X.; LI, Y.; BAO, H.; XING, J.; ZHU, Y.; NAN, J.; XU, G. Biochar acts as an emerging soil amendment and its potential ecological risks: a review. **Energies**, v. 16, n. 1, p. 410, 2022. DOI: 10.3390/en16010410

ZOU, Z.; FAN, L.; LI, X.; DONG, C.; ZHANG, L.; ZHANG, L.; FU, J.; HAN, W.; YAN, P. Response of plant root growth to biochar amendment: a meta-analysis. **Agronomy**, v. 11, n. 12, p. 2442, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11122442

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.