

TRATAMENTO SORTIVO DA VINHAÇA COM CINZA VEGETAL PARA APLICAÇÃO NA FERTIRRIGAÇÃO

JULIANA GILBERT PESSOA¹, LINO CARLOS SITEO², JOSIANE DE LIMA SOUZA³, ROSELENA FAEZ⁴, CLAUDINEI FONSECA SOUZA⁵

¹ Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Anhanguera Km 174 - Zona Rural - Cep 13604-900 – Araras – SP - Brasil, ORCID 0009-0000-1809-2116 juliana@ufscar.br.

² Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Anhanguera Km 174 - Zona Rural - Cep 13604-900 – Araras – SP - Brasil, ORCID 0009-0003-2171-0044 linocs@estudante.ufscar.br.

³ Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Educação, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Anhanguera Km 174 - Zona Rural - Cep 13604-900 – Araras – SP - Brasil, ORCID 0000-0002-0013-8603 josianels2@gmail.com.

⁴ Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Educação, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Anhanguera Km 174 - Zona Rural - Cep 13604-900 – Araras – SP - Brasil, ORCID 0000-0003-1263-7837 faez@ufscar.br.

⁵ Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Anhanguera Km 174 - Zona Rural - Cep 13604-900 – Araras – SP - Brasil, ORCID 0000-0001-9501-0794 cfsouza@ufscar.br.

RESUMO: A produção sucroenergética, essencial ao agronegócio brasileiro, gera grandes volumes de resíduos, entre eles a vinhaça, efluente líquido rico em nutrientes e frequentemente aplicado como fertilizante. Outro resíduo relevante é a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), que apresenta propriedades alcalinizantes e adsorventes. Este estudo avaliou o uso da CBCA como adsorvente no tratamento da vinhaça, buscando melhorar sua estabilidade química e seu aproveitamento na fertirrigação. O experimento foi realizado no Laboratório de Física de Solo, no Centro de Ciências Agrárias, da UFSCar, seguiu um delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2×2 , avaliando dois tipos de CBCA (lavada e não lavada) e duas doses (2,5 g e 5,0 g), com três repetições. A CBCA foi adicionada a 100 mL de vinhaça in natura e agitada por 72 horas. Medições de pH e condutividade elétrica (CE) foram feitas aos 24, 48 e 72 horas. Os resultados mostraram que a CBCA aumentou o pH e a CE, promovendo maior estabilidade química. Conclui-se que a CBCA é uma alternativa potencial, de baixo custo, para tratar a vinhaça e promover práticas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: adsorção, cana-de-açúcar, sustentabilidade agrícola.

SORPTION TREATMENT OF VINASSE WITH PLANT ASH FOR APPLICATION IN FERTIGATION

ABSTRACT: Sugar-energy production, which is essential to agribusiness in Brazil, generates large volumes of waste, including vinasse, a nutrient-rich liquid effluent often applied as fertilizer. Another significant byproduct is sugarcane bagasse ash (CBCA), which has alkaline and adsorptive properties. In this study, the use of CBCA as an adsorbent in vinasse treatment was evaluated, with the goal of improving its chemical stability and potential for fertigation. The experiment was conducted at the Soil Physics Laboratory of the Center for Agricultural Sciences, UFSCar, following a completely randomized design with a 2×2 factorial scheme. Two types of CBCA (washed and unwashed) and two doses (2.5 g and 5.0 g) were tested, with three replications. CBCA was added to 100 mL of raw vinasse and stirred for 72 hours. The pH and electrical conductivity (EC) were measured at 24, 48, and 72 hours. The results showed that CBCA increased both the pH and the EC, promoting greater chemical stability. CBCA is a potential low-cost alternative for treating vinasse and promoting more sustainable agricultural practices.

Keywords: Adsorption, Sugarcane, Agricultural sustainability

Recebido em 05/11/2025 e aprovado para publicação em 10/12/2025

DOI: <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2025v40p65-71>

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), com destaque para o Estado de São Paulo, que concentra a maior parte da produção nacional. A expansão dessa cultura foi acelerada na década de 1970, com a implementação do Programa Nacional do Alcool (Proálcool), o que fortaleceu o setor sucroenergético e aumentou significativamente a geração de subprodutos, como a vinhaça, um resíduo líquido resultante da destilação do etanol (Araújo e Araújo Sobrinho, 2024). Estima-se que, para cada litro de etanol produzido, sejam gerados entre 12 e 18 litros de vinhaça, que é rica em matéria orgânica e nutrientes.

A fertirrigação com vinhaça tem se destacado como uma prática sustentável e economicamente viável, uma vez que promove a reciclagem de nutrientes e reduz a dependência de fertilizantes minerais (Soares *et al.*, 2024). A aplicação de 150 m³ ha⁻¹ de vinhaça pode fornecer ao solo cerca de 61 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 343 kg ha⁻¹ de potássio e 108 kg ha⁻¹ de cálcio, o que contribui para o crescimento das plantas e para a melhoria das propriedades físico-químicas do solo (Parsaei; Kiani; Karimi, 2019). No entanto, o manejo inadequado da vinhaça pode causar sérios impactos ambientais, como a acidificação do solo, a contaminação do lençol freático e a eutrofização de corpos d'água (Carrilho; Labuto; Kamogawa, 2016).

Torna-se, portanto, essencial desenvolver estratégias eficazes para o tratamento desse resíduo, visando mitigar seus efeitos nocivos. A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) surge como uma alternativa promissora, não apenas por sua elevada disponibilidade, mas também por suas propriedades químicas favoráveis. Rica em óxidos metálicos, como óxido de cálcio (CaO), magnésio (MgO), potássio (K₂O) e sílica (SiO₂), a CBCA apresenta características alcalinizantes e adsorventes (Santos, 2020).

Em relação à sua produção, estima-se que, no Brasil, sejam geradas aproximadamente 5 milhões de toneladas de CBCA por ano, resultantes da queima de cerca de 200 milhões

de toneladas de bagaço, subproduto fibroso obtido da moagem de aproximadamente 663 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra (Unica, 2025; Cana de açúcar, 2025). Para cada tonelada de bagaço seco queimado, são gerados cerca de 25 kg de cinza, valor que pode variar conforme a eficiência da combustão e o teor de umidade do material (Bayapureddy; Muniraj; Mutukura, 2024). Essa elevada disponibilidade da CBCA, aliada ao seu caráter residual, destaca o seu potencial para reaproveitamento em larga escala, principalmente em aplicações ambientais, como no pré-tratamento da vinhaça, correção da acidez do solo e recuperação de nutrientes (Santos, 2020).

Estudos demonstram que a aplicação da CBCA na vinhaça promove a correção da acidez, elevando o pH de valores geralmente inferiores a 4 para níveis próximos da neutralidade, reduzindo, assim, a toxicidade ao solo e ao meio ambiente (Chingono *et al.*, 2018). Portanto, o uso da vinhaça tratada com CBCA apresenta-se como uma alternativa técnica e ambientalmente viável para o reaproveitamento desses resíduos agroindustriais, sendo ambos provenientes da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, favorecendo sua integração em estratégias de aproveitamento sustentável de resíduos (Antonio; Faez, 2024).

Com base nesse cenário, este trabalho avaliou a eficácia da CBCA no tratamento da vinhaça, visando seu uso sustentável na fertirrigação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Física do Solo do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos - Campus Araras (CCA/UFSCar), no período de agosto de 2024 a janeiro de 2025. O delineamento experimental adotado foi fatorial 2×2, com três repetições por tratamento. Foram avaliados dois fatores principais: tipo de CBCA (lavada/seca e não tratada) e massa de CBCA (2,5 g e 5,0 g), com amostras de vinhaça *in natura* como adsorvato,

sendo todos os materiais fornecidos por unidades produtoras locais.

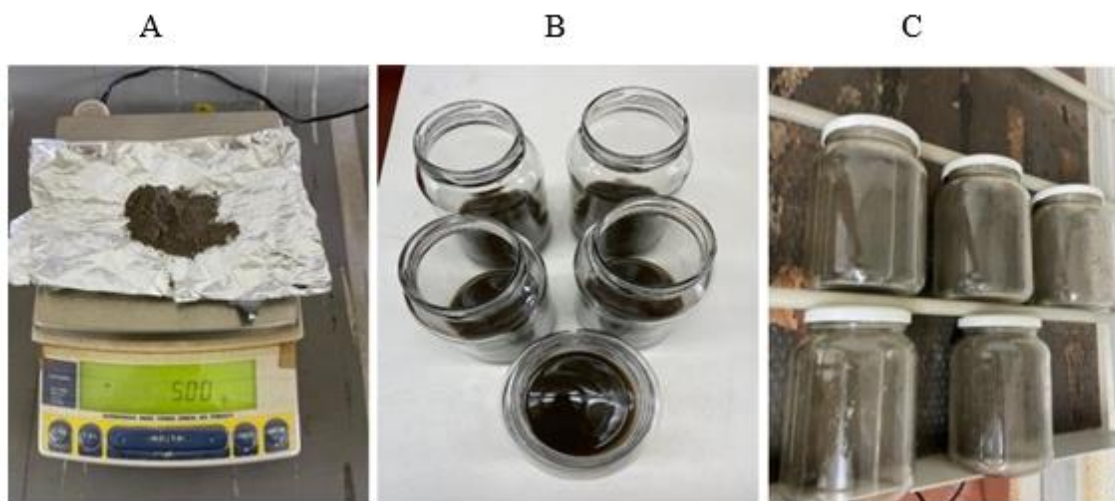
As CBCAs foram inicialmente lavadas a vácuo com água destilada (Milli-Q, Millipore), utilizando 1 L para aproximadamente 7,5 g de CBCA. Em seguida, foram secas em estufa com circulação e renovação de ar (modelo TE-394/1 - Tecnal) a 100 °C por 3 h, até atingir massa constante, conforme metodologia descrita por Antônio (2024). A partir desse lote preparado, foram pesadas alíquotas de 2,5 g e 5,0 g de CBCA lavada/seca e, paralelamente, as mesmas massas de CBCA não tratada foram utilizadas nos testes comparativos.

Cada amostra (em triplicata) consistiu da mistura de 100 mL de vinhaça *in natura* com a quantidade designada de CBCA, colocadas em frascos e mantidos sob agitação recíprocante (mesa agitadora Nova Técnica) a

150 rpm, durante 72 h. O processo compreendeu três ciclos de 24 h, com coletas de amostras após 24 h, 48 h e 72 h. Ao final de cada ciclo, a CBCA foi separada da vinhaça por centrifugação e filtragem, sendo a mesma vinhaça reutilizada para a batelada seguinte, porém com nova massa de CBCA.

As leituras de pH e condutividade elétrica (CE) foram realizadas antes do início do ensaio, ao final de cada ciclo de sorção e ao término das 72 h. Essas medidas permitiram acompanhar a evolução da neutralização da acidez e da mudança na ionização da solução ao longo do tempo. A eficácia do processo foi avaliada comparando-se os efeitos da massa de CBCA e do tempo de contato sobre o aumento do pH da vinhaça, com base em sua acidez inicial em cada ciclo. A Figura 1 apresenta os principais passos do ensaio de sorção.

Figura 1. Etapas do ensaio de sorção com CBCA: (A) pesagem da massa de CBCA; (B) vinhaça + adição de CBCA; (C) agitação recíprocante.



Fonte: Autoria própria (2025)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das cinzas em interação com a vinhaça foi fundamental para compreender o processo sortivo, identificar desafios e propor melhorias para otimizar o desempenho. Os testes realizados com CBCA *in natura* e CBCA previamente lavada e seca permitiram estabelecer as condições ideais, com base na comparação inicial da cinética utilizando 2,5 g de cinzas e, posteriormente, 5,0 g, de modo a analisarem os parâmetros de pH e CE das soluções.

Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam a variação do pH antes, durante e após o contato sortivo entre a vinhaça e a cinza, tanto *in natura* quanto lavada, utilizando-se massas de 2,5 g e 5,0 g do material. Observa-se um aumento gradual do pH, indicando que as cinzas exercem efeito alcalinizante sobre a vinhaça. Esse incremento no pH reflete a liberação de compostos alcalinos presentes nas cinzas, os quais interagem com os íons da vinhaça, modificando suas propriedades químicas (Antonio; Faez, 2024).

Tabela 1. Variação do pH antes, durante e depois do contato sortivo com diferentes massas de cinza *in natura* e cinza lavada.

Tratamento/Tempo	pH			
	0	24 h	48 h	72 h
Cinza <i>in natura</i> (2,5 g)	4,70 Ac	5,20 Cb	5,30 Cb	5,83 Ba
Cinza <i>in natura</i> (5,0 g)	4,70 Ad	5,50 Bc	6,10 Bb	6,33 Aa
Cinza lavada (2,5 g)	4,70 Ac	5,47 Bb	5,50 Cb	6,23 Aa
Cinza lavada (5,0 g)	4,70 Ac	5,80 Ab	6,33 Aa	6,13 Aa

Teste de Tukey aplicado nas colunas (letras maiúsculas) e nas linhas (letras minúsculas). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, ao nível de significância de 5%.

No tratamento com cinza *in natura* (2,5 g), o pH aumentou de 4,70 para 5,83 após 72 h. Esse aumento gradual sugere que a interação entre a vinhaça e a cinza *in natura* ocorreu de maneira constante ao longo do tempo, resultando em uma modificação progressiva do pH. Em comparação com a cinza *in natura* (5,0 g), o pH inicial também era 4,70, mas o aumento foi mais expressivo, atingindo 6,33 após 72 h. Esse resultado indica que a maior quantidade de cinza (5,0 g) gerou uma alteração mais significativa no pH da vinhaça, promovendo uma alcalinização mais pronunciada em comparação com a dose menor (2,5 g). Bega (2014), avaliando a aplicação de CBCA em latossolo com cultivo de cana-de-açúcar, observou que a saturação por bases aumentou em decorrência das doses crescentes de cinzas, reflexo direto da redução da acidez potencial do solo. Assim, esse comportamento sugere que a quantidade de cinza aplicada tem uma relação direta com a intensidade da modificação do pH, sendo que doses mais altas de cinza podem promover uma alteração mais significativa na acidez da vinhaça.

Nos tratamentos com cinza lavada/seca, os aumentos no pH também foram evidentes, com um comportamento gradual. A cinza lavada (2,5 g) apresentou uma variação do pH de 4,70 para 6,23 após 72 h, com um aumento mais expressivo em comparação à cinza *in natura*, sugerindo que a lavagem das cinzas pode reduzir a quantidade de compostos solúveis, fato esse que contribui para o aumento do pH. No caso da cinza lavada (5,0 g), o pH foi de 4,70 para 6,33 após 48 h, um aumento mais acentuado que o observado para os demais tratamentos, conforme comparações estatísticas. No entanto, após o ciclo sortivo de

72 h, ocorreu uma redução no valor de pH para 6,13, demonstrando um leve declínio no processo de neutralização. A redução do pH após 72 h, de 6,33 para 6,13, sugere o esgotamento dos cátions alcalinos solúveis inicialmente liberados pela cinza lavada, seguido da formação de compostos menos solúveis, o que promove a estabilização do sistema. Esse comportamento está de acordo com a dinâmica observada em cinzas de biomassa, cuja alcalinidade inicial tende a diminuir com o tempo devido à transformação dos cátions em formas menos disponíveis no meio reacional (Maj *et al.*, 2025).

Inicialmente, todos os tratamentos apresentaram condições homogêneas, conforme indicado pelos valores de pH semelhantes entre as amostras. No decorrer do tempo, observou-se que o aumento do pH foi mais expressivo nas primeiras 48 h, exceto para o tratamento com 2,5 g de CBCA *in natura*. Chingono *et al.* (2018), ao realizar um estudo cinético da interação entre CBCA e vinhaça para a remoção de DQO, observaram que o pH inicial de 3,50 elevou-se para 8,01 entre 4 e 6 h de contato, evidenciando que, além da massa do adsorvente, o tempo de contato também exerce influência direta na elevação do pH da vinhaça, Tabela 1.

Desse modo, os resultados indicam que o uso de cinzas, especialmente em maiores quantidades, exerce um impacto significativo na neutralização do pH da vinhaça, uma vez que a cinza *in natura* promoveu uma maior elevação, em comparação com a cinza lavada, no final do ciclo. Esses resultados são importantes para a aplicação da vinhaça tratada com cinzas em solos, pois a modificação do pH pode influenciar diretamente a disponibilidade

de nutrientes e a saúde do solo, sendo necessário um controle rigoroso para garantir que o pH não se torne excessivamente alcalino, o que poderia prejudicar o crescimento das plantas (Neina, 2019).

Em relação a análise da CE, Tabela 2, observou-se que em todos os tratamentos, ocorreu um aumento inicial após 24 h de contato, sugerindo uma interação significativa

entre os compostos presentes na cinza e os íons da vinhaça. Esse aumento é esperado, uma vez que as cinzas, tanto sem tratamento prévio quanto lavadas/secas, possuem minerais e compostos solúveis que são liberados para o meio aquoso, contribuindo para a elevação da condutividade elétrica, um indicativo de troca iônica entre os materiais (Rehl; Reimer; Rutherford, 2021).

Tabela 2. Variação da condutividade elétrica, em dS m^{-1} , antes, durante e depois do contato sortivo com diferentes massas de cinza *in natura* e cinza lavada.

Tratamento/Tempo	Condutividade elétrica (dS m^{-1})			
	0	24 h	48 h	72 h
Cinza <i>in natura</i> (2,5 g)	8,59 Ad	9,90 Aa	9,45 Ac	9,67 Ab
Cinza <i>in natura</i> (5,0 g)	8,59 Ac	9,74 Aa	9,19 Bb	9,14 Cb
Cinza lavada (2,5 g)	8,59 Ac	9,79 Aa	9,45 Ab	9,36 BCb
Cinza lavada (5,0 g)	8,59 Ac	9,87 Aa	9,51 Ab	9,49 ABb

Teste de Tukey aplicado nas colunas (letras maiúsculas) e nas linhas (letras minúsculas). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, ao nível de significância de 5%.

Os resultados indicam que, a partir de 48 h de contato sortivo, houve diferença estatística entre os tratamentos com cinza *in natura* em função da massa aplicada. Observou-se que o tratamento com menor massa (2,5 g) apresentou valores de CE superiores ao longo do período experimental, atingindo os maiores níveis até 72 h. No entanto, o tratamento com 5,0 g demonstrou uma tendência de estabilização da CE a partir do mesmo ponto. Esse comportamento pode estar relacionado a processos de adsorção iônica nas superfícies das partículas, à saturação da solução ou à precipitação de compostos menos solúveis ao longo do tempo (Mota; Villas Bôas; Sousa, 2006).

A partir de 48 h, as diferenças entre os tratamentos se tornaram mais evidentes, especialmente para a cinza lavada (5,0 g), que apresentou uma CE de $9,51 \text{ dS m}^{-1}$, superior à cinza *in natura* de mesma massa ($9,19 \text{ dS m}^{-1}$), com diferença estatística significativa. Isso sugere que, apesar da lavagem para remoção de sais solúveis, a cinza lavada ainda mantém íons liberáveis, especialmente em maiores quantidades, contrariando a expectativa de menor liberação de solutos (Quirantes *et al.*, 2016). Além disso, os tratamentos com cinza lavada apresentaram um comportamento mais uniforme ao longo do tempo, com menor

flutuação entre os intervalos avaliados. Esse padrão pode indicar que o pré-tratamento de lavagem estabiliza a liberação iônica, embora não reduza necessariamente a concentração final de íons em solução, especialmente quando maiores quantidades de material são aplicadas (Jiang *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2016).

Os dados obtidos demonstram que a aplicação de cinzas como material sortivo modifica significativamente a composição iônica do meio, o que reforça a importância de se considerar tanto a dosagem quanto o pré-tratamento do material em aplicações voltadas ao controle da salinidade ou à remoção de íons em soluções aquosas (Buema *et al.*, 2021). De acordo com Antonio e Faez (2024), a direção do fluxo de nutrientes depende do gradiente de concentração entre o meio e o material sortivo: quando a concentração de nutrientes na solução é superior à presente nas cinzas, ocorre a sorção desses elementos; por outro lado, em concentrações mais baixas, há liberação de íons do material para o sistema. Nesse contexto, a interação entre a vinhaça e maiores quantidades de cinza pode resultar em um aumento mais expressivo da condutividade elétrica, indicando elevação na concentração de íons disponíveis, o que potencialmente altera as características químicas da vinhaça, incluindo o pH (Francisco *et al.*, 2016).

É notório que, os resultados apontam para a importância de controlar tanto o tipo quanto a quantidade de cinza utilizada, bem como o tempo de contato. O uso de cinzas *in natura* pode ser mais eficaz na modificação rápida das propriedades químicas da vinhaça, mas também apresenta uma maior variação no comportamento ao longo do tempo, o que pode exigir um monitoramento mais cuidadoso.

4 CONCLUSÕES

A aplicação de CBCA *in natura*, especialmente na dosagem de 5,0 g durante 72 h, demonstrou elevado potencial para o tratamento da vinhaça, promovendo significativa elevação do pH e estabilização da condutividade elétrica após 24 h de contato. Conclui-se que a CBCA é uma alternativa eficiente para a neutralização da acidez e o controle da salinidade da vinhaça, favorecendo seu reaproveitamento agrônômico de forma ambientalmente segura.

5 REFERÊNCIAS

- ANTONIO, M. M.; FAEZ, R. Unlocking agronutrient resources: sorption strategies for sugar-energy industry waste. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 356, article 120634, 2024.
- ARAÚJO, D. F. C.; ARAÚJO SOBRINHO, F. L. O setor sucroenergético brasileiro: a intervenção estatal como motor do desenvolvimento. **Revista Tocantinense de Geografia**, Araguaína, v. 13, n. 30, p. 173-200, 2024.
- BAYAPUREDDY, Y.; MUNIRAJ, K.; MUTUKURU, M. R. G. Enhancing material properties of agro-industrial waste sugarcane bagasse ash—Way towards sustainable development. **Sustainable Futures**, Amsterdam, v. 7, article 100154, 2024.
- BEGA, R. M. **Aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2014. Dissertação (Doutorado em Agronomia /Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2014.
- BUEMA, G.; HARJA, M.; LUPU, N.; CHIRIAC, H.; FORMINTE, L.; CIOBANU, G.; BUCUR, D.; BUCUR, R. D. Adsorption performance of modified fly ash for copper ion removal from aqueous solution. **Water**, Basel, v. 13, n. 2, article 207, 2021.
- CANA-DE-AÇÚCAR. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. Brasília, DF, v. 13, n. 1, p. 14-39, abr. 2025. Safra 2025/26, Primeiro levantamento. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt--br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-boletins/1o-levantamento-safra-2025-26>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- CARRILHO, E. N. V. M.; LABUTO, G.; KAMOGAWA, M. Y. Destination of vinasse, a residue from alcohol industry: resource recovery and prevention of pollution. In: HOSSAIN, M. A. (ed.). **Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention**. Amsterdam: Elsevier, 2016. p. 21-4.
- CHEN, X.; BI, Y.; ZHANG, H.; WANG, J. Chlorides removal and control through water-washing process on MSWI fly ash. **Procedia Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 31, p. 560-566, 2016.
- CHINGONO, K. E.; SANGANYADO, E.; BERE, E.; YALALAA, B. Adsorption of sugarcane vinasse effluent on bagasse fly ash: a parametric and kinetic study. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 224, p. 182-190, 2018.
- FRANCISCO, J. P.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, L. D. B.; SILVA, J. G. B. Monitoramento da condutividade elétrica e pH da solução do solo sob diferentes doses de aplicação de vinhaça. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 23, n. 6, p. 552-561, 2016.

JIANG, J.; TIE, Y.; DENG, L.; CHE, D. Influence of water-washing pretreatment on ash fusibility of biomass. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 200, p. 125-135, 2022.

MAJ, I.; NIESPOREK, K.; PŁAZA, P.; MAIER, J.; ŁÓJ, P. Biomass ash: a review of chemical compositions and management trends. **Sustainability**, Basel, v. 17, n. 11, article 4925, 2025.

MOTA, P. R. D.; VILLAS BÔAS, R. L.; SOUSA, V. F. Concentração de sais da solução avaliada pela condutividade elétrica na zona radicular do crisântemo sob irrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 4, p. 532–542, 2006.

NEINA, D. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. **Applied and Environmental Soil Science**, New Jersey, v. 2019, p. 1-9, 2019.

PARSAEE, M.; KIANI, M. K. D.; KARIMI, K. A review on biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 122, p. 117-125, 2019.

QUIRANTES, M.; CALVO, F.; ROMERO, E.; NOGALES, R. Soil-nutrient availability affected by different biomass-ash applications.

Journal of Soil Science and Plant Nutrition, Temuco, v. 16, p. 159-163, 2016.

REHL, E.; REIMER, K. B.; RUTHERFORD, P. M. Mobility of biomass ash constituents as influenced by pretreatment and soil - An artificial weathering study. **Waste Management**, Amsterdam, v. 121, p. 186-197, 2021.

SANTOS, I. W. S. **Viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da vinhaça de usinas de álcool para a produção de energia**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

SOARES, A. A. V. L.; PRADO, R. M.; BERTANI, R. M. A.; SILVA, A. P. R.; DEUS, A. C. F.; KANO, C.; FURLANETO, F. P. B. Contribution of using filter cake and vinasse as a source of nutrients for sustainable agriculture - A review. **Sustainability**, Basel, v. 16, n. 13, article 5411, 2024.

UNICA. **Balanço de Safra - 2024/2025**. São Paulo: UNICA, 2025. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=169>. Acesso em: 4 ago. 2025.