

CINZA DE CALDEIRA PROVENIENTE DA QUEIMA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CAVACO DE EUCALIPTO NA ADUBAÇÃO DA COUVE (*Brassica oleracea* var. *acephala*)

Boiler ash from sugarcane bagasse and eucalyptus wood chips as fertilizer for kale
(*Brassica oleracea* var. *acephala*)

Ceniza de caldera procedente de la combustión de bagazo de caña de azúcar y astillas de eucalipto en la fertilización de la col (*Brassica oleracea* var. *acephala*)

DOI: 10.23900/artefactum.v25i1.2644

Submitted on: 2.26. 2026

Accepted on: 3.13. 2026

Published on: 3.30.2026

Lourena Rios Tibery

Mestranda em Engenharia Química

E-mail: lourenart@gmail.com

Fabício Pelizer Almeida

Doutor em Estudos Ambientais e Geotecnologias

E-mail: fabricao.almeida@uniube.br

Harielly Marianne Costa Marques

Doutora em Agronomia

E-mail: harielly.marques@uniube.br

Euclides Antônio Pereira de Lima

Doutor em Engenharia Química

E-mail: euclides.lima@uniube.br

Rogério Gonçalves Lacerda de Gouveia

Doutor em Agronomia

E-mail: rogerio.goncalves@uniube.br

RESUMO

A valorização agrônômica de resíduos agroindustriais tem assumido crescente relevância diante da necessidade de reduzir a dependência de insumos convencionais e ampliar a circularidade produtiva na agricultura. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso direto de cinza de caldeira proveniente da queima de bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto na adubação da couve (*Brassica oleracea* var. *acephala*), considerando seus efeitos agrônômicos e sua dimensão econômico-ambiental. A pesquisa foi conduzida em condições de campo, em delineamento inteiramente casualizado, com dois tratamentos e quatro repetições, comparando-se o manejo com cinza de caldeira ao manejo convencional. Realizaram-se análises químicas e granulométricas da cinza e do solo, análises foliares de macro e micronutrientes, ensaios bromatológicos e tratamento estatístico por análise de variância e teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os

resultados evidenciaram que o tratamento com cinza promoveu incremento significativo nos teores foliares de nitrogênio, fósforo, boro, cobre, ferro, manganês e zinco, sem prejuízo estatisticamente detectável da composição bromatológica da cultura. Do ponto de vista econômico, o manejo com cinza apresentou maior custo direto por canteiro, mas revelou potencial para atribuir função produtiva a um resíduo anteriormente associado a custos de destinação. Conclui-se que a cinza de caldeira apresenta potencial técnico para integrar estratégias de adubação da couve, desde que seu uso seja precedido de caracterização química e compatibilizado com as condições do solo e da cultura.

Palavras-chave: cinza de caldeira, couve, adubação alternativa, nutrição vegetal, resíduos agroindustriais.

ABSTRACT

The agronomic valorization of agro-industrial residues has gained increasing relevance due to the need to reduce dependence on conventional inputs and to promote more circular production systems in agriculture. Within this framework, this study aimed to assess the feasibility of the direct use of boiler ash derived from the combustion of sugarcane bagasse and eucalyptus wood chips in kale fertilization (*Brassica oleracea* var. *acephala*), considering both its agronomic effects and its economic-environmental dimension. The research was conducted under field conditions in a completely randomized design, with two treatments and four replications, comparing boiler ash management with conventional management. Chemical and granulometric analyses of ash and soil were performed, along with leaf analyses of macro- and micronutrients, bromatological assays, and statistical treatment through analysis of variance followed by Tukey's test at the 5% probability level. The results showed that the ash treatment significantly increased leaf contents of nitrogen, phosphorus, boron, copper, iron, manganese, and zinc, without statistically detectable impairment of the crop's bromatological composition. From an economic perspective, ash-based management showed a higher direct cost per bed, but also demonstrated potential to assign productive value to a residue previously associated with disposal costs. It is concluded that boiler ash has technical potential to be incorporated into kale fertilization strategies, provided that its use is preceded by chemical characterization and adjusted to soil and crop conditions.

Keywords: boiler ash, kale, alternative fertilization, plant nutrition, agro-industrial residues.

RESUMEN

La valorización agronómica de residuos agroindustriales ha adquirido creciente relevancia ante la necesidad de reducir la dependencia de insumos convencionales y de fortalecer sistemas productivos más circulares en la agricultura. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad del uso directo de ceniza de caldera procedente de la combustión de bagazo de caña de azúcar y astillas de eucalipto en la fertilización de la col (*Brassica oleracea* var. *acephala*), considerando sus efectos agronómicos y su dimensión económico-ambiental. La investigación se desarrolló en condiciones de campo, bajo un diseño completamente aleatorizado, con dos tratamientos y cuatro repeticiones, comparando el manejo con ceniza de caldera con el manejo convencional. Se realizaron análisis químicos y granulométricos de la ceniza y del suelo, análisis foliares de macro y micronutrientes, ensayos bromatológicos y tratamiento estadístico mediante análisis de

varianza y prueba de Tukey al 5% de probabilidad. Los resultados evidenciaron que el tratamiento con ceniza promovió incrementos significativos en los contenidos foliares de nitrógeno, fósforo, boro, cobre, hierro, manganeso y zinc, sin perjuicio estadísticamente detectable en la composición bromatológica del cultivo. Desde la perspectiva económica, el manejo con ceniza presentó mayor costo directo por cantero, pero mostró potencial para atribuir función productiva a un residuo previamente asociado a costos de disposición. Se concluye que la ceniza de caldera presenta potencial técnico para integrarse a estrategias de fertilización de la col, siempre que su uso esté precedido por caracterización química y sea compatible con las condiciones del suelo y del cultivo.

Palabras clave: ceniza de caldera, col, fertilización alternativa, nutrición vegetal, residuos agroindustriales.

1 INTRODUÇÃO

A crescente pressão por sistemas produtivos mais eficientes e ambientalmente responsáveis tem ampliado, no setor agroindustrial, o interesse por estratégias capazes de reduzir a dependência de insumos convencionais e, ao mesmo tempo, valorizar resíduos gerados nos próprios processos produtivos. No caso da agricultura, essa discussão é particularmente relevante porque a manutenção da fertilidade do solo, da produtividade das culturas e da qualidade ambiental depende de práticas que conciliem aporte adequado de nutrientes, conservação dos atributos edáficos e racionalidade no uso de recursos. Nesse contexto, o reaproveitamento agrônomo de resíduos agroindustriais tem sido progressivamente incorporado ao debate técnico como alternativa promissora para a construção de sistemas mais circulares e menos dependentes de fertilizantes minerais sintéticos (FAO, 2024; FREIRE et al., 2013).

Entre os resíduos com potencial de uso agrícola, destacam-se as cinzas vegetais oriundas da combustão de biomassa em caldeiras industriais. Esse material, gerado a partir da queima de resíduos lignocelulósicos como bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto, pode concentrar elementos de interesse agrônomo, especialmente potássio, cálcio, magnésio e fósforo, além de apresentar reação alcalina, o que sugere potencial para atuar tanto como fonte complementar de nutrientes quanto como insumo com efeito corretivo sobre solos ácidos. Revisões e estudos recentes convergem ao indicar que a aplicação de cinzas pode melhorar propriedades químicas do solo e favorecer o crescimento vegetal, embora os resultados dependam fortemente da composição do

resíduo, da dose empregada e das características do solo e da cultura avaliados (WANG et al., 2024; ROUHANI; PIDLISNYUK; AL SOUKI, 2024).

Esse potencial, contudo, não autoriza generalizações automáticas. A composição química das cinzas varia conforme a biomassa de origem, as condições de combustão, a granulometria do material e o modo de armazenamento, de modo que o valor agrônômico do resíduo precisa ser demonstrado experimentalmente em cada situação de uso. Em termos práticos, isso significa que a viabilidade agrícola das cinzas não deve ser presumida com base apenas em seu caráter residual ou em sua origem vegetal, mas avaliada a partir de evidências relacionadas ao sistema solo-planta, à disponibilidade efetiva de nutrientes e aos possíveis efeitos sobre o equilíbrio químico do ambiente de cultivo (WANG et al., 2024; ROUHANI; PIDLISNYUK; AL SOUKI, 2024).

No caso das hortaliças folhosas, a pertinência dessa avaliação é ainda maior. A couve (*Brassica oleracea* var. *acephala*) ocupa posição de destaque entre as hortaliças consumidas no Brasil e possui relevância nutricional, alimentar e comercial. Além disso, por integrar o grupo das brássicas, a cultura responde de modo sensível ao manejo da fertilidade do solo, o que a torna apropriada para estudos comparativos entre fontes convencionais e alternativas de adubação. Publicações técnicas do Instituto Agrônômico e da Embrapa assinalam que o desempenho da cultura depende de adequado manejo nutricional, calagem e adubação, reforçando a importância de investigar fontes complementares de nutrientes em condições de cultivo controladas e comparáveis (TRANI et al., 2015; EMBRAPA, 2025).

Sob a ótica ambiental, a discussão também é consistente. A valorização de resíduos agroindustriais por meio de sua reinserção em sistemas produtivos agrícolas dialoga com princípios da economia circular, especialmente no que se refere ao fechamento de ciclos de nutrientes, à redução de descartes e à diminuição da dependência de insumos externos. Em vez de tratar a cinza apenas como passivo operacional da geração de energia por biomassa, essa abordagem a considera como subproduto potencialmente útil, desde que sua aplicação seja tecnicamente segura e agronomicamente justificável (FAO, 2024).

Diante disso, este estudo parte da seguinte questão de pesquisa: a aplicação direta de cinzas de caldeira industrial, oriundas da combustão de biomassa vegetal, apresenta viabilidade técnica e pertinência agrônômico-ambiental como fonte alternativa de adubação no cultivo da couve? Com base nessa problemática, o objetivo deste trabalho foi avaliar a

viabilidade do uso direto de cinzas provenientes da queima de cavaco de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar como fonte de adubação no cultivo da couve, considerando seus efeitos sobre atributos químicos do sistema de cultivo e sobre a composição nutricional da planta, em comparação com o manejo convencional. Complementarmente, discutiu-se essa prática como estratégia de aproveitamento produtivo de resíduos agroindustriais em perspectiva de sustentabilidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FERTILIDADE DO SOLO E RECICLAGEM DE RESÍDUOS

A discussão contemporânea sobre sustentabilidade agrícola tem se deslocado de formulações excessivamente abstratas para abordagens centradas na eficiência do uso de recursos, na conservação da base edáfica e na redução de externalidades ambientais. No âmbito da fertilidade do solo, isso implica compreender que a produtividade não depende apenas do fornecimento isolado de nutrientes, mas de práticas capazes de manter o equilíbrio químico do sistema, preservar a capacidade produtiva do solo e reduzir perdas associadas ao manejo inadequado. Nesse cenário, a reciclagem de resíduos agrícolas e agroindustriais assume papel estratégico, pois permite reinserir nutrientes em ciclos produtivos e reduzir a lógica linear de extração, uso e descarte (FAO, 2024; FREIRE et al., 2013).

Essa perspectiva é coerente com recomendações agronômicas brasileiras que reconhecem a possibilidade de substituição total ou parcial da adubação mineral por fontes orgânicas ou residuais, desde que consideradas as características do material, do solo, do clima e da cultura. Em outras palavras, a sustentabilidade do manejo não decorre apenas da origem “natural” do insumo, mas de sua adequação técnica ao sistema de produção. Esse ponto é central do presente estudo, porque afasta interpretações simplistas segundo as quais todo resíduo orgânico ou vegetal seria, por si só, agronomicamente recomendável (FREIRE et al., 2013).

2.2 BIOMASSA ENERGÉTICA E GERAÇÃO DE CINZAS DE CALDEIRA

A expansão do uso energético da biomassa em sistemas agroindustriais aumentou a geração de resíduos sólidos resultantes da combustão, entre eles as cinzas de caldeira. Em cadeias produtivas que utilizam materiais lignocelulósicos, como bagaço de cana-de-açúcar e resíduos florestais, a produção de energia térmica e vapor constitui alternativa tecnicamente consolidada, mas gera subprodutos cuja destinação precisa ser equacionada de forma ambiental e economicamente racional. Nesse sentido, a cinza deixa de ser apenas resíduo operacional e passa a ser objeto de interesse técnico pela possibilidade de aproveitamento em outras etapas do ciclo produtivo.

A literatura recente reforça que cinzas de biomassa apresentam composição altamente variável, determinada pela matéria-prima utilizada, pela temperatura de combustão e pelo processo de coleta. Ainda assim, há convergência quanto ao fato de que esse material pode concentrar bases e nutrientes relevantes para o solo, o que fundamenta seu estudo como fertilizante alternativo ou condicionador químico. Assim, a relevância agrônômica das cinzas está menos em sua condição genérica de “resíduo” e mais em sua capacidade potencial de requalificação como insumo, desde que caracterizada e validada em contexto experimental específico (WANG et al., 2024; ROUHANI; PIDLISNYUK; AL SOUKI, 2024).

2.3 CINZAS VEGETAIS COMO FONTE DE NUTRIENTES E CORRETIVO DO SOLO

O interesse pelo uso agrícola das cinzas vegetais decorre de sua composição química e de seus possíveis efeitos sobre a fertilidade do solo. Estudos recentes mostram que esse material pode atuar como fonte de potássio, cálcio, magnésio e fósforo, além de contribuir para elevação do pH e incremento da disponibilidade de bases, sobretudo em solos mais ácidos. Tais efeitos explicam por que as cinzas têm sido investigadas tanto como fertilizante complementar quanto como insumo com ação corretiva, especialmente em sistemas que buscam reduzir a dependência de fontes minerais convencionais (WANG et al., 2024; ROUHANI; PIDLISNYUK; AL SOUKI, 2024).

Ao mesmo tempo, o uso agrônômico desse material exige cautela. A literatura também assinala que as respostas do solo e das plantas à aplicação de cinzas variam de

acordo com a origem da biomassa, a dose empregada, a solubilidade dos compostos presentes e a interação com as condições edáficas locais. Em consequência, a viabilidade do uso agrícola das cinzas não deve ser tratada em termos universais, mas como hipótese a ser testada em função do material residual específico e da cultura analisada. Essa observação é particularmente importante no presente estudo, porque a mistura entre bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto pode gerar perfil químico distinto de outros tipos de cinza relatados na literatura (ROUHANI; PIDLISNYUK; AL SOUKI, 2024).

2.4 PERTINÊNCIA EXPERIMENTAL E POSICIONAMENTO DO ESTUDO

A couve (*Brassica oleracea* var. *acephala*) constitui cultura de elevada relevância alimentar e comercial no Brasil, destacando-se pelo valor nutricional de suas folhas e por sua ampla presença em sistemas de produção hortícola. Informações técnicas da Embrapa indicam que a hortalíça apresenta teores expressivos de fibras alimentares e minerais como cálcio, magnésio, manganês, fósforo e potássio, enquanto o boletim técnico do Instituto Agrônômico ressalta a importância do adequado manejo de calagem, adubação e nutrição mineral para o bom desempenho da cultura (EMBRAPA, 2025; TRANI et al., 2015).

Essa característica torna a couve uma planta-modelo adequada para estudos sobre fontes alternativas de adubação. Por ser uma hortalíça folhosa, a cultura responde de forma sensível às alterações na disponibilidade de nutrientes no sistema solo-planta, o que favorece análises comparativas entre tratamentos e permite observar reflexos tanto no desenvolvimento vegetativo quanto na composição mineral do tecido vegetal. Em termos metodológicos, isso amplia a capacidade indicativa da cultura para avaliação de insumos alternativos, especialmente em experimentos voltados à análise de viabilidade agrônômica (ROY et al., 2006; TRANI et al., 2015).

Embora o aproveitamento agrícola de cinzas de biomassa venha recebendo atenção crescente, a literatura ainda apresenta uma lacuna importante entre o reconhecimento genérico de seu potencial e a validação experimental de materiais residuais específicos em culturas específicas. Parte dos estudos se concentra em revisões gerais, aplicações em solos florestais, avaliações em espécies distintas ou discussões amplas sobre circularidade de nutrientes, sem detalhar adequadamente o comportamento agrônômico de cinzas provenientes de combinações particulares de biomassa em sistemas hortícolas de

interesse alimentar (ROUHANI; PIDLISNYUK; AL SOUKI, 2024; FAO, 2024).

É exatamente nesse ponto que o presente trabalho se posiciona. Ao analisar o uso direto de cinzas de caldeira originadas da combustão de bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto, comparando essa prática ao manejo convencional no cultivo da couve, a pesquisa contribui para uma lacuna aplicada na interface entre fertilidade do solo, reciclagem de resíduos agroindustriais e produção de hortaliças. A originalidade do estudo, portanto, não está em uma afirmação genérica sobre sustentabilidade, mas na verificação experimental da viabilidade agrônômica de um resíduo específico, em um sistema de cultivo específico, com implicações práticas para o uso produtivo de subprodutos da bioenergia.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Esta pesquisa caracteriza-se como estudo aplicado, de abordagem quantitativa, com delineamento comparativo em condições de campo, voltado à avaliação do uso direto de cinzas de caldeira como fonte alternativa de adubação no cultivo da couve (*Brassica oleracea* var. *acephala*). O experimento foi conduzido em propriedade rural localizada no município de Uberlândia, Minas Gerais, pertencente à empresa Folha D'Água Cultivo Hidropônico Ltda., situada na Rodovia BR-455, sentido Uberlândia-Campo Florido, zona rural, nas coordenadas geográficas -19.064291 e -48.313587.

As cinzas utilizadas no experimento foram provenientes da combustão de bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto em caldeira industrial de empresa parceira. O material foi transportado por caminhão tipo *roll-on*, acompanhado de documentação fiscal e manifesto de transporte de resíduos, sendo posteriormente armazenado próximo à área experimental e protegido com lona para evitar excesso de umidade antes da aplicação.

O estudo foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com dois tratamentos e quatro parcelas de observação por tratamento. Cada parcela experimental foi demarcada no interior dos canteiros de cultivo, que constituíram a base física de aplicação dos manejos. Cada parcela foi composta por 12 plantas de couve, totalizando 48 plantas por tratamento e 96 plantas no conjunto experimental.

O cultivo foi implantado em solo natural, sob espaçamento de 0,30 m × 0,30 m entre

plantas, em canteiros com dimensões de 1,0 m de largura por 50,0 m de comprimento. A área experimental foi organizada em dois sistemas de manejo: (i) tratamento com cinza de caldeira, com aplicação direta de cinzas oriundas da combustão de bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto; e (ii) tratamento convencional, com uso de fertilizante mineral NPK 20-05-20 associado à cama de frango (Figura 1).

Figura 1. Implantação de mudas de couve (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) em sistema de cultivo com cobertura do solo por *mulching* plástico.



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Na implantação dos tratamentos, os canteiros destinados ao manejo com cinza receberam 280 kg de cinza por canteiro. Por sua vez, os canteiros submetidos ao manejo convencional receberam 5 kg de NPK 20-05-20 e 280 kg de cama de frango por canteiro. Para fins metodológicos, registra-se que a aplicação dos insumos foi operacionalizada por canteiro, ao passo que as avaliações foram conduzidas a partir das parcelas internas demarcadas para observação experimental.

3.2 CONDUÇÃO DO CULTIVO, COLETAS E PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

Após o preparo da área experimental e a implantação dos canteiros, foram transplantadas mudas de couve tipo manteiga, conduzidas em solo natural sob irrigação por gotejamento. O sistema de cultivo utilizou cobertura plástica do solo (*mulching*), com a finalidade de auxiliar na conservação da umidade, reduzir a emergência de plantas daninhas e proteger fisicamente a superfície do solo.

Durante a condução experimental, ambos os tratamentos receberam fertirrigação

semanal, com aplicação de 2 kg de NPK 4-14-8 e 1 kg de ureia a cada sete dias. Em razão dessa condição de manejo, a comparação entre os tratamentos deve ser interpretada como contraste entre sistemas de adubação diferenciados no preparo dos canteiros, com suplementação nutricional comum ao longo do ciclo, e não como comparação entre uso exclusivo de cinza e ausência de fertilização mineral complementar.

A caracterização experimental envolveu análises do material residual utilizado como insumo, do solo da área cultivada e do tecido vegetal das plantas submetidas aos diferentes manejos. As cinzas de caldeira foram previamente analisadas quanto à composição físico-química e granulométrica, abrangendo macronutrientes, micronutrientes, matéria orgânica, carbono orgânico total, nitrogênio total, frações granulométricas e elementos-traço de interesse ambiental. O solo da área experimental também foi submetido à caracterização química e granulométrica, com determinação de matéria orgânica, fósforo disponível, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, cobre, zinco, manganês, boro, ferro, carbono orgânico total, nitrogênio total, relação C/N, umidade, sólidos totais e frações granulométricas.

Após 30 dias de cultivo, foram coletadas amostras foliares compostas a partir das parcelas experimentais de cada tratamento, com posterior encaminhamento para análise laboratorial. Nos tecidos vegetais, foram determinados os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês e zinco. Complementarmente, realizaram-se ensaios bromatológicos para determinação de extrato etéreo, fibra bruta, matéria pré-seca, matéria mineral, proteína bruta e umidade/voláteis.

As análises laboratoriais seguiram métodos de rotina adotados por laboratórios especializados, com base em protocolos técnicos reconhecidos para avaliação de fertilidade do solo, caracterização de resíduos, análise de tecido vegetal e ensaios bromatológicos. Os relatórios laboratoriais indicam o emprego de procedimentos referenciados por instituições como Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Embrapa e Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), além de metodologias padronizadas específicas para análises químicas e bromatológicas.

Os dados obtidos foram organizados por variável e por tratamento e submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando-se o delineamento adotado e as parcelas de observação estabelecidas em cada manejo. Quando identificado efeito significativo do fator tratamento, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para fins analíticos, as amostras foliares foram constituídas de forma composta no âmbito de

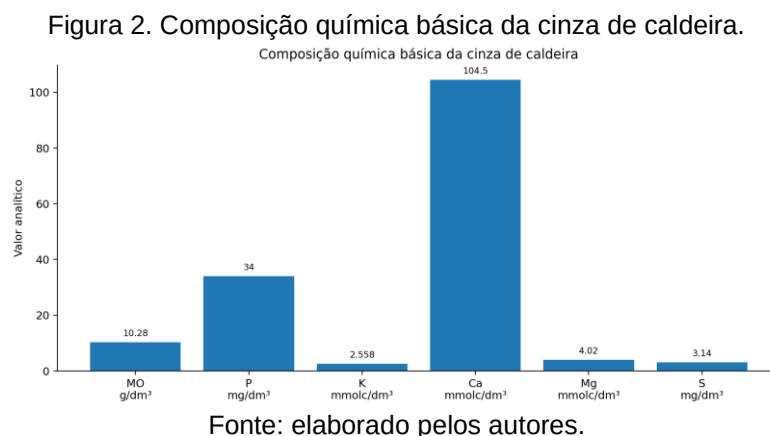
cada parcela experimental, preservando a estrutura de observação adotada no estudo.

Embora o experimento tenha fornecido base empírica consistente para comparação entre os manejos avaliados, alguns limites metodológicos devem ser considerados na interpretação dos resultados. A suplementação nutricional comum aos dois tratamentos ao longo do ciclo restringe a análise ao contraste entre estratégias de adubação de base sob condução compartilhada, e não ao efeito isolado da cinza. Ainda assim, o conjunto de análises realizado sobre cinza, solo e tecido vegetal oferece suporte técnico para discutir a viabilidade agrônômica do uso da cinza de caldeira no cultivo da couve.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

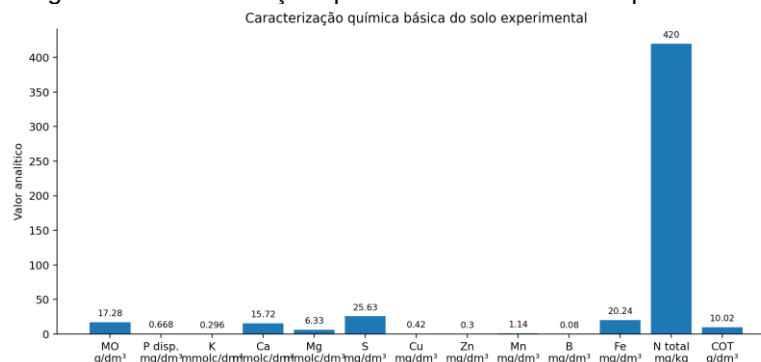
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DE CALDEIRA E QUÍMICA DO SOLO

As análises da cinza de caldeira indicaram presença de nutrientes de interesse agrônômico, com destaque para cálcio, potássio e fósforo, além de matéria orgânica e carbono orgânico total. Também foram reportados valores baixos ou abaixo do limite de quantificação para alguns elementos-traço de interesse ambiental, como mercúrio, arsênio, chumbo e cádmio, no âmbito da amostra analisada. Já o solo da área experimental apresentou, antes da implantação dos tratamentos, baixos teores de fósforo disponível e potássio, além de teores mensuráveis de cálcio, magnésio e enxofre, o que indica um ambiente em que a adição de fontes alternativas de nutrientes poderia produzir resposta agrônômica mensurável (Figura 2).



A elevada concentração de cálcio na cinza, associada à presença de fósforo, potássio, manganês, boro e nitrogênio total no material analisado, reforça o potencial de atuação desse insumo tanto no suprimento nutricional quanto na modificação do ambiente químico do solo. Ao mesmo tempo, os baixos teores iniciais de fósforo e potássio no solo experimental indicam uma situação em que a resposta da cultura à adubação de base tende a ser agronomicamente relevante (Figura 3). Os resultados de caracterização da cinza e do solo, quando analisados em conjunto, reforçam a consistência agrônômica do experimento. A cinza apresentou composição compatível com seu aproveitamento como insumo potencial, ao passo que o solo revelou condição inicial que tornava tecnicamente justificável a avaliação de uma fonte alternativa de nutrientes.

Figura 3. Caracterização química básica do solo experimental.



Fonte: elaborado pelos autores.

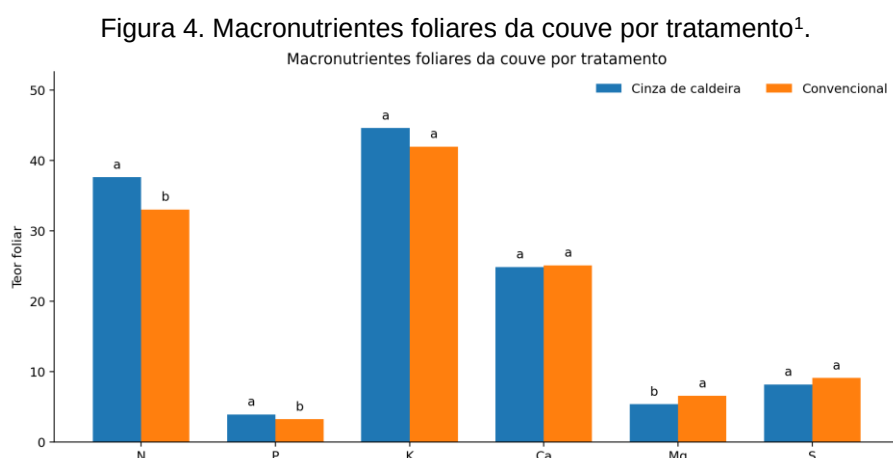
4.2 RESPOSTAS DA CULTURA AOS TRATAMENTOS

A elevação dos teores foliares de nitrogênio e fósforo no tratamento com cinza constitui resultado agronomicamente relevante, uma vez que esses nutrientes desempenham funções centrais no crescimento e no metabolismo vegetal. O nitrogênio participa da constituição de compostos orgânicos essenciais, estando diretamente relacionado à formação de tecidos, ao crescimento vegetativo e à expansão da área foliar, enquanto o fósforo atua em processos de transferência de energia, divisão celular e desenvolvimento da planta.

Em culturas folhosas, como a couve, o suprimento adequado desses elementos tende a favorecer o vigor vegetativo e o desempenho fisiológico da parte aérea, que corresponde justamente ao órgão de interesse comercial. Os resultados obtidos sugerem

que, nas condições do experimento, a aplicação da cinza contribuiu para aumentar a disponibilidade ou a assimilação de nitrogênio e fósforo no sistema solo-planta, repercutindo positivamente no estado nutricional da cultura.

Por outro lado, a ausência de diferença estatística para potássio, cálcio e enxofre indica que o uso da cinza não alterou de forma decisiva esses teores foliares em relação ao manejo convencional. Esse comportamento deve ser interpretado à luz do próprio desenho experimental, uma vez que ambos os tratamentos receberam suplementação nutricional via fertirrigação durante a condução da cultura. Assim, os contrastes observados tendem a refletir sobretudo o efeito diferencial da adubação de base, e não uma oposição entre uso de cinza e ausência de fertilização mineral complementar. Nessa perspectiva, o experimento não demonstrou superioridade generalizada da cinza para todos os macronutrientes, mas evidenciou resposta mais consistente para nitrogênio e fósforo no contexto do manejo adotado (Figura 4).



¹Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

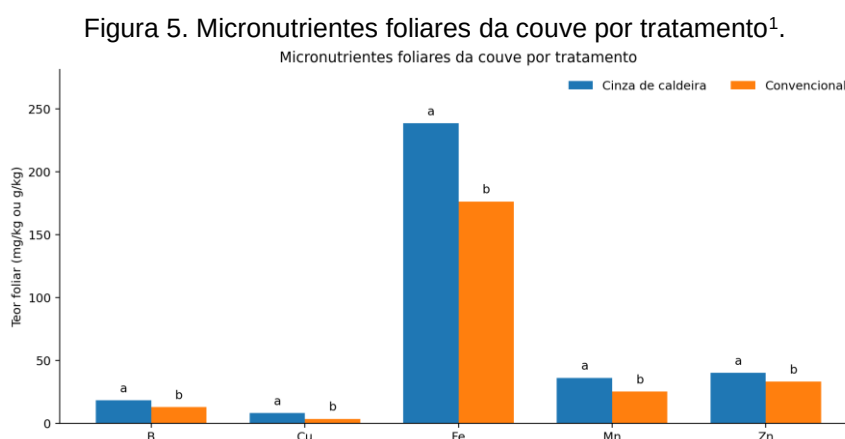
Fonte: elaborado pelos autores.

A redução relativa do magnésio no tratamento com cinza também merece destaque. Embora esse comportamento não comprometa, por si só, a viabilidade agrônômica do manejo, ele sugere alteração nas relações de equilíbrio entre cátions no ambiente radicular. A literatura agrônômica registra que potássio, cálcio e magnésio mantêm interações competitivas no solo e na absorção pelas plantas, de modo que o aumento relativo de um desses elementos pode influenciar a disponibilidade e o aproveitamento dos demais.

Em estudo com milho, Andreotti *et al.* (2001) observaram que o aumento da

saturação por bases e da adubação potássica interferiu nos teores foliares de cálcio e magnésio, evidenciando antagonismos nutricionais no sistema. De forma convergente, Carvalho et al. verificaram, em maracujazeiro-amarelo, resposta dos teores foliares à interação entre adubação potássica, cálcica e magnesiana, reforçando que o comportamento desses nutrientes não é linear nem independente. Assim, o decréscimo relativo de magnésio observado no presente estudo reforça a interpretação de que a resposta à cinza foi seletiva e dependente da dinâmica de interação entre os elementos presentes no sistema solo-plantas (ANDREOTTI et al., 2001; CARVALHO et al., 2001; SOUSA; LOBATO, 2004).

Os resultados referentes aos micronutrientes foliares evidenciaram resposta mais expressiva do tratamento com cinza de caldeira em comparação ao manejo convencional. Verificaram-se teores significativamente superiores de boro, cobre, ferro, manganês e zinco nas folhas das plantas submetidas a esse manejo, o que revela efeito consistente da adubação de base sobre a composição mineral do tecido vegetal. Esse comportamento assume particular relevância agrônômica porque tais elementos, embora exigidos em menores quantidades, desempenham funções estruturais e metabólicas indispensáveis ao crescimento e ao funcionamento fisiológico das plantas (Figura 5).



¹Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: elaborado pelos autores.

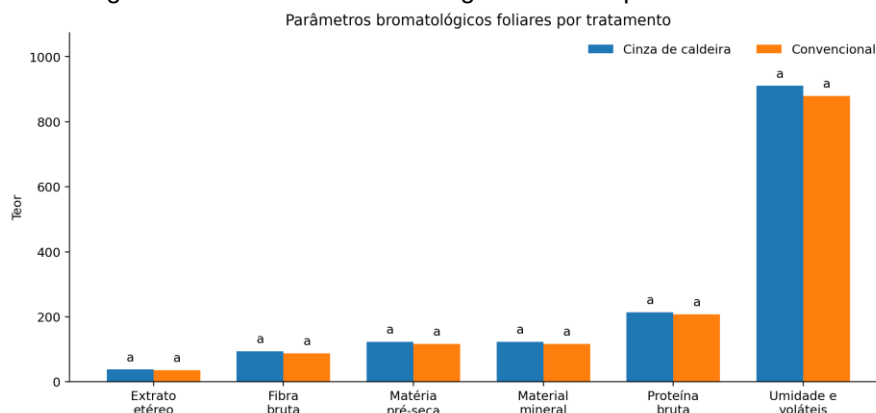
O boro participa de processos relacionados à integridade da parede celular, ao crescimento de tecidos meristemáticos e ao transporte de açúcares; o cobre, o ferro e o manganês atuam em sistemas enzimáticos e reações de oxirredução, com participação direta em processos fotossintéticos; e o zinco se associa à atividade enzimática, à síntese

de reguladores de crescimento e ao metabolismo de compostos nitrogenados. Nessa perspectiva, o incremento simultâneo desses micronutrientes sugere que a cinza, nas condições experimentais adotadas, funcionou como fonte efetiva desses elementos, com reflexos mensuráveis no estado nutricional da cultura (FAO, 2006; SOUSA et al., 2024).

Os resultados indicam resposta nutricional seletiva e coerente com a composição mineral do resíduo utilizado. Em sistemas hortícolas intensivos, nos quais o desempenho da parte aérea depende de suprimento equilibrado e contínuo de nutrientes, o adequado aporte de micronutrientes é decisivo para a manutenção da atividade metabólica, da integridade fisiológica e da qualidade do produto colhido. Assim, a superioridade estatística do tratamento com cinza para todos os micronutrientes avaliados reforça a interpretação de que o resíduo apresentou potencial de uso como componente de adubação de base, especialmente em contextos nos quais a reciclagem de subprodutos agroindustriais se articula à busca por maior eficiência nutricional do sistema solo-planta (FAO, 2006; SOUSA et al., 2024).

Em relação aos parâmetros bromatológicos, a ausência de diferença estatística entre os tratamentos para extrato etéreo, fibra bruta, matéria pré-seca, matéria mineral, proteína bruta e umidade/voláteis indica que a substituição parcial da adubação de base convencional pelo manejo com cinza não comprometeu a composição bromatológica da couve nas condições avaliadas (Figura 6). Esse resultado é relevante porque demonstra que o ganho observado na dimensão mineral da nutrição foliar não foi acompanhado por deterioração detectável da composição geral do tecido vegetal. Em termos agrônômicos, isso sugere que a inserção da cinza no sistema de manejo preservou a qualidade composicional da cultura, ao mesmo tempo em que favoreceu o acúmulo de micronutrientes essenciais.

Figura 6. Parâmetros bromatológicos foliares por tratamento¹.



¹Letras diferentes sobre as barras indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: elaborado pelos autores.

As diferenças numéricas observadas em proteína bruta, fibra bruta e matéria mineral, embora tendencialmente superiores no tratamento com cinza, não foram acompanhadas de significância estatística e, por isso, devem ser interpretadas com cautela. Ainda assim, quando examinadas em conjunto com o padrão de resposta dos nutrientes minerais, essas tendências reforçam a hipótese de que o resíduo contribuiu positivamente para o estado nutricional da planta sem impor penalização composicional mensurável. O resultado, portanto, não autoriza afirmar superioridade bromatológica da cinza, mas sustenta conclusão metodologicamente mais robusta: o uso desse material como componente da adubação de base mostrou-se compatível com a manutenção da qualidade da parte comercial da cultura (Figura 6).

De modo integrado, os resultados indicam que a aplicação de cinza de caldeira apresentou desempenho agrônomo promissor como componente de adubação de base no cultivo da couve. Embora o tratamento com cinza não tenha superado o convencional em todos os atributos avaliados, promoveu incremento significativo em elementos estratégicos, com destaque para nitrogênio, fósforo, boro, cobre, ferro, manganês e zinco, sem perda significativa dos teores de potássio, cálcio, enxofre e dos parâmetros bromatológicos. Configura-se, assim, um efeito positivo seletivo, mais pronunciado sobre a nutrição mineral foliar do que sobre a composição bromatológica da cultura.

Essa interpretação, contudo, deve ser situada nos limites do desenho experimental. Como ambos os tratamentos receberam fertirrigação semanal ao longo do ciclo, os efeitos observados não podem ser atribuídos de forma isolada à cinza, mas ao sistema de manejo

em que ela foi empregada como adubação de base. Ainda assim, o fato de o tratamento com cinza apresentar respostas superiores mesmo sob suplementação nutricional comum posterior reforça a plausibilidade agrônômica de seu uso.

Em síntese, os resultados sustentam a hipótese de que cinzas oriundas da queima de bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto podem ser tecnicamente aproveitadas no cultivo da couve, desde que precedidas de caracterização química e inseridas em manejo agronomicamente controlado. A principal contribuição do estudo não reside em considerar a substituição irrestrita da adubação convencional, mas em demonstrar que o resíduo pode integrar estratégias de nutrição da cultura com resposta positiva sobre o seu estado nutricional e sem comprometimento detectável da composição bromatológica foliar.

4.3 VIABILIDADE ECONÔMICO-AMBIENTAL DO USO DA CINZA DE CALDEIRA

Como se observa na Tabela 1, a avaliação econômico-ambiental do uso da cinza de caldeira revelou comportamento distinto daquele verificado no manejo convencional, embora sem diferença expressiva no custo direto por canteiro. No sistema tradicional, o custo de formação do canteiro foi estimado em R\$ 56,40, considerando a aplicação de 5 kg de NPK e 280 kg de cama de frango. No tratamento com cinza, adotou-se como referência a aplicação de 280 kg de cinza associada à manutenção de 280 kg de cama de frango, resultando em custo total de R\$ 56,00 por canteiro. Nessa condição, o uso da cinza apresentou valor econômico praticamente equivalente ao sistema convencional, indicando possibilidade de substituição parcial da fração mineral do manejo sem elevação relevante do custo direto de implantação.

Tabela 1. Síntese comparativa dos custos do manejo convencional e do aproveitamento da cinza de caldeira

Indicador	Base de cálculo	Valor
Custo do canteiro convencional	5 kg de NPK + 280 kg de cama de frango	R\$ 56,40
Custo da cinza por canteiro	280 kg de cinza	R\$ 42,00
Custo do canteiro com cinza	280 kg de cinza + 280 kg de cama de frango	R\$ 56,00

Fonte: elaborado pelos autores.

A leitura econômica do material, entretanto, não deve ser limitada à comparação estrita dos valores monetários por canteiro. A equivalência observada entre os dois sistemas indica que a cinza de caldeira pode ser incorporada ao manejo como insumo

alternativo sem comprometer a racionalidade econômica da prática adotada pelo produtor. Em vez de representar aumento expressivo de custo, sua utilização mostrou-se compatível com o padrão de investimento já realizado na adubação convencional, o que reforça sua viabilidade como componente complementar da fertilização.

Sob o ponto de vista agrônomo, essa interpretação torna-se ainda mais relevante quando se considera a composição da cinza analisada, caracterizada pela presença de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes. Destacaram-se, particularmente, os teores de cálcio e potássio, além da contribuição de magnésio, o que confere ao material potencial para atuar como fonte mineral complementar na fertilidade do solo. Ao mesmo tempo, o baixo teor de nitrogênio indica que a cinza não deve ser interpretada como substituta integral do fertilizante mineral formulado, mas sim como insumo de uso parcial e tecnicamente articulado ao manejo já empregado na propriedade.

A dimensão ambiental reforça essa compreensão. A cinza analisada neste estudo é oriunda da queima de biomassa vegetal, especificamente bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto, e seu aproveitamento agrícola representa alternativa de maior valor funcional quando comparada à simples condição de resíduo sem uso agrônomo definido. Quando quimicamente caracterizada e utilizada de forma compatível com as exigências da cultura e com os atributos do solo, sua aplicação favorece a reinserção de nutrientes no sistema produtivo e se alinha aos princípios da economia circular, ao promover a valorização de um subproduto com potencial de retorno ao agroecossistema.

Nesse sentido, a viabilidade econômico-ambiental da cinza de caldeira não se expressa como vantagem financeira ampla e imediata, mas como possibilidade concreta de integrar custo equivalente, função agrônoma e aproveitamento sustentável de material residual em um mesmo arranjo técnico. Os resultados obtidos indicam que, nas condições avaliadas, a substituição parcial da adubação mineral comercial pela cinza pode ser realizada sem alteração substancial do custo direto por canteiro, ao mesmo tempo em que amplia a inserção de estratégias sustentáveis no manejo da fertilidade.

Em síntese, os resultados demonstram que a cinza de caldeira apresentou desempenho econômico compatível com o sistema convencional na condição experimental analisada. Embora não se configure como substituta integral da adubação tradicional, seu uso mostrou potencial para compor estratégias de fertilização com coerência agrônoma e relevância ambiental, associando aproveitamento de subproduto, manutenção da

viabilidade econômica do manejo e fortalecimento de práticas alinhadas à circularidade produtiva.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que a cinza de caldeira proveniente da queima de bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto apresentou viabilidade agrônômica como componente de adubação de base no cultivo da couve, promovendo incremento significativo em nutrientes foliares estratégicos, especialmente nitrogênio, fósforo, boro, cobre, ferro, manganês e zinco, sem prejuízo estatisticamente detectável da composição bromatológica da cultura. Esses resultados demonstram que o reaproveitamento do resíduo pode contribuir positivamente para o estado nutricional das plantas, desde que sua utilização seja precedida de caracterização química e inserida em manejo tecnicamente controlado.

Do ponto de vista econômico-ambiental, a cinza não se mostrou mais vantajosa em termos de custo direto imediato por canteiro quando comparada ao sistema convencional adotado. Ainda assim, seu aproveitamento revelou potencial para reduzir a lógica de descarte de um subproduto industrial, conferir função produtiva a um material anteriormente associado a custo de destinação e favorecer estratégias mais circulares de uso de recursos no sistema agroindustrial.

Dessa forma, o estudo evidencia que a cinza de caldeira pode integrar práticas de fertilização com consistência técnica, desde que observadas as condições de dose, composição do material, exigências da cultura e atributos do solo. Sua principal contribuição não reside na substituição irrestrita da adubação convencional, mas na demonstração de que resíduos agroindustriais podem ser reinseridos no sistema produtivo com resposta agrônômica favorável e com potencial de racionalização ambiental. Como implicação aplicada, os resultados reforçam a importância de estudos que articulem fertilidade do solo, nutrição vegetal e sustentabilidade produtiva, ampliando as bases para o uso tecnicamente seguro de subprodutos da bioenergia na horticultura.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da UNIUBE, à UNIUBE - Universidade de Uberaba, à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais FAPEMIG (Processos: MPR-01119-16; APQ-01203-23), à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação.

REFERÊNCIAS

- ANDREOTTI, M. *et al.* Crescimento do milho em função da saturação por bases e da adubação potássica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 145-150, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/3SZBCSXVxqhY7ZYw8xfv7Mb/>. Acesso em: 16 jan. 2026.
- CARVALHO, A. J. C. *et al.* Teores de nutrientes foliares no maracujazeiro-amarelo associados à estação fenológica, adubação potássica e lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 403-407, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/b6JyJ6rFzgSzHCcwvGPFvZD/>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- EMBRAPA. Couve. Brasília, DF: **Embrapa**, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/couve>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- FAO. **Circular Economy: Waste-to-Resource**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/land-water/overview/onehealth/circular/en/>. Acesso em: 18 ago. 2025.
- FAO. **Food safety in a circular economy**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/food-safety/scientific-advice/food-safety-in-a-circular-economy/en>. Acesso em: 18 ago. 2025.
- FREIRE, L. R. *et al.* **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/963089/1/ManualdecalagemeadubacaoRJ2013.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2025.
- LEHMUSTO, J. *et al.* Ashes from challenging fuels in the circular economy. **Waste Management**, [s. l.], v. 177, p. 211-231, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.01.051>. Acesso em: 21 ago. 2025.
- MAJ, I. *et al.* Biomass ash: a review of chemical compositions and management trends. **Sustainability**, [s. l.], v. 17, n. 11, p. 4925, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17114925>. Acesso em: 20 fev. 2026.
- ROUHANI, A.; PIDLISNYUK, V.; AL SOUKI, K. Characterizations of ash derived from the crops' waste biomass for soil improvement and assisted phytoremediation. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 62, p. 103456, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103456>. Acesso em: 10 set. 2025.
- ROY, R. N. *et al.* **Plant nutrition for food security: a guide for integrated nutrient management**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006. Disponível em: https://www.fao.org/fileadmin/templates/soilbiodiversity/Downloadable_files/fpnb16.pdf. Acesso em: 20 ago. 2025.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2004. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/555355/1/Cerrado-Correcao-solo-adubacao-ed-02-8a-impressao-2017.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.

TRANI, P. E. *et al.* **Couve de folha: do plantio à pós-colheita**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2015. (Boletim Técnico IAC, 214). Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/media/publicacoes/iacbt214.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.

WANG, R. *et al.* Biomass ash as soil fertilizers: supercharging biomass accumulation by shifting auxin distribution. **Chemosphere**, [s. l.], v. 357, p. 141910, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141910>. Acesso em: 20 jan. 2026.