

TATIANE CRISTOVAM FERREIRA

**USO DAS CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOSSÓLIDO NO
MANEJO NUTRICIONAL DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)**

Botucatu

2021

TATIANE CRISTOVAM FERREIRA

**USO DAS CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOSSÓLIDO NO
MANEJO NUTRICIONAL DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre
em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Fernando Broetto

Coorientador: Prof. Dr. Saulo P. Sebastião
Guerra

**Botucatu
2021**

F383u

Ferreira, Tatiane Cristovam

Uso das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido
no manejo nutricional do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) /

Tatiane Cristovam Ferreira. -- Botucatu, 2021

111 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Fernando Broetto

Coorientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra

1. *Phaseolus vulgaris* L. 2. Resíduos. 3. Biomassa. 4. Cinza.
5. Biossólido. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: USO DAS CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIODSÓLIDO NO MANEJO NUTRICIONAL DO FEJÓEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)

AUTORA: TATIANE CRISTOVAM FERREIRA

ORIENTADOR: FERNANDO BROETTO

COORDINADOR: SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

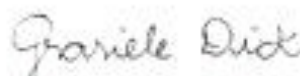
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. FERNANDO BROETTO (Participação Virtual)
Química e Bioquímica / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. HUMBERTO DE JESUS EUFRAIDE JUNIOR (Participação Virtual)
Pós-Doutorando - Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrômicas - UNESP



Prof.ª Dr.ª GRASIELE DICK (Participação Virtual)
Pós-Doutoranda - PPG/Engenharia Florestal / Universidade Federal de Santa Maria

Botucatu, 30 de julho de 2021

Aos meu país, **Roseani Aparecida Crístovam** e
Waldecir Ferreira, aos meus irmãos, por tudo que sempre
foram e são para mim,
por acreditarem no meu sonho e sonharem junto, e
estarem sempre ao meu lado.
A Deus e a Virgem Santíssima por conduzir e iluminar meus passos,
me dando sabedoria e paciência.

Dedico,

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo Dom da vida e por essa oportunidade engrandecedora e cheia de aprendizado e perseverança. À nossa senhora, minha mãe e rainha que sempre cuidou dos meus passos, me colocando embaixo do seu manto.

Aos meus amados pais, Roseani Aparecida Cristovam e Waldecir Ferreira, aos meus irmãos, Thiago Ferreira e Rodrigo Cristovam, que mesmo distante, se fizeram sempre presentes me apoiando incondicionalmente, se doando e me ajudando a colocar os tijolinhos para construir minha carreira e tornar possível a realização de cada sonho imaginado.

Ao Prof. Dr. Fernando Broetto, pelos ensinamentos, pela confiança, por acreditar no meu potencial, pelos conselhos, orientação, por sempre ser tão solícito e por sempre fazer o seu máximo para ajudar.

Ao Prof. Dr. Saulo Guerra, pela coorientação, prontidão e por todos os conselhos, suporte e apoio durante essa jornada.

À toda equipe do Laboratório de Bioquímica vegetal (Jonath, Irineu, Alessandro, Edilson e Dariane), pela colaboração, incentivo, auxílio durante todo o período da realização de cada etapa dessa pesquisa.

Aos meus amigos que tive o privilégio de conhecer por meio da pesquisa e que se tornaram mais que colegas de trabalho acadêmico. Em especial a Mara Lúcia, que nunca mediu esforços para me ajudar e sem ela teria sido muito difícil realizar tudo que realizei e não teria chegado até aqui. Ela foi meu apoio e força em todos os momentos, a Jessica pelas conversas, companheirismo e amizade, a Alessandra pelas risadas e colaboração em tantos momentos, a Leticia pelo tesouro de amizade que é, a Amanda pelas várias tardes me aguentando na estatística, a Gabi que mesmo longe sempre esteve presente, ao Marcelo que nunca mediu esforços para me ajudar, nunca negando nenhum pedido se quer. A todos meus agradecimentos profundos pela conclusão desse sonho.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), pela oportunidade de participar do curso de pós-graduação. A todo departamento de Bioquímica e Química, por todo suporte e recursos disponibilizado para condução desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos concedida para o desenvolvimento do mestrado.

Meus sinceros agradecimentos a cada um de vocês que me apoiaram e me motivaram nessa trajetória tão importante da minha vida.

RESUMO

Essa pesquisa teve como objetivos o estudo de respostas metabólicas e fisiológicas em plantas cultivadas em sistema de ambiente protegido. O delineamento experimental foi em bloco casualizados em esquema fatorial (2x4+1), sendo 9 tratamentos com incorporação de resíduo de cogeração (cinzas da queima do bagaço de cana-de-açúcar, CBC) associado com o biossólido (BS) e plantas cultivadas com a adubação recomendada. Os tratamentos aplicados foram o T₁ (5 t ha⁻¹ de cinza); T₂ (5 t ha⁻¹ cinza e 2,5 t ha⁻¹ de biossólido); T₃ (5 t ha⁻¹ de cinza e 5 t ha⁻¹ biossólido); T₄ (5 t ha⁻¹ de cinza e 10 t ha⁻¹ biossólido); T₅ (10 t ha⁻¹ de cinza); T₆ (10 t ha⁻¹ de cinza e 2,5 t ha⁻¹ de biossólido); T₇ (10 t ha⁻¹ de cinza+5 biossólido); T₈ (10 t ha⁻¹ de cinza+ 10 t ha⁻¹ biossólido) e T₉ (adubação comercial). As plantas foram avaliadas aos 35 e 70 dias após a emergência sendo medidos o conteúdo relativo de água (CRA), perda de eletrólitos, fotossíntese líquida, condutância estomática, trocas gasosas, proteínas solúveis totais, atividade das enzimas nitrato redutase, antioxidativas superóxido dismutase, catalase, peroxidase e teor de açúcares totais e parâmetros nutricionais. Também foram avaliados os teores de silício em tecidos da raiz e nos grãos. A fertilidade do solo e o teor de silício foram avaliados aos 70 dias após a incubação dos resíduos + calagem, e ao final do experimento. Ao longo do experimento foram feitas coletas da solução do solo (semanalmente), sendo medidos pH, condutividade e parâmetros nutricionais da solução. Também foi realizado o monitoramento da condutividade do solo. A avaliação global das plantas revelou que a associação dos resíduos apresentou efeito sobre o desenvolvimento das plantas, acúmulo de biomassa, produção e aporte nutricional. As doses de cinza testadas não apresentaram influência sobre a produtividade, com efeito somente para o biossólido, com uma produtividade de 1216 kg ha⁻¹ para maior dose de biossólido. As doses de biossólido apresentaram efeito principalmente sobre as variáveis área foliar, massa seca, fotossíntese, biomassa alocada nas folhas, com uma relação crescente no estágio vegetativo e decrescente no estágio reprodutivo. As doses de cinzas apresentaram efeito principalmente sobre morfologia radicular, tendo inibido seu desenvolvimento, decorrente do seu efeito pozolânico. As doses de cinzas proporcionaram maior acúmulo de Si nos grãos, na raiz e no solo, a associação das doses também disponibilizaram um teor maior de N, P, K, Mg e Ca comparado ao tratamento com adubação comercial. O uso de cinzas oriundas da cogeração de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido, alteraram parâmetros fisiológicos importantes da cultura do feijoeiro, com reflexo no seu desenvolvimento e produção vegetal, resultando no incremento para os parâmetros de altura, diâmetro do caule, área foliar e massa seca e folhas.

Palavras Chave: nutrição mineral; cultivos agrônômicos; resíduos agrícolas.

ABSTRACT

This research aimed to study metabolic and physiological responses in plants grown in a protected environment system. The experimental design was a randomized block in a factorial scheme (2x4+1), with 9 treatments incorporating cogeneration residue (ash from burning sugarcane bagasse, CBC) associated with biosolids (BS) and cultivated plants with the recommended fertilization. The treatments applied were T1(5 t ha⁻¹ of ash); T2 (5 t ha⁻¹ ash and 2.5 t ha⁻¹ biosolids); T3 (5 t ha⁻¹ of ash and 5 t ha⁻¹ biosolids); T4 (5 t ha⁻¹ ash and 10 t ha⁻¹ biosolid); T5 (10 t ha⁻¹ ash); T6 (10 t ha⁻¹ of ash and 2.5 t ha⁻¹ of biosolids); T7 (10 t ha⁻¹ ash+5 biosolids); T8 (10 t ha⁻¹ of ash+ 10 t ha⁻¹ biosolid) and T9 (commercial fertilization). Plants were evaluated at 35 and 70 days after emergence, measuring relative water content (RAC), electrolyte loss, liquid photosynthesis, stomatal conductance, gas exchange, total soluble proteins, nitrate reductase enzyme activity, antioxidative superoxide dismutase, catalase, peroxidase, and total sugar content and nutritional parameters. Silicon contents in root tissues and grains were also evaluated. Soil fertility and silicon content were evaluated 70 days after the incubation of residues + liming, and at the end of the experiment. During the experiment, collections of the soil solution were made (weekly), and pH, conductivity, and nutritional parameters of the solution were measured. Monitoring of soil conductivity was also carried out. The global assessment of the plants revealed that the association of residues affected plant development, biomass accumulation, production and nutritional intake. The tested ash doses did not influence the yield, with effect only for biosolids, with the produce of 1216 kg ha⁻¹ for the highest biosolid dose. Biosolids doses are affected mainly on the variables leaf area, dry mass, photosynthesis, biomass allocated to leaves, with an increasing relationship in the vegetative stage and decreasing in the reproductive stage. Ash doses affected mainly on root morphology, having inhibited its development, due to its pozzolanic effect. The ash doses provided greater accumulation of Si in the grains, root, and soil, the combination of doses also provided a higher content of N, P, K, Mg, and Ca compared to the treatment with commercial fertilization. The use of ash from cogeneration of sugarcane bagasse and biosolids, changed important physiological parameters of the bean crop, with reflection on its development and plant production, increasing the parameters of height, stem diameter, leaf area, and dry mass and leaves.

Keywords: mineral nutrition; agronomic crops; agricultural waste.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	15
CAPÍTULO 1 – Aplicação de bagaço de cana incorporado do biossólido na fertilidade do solo e nutrição do feijoeiro	20
1.1 Introdução.....	22
1.2 Material e Métodos	25
1.2.1 Instalação do experimento	25
1.2.2 Delineamento experimental e tratamentos	27
1.2.3 Caracterização dos resíduos.....	28
1.2.4 Monitoramento da solução do solo.....	29
1.2.5 Análise do tecido vegetal.....	30
1.2.6 Análise do solo.....	30
1.2.7 Análise estatística.....	30
1.3 Resultados	31
1.3.1 Macro e micronutriente na solução do solo	33
1.3.2 Teor de nutrientes no solo.....	34
1.3.3 Características nutricionais das plantas de feijoeiro	41
1.3.4 Discussão	45
1.4 Conclusão	46
Referências.....	47
 CAPÍTULO 2 – Resposta do feijoeiro em solo com diferentes doses de cinza de cogeração de bagaço de cana -de açúcar e biossólido.....	 50
2.1 Introdução.....	52
2.2 Material e métodos.....	54
2.2.1 Instalação do experimento.....	55
2.2.2 Delineamento experimental e manejo da cultura	57
2.2.3 Parâmetros avaliados	57
2.2.4 Características dos resíduos.....	58
2.2.5 Análise estatística	60
2.3 Resultados.....	60
2.3.1 Parâmetros biométricos.....	60
2.3.2 Índices de crescimento.....	66

2	Avaliações morfológicas do sistema radicular.....	69
2.3.4	Avaliações fisiológicas e bioquímicas das plantas de feijoeiro	74
2.3.5	Teor de silício	83
2.3.6	Índices de rendimento da cultura	85
2.4	Discussão	85
2.5	Conclusão	94
	Referências.....	95
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
	REFERÊNCIAS.....	101

INTRODUÇÃO GERAL

Devido à grande geração de resíduos e o avanço no debate voltados às questões ambientais, diversos segmentos têm se concentrado na busca de alternativas para tornar seus processos mais sustentáveis, principalmente buscando atender agendas e políticas ambientais, além de proporcionar redução no uso de seus insumos. Diante da necessidade de incentivar essas práticas cada vez mais tem se reconhecendo a importância do desenvolvimento sustentável, com isso, em 2015 os países membros das Nações Unidas firmaram uma nova política global; a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável a fim de elevar o desenvolvimento mundial e alavancar a qualidade de vida das pessoas (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015)

Isto posto, foram estabelecidos 17 ODS (Objetivos de Desenvolvimento sustentável), dentre esses o 12 (consumo e produção sustentáveis) estabelece a redução na geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. O objetivo é incentivar as empresas, prioritariamente, as grandes e transnacionais, a buscar práticas sustentáveis e a integrar informações a respeito da sustentabilidade em suas agendas internas (BRASIL, 2021).

Nesse sentido, o aproveitamento de resíduos tem se tornado uma prática frequente e essencial com o intuito de diminuir a problemática ambiental atrelada ao descarte desses materiais, além do desperdício de recursos como, a biomassa e dos nutrientes que podem ser disponibilizados por esses materiais, além do potencial de contaminação atrelado à disposição inadequada, que podem vir a gerar poluição dos recursos hídricos, pela lixiviação desses compostos e a degradação de solos.

Com destaque, o setor da agroindústria tem avançado no aproveitamento de resíduos, com a celulose, lignina, carbono, sílica, silício, inibidores, adsorventes e biocombustíveis, sendo utilizados para disponibilização de nutrientes, geração de energia e no controle de estresses abióticos

O Brasil é maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e principal exportador dos seus derivados, etanol e açúcar. O setor sucroalcooleiro é uma atividade crescente e se destaca principalmente pelo aspecto da autossuficiência energética da mesma maneira que seus subprodutos (SUGARCANE, 2019)

Segundo a CONAB (2021), a produção de cana-de-açúcar para a safra 2021 é estimada em 628,1 milhão de toneladas de cana-de-açúcar, sendo que cada tonelada

de cana processada pode gerar cerca 260kg de bagaço-de-cana e aproximadamente cerca 6,2 kg de cinzas após sua queima nas caldeiras (FIESP, 2002). Desta forma, a produção de cinzas tende a aumentar, podendo chegar em média a cerca de 3,8 milhões kg de cinza na referida safra, se o setor chegar a produzir o previsto.

O setor sucroalcooleiro é referência no aproveitamento dos seus resíduos, como a vinhaça, torta de filtro que já utilizados no fornecimento de nutrientes para solo e em cultivos, a palha e o bagaço que são reaproveitados na geração de energia das suas caldeiras, ou como mistura na ração animal (ASSAD, 2017).

Contudo, no que diz respeito a este setor, ainda há alguns problemas tanto na geração como na disposição de alguns resíduos, principalmente as cinzas do bagaço da cana- de-açúcar oriunda da queima desse material para geração de energia nas caldeiras. O uso de cinzas residuais no meio agrícola apresenta grande oportunidade para recuperação de nutrientes importantes, além de ser alternativa para mitigação do descarte desses resíduos (ZHANG; YAMASAKI; KIMURA, 2002).

A produção de energia a partir da combustão de biomassa gera uma grande quantidade de cinzas, as quais apresentam composição heterogênea qualitativa e quantitativa conforme a biomassa de origem bem como em função das diferentes temperaturas de carbonização. Suas propriedades físico-químicas são distintas e podem variar de acordo com parâmetros de queima e alterar sua eficiência nas diferentes aplicações (CHINDAPRASIRT; RATTANASAK, 2020) e conforme sua composição, pode apresentar quantidades relevantes de macro e micronutrientes (SEVERINO et al., 2006).

O processo de reaproveitamento das cinzas reduz a necessidade da utilização de fertilizantes comerciais. Alguns estudos também atestam que normalmente as cinzas possuem valores altos de pH, contendo nutrientes como P, K, S, Ca, Mg, Na, e micronutrientes considerados essenciais para o crescimento das plantas (ARRUDA, 2016). Anguissola, Silva, Botteschi (1999), também afirmam que as cinzas de caldeira podem ter em sua composição importantes nutrientes às plantas, como, Mg, P, K, Fe, Mn, Zn e Cu, além Ca, Fe, Mg e K. Chirenje e Lena (2006) indicam que o potássio pode ser considerado como o principal elemento da composição das cinzas oriundas da queima do bagaço de cana. Os cátions presentes nas cinzas reagem rapidamente com componentes ácidos no solo, levando a liberação de B na forma favorável para as plantas cultivadas (BASU et al., 2009).

As cinzas provenientes da queima de biomassas nas termoeletricas podem ser fontes de quase todos os nutrientes essenciais, sendo eficaz na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Esse resíduo também possui bases que servem para neutralizar a acidez do solo, funcionando como corretivo e seus efeitos variam dependendo do tipo de solo (OLIVEIRA et al., 2006). A adição de cinzas no solo tem a capacidade de elevar e neutralizar o pH, condição que resulta em modificações químicas devido a solubilização de K, Na e SO₄, resultante da dissolução de sais presentes nesses resíduos (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008).

Um dos elementos que torna as cinzas recomendáveis para aplicação na agricultura, além do potássio, é o silício na forma de silicato (SiO₂). Seu teor é influenciado pela quantidade e disponibilidade do silício presente no solo, sendo que as raízes das plantas o absorvem na forma de ácido monossilícico o qual após translocação para a parte aérea, acumula-se em forma amorfa (NORSURAYA; FAZLENA; NORHASYIMI, 2016). O silício acumulado no tecido vegetal, tem sido associado à diminuição do acamamento das plantas, tolerância a pragas, doenças e a deficiência hídrica (WANG, Y. et al., 2019). O seu acúmulo influencia de maneira positiva nas taxas de crescimento, desenvolvimento e rendimento de diversas culturas (ALVAREZ et al., 2018; NASCIMENTO et al., 2019).

Baseado nas práticas vigentes no Brasil, parte das cinzas geradas pelo setor agroindustrial vem sendo descartada em locais inadequados. A deposição desse resíduo em aterros municipais ou industriais, ou até mesmo aplicadas em plantios, é geralmente conduzida sem critério ou monitoramento adequado, desconsiderando aspectos físico-químicos e até presença significativa de metais pesados e seus efeitos nas plantas.

É possível que os metais pesados presentes nas cinzas (quando identificado) sejam provenientes do uso intensivo de fertilizantes fosfáticos, resíduos industriais, efluentes, lodo de esgoto e demais subprodutos oriundos das próprias usinas de açúcar, usados nos solos cultivados com cana-de-açúcar, podendo ser absorvido pelas culturas (YADAV; JAIN; RAI, 2019).

A destinação mais comum de cinzas tem sido a aplicação em solos das áreas plantadas com cana-de-açúcar e/ou incorporado a vinhaça e torta de filtro. Porém essa prática não é regulamentada pelas agências ambientais ou pelo Ministério da

Agricultura (MAPA) e, além disso, as avaliações a respeito das vantagens, desvantagens e efeitos que podem ocorrer no solo, na planta ou mesmo no rendimento industrial a partir da matéria-prima são limitadas e escassas.

Nesse contexto, compreender a morfologia das cinzas, sua composição química, persistência no solo e absorção pela planta é essencial para avaliar a viabilidade de sua aplicação em culturas de interesse agrônômico. Seu estudo pode colaborar para evitar o desequilíbrio nutricional e impactos ambientais que possam ocorrer no âmbito do solo, lençol freático, fauna e flora. Por outro lado, enquanto a cinza ainda tem sido pouco explorada quanto ao uso na agricultura, mesmo sendo uma alternativa para suas destinações, resíduos como o bio sólido, já são amplamente utilizados na fertilidade e como condicionantes do solo.

De acordo com Serrat et al. (2012), o bio sólido aplicado na agricultura, é uma destinação sustentável e ambientalmente correta, e ainda promove a reciclagem nutricional do solo, proporcionando benefícios ao manejo agrícola, e das características físico-química, biológicas do solo.

Por ser um recurso abundante em aspecto de nutrientes, microorganismos, nitrogênio e fósforo, o lodo se torna (bio sólido) um fator interessante do ponto de vista do desenvolvimento e produtividade das plantas. Dessa forma, quando processado e tratado, pode vir a ser um ótimo fertilizante agrícola (QUINTANA, 2006).

De acordo com Malta (2001), o lodo tem a capacidade de transformar e mudar as propriedades físicas do solo, contribuindo com a melhoria do solo de forma abrangente, como na qualidade da densidade, na porosidade, na retenção hídrica, na fertilidade, na elevação do pH, na diminuição do teor de alumínio trocável do solo, e ainda, aumenta a capacidade de troca de cátions (CTC). Portanto, assim como a cinza o bio sólido é considerado uma verdadeira fonte de nutriente, o que tem intensificado nos últimos anos sua aplicação na agricultura e os diversos estudos para avaliar o impacto da sua aplicação no solo e no desenvolvimento das plantas (CHIAN et al., 2020).

Outro aspecto a ser considerado, relaciona-se com a legislação ambiental. Para que esses resíduos sejam aproveitados em atividades agrícolas, há necessidade de cumprir as obrigações previstas no inciso II, do artigo 7º, da Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010). Dentro da PNRS, a cinza pode se enquadrar como um resíduo agrossilvopastoris, já que a classificação depende da sua origem, se enquadrando

como resíduo gerados a partir das atividades agropecuárias. E de acordo com a norma NBR/ABNT 10004/2004, as cinzas provenientes da queima do bagaço, estão estabelecidas quanto a periculosidade, como sendo um resíduo classe II A, pertencente ao grupo de não-inertes.

Por outro lado, o biossólido que também se enquadra como resíduo classe II A, já tem sua produção/aplicação testada e definida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e abastecimento (MAPA), regulamentando seu uso conforme a resolução Nº 49 de agosto de 2020 que define os critérios de sua aplicação, enquanto a como alternativa para fertilização e nutrição de solos ainda é pouco explorada.

Com base nas argumentações, este ensaio teve como objetivo principal, avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido nos parâmetros químicos do solo, além da disponibilização de N, P, K e Si e absorção pelas plantas. Também, avaliou-se o comportamento fisiológico, bioquímico, produtivo e morfologia das raízes na cultura do feijoeiro.

CAPÍTULO 1

APLICAÇÃO DE CINZA DE BAGAÇO DE CANA INCORPORADO COM BIOSSÓLIDO NA FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DO FEIJOEIRO

Resumo

O uso de resíduo agroindustriais no solo é uma alternativa para a destinação ambientalmente adequada e uma forma de manejo de resíduos, mas também uma fonte de nutrientes para o solo. Este estudo objetivou avaliar os efeitos da associação de doses de biossólido e cinza da queima do bagaço de cana na cultura do feijoeiro, sobre os parâmetros nutricionais e químicos do solo e da planta. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados no esquema fatorial $2 \times 4 + 1$, com quatro repetições. Os fatores consistiram em: duas doses de cinza (5 t e 10 t ha⁻¹) e 4 doses de biossólido (0, 2,5, 5, 10 t ha⁻¹) em dois estádios fenológicos, vegetativo(V4) e reprodutivo (R7). Os resultados evidenciaram que a aplicação dos resíduos no solo proporcionou melhor disponibilidade de macronutrientes secundários e micronutrientes essenciais para cultura do feijoeiro, mas baixa dos macronutrientes primários. Com relação ao efeito das doses na nutrição, independente do estágio, foi observado incremento para menor dose de cinza com biossólido. Indicando que dependendo da dose estipulada dos resíduos, esses podem ser complementar a necessidade nutricional da cultura.

Palavra-chave: lodo de esgoto; fertilidade do solo; resíduos.

Abstract

The use of agro-industrial residues in the soil is an alternative to environmentally adequate disposal and a form of waste management, but also a source of nutrients for the soil. This study aimed to evaluate the effects of the association of biosolids and ash from burning sugarcane bagasse in the bean crop on the nutritional and chemical parameters of the soil and the plant. The experimental design used was in randomized blocks in a 2x4+1 factorial scheme, with four replications. The factors consisted of two doses of ash (5 t and 10 t ha⁻¹) and 4 doses of biosolid (0, 2.5, 5, 10 t ha⁻¹) at two phenological stages, vegetative (V4) and reproductive (R7). The results showed that the application of residues to the soil provided better availability of secondary macronutrients and essential micronutrients for the bean crop, but low availability of primary macronutrients. Regarding the effect of doses on nutrition, regardless of the stage, an increase was observed for a lower dose of ash with biosolids. Indicating that depending on the stipulated dose of residues, these can complement the nutritional needs of the crop.

Keywords: sewage sludge; soil fertility; residues.

1.1 Introdução

A aplicação de resíduos na agricultura é uma prática que pode auxiliar nas propriedades físico-químicas dos solos, bem como ser fonte de nutrientes para culturas de interesse agrícola, aumentando a qualidade da produção e viabilidade econômica dos sistemas de produção (SELEIMAN; KHEIR, 2018). A utilização de resíduos como, cinza da queima do bagaço de cana e biossólido (lodo de esgoto) podem melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Além disso, pode melhorar a produtividade das culturas, reduzindo a aplicação de fertilizantes sintéticos, além de ser fonte de matéria orgânica (MO). Ressalta-se ainda que, o carbono aportado por esse composto desempenha papel essencial para o equilíbrio dos ecossistemas agrícolas, estimulando a atividade biológica, níveis de nutrientes e eficiência de uso da água pelas plantas.

Favare et al., (2020) argumentam que cinzas oriundas da queima do bagaço da cana têm despertado interesse pelo potencial como fertilizante, condicionante e possível uso na formulação de substratos. Dentre suas vantagens incluem-se a melhoria da estrutura física do solo resultante do aporte orgânico pelo resíduo que, por sua vez, aumenta a capacidade de retenção da água e nutrientes, além do fornecimento de macro e micronutrientes, quando comparado a fertilizantes convencionais.

Os principais nutrientes encontrados nas cinzas são os macronutrientes primários como fósforo (P) e potássio (K) e os secundários magnésio (Mg) e cálcio (Ca). Hale et al. (2020) corroboram com esses autores, reforçando que a aplicação de cinzas pode aumentar a disponibilidade do fósforo (P) no solo. Seleiman, Kheir (2018), verificaram que a aplicação de cinza ao solo, elevou o teor de P e K, enquanto os teores de N foram mais baixos comparado a solos que não receberam aplicação de cinzas.

Yamane (2013), estudou o efeito do bagaço da cana-de-açúcar no solo e descobriu que esse resíduo é benéfico, pois é uma grande fonte de potássio, fazendo com que haja um aumento nos teores de potássio trocável no solo. Além disso, Benbi et al. (2017) destacam que, as cinzas de bagaço podem apresentar teores de micronutrientes em excesso, como nos casos do Fe ($8690 \mu\text{g g}^{-1}$) e Mn ($192 \mu\text{g g}^{-1}$). Por outro lado, tem sido reportado que a aplicação de cinza em solos contaminados com metais pesados, age na imobilização de íons no solo, sendo eficaz na redução dos

teores de Cu, Ni, Pb. Porém, apresenta baixa eficácia na imobilização de Cd e Cr (NEGIM; SWEED, 2020).

De acordo com Osinubi e Eberemu (2013) a aplicação de cinza em um solo com alta concentração de hidróxido de ferro e alumínio influencia na mecânica do mesmo, com aumento na compactação e redução da condutividade hidráulica em tratamentos com 8% de cinza. Rai et al., 2019 também verificou um aumento da permeabilidade de solo conforme o aumento da adição cinza (2%) em solo derivado de xisto.

Segundo Durgude; Salunkhe e Patil (2019) plantas de trigo cultivadas em solos moderadamente alcalino com teor médio de carbono orgânico, alto teor de CaCO_3 , baixa disponibilidade de N, média disponibilidade de P, muito alto em K disponível e deficiente em Zn e Fe alcançaram maior produção de biomassa quando incorporado com cinzas comparado com tratamentos usando outros corretivos de solo.

Muitos estudos têm relatado a eficácia da cinza combinada com outros resíduos orgânicos, subprodutos do setor sucroalcooleiro (vinhaça, bagaço, palha, torta de filtro) ou, ainda, casca de arroz, turfa e biossólido quando aplicados aos solos. Devido a sua composição orgânica, biossólido também pode ser usado como fertilizante orgânico e/ ou condicionador de substratos (LOPES et al., 2018).

O lodo de esgoto tratado e estabilizado passa a ser denominado biossólido, geralmente descartado em aterros sanitários. A depender de sua concentração em patógenos e teor de metais, o mesmo é destinado a aplicação em solos como corretivo e/ou fertilizante em plantios (PAZ-FERREIRO et al., 2018). O uso agrônômico tem sido amplamente pesquisado, como uma das aplicações mais promissoras por vários aspectos, incluindo a incorporação de matéria orgânica, nitrogênio (N) e P no solo, porque além de melhorar as propriedades físico-química do solo, fornece aumento da atividade microbiológica e enzimática, logo, na fertilidade do solo (MOHAMED et al., 2018).

As diretrizes da Organização das Nações Unidas para alimentação e Agricultura (FAO) e a Diretiva Europeia 86/278/CEE estabelecem a concentração máxima aceitável de elementos potencialmente tóxicos no solo após a aplicação do biossólido, com taxas anuais máximas (FAO, 1992; Krzyzanowaski et al., 2016). No Brasil, a resolução CONAMA 375/2006 é a normativa que *“Define os critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados nas estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e das providências”* (BRASIL, 2006).

A diretiva europeia regulamenta os limites máximos dos metais pesados, cádmio (Cd), níquel (Ni), zinco (Zn), mercúrio (Hg), e chumbo (Pb) quando para o uso agrícola, entretanto, alguns desses valores são dependentes do pH devido á mobilidade, resultando em maior biodisponibilidade para as culturas (NUNES et al., 2021).

A reciclagem do lodo é uma alternativa vantajosa, tanto para o responsável pela geração do biossólido, que passa a ter um destino para o resíduo de forma mais sustentável, como para quem vai fazer uso desse material, rico em nutrientes e matéria orgânica, em quantidade e com baixo custo (ABREU et al., 2019).

A composição do biossólido vai depender do tipo de efluente gerado e do tratamento, mas geralmente são ricos em matéria orgânica, em torno de 50% da matéria seca, hidrocarbonetos, aminoácidos ou lipídios, com pequena presença de lignina ou celulose. Portanto, se aplicado ao solo, a matéria orgânica do resíduo pode promover aumento na qualidade física, mediante melhoria da organização das partículas minerais e, conseqüentemente, na estrutura do solo com redução do escoamento superficial e erosão (PAZ-FERREIRO et al., 2018).

Entretanto, dependendo da diluição no tratamento, a associação do calcário ao biossólido pode reduzir o teor de matéria orgânica (MO). Como salienta Alcântara (2003), que relata que o método de secagem pode influenciar o teor de matéria orgânica e nutrientes presente no biossólido, a secagem do lodo ao ar pode preservar a matéria orgânica e os nutrientes, enquanto que a caleação favorece a volatilização da amônia, promovendo a perda de nitrogênio, além do aumento do pH do solo, favorecendo um desequilíbrio dos nutrientes.

O uso de biossólido nos substratos tem a propriedade de reduzir a necessidade e a aplicação de fertilizantes químicos (UESUGI et al., 2019), já que, sua composição apresenta altos teores de N, P e outros macro e micronutrientes, com exceção do potássio (ABREU et al., 2019).

Embora o uso de cinza e biossólido sejam preconizados para aplicação em solos agrícolas, objetivando a nutrição de plantas, pouco se sabe sobre seus efeitos nas propriedades químicas do solo, assim como sua eficiência como fertilizante alternativo aos comerciais aplicados à cultura do feijoeiro. Assim, o presente estudo tem como objetivos avaliar os efeitos isolados e combinados da aplicação de cinza obtida pela queima de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido nas propriedades do solo. A hipótese central é que cada um desses resíduos poderá aportar características físico-

químicas complementares importantes em relação à disponibilidade de nutrientes essenciais como N, P, K e Si.

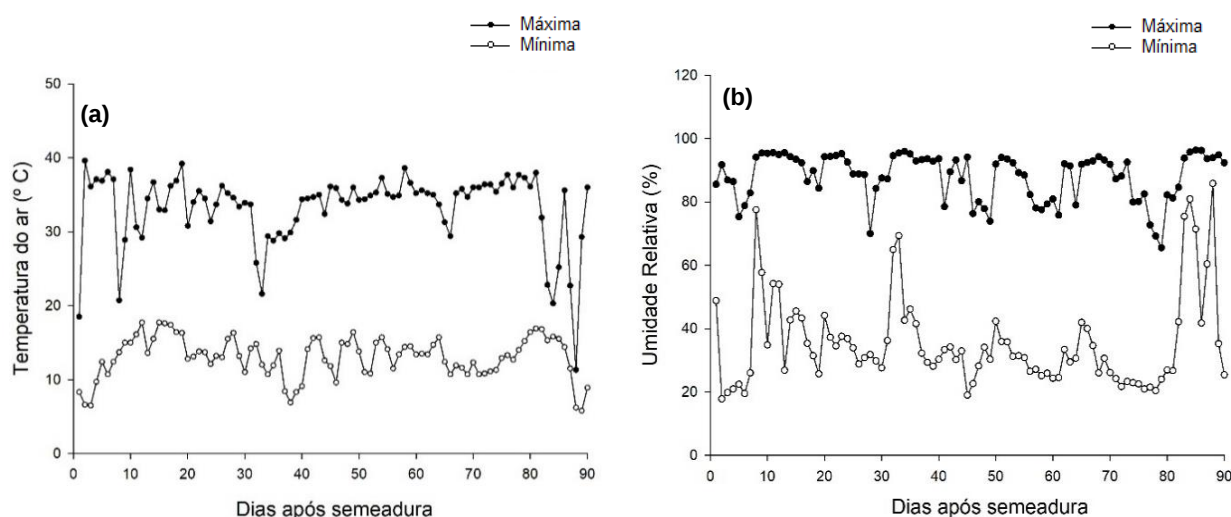
1.2 Material e métodos

1.2.1 Instalação do experimento

O ensaio foi conduzido do Instituto de Biociências-IB/UNESP, Botucatu-SP, (22°53'42.4", 48°29'36.6" e altitude de 840 m) entre maio a setembro de 2020 em casa de vegetação. O clima local é classificado como temperado quente úmido, com verão chuvoso e inverno seco, segundo classificação de Koppen. A média anual da temperatura varia de 20,3 °C, e umidade relativa variando entre 20% a 70% (CUNHA; MARTINS, 2009).

O controle ambiental no período experimental foi registrado mediante o uso *datalogger* instalado no centro da casa de vegetação. As leituras foram registradas a cada 30 minutos. A temperatura média durante o período de experimentação foi 23,13°C e a umidade relativa de 61,74% (Figura 1), valores adequados para desenvolvimento do feijoeiro (ALVARES et al., 2013; CUNHA; MARTINS, 2009).

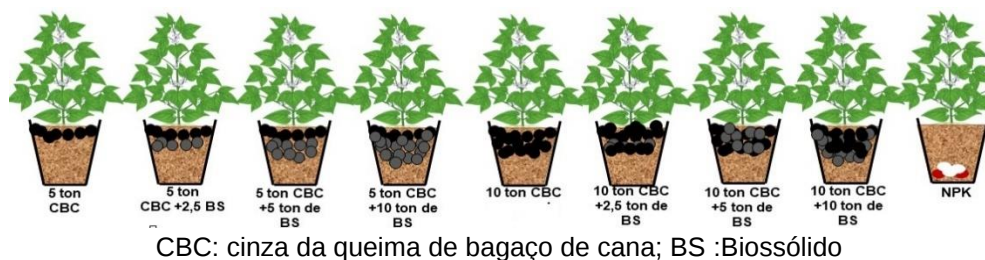
Figura 1 – Temperatura (a) e umidade (b) relativa máxima, mínima do ar ao longo do experimento no período de maio de 2020 a setembro de 2020. Botucatu, SP



1.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O genótipo de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizado foi a cv. IAC Sintonia, de ciclo médio (88 dias) e crescimento indeterminado. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial ($2 \times 4 + 1$), sendo 2 doses de cinza oriunda da queima de bagaço de cana-de-açúcar (5 e 10 t ha⁻¹), combinado com 4 doses de lodo de esgoto (base seca-biossólido) (0; 2,5; 5 e 10 t há¹), e um tratamento adicional sem dose de cinza e lodo, apenas com adubação recomendada (Tabela 1) para a cultura (NPK – fertilizante mineral), com 4 repetições por tratamento (Figura 2). As doses estipuladas foram baseadas na literatura (individual) disponível para cada um dos resíduos, objetivando achar a melhor dose resposta para sua associação.

Figura 2 - Representação esquemática dos tratamentos que receberam cinza do bagaço da cana-de-açúcar em combinação com doses de biossólido da forma que segue: T₁: 5 t; T₂: 5 t CBC+2,5 BS; T₃: 5 t CBC + 5 t BS; T₄: 5 t CBC +10 BS; T₅: 10 t CBC; T₆: 10 t CBC +2,5 BS; T₇: 10 t CBC+5BS; T₈: 10 t CBC+10BS; T₉: convencional (NPK)



As parcelas experimentais foram constituídas por vaso de polietileno de 21 L, preenchidos com solo caracterizado como latossolo vermelho Distrófico de textura franco arenosa, com 755 g dm⁻³ areia, 210 g dm⁻³ argila e 34 g dm⁻³ de silte (atributos físicos), coletado na cidade de São Manuel, SP. A correção do solo (calagem) foi feita com base no resultado da análise do solo, para elevação do índice de saturação por bases, teor Mg e Ca (Tabela 2).

Para a cultura do feijoeiro o índice de saturação por bases deve ser elevado a 70% (AGUIAR et al., 2014). Conforme tabela 2, a saturação por bases (V%) era de 10%. A calagem foi realizada 70 dias antes do plantio, mantendo-se os vasos sempre úmidos e cobertos para promover uma melhor reação.

A adubação de plantio e cobertura do feijoeiro no tratamento convencional seguiu a recomendação proposta pelo Boletim 200 (Quadro 1) para o estado de São Paulo (AGUIAR et al., 2014).

Quadro 1 – Adubação recomendada para cultura do feijoeiro

Nutriente	Plantio	Cobertura
	mg dm ⁻³	
Nitrogênio (Ureia)	30	30
Fosforo (P ₂ O ₅)	90	
Potássio (K ₂ O)	50	50
Zinco (ZnSO ₄)	150	-
Boro (H ₃ BO ₃)	61	-

Para caracterização dos atributos químicos do solo (micronutrientes), antes do início do experimento, uma amostra composta do solo foi coletada e determinada de acordo com a metodologia proposta pela EMBRAPA (2011) e Raij et. Al. (2001) e estão resumidos no Quadro 2.

Quadro 2 – Atributos químicos do solo na camada 0 a 0,20 m de profundidade - São Manuel SP

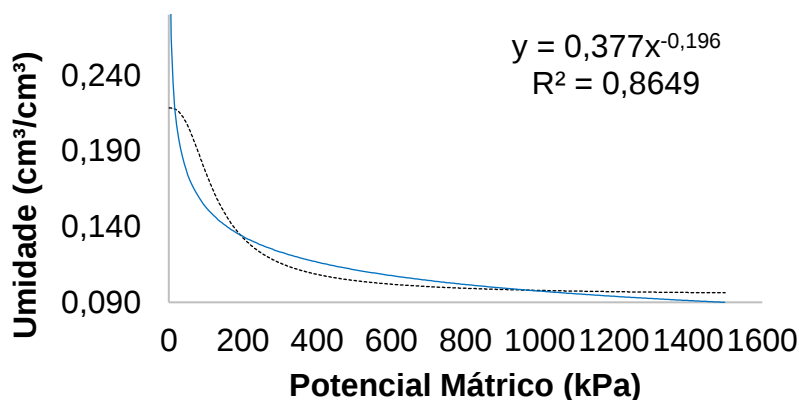
pH	MO	AL ⁺³	H+AL ⁺³	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	Fe	Cu	Mn	Zn	B	P _{resina}	S
CaCl ₂	g dm ⁻³	mmolc dm ⁻³													mg dm ⁻³	
4,2	4	6	20	0,26	2	1	2	22	10	3	0,4	2,8	0,2	0,16	2	18

pH – potencial hidrogeniônico; MO – matéria orgânica; P_{resina} – extrator de fósforo; Al₃⁺ - acidez trocável; H+Al – acidez potencial; - SB – soma de bases; CTC – capacidade de troca cátions; V – saturação por bases

O experimento teve um sistema de irrigação por gotejamento com espaçamento de 0,2 m entre os emissores e uma vazão média de 2 L h⁻¹ conectado a distribuidores de duas saídas e fixadas por uma haste tipo flecha em cada vaso, sendo a pressão de operação de 10mca. Dessa forma, o manejo da irrigação foi feito via solo com o auxílio de três tensiômetros por tratamento, instalados aleatoriamente nas repetições, em profundidade de 0,15 m, totalizando 27 tensiômetros no ensaio. O monitoramento da tensão de água no solo foi realizado diariamente com o auxílio de um tensímetro digital, sendo os valores de tensão convertidos em unidade volumétrica baseado na equação para ajuste da curva de retenção de água no solo (Figura 3), conforme modelo proposto por Van Genuchten (1980).

Todos os tratamentos foram conduzidos com a mesma lâmina de água, mantendo a tensão próximo a capacidade de campo (6 kPa – 10 kPa). Ao longo do ciclo foi utilizado 365,96 mm de água na irrigação da cultura.

Figura 3 - Curva de retenção de água no solo



Para controle fitossanitário foi realizado duas aplicações do inseticida Acefato Nortox (i.a. Acefato, 750 g kg⁻¹ p.c.), no estágio fenológico vegetativo (23 DAE) e no florescimento na dose de 1kg há⁻¹, duas aplicações do fungicida Orkestra SC na dose de 250 mL há⁻¹ e uma aplicação do fungicida Cabrio Top no enchimento de grãos na dose 1,5 kg há⁻¹ (Quadro 3).

Quadro 3 – Controle fitossanitário realizado durante o ensaio

Data	Aplicação
16/06	Acefato Nortox
12/07	Orkestra
17/07	Acefato Nortox
23/07	Orkestra
06/08	Cabrio Top

1.2.3 Caracterização dos resíduos

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar foi coletada na Usina Zilor – Energia e alimentos em Lençóis Paulista (SP), provenientes de caldeira aquatubular. Os resíduos coletados para utilização no experimento foram submetidos à análise da composição de macro e micronutrientes, além de silício. Para caracterização química dos elementos que constituem as cinzas residuais, obtida da combustão incompleta da biomassa da cana nas caldeiras, foi realizada análise de macronutrientes e micronutrientes, seguindo metodologia de Malavolta et al. (1997) resumido na Quadro 4.

Quadro 4 – Caracterização química nutricional da cinza oriunda da queima do bagaço da cana-de-açúcar em caldeiras – Usina Zilor, Lençóis Paulista, SP

N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Si
-----g kg ⁻¹ -----						-----mg kg ⁻¹ -----					
1,1	0,30	13,75	12,6	7,0	3,3	12900	40,0	57,5	535	41,0	242,7

N: nitrogênio; P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, S: enxofre, Fe: ferro, Cu: cobre, Zn: zinco, Mn: manganês, B: boro, Si: silício

O Biossólido utilizado (Quadro 5) foi coletado na estação de tratamento de esgoto da ETE- SABESP em Botucatu-SP, na Fazenda Experimental na Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. O resíduo é tratado conforme o art.3 da resolução CONAMA 375/2006 para redução de patógenos, permanecendo em repouso para secagem em baias por 45 dias, com temperatura de 55° C até que o material chegue a 20% de umidade.

Quadro 5 – Características químicas do lodo de esgoto (base seca) utilizado no experimento

N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Umidade	M.O.	C.O
----- % (ao natural) -----								
2,8	3,5	0,1	1,5	0,4	0,4	21	37	26
Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	C/N	pH ao natural	
----- mg kg ⁻¹ (ao natural) -----								
1132	145	185	33793	259	701	7/1	5.8	

1.2.4 Monitoramento da solução do solo

Para extração da solução do solo foram instalados 27 extratores de cápsula porosa, sendo 3 por tratamento na profundidade de 0,15 m. A primeira avaliação iniciou-se 35 dias após emergência (DAE). As coletas da solução foram realizadas no período da tarde (15h), a cada sete dias, durante 6 semanas, com três coletas no estágio vegetativo e três coletas no estágio reprodutivo. Anterior à coleta, era realizado a irrigação e após uma hora aplicava-se o vácuo em cada extrator com uma seringa e uma válvula de três vias. Depois de uma hora a solução era coletada realizada a mensuração do pH e da condutividade elétrica (mS cm⁻¹) e armazenada em tubos Falcon. Ao final do ciclo foram analisados macro e micronutrientes das amostras de solução do solo, com leitura direta na solução para K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn, colorimetria para P, B e S. A análise de nitrogênio foi realizada por método de destilação segundo Kjeldahl (1997).

1.2.5 Análise do tecido vegetal

Para determinação de nutrientes no tecido do feijoeiro, foram selecionadas duas plantas por tratamento ao final do ensaio (36 plantas), separando-se as folhas as amostras foram embaladas em sacos de papel e secas à uma temperatura de 40 °C. Depois, as amostras da parte aérea foram moídas e encaminhadas ao laboratório de nutrição mineral de plantas da FCA/UNESP- Botucatu, SP para determinar macronutrientes e micronutrientes de acordo com Malavolta et al. (1997).

1.2.6 Análise do solo

Após 70 dias de incubação do solo incorporado com os resíduos e calagem foi coletado amostras compostas de solo (Coleta1) e ao final do experimento (Coleta 2- 90 dias) foi realizado uma segunda coleta de amostras composta de solo para cada tratamento na profundidade de 20 cm, sendo em seguida seca em estufa com circulação de ar (45 °C), peneirada em malha de 2 mm e enviado ao laboratório de análises de solos da FCA -UNESP, Botucatu, SP para determinação do pH, M.O, $H+Al^{+3}$, SB, V%, CTC, macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) e micronutrientes (boro, cobre, ferro, manganês e zinco) conforme a metodologia proposta por Raij et al. (2001).

A condutividade elétrica do solo foi realizada semanalmente com auxílio do sensor de umidade (HH2 Moisture Meter). Foram feitas uma avaliação por semana em todos as amostras (180 vasos). Para determinação do teor de silício no solo foram feitas duas coletas de amostras compostas para cada tratamento após 70DAE de incubação do resíduo no solo e ao final do ensaio (90DAE), segundo a metodologia de Korndörfer et al., (2004).

1.2.7 Análise estatística

Os dados inicialmente foram submetidos a verificação da normalidade e homoscedasticidade das variâncias por meio do teste de Shapiro-Wilk ($p>0.05$).

Os dados que seguiram normalidade, foram submetidos a análise de variância – ANOVA e, havendo efeito significativo ($p<0,05$) foram complementados com os testes de comparações múltiplas, sendo utilizado Tukey ($p<0.05$) para comparações entre médias e quando significativo pela ANOVA interação do fatorial foi comparada com o tratamento convencional mediante Teste de Dunnett ($p< 0.05$). Para analisar a

variabilidade no comportamento em relação as doses testadas foram realizadas a Análise de Componente Principal (PCA) e teste de Correlação de Pearson

As análises estatísticas foram realizadas nos programas Agroestat®, Minitab 18® e software R versão 4.1.0 (R Core Team, 2021) e para melhor compreensão dos resultados, gráficos no formato de figuras foram elaboradas utilizando o software SigmaPlot, versão 14.

1.3 Resultados

Os resíduos adicionados ao solo influenciaram os parâmetros relacionados a mineralização e disponibilidade de nutrientes, provocando mudanças na condutividade elétrica, fertilidade do solo, além de alterações na nutrição das plantas do feijoeiro, conforme os resultados apresentados a seguir.

Os valores de pH médio da solução do solo ao longo do ensaio estão apresentados no Quadro 4. Verifica-se que o pH dos tratamentos teve uma media variando de 6,7 a 7,8. Os valores mais altos de pH foram verificados nos tratamentos 6 e 8, nas maiores doses de cinza com biossólido e no tratamento convencional.

Quadro 4 – pH da solução em função das doses testadas

Tratamento	Dias após a emergência (DAE)						Linear até
	35	42	49	56	63	70	
T1	6,1	7,4	6,7	6,3	7,1	6,5	70 DAE
T2	6,1	7,4	7,3	7,7	7,5	7,5	63 DAE
T3	5,2	6,8	7,3	8,0	7,7	6,2	70DAE
T4	5,0	6,7	7,2	7,7	8,5	6,9	70DAE
T5	7,0	6,3	7,7	6,7	7,0	7,5	56 DAE
T6	7,3	8,2	7,1	7,0	7,8	7,4	70 DAE
T7	6,7	7,3	7,8	7,6	7,2	8,0	70 DAE
T8	6,5	7,0	7,8	7,4	8,7	6,8	70 DAE
Convencional	6,7	8,2	7,5	8,0	7,4	7,5	63 DAE

*DAE: dias após a emergência

T₁ : 5t de cinza, T₂ : 5t de cinza+ 2,5 de biossólido, T₃ : 5t de cinza+ 5 de biossólido, T₄ : 5t de cinza+10 de biossólido, T₅ : 10t de cinza, T₆ : 10t de cinza+ 2,5 de biossólido, T₇ : 10t de cinza+ 5 de biossólido, T₈ : 10t de cinza+10 de biossólido, T₉ : convencional

A condutividade elétrica média da solução do solo ao longo do ensaio (Quadro 5) mostrou que os tratamentos 2, 4, 5,7,8 tiveram valores média em torno de 0,83 a 0,99 mS cm⁻¹, enquanto que os tratamentos 1,3,6 e convencional variaram de 1,4 a 1,7 mS cm⁻¹.

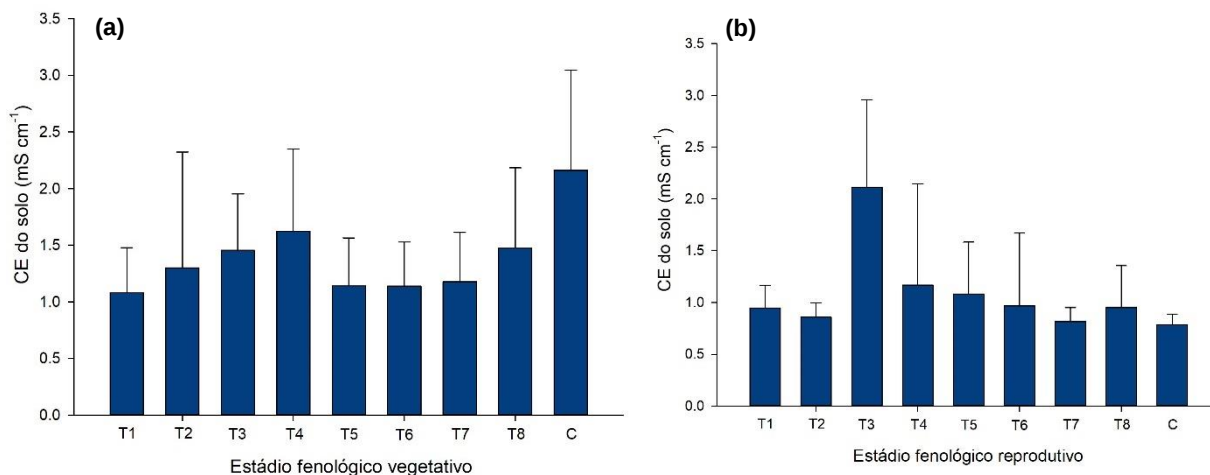
Quadro 5 - Condutividade da solução do solo ao logo do ensaio (mS cm⁻¹)

Tratamento	DAE					
	35	42	49	56	63	70
T1	3,14	0,37	2,67	0,53	1,73	1,52
T2	1,26	0,42	1,09	1,14	1,16	1,10
T3	1,77	0,55	0,53	2,76	1,65	2,21
T4	0,96	0,55	0,90	0,95	1,02	2,74
T5	0,27	2,11	0,37	1,55	0,37	0,65
T6	1,58	1,88	1,73	1,73	1,78	1,76
T7	0,48	0,82	0,70	0,41	0,43	1,49
T8	0,62	1,30	1,01	0,37	1,19	0,46
Convencional	1,26	1,15	5,47	1,23	1,15	0,70

As medidas de condutividade elétrica (CE) no solo foram realizadas em frequência semanal. Assim, na Figura 6 estão apresentadas as médias da CE para o estágio vegetativo (a) e reprodutivo (b). No estágio vegetativo o tratamento convencional apresentou o maior índice de CE (2,16 mS cm⁻¹), seguido do T8 (1,62 mS cm⁻¹), enquanto os menores valores de CE no solo foram verificados nos tratamentos T1, T2, T3 e T5, variando de 1,08 a 1,17 mS cm⁻¹. Os tratamentos T4, T6 e T7 não ultrapassaram a média de 1,5 mS cm⁻¹.

No estágio reprodutivo, observou-se que houve decréscimo para a CE, exceto para T7 o qual manteve média de 2,11 mS cm⁻¹, 45% superior em relação ao estágio vegetativo. A CE dos demais tratamentos variaram de 0,78 a 1,16 mS cm⁻¹.

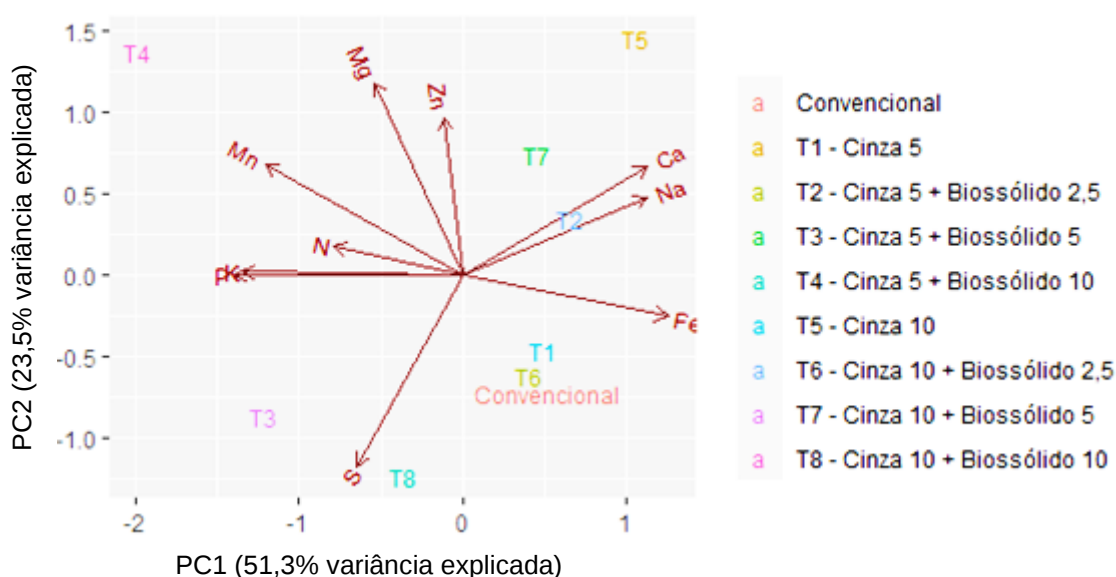
Figura 6 – Condutividade elétrica durante o período vegetativo (a) e reprodutivo (b) registrado no solo em função das doses da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.



1.4.1 Macro e micronutrientes na solução do solo

O substrato utilizado no ensaio foi submetido a análise de composição mineral. Os dados obtidos foram analisados a partir do comportamento e da correlação entre os mesmos com auxílio da análise estatística de componentes principais (Figura 7).

Figura 7- Biplot exibindo autovetores e pontuações para componentes principais 1 e componente principais 2 dos nutrientes na solução do solo



As duas primeiras componentes explicaram a totalidade de aproximadamente 74,80% de toda a variabilidade no conjunto de dados (51,3% explicado pelo PC1 e 23,5% por PC2)

Nessa análise, verificou-se que P e K assim como o Mn e Mg se correlacionaram positivamente ($\alpha < 90^\circ$). Da mesma forma, Fe, Na e Ca, para a primeira componente. Por outro lado, N foi correlacionado positivamente com K, P, Mg, Mn e Zn e negativamente com Fe, Ca e Na. O tratamento T7 teve correlação positiva com N, P e K assim como T1, T2 e T7 para as variáveis de Fe, Ca e Na. O tratamento convencional apresentou uma correlação positiva com Fe e negativa com os macros nutrientes.

Os tratamentos 4 e 5 se distanciaram dos demais tratamentos e não apresentou relação com nutrientes disponíveis no solo. O tratamento 4 obteve a proporção de S mais alta e distanciou-se dos demais tratamentos por essa característica.

1.4.1 Teor de nutrientes no solo

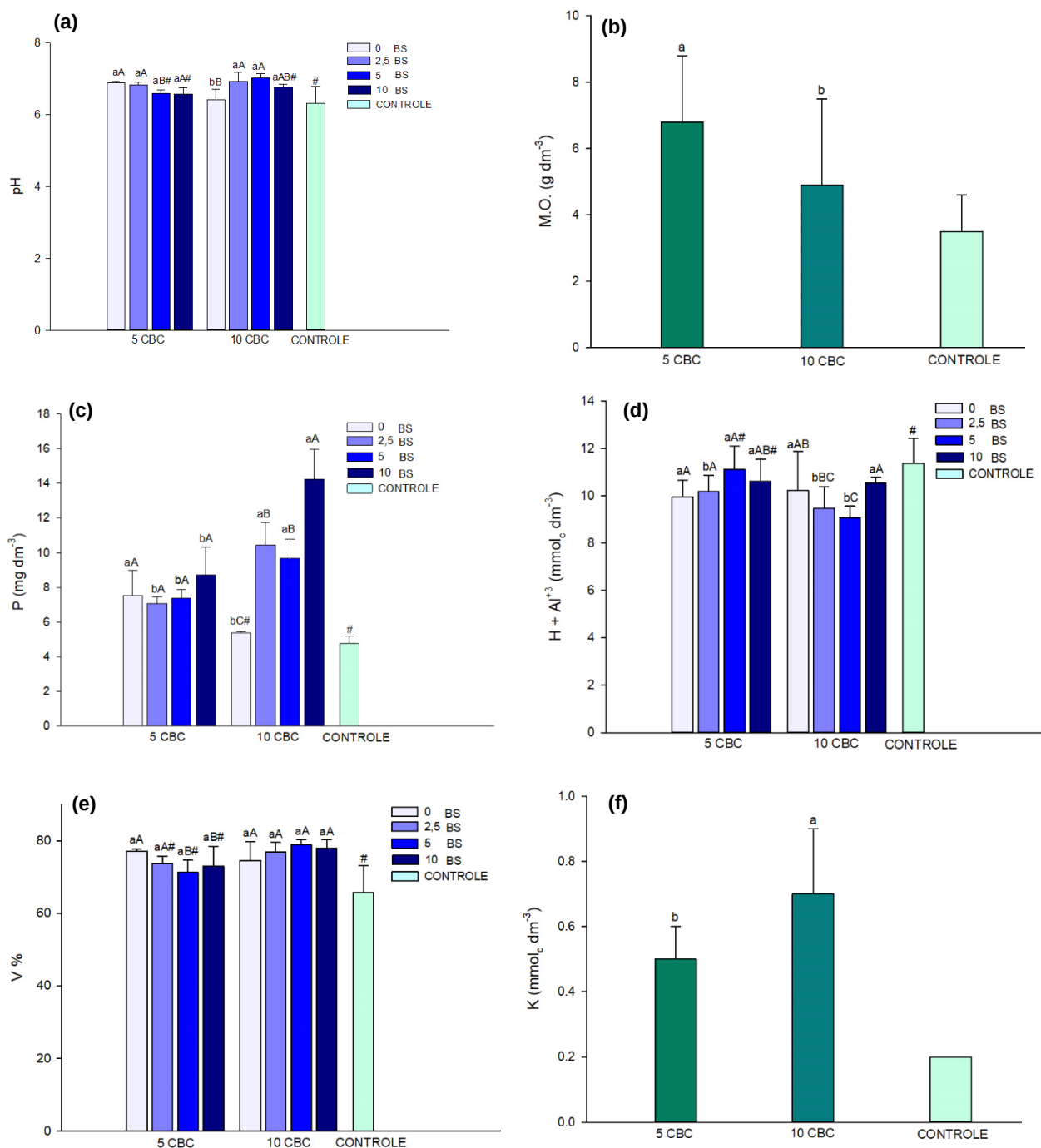
Os resultados da análise química do solo estão apresentados nas Figuras 8-14. Verifica-se que houve interação dos fatores CBC e BS apenas para pH, teor de fósforo, acidez potencial e saturação por bases na primeira coleta (Figura 8). Os teores de matéria orgânica e potássio no solo sofreram influência apenas das doses de CBC aos 70 dias coleta.

Os maiores valores de pH foram medidos para o T6 e T7 quando combinados, embora não tenham diferido da maior dose do bio sólido (Figura 8a). As plantas do tratamento convencional tiveram a menor média, mas não diferiram do T3, T4 e T8. A aplicação de 10t de CBC apresentou valor de pH estatisticamente inferior a dose de 5t quando na ausência da aplicação de bio sólido.

Para os teores de P (Figura 8c) verificou-se que os tratamentos sem BS apresentaram os menores teores do ensaio, tendo diferido entre eles (T1 e T5), embora o tratamento T5 não tenha diferido do convencional. O maior teor de fósforo foi encontrado no substrato do T8. No geral, a combinação de BS com a maior dose de cinza de CBC (10 t), resultaram nos maiores teores de P, se comparado à dose de 5 CBC (Figura 8c). Entretanto, as doses de BS (2,5; 5 e 10 t) combinadas com 5 t de CBC não diferiram no teor de P medido no substrato que não recebeu bio sólido, ainda que tenha diferido do convencional.

Com relação a acidez potencial do solo (Figura 8d), o tratamento convencional foi superior aos demais, porém não diferiu do tratamento T3 e T4. Por outro lado, a saturação por bases (V%) conforme Figura 11e, foi superior no T7, diferindo do convencional o qual desenvolveu menor V%, sendo similar ao T2; T3 e T4. No entanto, nenhum efeito das doses de bio sólido foi verificado quando se associou a 10 t de CBC. Diferentemente, na dose de 5 CBC, a aplicação de 5 e 10t de BS (T4) reduziram o V% calculado comparativamente ao T1 (5 t e 0 BS).

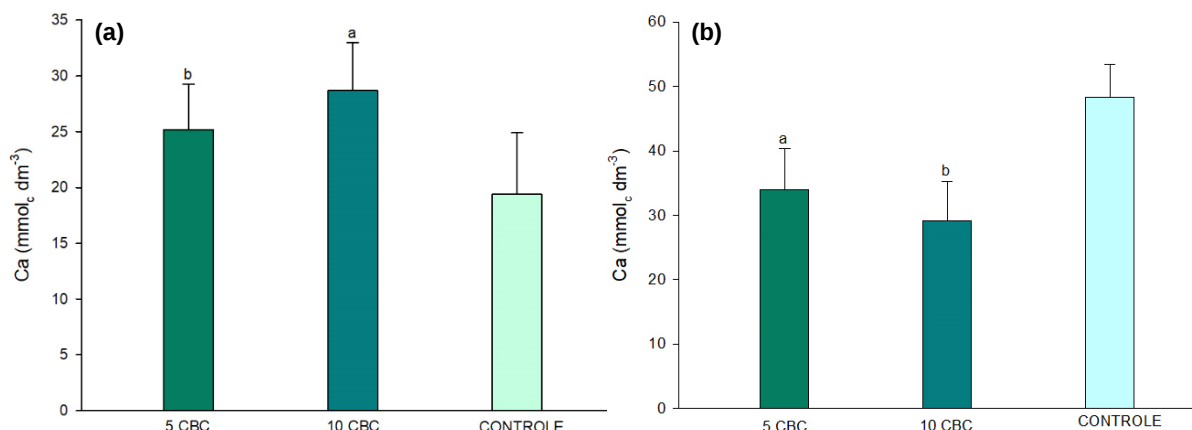
Figura 8 - (a) pH; teores (b) Matéria orgânica; (c) Fósforo; (d) Acidez potencial; (e) Percentagem da saturação por bases; (f) Potássio no solo em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido na coleta1



Médias seguidas de mesma letra minúscula para cinza do bagaço de cana-de-açúcar e maiúscula para biossólido não diferem entre si pelo teste de Tukey $P < 0,05$. Médias seguidas com # não diferem do tratamento convencional pelo Teste de Dunnett $P < 0,05$.

Os teores de Ca nas duas coletas (Figura 9 a e b) foram influenciados apenas pelas doses de CBC. Na primeira coleta o maior teor para este nutriente foi na dose 10 CBC, contudo, na segunda coleta, o maior teor registrado foi na dose 5 CBC.

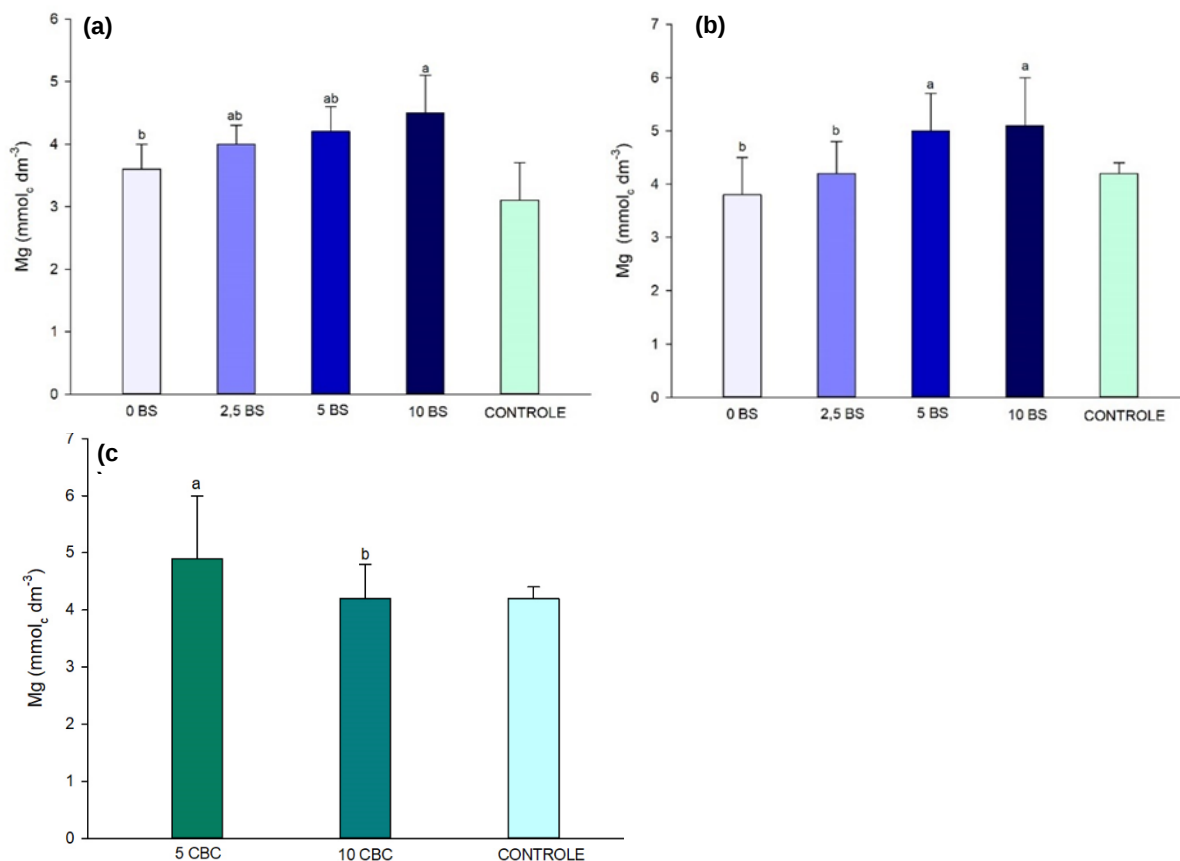
Figura 9- Teores de (a) Cálcio – coleta 1; (b) Cálcio – coleta 2 no solo em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido



Médias seguidas pela mesma letra não diferem si com 5% de significância pelo teste de Tukey

Na coleta 1, apenas a aplicação de BS influenciou o teor de magnésio (Figura 10a), de modo que o aumento da dose de BS adicionada promoveu o aumento do teor do nutriente no solo. O mesmo comportamento foi observado na segunda coleta (Figura 10b). Além disso, o magnésio (Figura 10c) também foi influenciado pelas doses de CBC, tendo sido verificado maior teor na dose 5 CBC

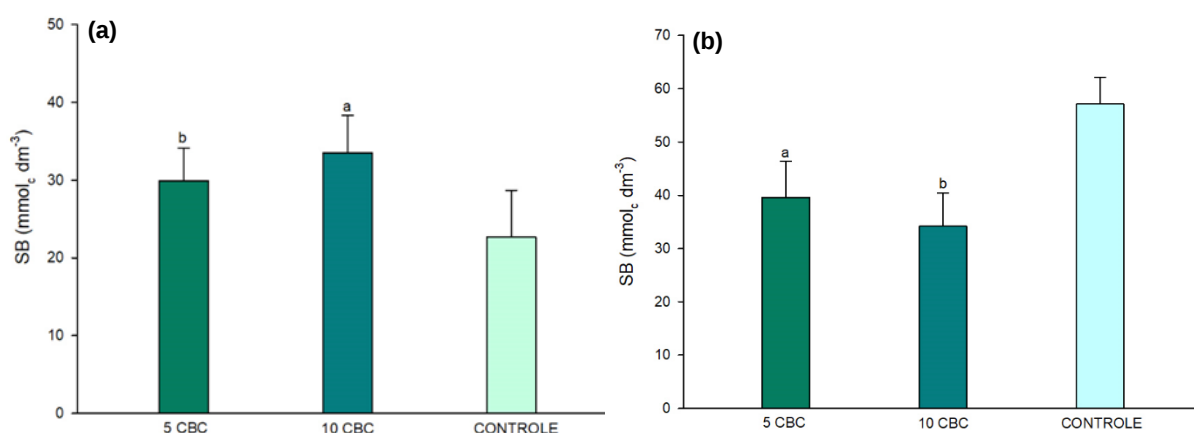
Figura 10 - (a) Magnésio – coleta 1; (b) Magnésio – coleta 2; (c) Magnésio – coleta 2 no solo em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e bio sólido



Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey

A soma de bases apresentou o mesmo comportamento do cálcio (Figura 11 a; b). Esta variável não foi influenciada pelas doses de BS, sendo que o maior valor de SB foi verificado na dose de 10 CBC na primeira coleta (Figura 11a), enquanto que na segunda coleta (Figura 11b), a maior média foi para dose de 5 CBC, tendo o convencional obtido valor superior às doses de CBC analisadas.

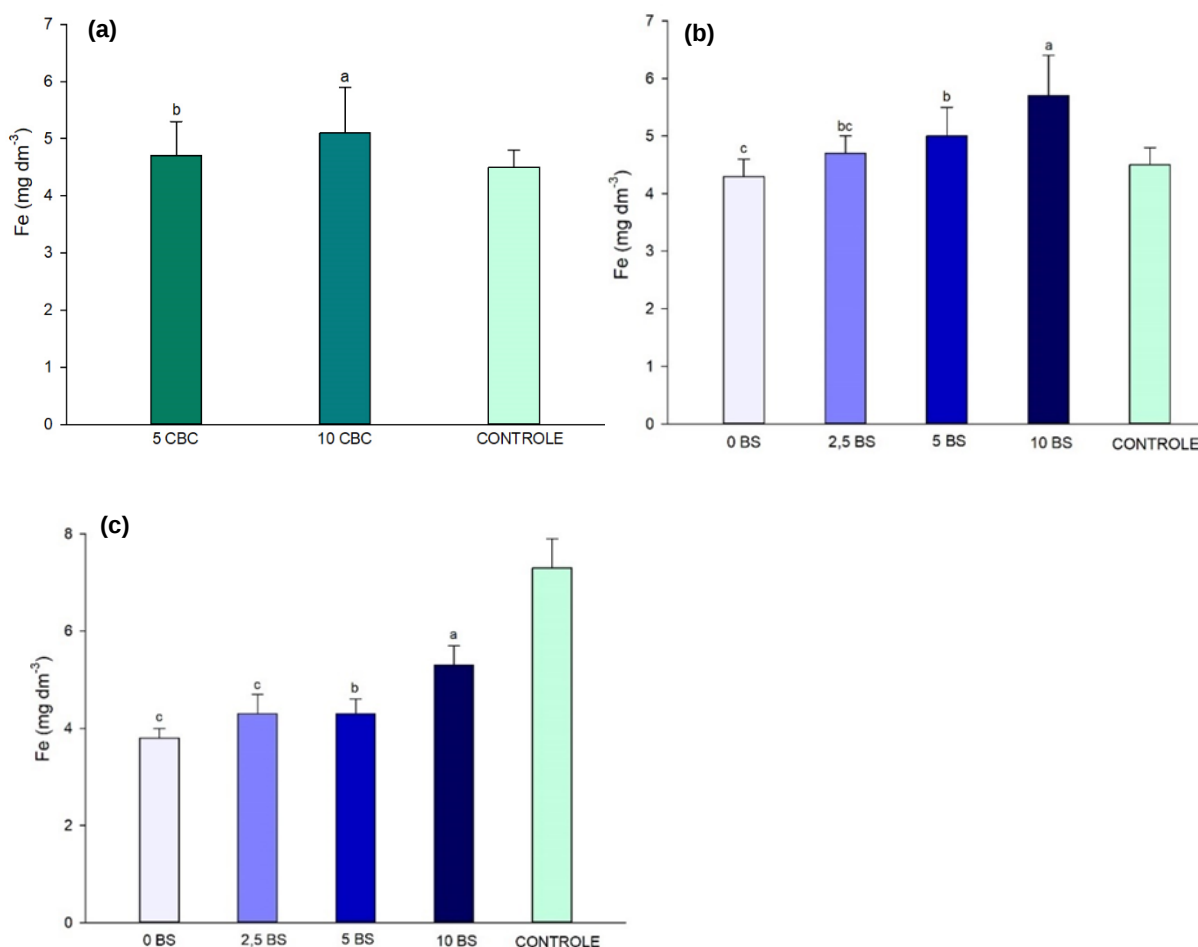
Figura 11 - Valores de (a) Soma de bases – coleta 1; (b) Soma de bases – coleta 2 do solo em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido



Médias seguidas pela mesma letra não diferem si com 5% de significância pelo teste de Tukey

Não houve interação entre doses de CBC e BS para os teores de Fe no solo, havendo somente efeito isolado dos fatores (Figura 12). Entretanto, notou-se que a dose de 10 t de CBC e a dose de 10 t de BS promoveram os maiores teores de Fe mensurados na primeira coleta. Na segunda coleta, houve efeito apenas das doses de BS, verificando-se comportamento semelhante a primeira coleta para as doses de BS, porém o convencional foi superior aos tratamentos estudados.

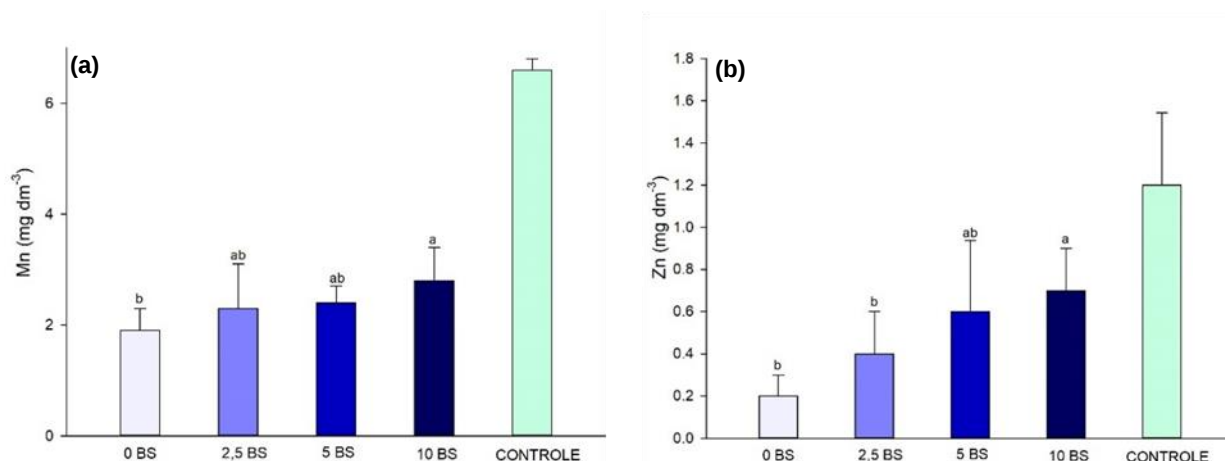
Figura 12- (a) Ferro – coleta 1; (b) Ferro – coleta 1; (c) Ferro – coleta 2 no solo em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem si com 5% de significância pelo teste de Tukey.

As doses de BS influenciaram os teores de manganês (Mg) e zinco (Zn) na segunda coleta (Figura 13 a e b), quando o maior teor de micronutrientes foram observados na dose 10 t BS, embora inferior aos teores encontrados no tratamento convencional.

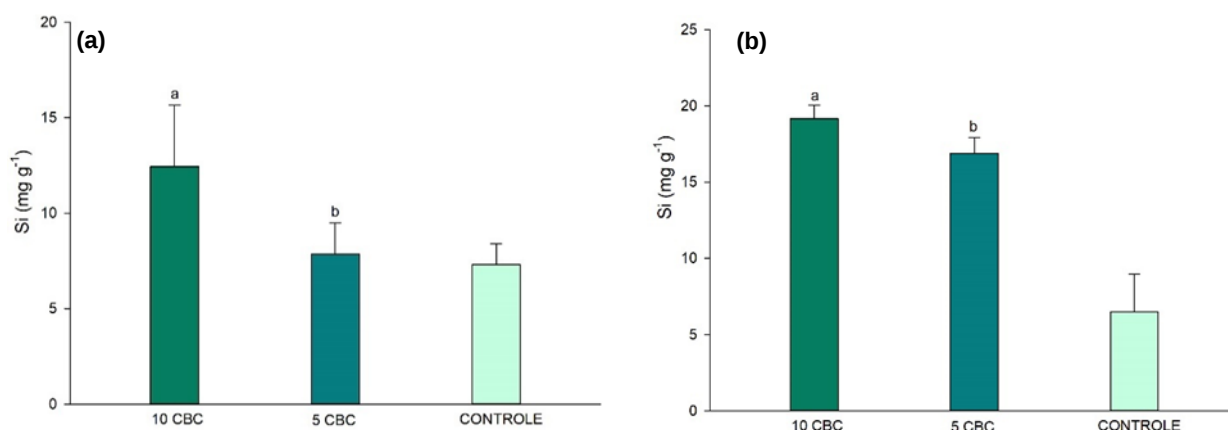
Figura 13 - Teores de (a) Manganês – coleta 2; (b) Zinco – coleta 2, em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem si com 5% de significância pelo teste de Tukey

Os teores de silício do solo indicam que houve efeito significativo de forma isolada para o fator cinza nas duas coletas (Figura 14 a e b). Para a primeira coleta realizada 70 dias após a incubação e anterior ao plantio, o maior teor de silício foi verificado no tratamento com 10 t de CBC, 57% maior que o tratamento com 5 t, indicando que a concentração determinada esteve relacionada à dose aplicada. O mesmo comportamento foi observado na segunda coleta (no final do ensaio), tendo sido observado aumento de 53% em relação à primeira coleta na dose 10 t CBC.

Figura 14 - a) Silício – coleta 1; (b) Silício – coleta 2 no solo em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey.

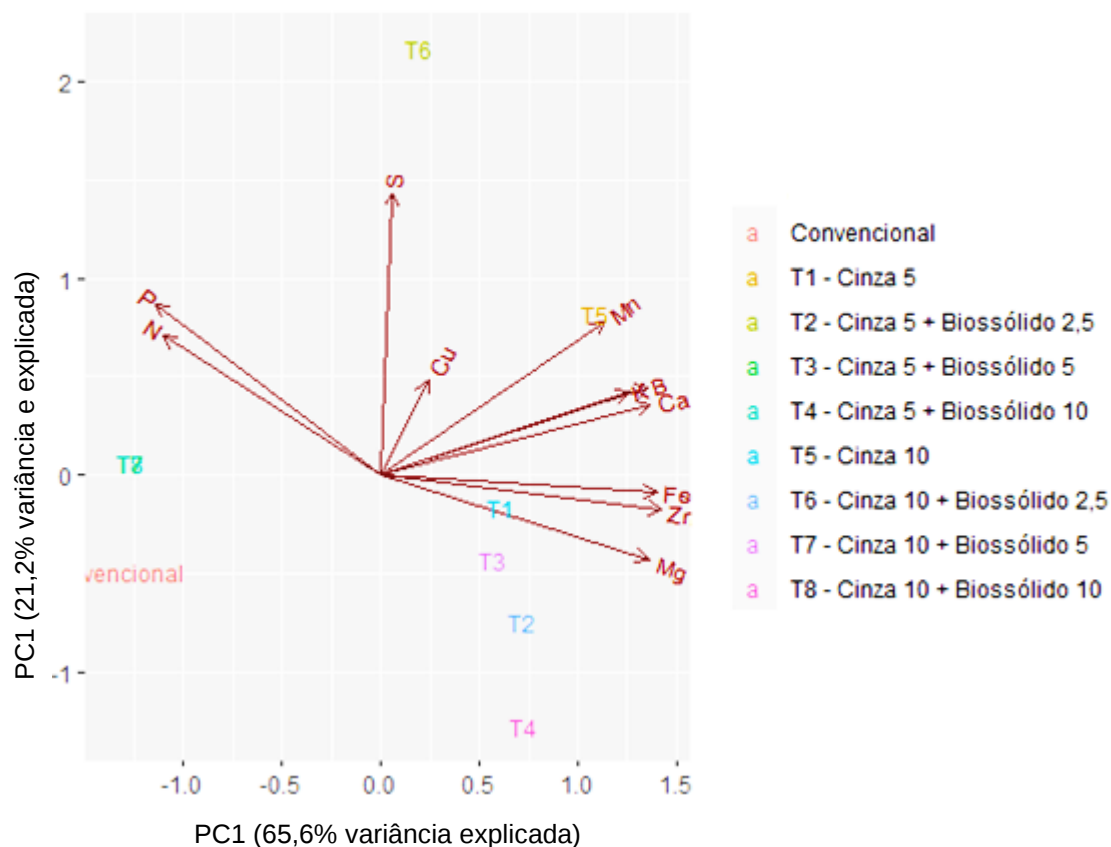
1.4.2 Características nutricionais das plantas de feijoeiro

A análise mineral de folhas gerou componentes agrupados de acordo com o comportamento das plantas frente à combinação de doses de CBS e BS incorporadas ao solo (Figura 15). As duas primeiras componentes expressaram 86,81% de toda a variabilidade no conjunto de dados (65,59% explicado pelo PC1 e 21,22% por PC2).

Pode-se verificar que o Nitrogênio (N) e Potássio (P) são elementos correlacionados positivamente ($\alpha < 90^\circ$), assim como as variáveis, Fe, Zn, Mg, Ca, B, Mn e K para a primeira componente. Cobre (Cu) correlacionou-se positivamente com quase todas as variáveis avaliadas, exceto para Mg, P e N.

Os tratamentos, convencional e T4 apresentaram correlação positiva com N e P, assim como T5, T6 e T7 para as variáveis de Fe, Zn e Mg. Plantas com alta concentração de N tendem a apresentar também alta concentração de P, para a componente 1.

Figura 15: Biplot exibindo autovetores e pontuações para componentes principais 1 e componentes principais 2 dos nutrientes na planta



O tratamento 5 apresentou alta relação com o teor de Mn em sua avaliação, sendo o oposto ao tratamento convencional. O tratamento 8 obteve a proporção de enxofre mais alta e distanciou-se dos demais tratamentos por essa característica. O tratamento 4 distanciou-se dos demais tratamentos, embora não tenha sido associado aos parâmetros nutricionais avaliados.

1.4 Discussão

A aplicação de calcário ao solo aumenta a disponibilidade de bases trocáveis e eleva o pH do solo (AMEYU, 2019). Embora na produção do BS ocorra a aplicação de fonte de óxido de cálcio, capaz de neutralizar a acidez ativa do solo, a associação dos resíduos favoreceu a neutralização do solo o qual apresentou valores de pH superiores ao tratamento convencional (Figura 8a). Assim a dose de cinza aplicada influenciou o pH, considerando-se suas propriedades neutralizantes. A adição de 10 t de CBC reduziu o pH significativamente quando comparado à aplicação de 5 t, na ausência da aplicação do biossólido. O que demonstra que a dose de cinza aplicada pode influenciar o pH do solo. A matéria orgânica (Figura 8b) apresentou o maior teor médio na dose de 5 t de cinza. Os resultados indicam que, diferente do descrito na literatura, a aplicação de BS não contribuiu para o aumento do teor de carbono no solo, sem efeito determinado.

Em relação aos teores de K a dose de 10 t CBC promoveu o maior aumento no teor deste elemento, diferindo da dose 5 t CBC e do tratamento convencional, indicando que este resíduo tem potencial para substituir fontes comerciais de K (Figura 8f).

Isso evidencia o efeito do resíduo sobre a acidez ativa do solo, ainda que o mecanismo não seja claro. A presença de carbono (Tabela 5) no resíduo do BS pode ter atuado reduzindo a atividade dos íons hidrogênio da solução. Contudo a ausência de padrão entre as doses, comparada ao tratamento convencional, dificulta a consolidação dessa hipótese. De fato, o aumento do pH do solo ocorreu devido ao tratamento pré-instalação (calagem) do experimento, porém os valores observados discrepantes ao convencional enunciam o efeito que foi atribuído aos tratamentos testados, embora pudesse ter sido esclarecido com a mensuração do pH em solo sem nenhum tratamento.

O teor de matéria orgânica do solo aumentou por ocasião da aplicação de CBC, principalmente na dose de 10 t do resíduo. Embora na caracterização do CBC (Tabela 3) não indique a presença de resíduo orgânico, é possível supor que este material possa ser proveniente da queima incompleta no sistema de caldeira da Usina. Moléculas carbônicas condensadas que ao serem adicionadas ao solo podem ter favorecido o incremento do teor do elemento no solo. Entretanto, pelo fato de que a caracterização do BS (Tabela 4) indicava a presença de carbono, esperava-se que a aplicação do mesmo ao solo aumentasse o teor original de carbono, o que não ocorreu.

A aplicação combinada dos resíduos após 70 dias de incubação provocou aumento do teor de P no solo, sendo 610 % na maior dose (10t) e 168,5% para ausência de BS, quando comparado ao fertilizante mineral. Shan et al. (2021) encontraram efeito semelhante na disponibilidade de P, quando realizaram aplicação de doses crescentes de BS, com acréscimo de 144% relativo ao tratamento convencional. Boudjabi, Chenchouni (2021) também estudaram aplicação de doses crescentes de biossólido, reportando incrementos nos teores de P.

As plantas do tratamento convencional apresentaram menor teor de P disponível no solo (137 %) comparado ao solo natural. Provavelmente esse efeito está relacionado a coleta anterior a calagem e adubação de plantio (NPK). Assim, esse aumento foi somente devido à aplicação de calcário, demonstrando possível viabilidade da cinza na correção solo.

Segundo Novais, Smyth, Nunes (2007) fontes orgânicas ou minerais podem variar atuando como fonte ou drenos de P disponível, a depender das condições do solo e pH. Entretanto, como observado na correlação de componentes principais (Figura 15) os tratamentos T4 (5 t CBC + 10 t BS ha⁻¹) e convencional apresentaram correlação positiva para N e P na nutrição das plantas. Esse efeito indica relação antagônica causada pelo excesso de fósforo em relação aos micronutrientes boro (B) e zinco (Zn) os quais apresentaram correlação negativa e teor abaixo do recomendado para a cultura do feijoeiro. Essa condição também foi verificada por Zeffa et al. (2021), em estudo de variabilidade genética de diferentes cultivares de feijão. Os autores encontraram correlação negativa em grãos para P, Zn e Fe. A deficiência de Zn é um fator limitante para a produção, principalmente em leguminosas, além do seu valor nutricional (JALAL et al., 2021).

Grupta et al. (2014) também identificou aumento na sorção de P causado pelo efeito dos altos teores de óxidos livres de Fe. Autores também identificaram redução na adsorção de P quando aplicou 10 t ha⁻¹ de cinza em plantio de arroz e trigo. O alto teor de Fe e Al presente no solo (Tabela 2), afeta a disponibilidade de P, especialmente das fontes minerais.

No presente ensaio, também se identificou correlação das plantas do tratamento convencional com os teores de Fe na solução. Houve relação positiva para Fe na solução do solo (Figura 7), bem como maior teor de íon ao final do ciclo (38,98%). Notou-se também que nesse tratamento (convencional) houve correlação negativa para P, K e N na solução do solo, o que sugere que esses conseguiram ser melhor aproveitados pelo feijoeiro.

Observou-se que o Fe foi mais influenciado nos tratamentos com aplicação de BS comparado aos tratamentos com CBC. Comportamento similar, foi observado em relação ao teor de Zn. Esse efeito denota que o bio sólido apresenta maior teor Zn e Fe do que na composição da cinza. Houve aumento de 90% no teor de Fe para a maior dose de BS e 96% para maior dose de CBC, embora o convencional tenha obtido maior aumento em relação ao solo ao final do ciclo (146%). Esses valores parecem indicar que as plantas do tratamento convencional absorveram menores taxas de Fe, o que se pode constatar na correlação negativa entre o teor de Fe e o convencional, enquanto houve relação positiva entre os tratamentos, T6, T7, T8 para esse elemento na planta.

Em contraste a esses resultados, na solução do solo o tratamento convencional apresentou correlação positiva com o Fe. A disponibilidade do ferro diminui à medida que ocorre um aumento do pH (MALAVOLTA, 1979). Condição observada na solução do solo do tratamento convencional que apresentou um pH de neutro a básico dos 42 DAE em diante. Possivelmente as plantas dos tratamentos com associação dos resíduos, principalmente T1 e T3 tiveram correlação positiva com Fe nas folhas das plantas por terem absorvido mais Fe, além da maior disponibilidade promovida por ambas fontes, mas também pela faixa de pH registrada na solução do solo; 6,5 e 6,2. De acordo com Oliveira; Nascimento (2006) pH na faixa de 4, 0 e 6,0 ocorre a maior disponibilidade.

De acordo com Dechen, Nachtigal (2006) os teores adequados de M.O proporcionam um melhor aproveitamento do Fe pelas plantas, devido a suas características acidificantes e redutoras, além da condição para formar quelatos em

condições adversas de pH. Como já relatado, tanto a absorção quanto o transporte de Fe vão depender também da concentração de P, do teor de Ca e pH (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). Para as plantas de feijoeiro do presente ensaio, o convencional teve maior teor de Ca no solo e correlação negativa para a absorção pelas plantas ao final do ciclo.

O Fe é o micronutriente mais importante na produção agrícola, principalmente na cultura do feijoeiro, sendo sua disponibilidade reduzida principalmente em solos calcáreos (SOURI; NAIJI; MARYAM ASLANI, 2018).

Conforme os resultados encontrados, houve correlação positiva entre aplicação dos resíduos e disponibilidade de teores de Fe para absorção pelas plantas de feijão. Não obstante, o tratamento convencional teve correlação negativa com os principais micronutrientes (Figura 15) que possivelmente está relacionado com os valores verificados para condutividade do solo no estágio vegetativo ($2,01 \text{ mS cm}^{-1}$), condutividade da solução (1,20) e do pH da solução (7,5) que podem ter afetado a absorção dos micronutrientes pelas plantas.

A acidez potencial (H^+Al) teve comportamento decrescente em relação as doses dos biofósforo em quase todas as associações, exceto nos tratamentos com proporções iguais dos resíduos e o convencional. Foi observado uma redução de 64,6% em relação à menor média encontrada (7,08) e 43,15% para o convencional quando comparado ao solo natural (Tabela 2). Kitamura et al. (2020) verificaram comportamento similar a essa relação decrescente, com reduções percentuais para acidez potencial nas faixas de 27, 61, 55 e 92% de biofósforo (6,25, 100, 250 e 500 Mg ha^{-1}) e inferior ao convencional. Porém diferiram desses resultados as plantas dos tratamentos com maiores doses, que pode estar associado a maior liberação do nitrogênio amoniacal disponibilizada pelo BS. Essa hipótese pode ser em parte confirmada, considerando-se que durante o monitoramento da solução do solo, dentro da mesma dose (10 t) de cinza, o pH variou entre 6,6 até 8, com menor pH para as doses sem lodo (T1 e T5).

Os valores de saturação por bases (V%) para todas as associações atingiram níveis acima do preconizado para cultura do feijoeiro (em torno de 70%). Como exceção, a saturação em vasos do tratamento convencional atingiu valores 6,43 % menores. A saturação por bases evoluiu de baixa para alta desde a análise inicial, por efeito da calagem, mas também com a aplicação das doses de cinza associadas ao

biossólido. Embora ambos resíduos possam ter contribuído com o aumento da V%, a CBC parece ter sido predominante no resultado, já que a adição das doses de BS em associação a cinza não modificou estatisticamente os valores de V%. As cinzas representam fonte rápida de disponibilidade de nutrientes (Tabela 3) às plantas, pois a queima do material orgânico libera os nutrientes de estruturas orgânicas, o que reduz a necessidade de mineralização pelos microrganismos do solo. Contudo, devido ao alto conteúdo orgânico do BS a decomposição e mineralização do resíduo para liberação de nutrientes é primordial para fornecer nutriente às plantas, embora este processo não esteja alinhado à demanda nutricional das culturas ao longo dos estádios fenológicos do feijoeiro.

Ainda em relação ao *status* iônico, observou-se aumento no teor de K com efeito isolado para cinza, com valores 393,3 % maiores que o teor do elemento encontrado para o convencional. Esse resultado evidencia a capacidade deste resíduo em suprir o teor de K às plantas, equitativamente ao fertilizante mineral. Esta característica se deve ao fato de que o K é o nutriente encontrado em maior quantidade nesse resíduo, estando prontamente disponível para a planta. Para o teor de magnésio, os dois resíduos aumentaram o teor do elemento no solo, quando comparado ao tratamento convencional. A ausência de aplicação de magnésio no convencional, apenas NPK, indica que os resíduos podem ser fontes alternativa nutricionalmente mais completas do que os fertilizantes minerais convencionais.

O uso do BS como fertilizante tem sido estudado por diversos autores (BOURIOUG et al, 2015; BURDUCEA et al, 2019; DHANKER et al.,2021), a associação do mesmo com a cinzas oriundas de bagaço de cana na cultura do feijoeiro. Essa prática poderá se constituir alternativa sustentável à destinação de resíduos e ser suplementar a demanda nutricional da cultura do feijoeiro.

1.5 Conclusão

A aplicação dos resíduos influenciou claramente na disponibilidade potássio notadamente para as maiores doses de cinza. Com o ajuste da aplicação dos dois resíduos, esse efeito também foi notado em relação ao N, P, Ca e Mg acompanhando o processo de mineralização; em relação a micronutrientes, os resíduos favoreceram a disponibilidade de Fe obedecendo critério de dose aplicada. O maior aporte de Si provocado pela aplicação de cinzas diferiu em função das doses, em relação ao tratamento convencional e aplicação de biossólido.

Referências

- ABREU et al. Characterization of biosolids and potential use in the production of seedlings of *Schinus terebinthifolia* Raddi. **Eng. Sanit. Ambient**, v.24, n.3, p.591-599, maio. /jun.2019 <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019108265>.Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/xgcZTGPw3CWzP9RzzWyHyhP/?format=html>
- AGUIAR, T. et al. **Boletim 200**: instruções agrícolas para as principais culturas econômicas. 7.ed. Campinas: IAC, 2014. 452 p.
- ALCÂNTARA, R. **Biossólido como fonte de nutrientes para o algodão herbáceo e seu efeito residual no milho**. 2003. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado Temático em Recursos Naturais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.
- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013
- AMEYU, T. A Review on the Potential Effect of Lime on Soil Properties and Crop Productivity Improvements. **Journal of Environment and Earth Science**, v.9, n.2, p.17-23, 2019.<https://doi.org/10.7176/JEES/9-2-03>
- BOUDJABI, S.; CHENCHOUNI, H. On the sustainability of land applications of sewage sludge: How to apply the sewage biosolid in order to improve soil fertility and increase crop yield. **Chemosphere**, v.282, nov.2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131122>
- BOURIOUG, M et al. Sewage sludge fertilization in larch seedlings: effects on trace metal accumulation and growth performance. **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 77, p. 216-224, abr. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.031>.
- ASSAD, L. Aproveitamento de resíduos do setor sucroalcooleiro desafia empresas e pesquisadores. **Ciência e Cultura**, v.69, n.4, p.13-16. <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602017000400005>
- BOUDJABI, S; CHENCHOUNI, H. On the sustainability of land applications of sewage sludge: how to apply the sewage biosolid in order to improve soil fertility and increase crop yield. **Chemosphere**, v. 282, p. 131-122. nov. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131122>.
- CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. Irriga, Botucatu, v. 14, n.1, p.1-11, jan, 2009.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos essenciais e benefício às plantas superiores. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. cap. 13. p. 327-354.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. cap. 13. p. 327-354.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2011.

European Commission. Protection of the Environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. Off. J. Eur. **Communities** 1986, 4, 6–12

FAO. **Uso Agrícola de Esgoto**. Em Tratamento e Uso de Águas Residuais na Agricultura, Irrigação e Desenho de Papel 47; Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura: Roma, Itália, 1992.

FAVARE, H et al. Potential use of ash from sugarcane bagasse to produce passion fruit seedling. **Australian Journal Crop Science**, v.14, n.14, p.408-4014, 2020. doi: 10.21475/ajcs.20.14.03.p1734.

GUPTA, R. et al. Effects of rice husk ash and bagasse ash on phosphorus adsorption and desorption in an alkaline soil under wheat–rice system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 45, p.1385-1398,2014. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2014.884109>.

JALAL, A et al. Common Bean Yield and Zinc Use Efficiency in Association with Diazotrophic Bacteria Co-Inoculations. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 959, 12. maio.2021. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy11050959>.

KITAMURA, N. Biossólido no estabelecimento de espécies herbáceas e nos atributos químicos e microbiológicos em solo impactado pela mineração de carvão. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 607-617, ago. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020182506>.

KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., NOLLA, A. Análise de silício no solo, planta e fertilizante. **Boletim Técnico nº 02**, Uberlândia: GPSi, 2004. 50p

LOPES, Alfredo Scheid (org.). **Boletim técnico Nº 1**: acidez do solo e calagem. São Paulo: Anda Associação Nacional Para Difusão de Adubo, 1991. 22 p. (3a ed.).

MOHAMED, B et al. Sewage sludge used as organic manure in Moroccan sunflower culture: effects on certain soil properties, growth and yield components. **Science Of The Total Environment**, v. 627, p. 681-688, jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.258>.

MARTINS, M.R. **Aplicação de lodo de esgoto no solo: avaliação da estabilização e da toxicidade**. 2020. 108 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Mestra em Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Tecnologia, Limeira, 2019. Cap. 1.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 11. p. 645-736

NUNES, N et al. Review of Sewage Sludge as a Soil Amendment in Relation to Current International Guidelines: a heavy metal perspective. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 2317, 20 fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/su13042317>.

OSINUBI, K.; EBEREMU, A. O. Hydraulic conductivity of compacted lateritic soil treated with bagasse ash. **International Journal Of Environment And Waste Management**, v. 11, n. 1, p. 38, 2013. <http://dx.doi.org/10.1504/ijewm.2013.050522>

RAI el a. An Experimental Study of Effect of Sugarcane Bagasse Ash on the Permeability of Shale Soil. In: **International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering**, MUET, 2019, Pakistan. p. 1-4

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, SP: Instituto Agrônomo de Campinas - **IAP**, 2001.

SOURI, M et al. Effect of Fe-Glycine Aminochelate on Pod Quality and Iron Concentrations of Bean (*Phaseolus vulgaris*L.) Under Lime Soil Conditions. **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, v. 49, n. 2, p. 215-224,18 jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2017.1421655>.

SHAN, Y. et al. Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat soil. **Scientific Reports**, n.11, v.1, p. 1402, jan. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80358-2>

TAVARES, R et al. Avaliação da toxicidade do lodo de estação de tratamento de água e esgoto, antes e após vermi compostagem, usando teste de germinação com semente de alface (*Lactuca sativa*). **Revista Dae**, v. 67, n. 218, p. 156-167, 2019. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2019.040>.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

ZEFFA, D. et al. Genetic Variability of Mineral Content in Different Grain Structures of Bean Cultivars from Mesoamerican and Andean Gene Pools. **Plants**, v. 10, n. 6, p. 1246, 19 jun. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/plants10061246>.

CAPÍTULO 2

Resposta do feijoeiro em solo com diferentes doses de cinza de cogeração de bagaço de cana-de-açúcar e bioossólido

Resumo

A aplicação de resíduos agroindustriais exerce efeito promissor sobre a estrutura e fisiologia da planta, contribuindo para o aporte nutricional e absorção de água. Este trabalho objetivou avaliar os efeitos da substituição da adubação comercial, por uma adubação com resíduos no cultivo de uma variedade do feijoeiro em dois estádios (vegetativo e reprodutivo) sobre a produtividade da cultivar. O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, no esquema fatorial $2 \times 4 + 1$, com quatro repetições. Observou-se efeito da aplicação do bioossólido para maioria dos parâmetros, exceto para o acúmulo de silício que não sofreu influência da associação do Bioossólido. Em relação ao sistema radicular, ficou evidente que aplicação da cinza (CBC) influenciou no desenvolvimento das raízes no solo, afetando sua atividade metabólica promovendo efeitos negativos na absorção de água e nutrientes pelo sistema radicular. Quanto a silício o maior acúmulo foi nos tratamentos sem a adição de Bioossólido (T1 e T5). Conclui-se que essa combinação no solo tem potencial para uso, entretanto se faz necessário estabelecer doses menores que 5 e 10 t ha⁻¹ de cinzas de para solos arenosos.

Palavra-chave: cinzas de caldeira; nutrição mineral; silício; bioossólido

Abstract

The application of agro-industrial residues has a promising effect on the structure and physiology of the plant, contributing to the nutritional intake and water absorption. The objective of this work was to evaluate the effects of replacing commercial fertilization by a fertilization with residues in the cultivation of a variety of common bean in two stages (vegetative and reproductive) on the productivity of the cultivar. The experiment was carried out under greenhouse conditions. The experimental design used was randomized blocks, in a 2x4+1 factorial scheme, with four replications. An effect of the application of biosolids was observed for most parameters, except for the accumulation of silicon that was not influenced by the association of biosolids. Regarding the root system, it was evident that application of ash (CBC) influenced the development of roots in the soil, affecting its metabolic activity, promoting negative effects on the absorption of water and nutrients by the root system. As for silicon, the greatest accumulation was in treatments without the addition of Biosolid (T1 and T5). It is concluded that this combination in the soil has potential for use, however it is necessary to establish doses smaller than 5 and 10 t ha⁻¹ of ash for sandy soils.

Keyword: boiler ash; mineral nutrition; silicon, biosolid

2.1 Introdução

Com o aumento da geração de resíduos urbanos, agrícolas e industriais e a crescente necessidade na busca de alternativas para gestão e destinação desses resíduos, muitas soluções têm sido propostas, como disposição em aterros sanitários, fabricação de tijolos, produção de biogás, geração de energia e calor, condicionante e fertilizante do solo, dentre outros (KACPRZARK et al., 2017).

Nesse contexto, a aplicação de resíduos orgânicos e inorgânicos além de ser uma solução para reaproveitamento, tem surgido como alternativa para fertilização no cultivo de diferentes culturas, por ser uma solução viável tanto para gestão quanto para o plantio agrícola, além do baixo custo da aplicação. A combinação de resíduos orgânicos e inorgânicos além de aumentar a atividade biológica pode reduzir a presença contaminantes (ROBINSON et al., 2018; RAMIZER et al., 2012). Principalmente para os resíduos urbanos e agrícolas que são fontes potenciais de nutrientes essenciais como nitrogênio, potássio e fósforo, porém quando depositados em níveis elevados que excedem os limites podem desencadear níveis críticos de eutrofização nos mananciais, além de que o excesso de nutriente pode levar a toxidez das plantas. Portanto, antes da aplicação de resíduos como suplemento em sistemas agrícolas, é importante avaliar a viabilidade econômica e os efeitos adversos provocados nas plantas e ambiente (SHARMA et al., 2019).

A aplicação de resíduos orgânicos pode favorecer a absorção de água e fornecer nutrientes que são exigidos pelas plantas. Ademais auxilia na redução do uso de fertilizantes minerais, melhorando a qualidade do solo e atuando como condicionante.

O uso de cinzas residuais de cogeração, tem se mostrado uma grande oportunidade para recuperação de nutrientes importantes, além de ser uma alternativa para mitigação do descarte desses resíduos e uma fonte promissora de nutrientes. Esses resíduos possuem compostos orgânicos capazes de melhorar a disponibilidade de NPK no solo, além de conter cerca de 2,76% de elementos nutrientes como nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio, magnésio (SOEGianto et al., 2017).

O silício também é um elemento encontrado em grandes proporções em cinzas resultantes da queima do bagaço de cana, alcançando cerca de 10 a 30% em massa de SiO₂ em sua forma amorfa e 3,5% na forma cristalina (BLOND et al., 2017). O teor de silício pode variar quantitativamente em função do plantio da cana-de-açúcar, das

condições da região, em termos de propriedade do solo, clima e estágio fenológicos da planta.

Camargo et al. (2010) indicam que a cana é uma das culturas com maior taxa de acúmulo de silício, considerando-se que em uma safra sua absorção pode atingir em torno de 200-500 kg ha⁻¹ Si. Os resíduos potenciais da indústria sucroalcooleira com alta quantidade de Si em ordem decrescente são: palha, bagaço, torta de filtro e vinhaça (FORMAN et al, 2020).

Embora, o Si não se enquadre como elemento essencial, Wei et al. (2021) argumenta que o Si desempenha papel ativo no desenvolvimento das plantas, principalmente no aspecto morfológico. Assim pode promover efeitos benéficos para o crescimento de muitas espécies, influenciando parâmetros como altura, área foliar, volume e área superficial das raízes em até 85%. Além disso, o Si melhora a capacidade da planta na tolerância a estresses físicos, biológicos e toxicidade (ETESAMI; JEONG, 2018; KATZ, 2019).

Apesar dos benefícios elencados, antes de ser aplicada como fertilizante, as cinzas devem ser avaliadas quanto a sua toxicidade, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos e com base na norma ABNT NBR 10004:2004, que trata da classificação de resíduos sólidos.

Os resíduos do bagaço podem ser incorporados em combinação com outros compostos para formação de fertilizantes (MISRAN, 2005), melhorando assim a disponibilidade de nutrientes. Segundo Mazzeo (2020) o bagaço da cana pode ser aplicado como agente bioestimulante, visando elevar a biodegradabilidade e redução da toxicidade de resíduos como o biossólido.

Assim, a hipótese central do estudo versa sobre o impacto agrônômico da aplicação de resíduos na cultura do feijoeiro e terá com embasamento o estudo de respostas metabólicas, quanto suas respostas enzimáticas, fotossíntese, parâmetros biométricos e seu efeito sobre a produção vegetal.

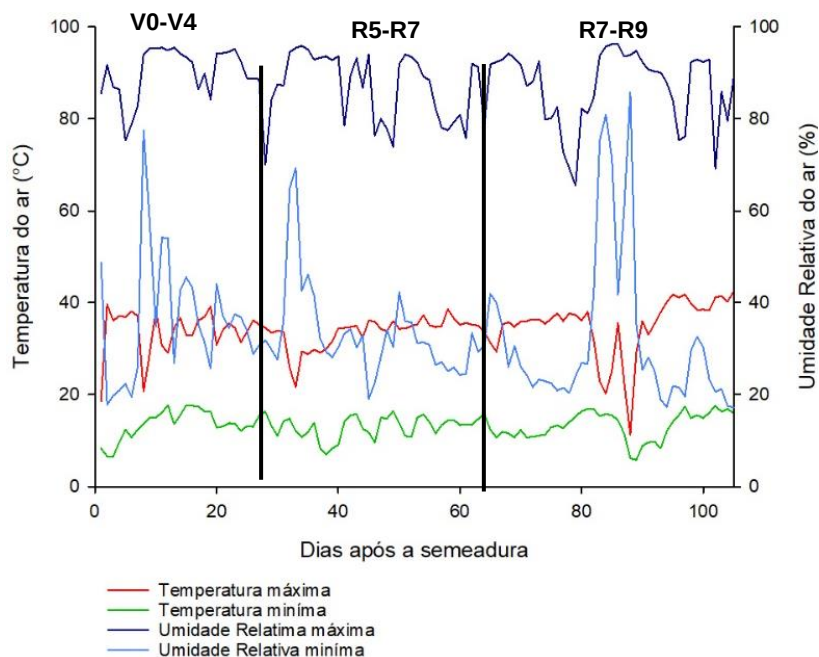
2.2 Material e métodos

2.2.1 Instalação do experimento

O ensaio foi conduzido do Instituto de Biociências-IB/UNESP, Botucatu-SP, (22°53'42.4", 48°29'36.6" e altitude de 840 m) entre maio a setembro de 2020. O clima local é classificado como temperado quente úmido, com verão chuvoso e inverno seco, segundo classificação de Koppen. A média anual da temperatura varia de 20,3°C, e umidade relativa variando entre 20% a 70% (CUNHA; MARTINS, 2009).

O controle ambiental foi registrado no período experimental através de um datalogger instalado no centro da casa de vegetação. A leituras foram registradas a cada 30 minutos. A temperatura média durante o período de experimentação foi 23,13°C e umidade relativa de 61,74% (Figura 16), valores adequados para desenvolvimento do feijoeiro.

Figura 16 - Temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar ao longo do experimento no período de maio de 2020 a setembro de 2020. Botucatu, SP

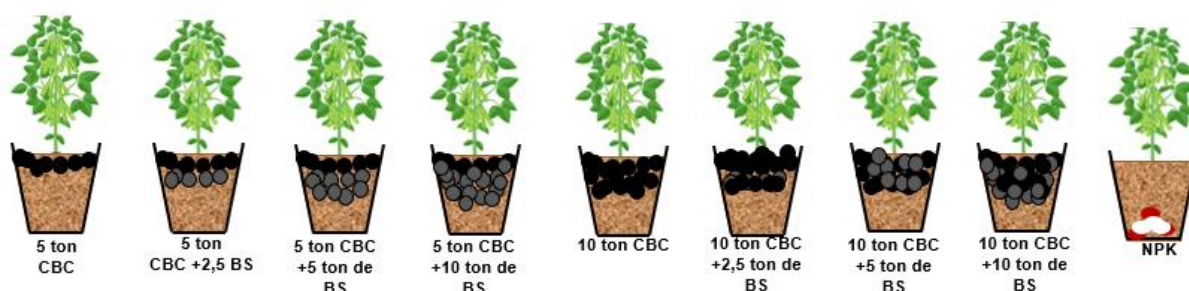


2.2.2 Delineamento experimental e manejo da cultura

O genótipo de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizado foi a cv. IAC Sintonia, de ciclo semiprecoce (85 dias) e crescimento indeterminado.

O delineamento experimental adotado neste estudo foi em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial (2 x 4 +1) sendo 2 doses de cinza de bagaço decana-de-açúcar (5 e 10 t) suplementado com 4 doses de lodo de esgoto seco (biossólido) (0, 2,5, 5 e 10 t), com um tratamento convencional sem dose de cinza e lodo, apenas com adubação recomendada para a cultura, com 4 repetições por tratamento (Figura 17).

Figura 17 – Definição dos tratamentos: T₁:5 t CBC; T₂:5 t CBC+2,5t B; T₃: 5 t CBC+5 t BS; T₄: 5 t CBC+10 BS; T₅: 10 t CBC;T₆: 10 t CBC+2,5BS ; T₇: 10 t CBC+5 BS, T₈:10 t CBC+10BS ; T₉:convencional (NPK)



As parcelas experimentais foram constituídas por vaso de polietileno de 21 L, com solo caracterizado como latossolo vermelho distrófico de textura franco arenosa com 755 g dm⁻³ areia, 210 g dm⁻³ argila e 34 g dm⁻³ de silte, coletado na cidade de São Manuel, SP. As adubações de plantio e cobertura (quadro 6) para as plantas do trat. convencional seguiram recomendações para cultura do feijoeiro para o estado de São Paulo conforme Boletim 200 do IAC (AGUIAR et al., 2014). Segundo apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – Quantidade de nutrientes aplicados na adubação do tratamento convencional

Nutriente	Plantio	Cobertura
	Mg dm ³	
Nitrogênio (Ureia)	30	30
Fosforo(P ₂ O ₅)	50	50
Potássio(K ₂ O)	90	-
Zinco (ZnSO ₄)	150	-
Boro (H ₃ BO ₃)	61	-

Os atributos químicos do solo foram determinados de acordo com a metodologia proposta pela EMBRAPA (2011) e Raij et al (2001) e estão resumidos na Quadro 7.

Quadro 7 - Atributos químicos do solo na camada 0 a 0,20 m de profundidade- São Manuel SP.

pH	MO	AL ⁺³	H+AL ⁺³	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	Fe	Cu	Mn	Zn	B	P _{resina}	S
CaCl ₂	g dm ³	molc dm ⁻³								mg dm ³						
4,2	4	6	20	0,26	2	1	2	22	10	3	0,4	2,8	0,2	0,16	2	18

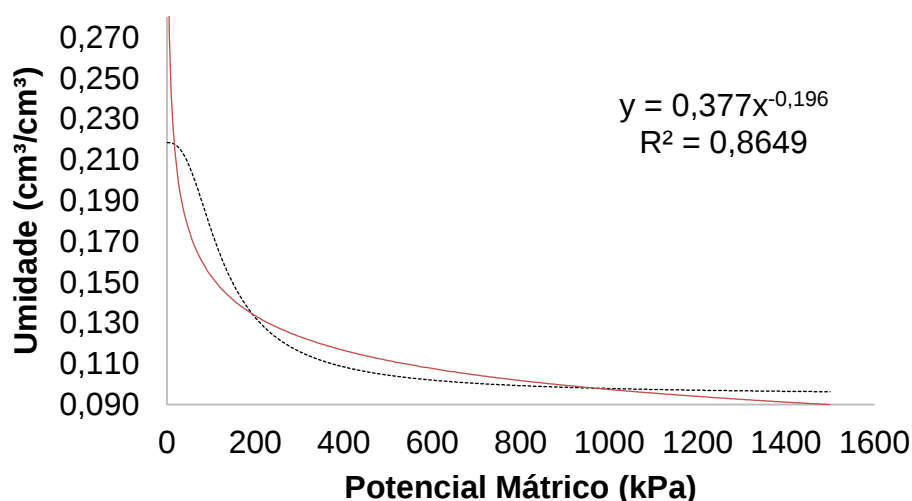
pH – potencial hidrogeniônico; MO – matéria orgânica; P_{resina} – extrator de fósforo; Al³⁺ - acidez trocável; H+Al⁺³ – acidez potencial; - SB – soma de bases; CTC – capacidade de troca cátions; V – saturação por bases

O experimento teve um sistema de irrigação por gotejamento com espaçamento de 0,2 m entre os emissores e uma vazão média de 2 L h⁻¹ conectado a distribuidores de duas saídas e fixadas por uma haste tipo flecha por vaso e pressão de operação de 10mca.

O manejo da irrigação foi feito via solo com o auxílio de três tensiômetros por tratamento, instalados aleatoriamente nas repetições, em profundidade de 0,15 m, totalizando 27 tensiômetros no ensaio. O monitoramento da tensão de água no solo foi realizado diariamente com o auxílio de um tensiômetro digital e o valores de tensão convertidos em unidade volumétrica baseado na equação para ajuste da curva de retenção de água no solo (Figura 18), pelo modelo proposto por Van Genuchten (1980).

Todos os tratamentos foram conduzidos com a mesma lâmina de água, mantendo a tensão próximo a capacidade de campo (6kPa – 10kPa). A lâmina total de água via irrigação foi 365,96 mm, distribuída ao logo do ensaio.

Figura 18 - Curva de retenção de água no solo



2.2.3 Parâmetros avaliados

Os parâmetros biométricos foram avaliados nas duas épocas descritas, quando foram registrados o diâmetro do caule; número de trifólios; área foliar total; altura; biomassa seca (caule, raiz, folha); morfologia radicular (área, volume, diâmetro, comprimento), índice de crescimento, contagem de vagens; grãos por planta, número de grãos por vagem e massa de grãos por planta; comprimento de vagem e estimativa de produtividade (kg ha^{-1}).

A partir da determinação dos parâmetros de crescimento e biomassa vegetal, foram determinados os seguintes índices de crescimento: área foliar específica, biomassa alocada nas raízes e relação de área foliar, seguindo metodologia de Hunt (1982).

A altura das plantas foi mensurada com auxílio de uma fita métrica em cm, a partir do nível do solo até o ápice da planta. Para o número de folhas foram coletadas todas as folhas sendo as mesmas utilizadas para a análise de área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$). A avaliação do diâmetro foi determinada com auxílio de um paquímetro digital (mm), a partir do colo da planta. Para análise da área foliar foram coletadas todas as folhas de uma planta, contabilizadas e mensuradas por um integrador de área foliar modelo LiCOR (mod. Li-3000). analisador infravermelho de gases (IRGA) modelo LI-6400XT (LI-COR, Lincoln, Nebraska – USA).

As avaliações bioquímicas foram feitas na segunda coleta aos 70 DAE, sendo para esse fim coletada uma planta por repetição. Para as avaliações fisiológicas foram coletadas folhas completamente expandidas do terço médio das plantas aos 35 DAE e 70 DAE e submetidas a avaliações de conteúdo relativo de água (CRA) conforme Barr et al. (1962), teor de pigmentos foliares (clorofila a, clorofila b, carotenoides) segundo Lee et al. (1979) e perdas de eletrólitos (LAFUENTE et al., 1991). Também foram determinados teores foliares de macronutrientes e micronutrientes conforme Malavolta et al. (1997) e teor de silício nos grãos e raízes de acordo com metodologia descrita por Korndörfer et al.(2004)

Parâmetros fisiológicos de trocas gasosas, foram avaliados nos estádios fenológicos V4 e R7 utilizando-se medidor infravermelho de gases (IRGA) modelo LI-6400XT (LI-COR, Lincoln, NE, USA). As medidas realizadas com o IRGA foram a taxa assimilação líquida de CO_2 (A ; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s ; mol

$\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de carbono (Ci ; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e transpiração (E ; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Para avaliação da morfologia radicular, foram coletadas raízes de uma planta por repetição para cada tratamento, lavadas acondicionadas em frascos de vidros com solução de álcool 70%. As raízes foram submetidas a análise por scanner de leitura ótica WinRhizo, na resolução de 300 dpi, para determinação quantitativa das variáveis morfológicas baseado no método de Tennant (1975).

Para as análises bioquímicas, foram coletadas no início da fase de florescimento amostras do tecido foliar do terço médio de uma planta por repetição, em seguida congeladas em N líquido e armazenadas em freezer (-80°C). Posteriormente, as amostras foram moídas na presença de N líquido, até a obtenção de um pó fino, em seguida pesadas (300 mg de massa fresca da folha) e armazenadas, as amostras foram mantidas em frascos eppendorf, em ultrafreezer a -80°C .

Com este material, foram analisados o teor de proteína solúvel total (BRADFORD, 1976), atividade da enzima superóxido dismutase (GIANNOPOLITIS e RIES, 1977), peroxidase e catalase (LOCK, 1963), açúcares totais (DUBOIS et al., 1956) e atividade da enzima Nitrato redutase (JAWORSKI, 1971).

Para determinação do teor de silício nas raízes foram feitas duas coletas de amostras para cada tratamento no Estádio V4 e ao final do ensaio e o teor de silício nos grãos foi realizado após a colheita, seguindo a metodologia de Korndörfer et al., (2004).

2.2.4 Caracterização dos resíduos

Os resíduos coletados foram submetidos à análise da composição de macro e micronutrientes incluindo silício, carbono e nitrogênio total. O biossólido utilizado (Quadro 9) foi coletado na estação de tratamento de esgoto da ETE- SABESP em Botucatu-SP, na Fazenda experimental da Faculdade de Ciências agrônômicas. O material foi tratado conforme o art.3 da resolução CONAMA 375/2006, permanecendo em repouso para secagem em baias por 45 dias, com temperatura de 55°C até que a matéria apresentasse 20% de umidade.

Quadro 9 - Características químicas do biossólido (base seca)

N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Umidade	M.O.	C.O.
----- % (ao natural) -----								seca
2,8	3,5	0,1	1,5	0,4	0,4	21	37	26
Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	C/N	pH ao natural	
----- mg/kg (ao natural) -----								
1132	145	185	33793	259	701	7/1	5,8	

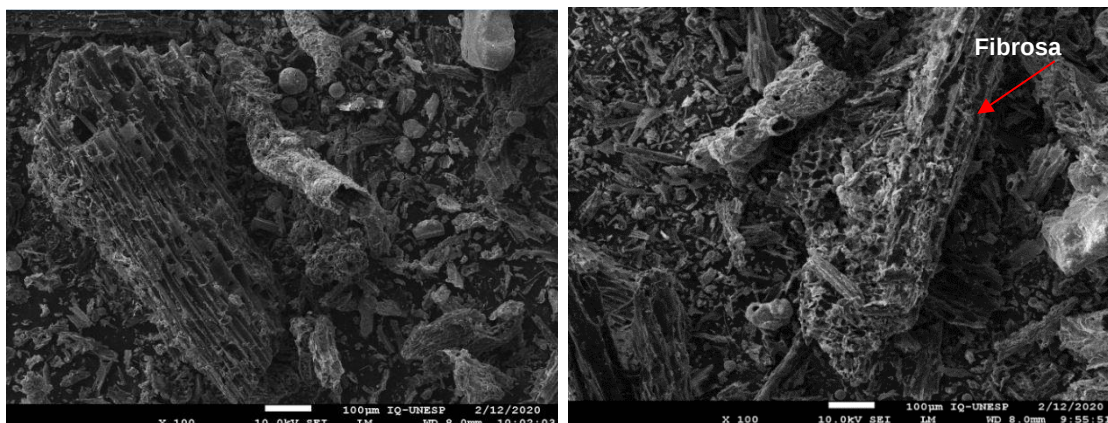
A cinza do bagaço da cana foi coletada na Usina Zilor - Energia e alimentos em Lençóis Paulista (SP), provenientes de caldeira aquatubular (Quadro 10).

Quadro 10 - Caracterização semi - elementar cinza da queima do bagaço da cana-de-açúcar teor (%) em massa

Elementos	(%)
S	1,95
P	2,25
Al	2,51
Mg	3,28
Ca	9,32
K	10,93
Si	23,97
O	45,79

Para identificar e quantificar os elementos que constituem as cinzas residuais da combustão incompleta das amostras de biomassas foi realizada análise de espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) no laboratório CCDPN-LIEC, do Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP).

A cinza do bagaço de cana, tem uma matriz heterogênea, com partículas fibrosas e dimensões distintas (Figura 19).

Figura 19 - Micrografias de partículas da cinza do bagaço de cana de açúcar (100x)

2.2.5 Análise estatística

Os dados inicialmente foram submetidos a verificação da normalidade e homoscedasticidade das variâncias por meio dos testes de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$).

Os dados que seguiram normalidade, foram submetidos a análise de variância – ANAVA e, havendo efeito significativo ($p < 0.05$) foram complementados com os testes de comparações múltiplas, sendo utilizado Tukey ($p < 0.05$) para comparações entre médias, e quando significativo pela ANAVA interação do fatorial com tratamento convencional foi utilizado o Teste de Dunnett ($p < 0.05$).

Para analisar a variabilidade no comportamento em relação as doses testadas foram realizadas a Análise de Componente Principal (PCA) e teste de Correlação de Pearson.

As análises estatísticas foram realizadas nos programas do Agroestat®, Minitab 18® e software R versão 4.1.0 (R Core Team, 2021) e para melhor compreensão dos resultados, gráficos no formato de figuras foram elaboradas utilizando o software SigmaPlot®, versão 14.

2.3 Resultados

2.3.1 Parâmetros biometricos

Para o número de trifólios (Tabela 1), não houve diferença entre as doses testadas de CBC e BS no estágio V4. Enquanto, no estágio R7 houve interação entre os fatores. Quando usado 10 t ha⁻¹ de cinza, a adição de 5 t ha⁻¹ de BS foi a que produziu plantas com maior número de trifólios. Quando usado 5 t de cinza, as doses de 5 e 10 t de biossólido apresentaram maiores médias, não diferindo entre si. As doses de cinza só diferenciaram entre si quando aplicado a maior dose de biossólido, com maiores médias nas plantas com a dose de 5 t.

Tabela 1 - Número de trifólios no estágio reprodutivo (R7) em plantas de feijoeiro em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	4,50±0,58aB	5,50±0,58aB	7,25±0,50aA	7,75±0,50aA
10	5,25±0,50aB	6,00±0,82aB	8,25±0,96aA	6,50±0,58bB
Convencional	11,50±1,29*			
CV (%)	11,34			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para área foliar nos dois estádios houve interação entre os fatores (Tabela 2). No V4 a área foliar teve um acréscimo conforme o aumento das doses de BS para ambas as doses de CBC, sendo que 10 t CBC foi superior as associações com 5 t ha⁻¹ (4,89%, 40,03%, 5,48%, 18,01%). Quando adicionado 10 t de biossólido foi aonde se obteve maior áreas foliar, mas não teve diferença estatística com a dose de 5 t BS. O T8 foi 18% maior que no 4 e estatisticamente diferente. No estágio R7 observou-se o mesmo comportamento do V4, exceto pela maior média, que foi do tratamento 7.

Para altura das plantas no estágio V4 houve interação dos fatores, quando usado 5 t de CBC, o tratamento 2 foi o que apresentou maior altura. Quando usado 10 t de CBC, o tratamento 8 foi o que apresentou maior média, diferindo das demais doses de BS. No estágio R7 as plantas que receberam a maior dose de CBC, apresentaram maior altura e diferiram das médias com 5 t de cinza, exceto pelos tratamentos 4 e 8 que não diferiram entre si.

Para o diâmetro no V4, quando adicionado 10 t ha⁻¹ de CBC, a adição de 10 t de BS foi que proporcionou maior diâmetro do caule, e diferiu das doses de 0 e 2,5 t o mesmo resultado ocorreu quando usou 5 t ha⁻¹ CBC. Enquanto no R7 observou comportamento semelhante, exceto que as maiores doses de BS não diferiu entre si, e diferiram somente das doses de CBC sem biossólido.

Tabela 2 - Área foliar (cm²), altura de plantas (cm), diâmetro de caule (mm) e número de trifólios nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Área foliar				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	122,27±0,9aB	107,10±6,3bC	139,67±1,8bA	146,47±2,6bA
10	128,25±4,3aC	149,97±5,1aB	147,32±3,1aB	172,85±5,5aA
Convencional	404,07±6,3*			
CV (%)	2,61			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	100,75±1,3bD	152,05±4,2bC	198,35±1,8bB	317,55±18,7aA
10	119,67±2,6aD	168,92±5,4aC	330,62±1,9aA	308,17±2,1aB
Convencional	1289,12±7,0*			
CV (%)	2,22			
Altura das plantas				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	11,65±0,46bB	14,07±0,80aA	13,40±0,01bA	13,79±1,24bA
10	13,37±0,22aC	12,82±0,67bC	15,22±0,70aB	17,23±0,18aA
Convencional	35,66±0,79*			
CV (%)	4,11			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	19,55±0,51bB	21,43±1,34bAB	21,30±1,69bAB	21,69±2,00aA
10	22,47±0,83aA	22,85±0,52aA	22,80±0,73aA	21,20±0,41aA
Convencional	34,80±0,81*			
CV (%)	4,18			
Diâmetro do caule				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	3,00±0,14aC	3,34±0,02aB	3,79±0,04aA	3,97±0,18aA
10	3,02±0,15aB	2,78±0,06bC	3,52±0,09bA	3,74±0,07bA
Convencional	5,85±0,22*			
CV (%)	3,14			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	3,25±0,13bB	3,86±0,10aA	3,85±0,06aA	4,05±0,13aA
10	3,78±0,07aB	4,03±0,11aAB	4,05±0,13aAB	4,10±0,35aA
Convencional	5,50±0,15*			
CV (%)	3,87			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

A massa fresca da folha (Tabela 3) teve influência da interação dos tratamentos, no V4, com maior acúmulo de massa fresca da folha (MSF) para o tratamento 4, mas só diferiu dos tratamentos 1 e 5.

Quando usou 10 t o maior acúmulo também foi para o tratamento 8 ,11,64% que para o tratamento 4. Já no R7 não houve interação dos fatores, com influência somente da dose de BS que teve maior acúmulo quando usado 10 t, que diferiu estaticamente da dose sem e com 2,5 t de BS.

Tabela 3- Massa fresca folha, (g) nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Efeitos de cinza do bagaço de cana de açúcar e biossólido				
Massa fresca Folha				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	2,11±0,01aBC	1,93±0,08bC	2,49±0,05aAB	2,75±0,32aA
10	2,00±0,18aB	2,81±0,01aA	2,70±0,01aA	3,07±0,01aA
Convencional	9,24±0,52*			
CV (%)	7,03			
Estádio R7				
Biossólido	Massa fresca Folha			
0	1,54±0,06c			
2,5	2,53±0,17bc			
5	4,56±1,00ab			
10	5,73±7,57a			
Convencional	28,20±5,69			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett

Massa seca da folha (Tabela 4) teve influência das associações de BS e CBC no Estádio V4 e R7. No V4 quando usou 5 t de cinza o maior acúmulo de massa seca da folha (MSC) foi do tratamento 4, que não diferiu do tratamento 3. Quando usou 10 t de CBC o maior acúmulo também foi para 10 t BS (T8), que foi estaticamente diferente do tratamento 4.

Enquanto que no R7 o maior acúmulo de MSF foi no tratamento 4 que diferiu das demais doses e quando se usou 10 t o maior acúmulo foi no tratamento 7 que diferiu das demais doses, mas não diferiu do tratamento 3.

Para massa fresca do caule (MFC) houve diferença entre as doses no estádio V4, com maior acúmulo nas plantas do tratamento 4 e 8, que não diferiram entre si. Quando se usou 10 t de CBC o menor acúmulo foi nas plantas que não receberam

biossólido (tratamento 1 e 5) que diferiu das demais doses, o mesmo ocorreu nas plantas que receberam 5 t de CBC, entretanto não diferiu de quando se adicionou 2,5 t de BS.

No estágio V4 para dose de 5 t de CBC as plantas do tratamento 4 tiveram maior acúmulo de massa seca do caule (MSC), mas não diferiu dos demais. Quando se usou 10 t de CBC o maior acúmulo de MSC foi nas plantas do tratamento 6. No R7 o comportamento foi similar, só que o tratamento 4 diferiu dos demais tratamentos.

Tabela 4 - Massa seca folha, massa fresca caule, massa seca caule (g) nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e bio sólido.

Massa seca Folha				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,368±0,1bB	0,362±0,01bB	0,457±0,02aA	0,457±0,02bA
10	0,430±0,01aC	0,505±0,04aBC	0,446±0,01aAB	0,537±0,02aA
Convencional	1,64±0,04*			
CV (%)	4,53			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,985±0,01aB	0,634±0,08aB	1,065±0,03aB	1,515±0,01aA
10	0,522±0,02bB	0,745±0,05aB	1,370±0,06aA	0,879±0,02bB
Convencional	6,08±0,64*			
CV (%)	14,69			
Massa Fresca Caule				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	1,08±0,04aAB	0,651±0,01bB	1,391±0,04aA	1,399±0,08aA
10	0,986±0,06aB	1,544±0,03aA	1,513±0,20aA	1,559±0,03aA
Convencional	6,08±0,64*			
CV (%)	13,34			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	1,80±0,02aC	2,86±0,51aB	2,78±0,02bB	4,02±0,06aA
10	1,11±0,01bD	2,23±0,01bC	4,49±0,03A	3,51±0,01aB
Convencional	25,33±1,12*			
CV (%)	7,87			
Massa Seca Caule				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,198±0,01aA	0,179±0,03bA	0,210±0,01aA	0,218±0,01aA
10	0,212±0,04aB	0,270±0,01aA	0,221±0,01aB	0,219±0,05aB
Convencional	0,464±0,16*			
CV (%)	9,28			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,395±0,05aC	0,538±0,03aBC	0,698±0,06bB	1,116±0,11aA
10	0,342±0,01aC	0,546±0,05aB	1,001±0,01aA	0,956±0,22bA
Convencional	3,692±0,11*			
CV (%)	9,26			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett

2.3.2 Índices de crescimento

Observou-se que houve interação dos fatores para a área foliar específica no Estádio vegetativo e reprodutivo (Tabela 5). No estágio V4 a maior área foliar específica (AFE), quando se usou 5 t de CBC foi nas plantas do tratamento 2 diferindo das demais doses e de quando se adicionou 10 t de CBC. Quando se usou 10 t CBC a maior área foliar foi nas plantas dos tratamentos 1 e 5, diferindo das demais doses.

Enquanto no R7, a maior área foliar quando usou 5 t de CBC foi no tratamento 4, mas quando se usou 10 t CBC foi para plantas do T7 que diferiu estatisticamente das demais doses, exceto do convencional. Notou-se que o acúmulo de biomassa na folha no V4, quando usou 5 t de CBC as plantas do T4 foi as apresentaram maior acúmulo, mas não diferiu das demais doses e nem do tratamento 8 apresentou maior acúmulo, percebe-se que essas plantas também tiveram uma menor AFE no V4.

Enquanto no R7 o maior acúmulo quando usou 5 t de CBC, foi para as doses sem lodo (T1 e T5) que também foram os tratamentos com menor AFE no R7, mas quando se adicionou 5 t de BS a biomassa alocada foi maior (T3 e T7), mas não diferiu na maior dose e nem quando se adicionou 10 t de CBC e nem apresentou diferença do tratamento convencional.

Tabela 5 - Área foliar específica ($\text{m}^2 \text{ folha g}^{-1} \text{ MSF}$) e biomassa total alocada nas folhas ($\text{g MSF g}^{-1} \text{ MST}$) nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Área foliar específica				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	124,14±0,6bB	171,50±29,9bA	131,25±5,3aB	96,68±1,8bC
10	246,19±14,1aA	201,95±12,0aB	107,63±4,7bC	196,68 ±6,1aB
Convencional	66,89±6,2*			
CV (%)	8,10			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	273,61±5,3aC	419,67±10,8aB	445,51±85,6bB	695,77±49,2aA
10	279,75±5,7aC	335,97±26,0bC	741,63±20,6aA*	574,10±18,0bB
Convencional	782,89±19,6*			
CV (%)	7,17			
Biomassa total alocada nas folhas				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,516±0,016bB	0,530±0,25aAB	0,558±0,047aAB	0,570±0,017bA
10	0,564±0,020aB	0,558±0,023aB	0,529±0,529aB	0,618±0,029aA*
Convencional	0,641±0,013*			
CV (%)	4,36			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,678±0,021aA	0,488±0,039aC	0,559±0,022aB*	0,539±0,022aBC
10	0,554±0,012bA*	0,513±0,008aA	0,539±0,011aA	0,438±0,048bB
Convencional	0,600±0,026*			
CV (%)	4,98			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

A razão da área foliar nas plantas de feijão no estágio vegetativo (V4) não apresentou interação entre os fatores avaliados (Tabela 16). Efeito significativo só para o fator secundário (biossólido), as plantas do tratamento com 2,5 t de BS teve menor razão foliar e não diferiu das plantas que não receberam dose de BS, enquanto que a maior razão foliar foi para as plantas que receberam maior dose de BS. Entretanto no R7 houve interação entre os fatores, quando usou 5 t de CBC a maior razão foliar com 10 t de BS que não diferiu estaticamente do tratamento convencional, mas diferiu do tratamento sem biossólido. Quando usou 10 t de CBC a maior razão

foliar também foi para a dose de 10 t de BS que diferiu das demais doses e do tratamento convencional

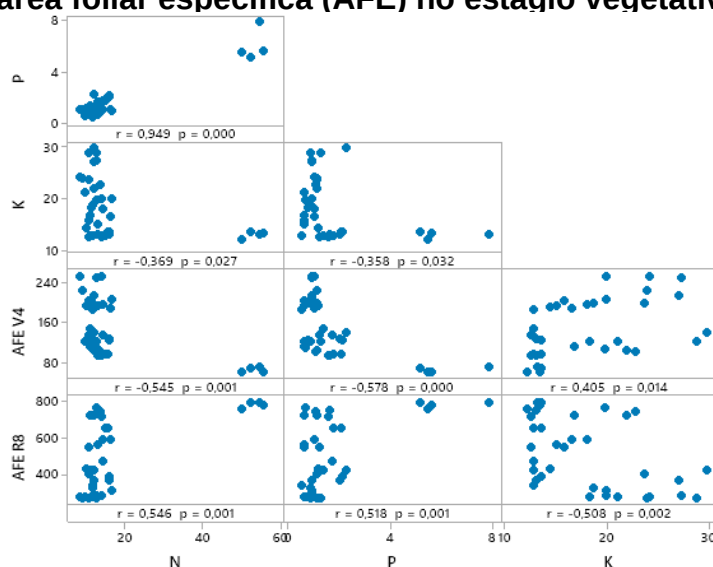
Tabela 6 - Razão de área foliar nos estádios V4 e R7 em plantas de feijoeiro em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Estádio V4				
Biossólido		Razão de área foliar		
0		170,30±6,78bc		
2,5		161,45±9,25c		
5		173,86±12,84b		
10		190,89±11,19a		
Convencional		157,43±11,27		
Cinza		Razão de área foliar		
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	69,37±1,42bB	117,55±4,82aA*	104,23±3,03bA	112,88±2,51bA*
10	127,28±5,8aB*	117,02±11,04aB*	130,20±4,13aB*	153,78±17,74aA
Convencional		127,79±8,39*		
CV (%)		7,01		

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para correlação da AFE com a disponibilização de nutrientes notou-se uma correção relação negativa entre área foliar no estágio vegetativo e o acúmulo de nitrogênio e fósforo na folha, e uma correlação positiva com o acúmulo de potássio na folha. Enquanto que no estágio reprodutivo ocorreu a relação inversa (Figura 20).

Figura 20 - Acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) na folha em relação a área foliar específica (AFE) no estágio vegetativo e reprodutivo.



Correlação de Pearson entre AFE no Estádio vegetativo e reprodutivo e teor de nitrogênio (N), teor de fosforo, teor de Potássio. Os círculos azuis representam correlações positivas e negativas em $P \leq 0,05$.

2.3.3 Avaliações morfológicas do sistema radicular

O acúmulo de massa fresca da raiz quando se usou 5 t de CBC foi maior no tratamento 3, que diferiu estaticamente do tratamento 1,2 e 4, mas quando se usou 10 t de CBC teve maior acúmulo as plantas do tratamento 2, que diferiu somente do tratamento 7. Já para o R7 houve uma relação contraria ao estágio vegetativo, com maior acúmulo para o tratamento 4, com uma redução 25, 83% comparado ao V4. E quando se usou 10t de CBC, o maior acúmulo foi para as plantas do tratamento 7, mas não diferiu dos tratamentos 5,6 e 7 (Tabela 7).

Tabela 7- Massa fresca das raízes e massa seca total (g) nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Massa Fresca das raízes				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,264±0,02aB	0,276±0,06aB	0,349±0,01aA	0,308±0,01aAB
10	0,271±0,03aA	0,290±0,01aA	0,202±0,03bB	0,273±0,01aA
Convencional	1,785±0,08*			
CV (%)	7,58			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,235±0,01aA	0,156±0,01aB	0,170±0,01bB	0,244±0,01aA
10	0,162±0,01bB	0,170±0,01aB	0,214±0,01aB	0,175±0,01bB
Convencional	0,641±0,03*			
CV (%)	4,13			
Massa seca Total				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,713±0,03aBC	0,683±0,03bC	0,814±0,083aA	0,801±0,019aB
10	0,759±0,03aB	0,904±0,04aA	0,842±0,01aAB	0,871±0,07aA
Convencional	2,568±0,09*			
CV (%)	5,15			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	1,453±0,05aBC	1,29±0,06aB	1,90±0,06bB	2,81±0,13aA
10	0,941±0,04bD	1,45±1,02aC	2,54±0,07aA	2,02±0,23bB
Convencional	10,12±0,66*			
CV (%)	9,22			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

A massa seca total teve um comportamento diferente no V4 quando se usou 5 t o maior acúmulo foi na maior dose de BS (tratamento 4) que apresentou diferença estáticas das demais doses. Quando se usou 10 t de CBC, com maior acúmulo de massa na menor dose de BS (tratamento 6), mas que não diferiu da maior dose.

A massa seca das raízes (MSR) no estágio V4 só teve influência das doses de biossólido (Tabela 8), quando adicionou 5 t de BS que teve um acréscimo de 21,21% em relação a dose sem lodo, mas não diferiu quando usou 2,5 t. Para as doses de CBC não houve diferença estática entre as médias. No estágio R7 quando houve interação entre as associações, e quando se usou 5 e 10 t de CBC o maior acúmulo

foi quando nos tratamentos 4 e 8 que não diferiram entre si, mas das demais doses, sendo 150% e 144% maior que as plantas que não receberam doses de biossólido.

Tabela 8 - Massa seca das raízes (g) nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Estádio V4	
Biossólido	Massa seca das raízes
0	0,132±0,02b
2,5	0,135±0,01ab
5	0,161±0,02a
10	0,121±0,01b
Convencional	0,374±0,01
Cinza	Massa seca das raízes
10	0,134±0,026a
5	0,140±0,015a
Convencional	0,374±0,01
CV (%)	12,23
Estádio R7	
Cinza	Biossólido
	02,5510
5	0,073±0,01aD0,122±0,01bC0,141±0,01bB0,180±0,01aA
10	0,077±0,02aC0,159±0,01aB0,169±0,01aB0,189±0,01aA
Convencional	0,342±0,01*
CV (%)	4,47

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para a área das raízes, só houve diferença entre as doses testadas no V4, quando se usou 5 t de CBC obteve-se maior área radicular para as plantas que não receberam lodo (tratamento 1 e 5), embora não tenha diferido da que recebeu 5 t de BS, na dose de 10 t de CBC as plantas do tratamento 6 tiveram maior área das raízes (Tabela 9).

Tabela 9 - Área das raízes (cm²) nos estádios V4 e R7 em plantas de feijoeiro em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Área das raízes				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	238,85±5,46aA	213,99±3,94bB	237,68±4,31aA	206,32±8,87aB
10	226,77±6,08aAB	238,93±5,20aA	217,43±2,44bAB	209,75±2,09aB
Convencional	273,34±35,56*			
CV (%)	5,23			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Nos dois estádios analisados, o comprimento das raízes e área da superfície das raízes foram influenciadas pela interação as doses testadas (Tabela 10). No V4 o comprimento das raízes e área da superfície apresentaram resultados semelhante, obtendo maior índice na dose de 10 t de CBC no tratamento 6 diferindo dos demais tratamentos, enquanto quando se usou 5 t de CBC as plantas do tratamento 3 alcançaram maior comprimento de raiz, e diferiu das demais. As plantas desse tratamento também apresentaram maior área da superfície das raízes que não diferiu do tratamento 1 e 5.

No Estádio R7 o comprimento das raízes e área da superfície das raízes obtiveram os maiores índices nas plantas do tratamento 4 que não diferiu das plantas do tratamento 3.

Tabela 10 - Comprimento (cm) e área da superfície das raízes (cm²) nos estádios V4 e R7 em plantas de feijoeiro em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Comprimento das raízes				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	394,85±3,49bB	333,26±49,66bC	524,04±4,98aA	239,67±2,59bD
10	438,40±6,28aB	645,50±7,4aA	311,10±7,14bC	288,57±2,15aC
Convencional	1590,57±4,76*			
CV (%)	3,76			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	264,49±1,70aB	259,39±2,72bB	497,05±12,95aA	502,86±70,46aA
10	250,69±4,98aC	304,65±7,07aB	353,91±1,85bA	379,81±14,82bA
Convencional	1719,23±12,76*			
CV (%)	4,80			
Área da superfície das raízes				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	38,31±1,09aA	28,64±1,63bB	47,17±0,87aA	23,67±0,46aB
10	12,07±1,15bC	53,82±11,50aA	27,82±0,99bB	28,93±7,52aB
Convencional	210,43±2,93*			
CV (%)	8,83			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	30,74±0,96aB	29,59±4,77aB	50,66±3,14aA	55,83±0,54aA
10	28,01±1,05aB	35,17±1,40aAB	40,51±8,18bA	38,02±3,49bA
Convencional	191,54±5,68*			
CV (%)	7,59			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para o volume de raiz no estágio V4 quando usou 5 t de CBC, o tratamento 2 obteve maior volume ocupado, diferindo somente do tratamento 4 sendo que o volume foi 145% menor. No estágio R7, quando usado 5 t de CBC o maior volume foi do tratamento 3 que não diferiu dos demais tratamentos.

Para o diâmetro médio (d_m) quando se usou 5 t de CBC, o tratamento 1 apresentou maior diâmetro médio no V4, quando usado 10 t de CBC o maior diâmetro foi das plantas do tratamento 8 que diferiu dos tratamentos 5, 6 e 7. Já no R7 quando usou 5 t de CBC, na dose sem BS, diferindo de quando se aplicou 10 t CBC. Quando se usou 10 t de CBC o maior foi das plantas do tratamento 7, mas não apresentou diferença do tratamento 6 (Tabela 11).

Tabela 11 - Volume (cm³) e diâmetro médio das raízes (mm) nos estádios V4 e R7 em plantas de feijoeiro em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Volume das raízes				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,302±0,052aA	0,370±0,123aA	0,340±0,008aA	0,190±0,020aB
10	0,268±0,059aAB	0,358±0,005aA	0,199±0,006bB	0,233±0,001aB
Convencional	2,23*±0,01			
CV (%)	10,30			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,222±0,02aC	0,306±0,01aBC	0,402±0,02aAB	0,498±0,06aA
10	0,253±0,056aB	0,322±0,05aAB	0,367±0,04aA	0,320±0,02bAB
Convencional	1,72±0,11*			
CV (%)	10,13			
Diâmetro médio das raízes				
Estádio V4				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,332±0,022aA	0,276±0,005aC	0,291±0,010aBC	0,314±0,003aAB
10	0,280±0,002bB	0,266±0,005aB	0,286±0,005aB	0,324±0,045aA
Convencional	0,415*0,01			
CV (%)	5,46			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,372±0,005aA	0,350±0,003bC	0,316±0,005bD	0,361±0,007aB
10	0,360±0,003bB	0,370±0,004aA	0,371±0,002aA	0,352±0,004bB
Convencional	0,354*±0,01			
CV (%)	1,48			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett

2.3.4 Avaliações fisiológicas e bioquímicas das plantas de feijoeiro

O estudo dos parâmetros fisiológicos demonstrou que o uso de CBC e BS pode influenciar alguns componentes: fotossíntese, condutância estomática, clorofila a e b e perda de eletrólitos.

Para a variável fotossíntese no Estádio V4, não houve efeito da interação das doses testadas de CBC e BS, somente efeito isolado. A maior atividade fotossintética foi quando aplicado 10 t de BS que diferiu das demais doses, o mesmo foi observado para quando se usou 10 t de CBC. Enquanto no estádio R7 houve interação entre os fatores.

Quando usado 5 t de CBC, o tratamento 4 foi o que apresentou maior atividade fotossintética. Quando usado 10 t de CBC a maior atividade fotossintética foi para as plantas do tratamento 8 que diferiu de todas as demais (Tabela 12).

Tabela 12- Fotossíntese líquida (A ; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Estádio V4	
Biossólido	A
0	8,34±0,36c
2,5	14,49±1,22b
5	13,49±2,49b
10	17,04±0,58a
Convencional	17,74±0,06
Cinza	A
5	12,74±3,15b
10	13,93±0,36a
Convencional	17,74±0,06
CV (%)	8,78
Estádio R7	
Cinza	Biossólido
	02,5510
5	15,79±0,79aC18,12±0,52aB14,81±1,69bC21,88±1,56aA
10	9,74±0,01bC*16,24±1,02bB17,42±0,27aAB19,01±0,62bA
Convencional	10,52±0,50*
CV (%)	5.75

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para a condutância estomática houve interação entre os fatores em ambos os estádios. No V4 quando usado 5 t de CBC, o tratamento 2 foi aonde as plantas apresentaram maior condutância, mas não diferiu do tratamento 4. Quando usado 10 t de cinza as plantas do tratamento 8 apresentaram maior condutância estomática, diferiram de todas as doses, mas não diferiu do tratamento 4 (Tabela 13).

Tabela 13 - Condutância estomática (gs; mol H₂O m⁻² s⁻¹) nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Estádio V4				
g _s				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,080±0,01aB	0,149±0,01aA	0,102±0,01aB	0,150±0,01aA
10	0,055±0,02bC	0,107±0,02bB	0,100±0,01aB	0,143±0,01aA
Convencional	0,207±0,01*			
CV (%)	10,34			
Estádio R7				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	0,297±0,03aAB	0,310±0,02aA	0,239±0,02aB	0,347±0,04aA
10	0,202±0,02bC*	0,360±0,06aA	0,270±0,05aB	0,337±0,03aA
Convencional	0,178±0,01*			
CV (%)	11,65			

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 14, as associações de CBC e BS não promoveram efeito significativo na concentração interna de CO₂ e na transpiração nos dois estádios analisados.

Tabela 14- Concentração interna de CO₂ (Ci; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol ar}^{-1}$) e transpiração (E; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Estádio V4		
Biossólido	Ci	E
0	129,34±105,25a	1,19±0,52a
2,5	158,82±69,73a	1,98±1,03a
5	142,54±124,87a	1,48±0,96a
10	133,27±124,28a	2,24±0,78a
Convencional	155,19±196,53	2,28±1,38
Cinza	Ci	E
5	138,58±110,60a	1,77±0,88a
10	143,41±99,77a	1,68±0,96a
Convencional	155,19±196,53	2,28±1,38
CV (%)	55,41	52,57
Estádio R7		
Biossólido	Ci	E
0	272,90±a15,32	4,83±1,84a
2,5	267,25±a21,70	6,11±1,32a
5	249,96±a22,24	4,83±1,31a
10	256,56±a22,96	5,96±1,49a
Convencional	270,64±19,27	3,30±2,66
Cinza	Ci	E
5	255,93±18,94a	5,40±1,67a
10	267,41±13,41a	5,46±1,48a
Convencional	270,64±19,27	3,30±2,66
CV (%)	6,69	25,79

Os resultados apresentados na Tabela 15 indicam que não houve efeito interação entre os fatores para as variáveis analisadas, havendo influência das doses de BS apenas para clorofila *a* nos dois estádios, para clorofila *b* no Estádio V4 e para perda de eletrólitos no Estádio R7.

No estádio V4 quando adicionado 10 t de BS as plantas tiveram maior índice de clorofila *a*, e conseqüentemente para clorofila *b* mas não diferenciou das doses de 2,5 e 5 t, somente das plantas que não receberam nenhuma aplicação do biossólido. O mesmo comportamento foi verificado no Estádio R7, que teve um aumento de 17,97% para clorofila *a*. Os resultados de perda de eletrólitos mostraram que quanto maior a

dose de BS, maior a perda de eletrólitos, visto que as doses de 10 e 5 t ha⁻¹ BS apresentaram maiores índices para esta variável.

Tabela 15 - Clorofila *a* clorofila *b*, carotenoides (µg cm⁻² de folha); conteúdo relativo de água (%) e perda de eletrólitos (%) nos estádios V4 e R7 em função das diferentes doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e bio sólido.

Estádio V4					
Bio sólido	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Carotenoides	CRA	PE
0	21,12±3,42b	6,21±6,21b	1,07±0,28a	79,36±0,18a	16,32±3,42a
2,5	22,37±5,05ab	7,16±7,16ab	1,18±0,30a	77,89±0,14a	13,93±5,06a
5	22,51±6,57ab	6,67±1,08ab	0,82±0,13a	80,29±0,02a	13,79±6,57a
10	24,49±3,29a	7,24±0,46a	1,06±0,30a	77,54±0,35a	12,12±3,29a
Convencional	26,30±1,95	9,11±1,44	0,78	75,21±4,92	8,76
Cinza	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Carotenoides	CRA	PE
10	22,48±1,40a	6,82±0,81a	0,99±0,26a	79,21±7,97a	13,12±4,37a
5	22,76±2,20a	6,82±0,77a	1,08±0,30a	78,33±11,49a	14,96±4,73a
Convencional	26,30±1,95	9,11±1,44	0,78±0,53	75,21±4,92	8,76±3,05
Cv (%)	8,20	10,54	26,94	12,14	29,58
Estádio R7					
Bio sólido	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Carotenoides	CRA	PE
0	22,18±6,23b	7,46±2,54a	1,41±0,53a	79,25±7,42a	16,20±4,16 b
2,5	27,04±3,04ab	12,77±6,96a	1,97±0,80a	81,7±12,31a	18,03± 3,05b
5	25,81±5,75ab	10,44±4,92a	1,72±1,40a	77,12±8,31a	19,26±5,53ab
10	28,89±1,41a	10,03±0,76a	1,94±0,75a	76,15±10,93 a	24,68±5,43 a
Convencional	25,63±1,91	9,26±2,82	1,57±0,68	75,21±4,92	24,65±1,91
Cinza	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Carotenoides	CRA	PE
10	25,76±4,62a	9,25±3,07a	1,50±0,817a	79,68±9,74a	19,04±a
5	26,20±5,50a	11,11±5,79a	2,01±1,22a	77,43±9,83a	20,04±a
Convencional	25,63±3,45	9,26±2,82	1,57±0,68	75,21±	24,65±1,91
CV (%)	14,04	42,38	60,98	10,94	22,82

No presente ensaio, avaliou-se teor proteína, açúcares totais, Nitrato redutase e três enzimas de resposta ao sistema antioxidativo, a (Superóxido dismutase-SOD; Catalases-CAT e Peroxidases-POD), conforme apresentado nas tabelas e na análise de componentes principais (Figura 21).

Para o teor de proteínas solúveis (Tabela 16) houve interação entre os fatores. Quando usado 5 t, a adição do bio sólido proporcionou um aumento, com maior teor para o tratamento 8 que diferiu somente do tratamento sem aplicação de bio sólido (tratamento 1) que apresentou menor média (37,94%). Quando usado 10 t CBC, o

maior teor foi para as plantas do tratamento que recebeu 10 t de biossólido que diferiu da demais aplicação

Tabela 16 - Teor de proteínas solúveis no estágio reprodutivo em função das diferentes doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido

Proteína (mg Prot g ⁻¹ MF)				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	11,36±a1,53B	15,42±0,42aA	15,63±0,03aA	15,67±0,26aA
10	9,98±1,07bB*	8,95±1,56bB*	9,88±0,60bB*	14,45±0,47bA
Convencional	9,45*±0,52			
CV	6,56			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

A atividade da SOD sofreu influência da interação dos fatores (Tabela 17), a atividade da enzima foi maior no tratamento 1 que diferiu dos demais tratamento e do tratamento 5 que foi 39% menor. Quando usado 10 t ha⁻¹ de CBC a atividade da SOD foi 54% maior no tratamento 7 que não diferiu do tratamento convencional.

Tabela 17 - Atividade da enzima Superóxido dismutase no estágio reprodutivo em função das diferentes doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido

Atividade específica (UI mg ⁻¹ Proteína)				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	2,43±0,02aA	1,73±0,06aB	1,69±0,06bB	1,78±0,02aB
10	1,49±0,02bB	1,82±a0,03B	2,61±0,06aA*	1,84±0,05aA
Convencional	2,93±0,52*			
CV	8,79			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para atividade da catalase houve interação dos fatores (Tabela 18), quando usado 5 t de CBC a maior atividade foi para o tratamento 4 que não diferiu das demais doses, mas diferiu do tratamento 8 com uma atividade maior (42%). Quando foi usado 10 t CBC, o tratamento 6 apresentou a maior atividade da enzima e só diferiu da dose de 10t BS.

Tabela 18 - Atividade da enzima Catalase no estágio reprodutivo em função das diferentes doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido

Catalase ($\mu\text{kat } \mu\text{g proteína}^{-1}$)				
Biossólido				
Cinza	Lodo			
	0	2,5	5	10
5	0,68 $\pm$ 0,051bA	0,53 $\pm$ 0,028bA	0,76 $\pm$ 0,042bA	0,82 $\pm$ 0,019bA
10	1,18 $\pm$ 0,028aAB	1,51 $\pm$ 0,022aA*	1,21 $\pm$ 0,49aAB	1,16 $\pm$ 0,013aB
Convencional	1,68 $\pm$ 0,01*			
CV	15,66			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para atividade da enzima peroxidase nas folhas houve interação entre as doses testadas de CBC E BS (Tabela 19). Quando usado 5 t de CBC, a ausência de biossólido (tratamento 1) foi a que proporcionou maior atividade da enzima peroxidase e diferiu das demais. Quando usado 10 t, o tratamento 7 apresentou maior atividade da enzima que foi menor que atividade da enzima no tratamento convencional (6%).

Tabela 19 - Atividade da enzima peroxidase no estágio reprodutivo em função das diferentes doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido

Cinza	Peroxidase (mg Kat μ g Prot ⁻¹)			
	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	2,25±0,004aA	1,47±0,017aB	1,25±0,004bC	1,25±0,004bC
10	1,17±1,165bD	1,47±0,024aB	1,70±0,031aA	1,31±0,042aC
Convencional	1,56±0,01*			
CV	1,46			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para atividade da enzima nitrato redutase (Tabela 20), quando usado 5 t de CBC, o tratamento 2 apresentou maior atividade da enzima que não diferiu do tratamento 4, sendo que a menor atividade da enzima foi nas plantas do tratamento 1. Quando usou 10t CBC a atividade da enzima foi maior no tratamento 8, que só apresentou diferença do tratamento 5, embora esse não tenha apresentado diferença estatística entres os tratamentos 6 e 7. A atividade da enzima no tratamento convencional foi 75% que no tratamento 8.

Tabela 20 - Atividade da enzima nitrato redutase no estágio reprodutivo em função das diferentes doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido

Cinza	Nitrito (nM NO ₂ h ⁻¹ g ⁻¹ MF)			
	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	1,45±0,014aB	2,62±0,060aA	1,67±0,470aB	2,34±0,005aA
10	1,74±0,021aB	1,85±0,010bAB	1,90±0,011aAB	2,23±0,053aA
Convencional	4,11±0,48*			
CV	9,97			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para o teor de açúcares totais (Tabela 21) quando usado 5 t ou 10 t de CBC, a adição de 10 t de BS (tratamento 4 e 8) proporcionou maior teor de açúcares para as plantas. Quando usado 10t CBC, o tratamento 7 apresentou menor média para teor de açúcares, quando comparado com os demais tratamentos.

Tabela 21 - Teor de açúcares totais no estágio reprodutivo em função das diferentes doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e biossólido

Açúcares totais (Glicose g ⁻¹ MF)				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	2,02±0,60bAB*	1,88±0,57aB*	2,43±0,07aAB*	2,64±0,50aA*
10	2,65±0,05aA*	2,35±0,06aA*	1,4±0,06bB	2,60±0,48aA*
Convencional	2,60±0,34*			
CV	16,62			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

As duas primeiras componentes explicaram a totalidade de aproximadamente 74,06% de toda a variabilidade no conjunto de dados (42,62% explicado pelo CP1 e 31,44% por PC2) (Figura 21).

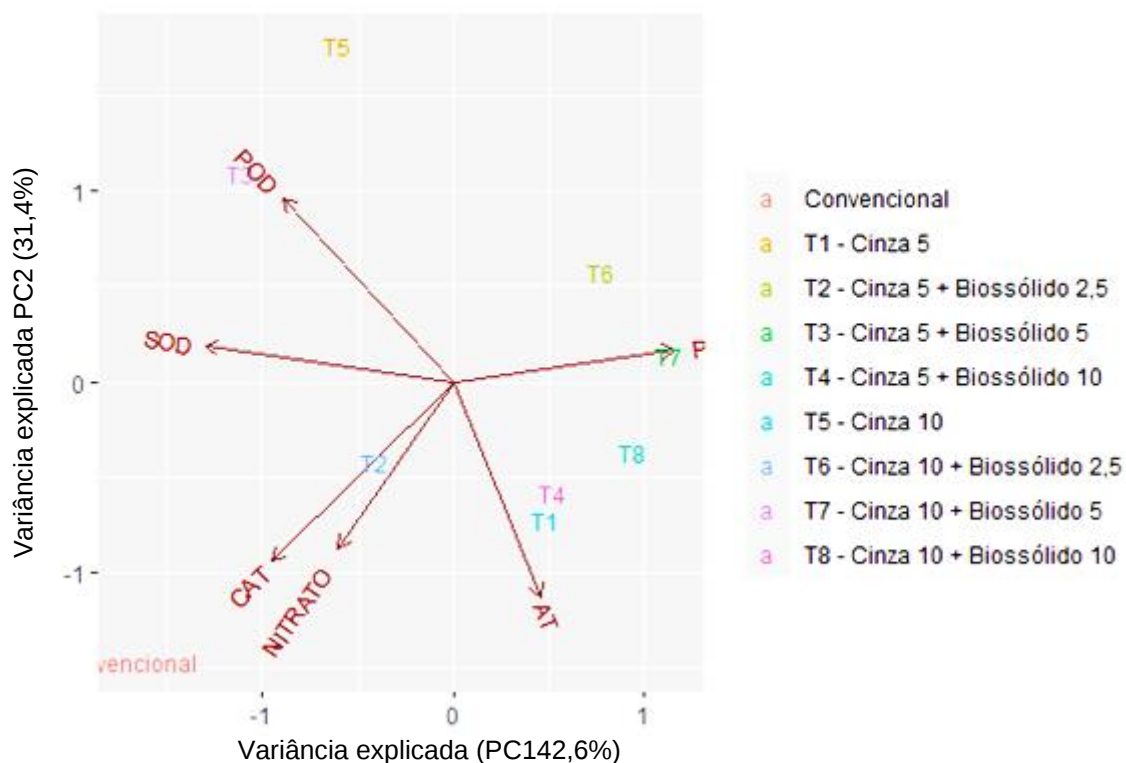
A variável SOD apresentou a maior variabilidade, seguida de proteína e catalase (CAT). Pode-se verificar que as variáveis superóxido dismutase (SOD) e peroxidase (POD); CAT e nitrato, CAT e AT; proteína e AT; SOD e nitrato estão positivamente correlacionadas entre si ($\alpha < 90^\circ$). As variáveis proteína, CAT, SOD, POD e nitrato estão negativamente correlacionadas entre si ($\alpha > 90^\circ$).

Ao mesmo tempo, pode-se observar que os tratamentos que tiveram maior atividades das enzimas antioxidativas POD e CAT (T7 e T6), são negativamente correlacionados com proteína. Assim os tratamentos que sofreram menos ação dessas enzimas estão relacionadas ao maior acúmulo de proteína.

Logo, os tratamentos que tiveram maior concentração de proteína e açúcares (T2, T3, T4, T5, T8) apresentaram menor atividade das enzimas em comparação aos tratamentos 3 e 5, para a primeira componente.

As plantas dos tratamentos 1 e convencional (Cinza 5 e NPK ref.) tiveram comportamentos opostos e isolando-os dos demais grupos, sendo que o tratamento T5 apresentou pouco AT e intermediário POD, e o convencional relação inicial de CAT e nitrato.

Figura 21 - Bixplot exibindo autovetores e pontuações para componentes principais 1 e componentes principais 2



2.3.5 Teor de silício

No estágio V4 não houve interação entre as doses testadas para o teor de Si nas raízes, somente diferença entre as doses de CBC (Tabela 22), com maior teor quando usado 10 t ha⁻¹ de CBC, sendo 214% maior que para as plantas do tratamento convencional, que apresentou menor teor. Enquanto que ao final do ciclo houve interação entre as doses. Quando usado 5 t ha⁻¹ de CBC, a adição de 10 t de BS proporcionou menor teor de Si que só se diferenciou quando adicionado 2,5 t de BS que teve maior teor. Quando usou 10 t ha⁻¹ de CBC o menor teor também foi para as plantas que receberam 10 t ha⁻¹ de BS.

Tabela 22 - Teor de silício nas raízes (g kg^{-1}) no Estádio V4 e no final do ciclo em função das doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Estádio V4	
Biossólido	Teor de silício nas raízes
0	13,75±9,20a
2,5	14,67±5,35a
5	13,92±3,54a
10	16,91±5,18a
CV (%)	25,45
Cinza	Teor de silício nas raízes
5	10,34±4,66b
10	19,29±3,18a
Convencional	6,06±0,84
CV (%)	25,45
Final do ciclo	
Cinza	Biossólido
	02,5510
5	3,94±0,95bB14,61±0,13aA4,08±4,08bB*3,64±0,40aB
10	9,01±3,91aB*12,94±1,52aA6,73±2,39aB*5,67±2,46aB*
Convencional	7,92±1,33*
CV	23.53

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

Para o teor de Si nos grãos (Tabela 23), houve interação dos fatores cinza e biossólido. Quando usado 5 t ha^{-1} de CBC o tratamento 3 apresentou maior teor, e não diferenciou quando usado 10 t ha^{-1} de CBC. Quando usado 10 t ha^{-1} CBC, a adição O tratamento 6 apresentou maior teor e não diferenciou das demais doses. As plantas do tratamento convencional apresentaram menor média ($1,14 \text{ g kg}^{-1}$).

Tabela 23 - Teor de silício nos grãos (g kg^{-1}) em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido no final do ciclo da cultura.

Teor de silício nos grãos				
Cinza	Biossólido			
	0	2,5	5	10
5	11,77±7,13aA	11,17±2,01aA	13,43±a3,10A	3,43±4,16bB*
10	9,57±1,60aA	16,01±2,89aA	11,18±0,98aA	9,59±2,79aA
Convencional	1,14±0,59*			
CV (%)	34,21			

Médias seguidas de letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey. Médias não seguidas com * são significativamente diferentes do convencional com 5% de significância pelo Teste de Dunnett.

2.3.6 Índices de rendimento da cultura

Para os parâmetros de produtividade (Tabela 24), não houve interação dos fatores somente diferença significativa para vagens/planta e produtividade para as doses testadas de biossólido. A adição de 10 t de BS proporcionou uma produtividade de 1216, 42 kg ha⁻¹ - 60 % menor que a produtividade do tratamento convencional, se diferenciou do tratamento com aplicação de 2,5 t e zero BS que teve menor produtividade.

Tabela 24 - Vagens por planta (un.), grãos por vagem (un.), comprimento das vagens (cm), e produtividade (kg ha⁻¹) em função das diferentes doses de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e biossólido.

Biossólido	Vagens planta ⁻¹	Grãos vagem ⁻¹	Comprimento das vagens	Produtividade Kg ha ⁻¹
0	5,13c	3,05a	6,82b	87,04c
2,5	11,50bc	4,49a	7,40a	696,44b
5	17,00ab	4,03a	7,35ab	943,06ab
10	21,25a	4,29a	7,48a	1501,42a
Convencional	45,75±7,93	4,48±	7,89	3050,18
Cinza	Total de Vagem	Grãos Vagem ⁻¹	Comprimento das vagens	Produtividade Kg ha ⁻¹
5	12,56a	4,02a	7,28a	864,56a
10	14,87a	3,91a	7,24a	749,91a
Convencional	45,75	4,48	7,89±0,34	3050,18
CV (%)	26,77	17,46	46,10	28,58

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si com 5% de significância pelo teste de Tukey

2.4 Discussão

As plantas do feijoeiro apresentaram crescimento menor para todos os tratamentos quando comparado ao tratamento convencional, mas houve um comportamento típico entre as associações dos resíduos.

A aplicação de biossólido resultou em incremento para os parâmetros altura, diâmetro do caule, área foliar, massa seca da folha. Os maiores valores biométricos foram obtidos para as doses mais elevadas dos tratamentos. Conforme o aumento das doses de biossólido, maiores foram as médias para esses parâmetros no estágio vegetativo. Por outro lado, tratamentos que não foram suplementados com biossólido foram menos expressivos para esses parâmetros.

Em consonância com esses resultados, Barbuca et al., (2019) sugerem que a aplicação de biossólido no solo pode aumentar a altura das plantas e promover um

acréscimo de biomassa. Em adição, DHANKER et al., (2021) sustentam que sua incorporação pode aumentar o teor de nitrogênio do solo (0,053% - 0,161%) com os níveis crescente de doses do resíduo. O mesmo efeito se aplica aos nitratos, sendo que o conteúdo que aumentou após a aplicação do BS. Alvarenga et al. (2007) afirmou que quando o teor total de nitrogênio é superior a 2,5%, o bio sólido é considerado rico em N. Esse resultado corrobora com o com nitrogênio disponível no bio sólido, com média de 2,12%.

Segundo Nasrin et al., (2019) diferentes doses de nitrogênio e fósforo influenciam no crescimento do feijoeiro nos diferentes estádios de desenvolvimento, com melhores resultados para o efeito combinado dos dois nutrientes. Tao et al. (2015) consideram que o percentual de matéria orgânica presente no resíduo pode favorecer o teor de nutrientes no solo, além de sua biodisponibilidade para as plantas. Assim, este aspecto pode facilitar ao aumento da atividade biológica, responsável pela produção de enzimas como, desidrogenases, fosfatases e peroxidases.

Bittencourt, Aiesse e Serrat. (2017) relataram benefícios da aplicação de bio sólido na safra de diferentes culturas no estado do Paraná. Com essa prática, culturas como a do feijoeiro podem ser beneficiadas com fonte aporte de cálcio, 69% do N, 83% do P_2O_5 e 35% do K_2O exigido pelas safras entre 2011 e 2013.

Vários estudos também têm relatado o efeito benéfico do silício em termos de crescimento, acúmulo de biomassa e absorção de macro e micronutrientes (TRIPATHI et al., 2016; HUSSAIN et al., 2021).

De acordo com Lesharadevi, Parthasarathi e Muneer (2021) a aplicação de silício pode melhorar o metabolismo e o crescimento das plantas, bem como regular espécies reativas ao oxigênio. Verma et al., (2019) reforça que a aplicação de silício melhora o crescimento e o desenvolvimento de plantas sob estresse. Isso ocorre porque o silício é usado pelas plantas como alternativa à lignina no reforço a parede celular, favorecendo a estrutura da planta.

Em geral, o aumento na disponibilidade de nutrientes aumenta a taxa de respiração, devido ao consumo de ATP para o transporte dos íons, favorecendo o crescimento das plantas (MARECO; LOPES, 2009). Observa-se que a massa fresca da folha no R7 não sofreu efeito da cinza, somente do lodo. Provavelmente pela correlação entre a absorção de nitrogênio já mineralizado do bio sólido no período da coleta. De acordo com Cantarella (2007) temperaturas nas faixas de 40° C aceleram a mineralização, mesma condição encontrada no ensaio aos 70 DAE. De acordo com

Chiam et al., (2020) temperaturas elevadas (50–70 °C) tem efeito negativo na %N, que pode diminuir o teor de nitrogênio disponível em biochar (biocarvão obtido pela pirolise).

A análise de matéria seca de folhas (MSF) indicou interação entre os fatores (CBC x BS), provavelmente por efeito da maior porcentagem de oxigênio presente na cinza (45,79%), e considerando-se que 92% da matéria seca é predominantemente composta de C, H e O. Assim, a presença da cinza foi acentuada na base seca das folhas após a mineralização.

Para área foliar, massa do caule (fresca e seca) e altura no estágio R7 não foi observado diferenças relevantes entre as doses, com maior média para doses de 2,5t e 5t ha⁻¹. Justifica-se assim, que nessa fase a prioridade das plantas é manter o funcionamento e respiração dos tecidos formados com o que já foi assimilado e fixado, e não mais em exportar nutriente dos resíduos. Malavolta (2006) afirma que leguminosas de grãos, como as plantas de feijão, praticamente cessam a fixação biológica de N após o início do florescimento. Cardoso et al. (2021) reforça que após o fornecimento da dose reposta ideal, teoricamente a planta não utiliza de forma eficiente a adubação aplicada.

Por outro lado, Morete; Bertoncini; Abreu-Junior (2013) indicam, que no caso da mineralização do nitrogênio, a maior taxa pode ocorrer na menor dose de resíduo incorporado sendo suficiente para suprir a necessidade da cultura. Essa condição também observada nos resultados presentes em massas (fresca e seca), volume, diâmetro das raízes e no acúmulo total de massa seca do feijoeiro. Estes parâmetros alcançaram maiores médias para as doses de 2,5 e 5 t ha⁻¹ de biossólido no estágio vegetativo e, nas maiores doses (5 e 10 t ha⁻¹) no estágio reprodutivo, o que se justifica pela exigência da planta.

Dhanker et al. (2021) observaram taxas de mineralização crescente em função das doses de BS. Em relação ao BS utilizado no presente ensaio, tal efeito não se confirmou, visto que a taxa de mineralização do BS em associação com CBC ocorreu de maneira lenta, provavelmente em função da composição da cinza, como potássio (10,93%), cálcio (9,32%) e magnésio (3,28%) da composição em massa de cinza, que podem ter comportamento antagônico com o N.

O excesso de nitrogênio comparável a interação com outros elementos pode ser um dos fatores responsáveis pelo sistema radicular pouco desenvolvido conforme

registrado nas plantas. Assim, outros parâmetros fisiológicos importantes foram influenciados como o crescimento excessivo da parte aérea, como observado no tratamento com 5t ha⁻¹ de BS. As plantas desse tratamento apresentaram maior área foliar e maior redução do volume e comprimento das raízes; enquanto que as plantas que receberam menor dose de BS ou que não receberam suplementação com o resíduo, alcançaram um comprimento maior de raízes (estádio vegetativo).

Esses resultados são comparáveis aos apresentados por Sanchez et al. (2003) que observaram redução na produção de biomassa e assimilação de N em raízes e folhas de feijão verde (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Strike) em altos níveis de N. Contudo, alguns autores relatam que, em testes de toxicidade, doses altas de biossólido podem inibir o crescimento de raízes, quando comparado com um solo que teve aplicação menor, mas que vai depender do tipo de solo e plantio (OLESZCZUK; HOLLERT, 2011, TAVARES et al., 2019; MARTINS, 2020)

Alguns autores relatam o uso de cinzas como resíduo cimentante devido suas características de aglutinação e resultados positivos em análises de compactação e resistências em solo argiloso de alta compressibilidade (AZEEM et al. 2020; CORDEIRO et al., 2016).

Pressupõe-se, então, que a textura do solo (755 g dm⁻³ areia) em combinação com as doses de cinza possivelmente induziram a um efeito de compactação, interferindo no crescimento radicular com reflexos na biometria geral das plantas. As características texturais do solo utilizado (franco arenoso) por apresentarem porcentagem menor de espaços vazios tem essa característica realçada, com incorporação das cinzas as quais tem partículas fibrosas, característica pozolânica (alto teor de sílica e sílico aluminosos) e alta porosidade.

Essas características provavelmente exerceram influência nas propriedades físicas do solo, orientação dos agregados, limitando a penetração das raízes e, por consequência, a absorção de água e nutrientes. Isso corrobora com os estudos de Hellliwell et al., (2019), que argumentam que a textura do solo é extremamente influente sobre arquitetura radicular, gerando estresse físico no caminho da raiz através do solo, além de afetar a disponibilidade de água, oxigênio e nutrientes.

Certamente pelo acúmulo de silício no sistema radicular, é possível evidenciar forte relação com a aplicação do resíduo. Para o feijoeiro, houve efeito significativo somente para cinza e na maior dose (V4 e final do ciclo), com maior acúmulo nas plantas dos tratamentos sem biossólido (9,01 g Kg⁻¹) e menor nos tratamentos com

maior dose de biossólido. Glab et al. (2020) argumentam que a compostagem a partir do BS tem um impacto benéfico nas propriedades físicas e hidráulicas em solo arenoso, fornecendo carga de nutrientes, além do aumento do teor de matéria orgânica. Essa informação coincide com os resultados observados por Shan et al. (2021) em plantas de arroz, onde o comprimento total das raízes aumentou gradativamente com o aumento das taxas de aplicação de BS (467%, 393,9%) em comparação ao convencional.

Em síntese, é provável que a mineralização do BS no Estádio R7 inibiu a absorção de silício pela raiz de acordo com os dados apresentados nesse ensaio.

Contudo, o maior ganho de biomassa, altura e área foliar foram para as maiores doses tanto de cinza, quanto de biossólido. Diferente do que ocorre em outras espécies para esses nutrientes, em leguminosas ocorre uma interação entre esses dois elementos (N e Si). Como relatado em estudos feitos por Andrade et al., (2021) que avaliou que a aplicação foliar de silício em plantas de feijão, o Si contribui para o acúmulo de nitrogênio por planta com ganhos de síntese de lignina, índice de fotossíntese líquida e produção de grãos.

O aumento da clorofila na maior dose de BS reforçam essa relação proposta pelo autor, visto que, o maior conteúdo de clorofilas que é conferido pela maior assimilação de nitrogênio, desempenhada pela enzima nitrato redutase, catalisa a reação de conversão do nitrato a nitrito. Como observado para a enzima Nitrato redutase, a maior atividade foi registrada em plantas tratadas com maiores doses de resíduos (10 t), o que certamente indica efeito sinérgico entre N e Si.

Índices de crescimento e relações fisiológicas

A relação de biomassa e área da folha é frequentemente utilizada para avaliar a produtividade e sua atividade fotossintética, avaliando os fatores críticos ligado a respiração e interceptação de energia em conversão de massa seca.

Para área foliar específica (AFE) no estágio vegetativo (Tabela 10) verificou-se redução conforme aumento das doses de biossólido e comportamento crescente para maiores doses de cinza. Esses resultados são comparáveis aos verificados por Silva et al. (2021) que identificaram AFE decrescente para doses de N. No estágio reprodutivo (Tabela 11) ocorreu comportamento oposto com aumento da AFE para a maior dose de biossólido e relação crescente entre os estádios, divergindo dos

resultados encontrados Coble et al. (2016) e Zhou et al. (2020) que relataram uma tendência de declínio conforme os estádios de crescimento.

Em contraste a esses, Ji et al. (2019) observou maior AFE e plasticidade das plantas entre os diferentes estádios. Essas variações sinalizam capacidade de utilização de recurso disponíveis, sendo indicativo de adaptação das diversas mudanças e tolerância ao estresse abiótico (LIU et al., 2017; WELLSTEIN et al., 2017).

Fanourakis et al. (2019) explica que aumento da AFE indica ambiente rico em recursos (água e nutrientes), enquanto baixos valores são normalmente associados a condições de poucos recursos, onde as reservas absorvidas têm uma via prioritária.

No ensaio presente, também se registrou efeitos semelhantes da relação entre resíduos e desenvolvimento vegetal. Ao que tudo indica, a taxa de mineralização do bio sólido foi mais elevada que os demais nutrientes, o que proporcionou maior disponibilização de nitrogênio. Assim, o elemento foi preferencialmente assimilado e alocado para parte a área, atuando como dreno. ($r=-0,545$) contribuindo para menor AFE (folhas mais grossas) e maiores concentrações de N e P nas folhas, condição que também contribui para os resultados avaliados para o sistema radicular.

Os valores de razão de área folia RAF igualmente justificam os resultados citados anteriormente, considerando-se que no V4 não houve relação entre as doses de cinza (Tabela 11), indicando não houve alteração fisiológica significativa entre a interação da associação dos resíduos, somente efeito das doses de bio sólido com maior média na dose de 10 t h^{-1} .

Em contraste com comportamento avaliado para AFE a razão da área foliar (RAF) sofreu decréscimo entre os estádios vegetativos e reprodutivos. À medida que no Estádio reprodutivo a AFE aumenta (folhas mais finas) e RAF diminui. Assim, possivelmente ocorreu melhor desenvolvimento morfológico e anatômico, porque a planta começa a direcionar o que já foi fotoassimilado para formação de novos tecidos, diminuindo assim a razão da área foliar como verificado nos parâmetros de raiz no R7.

Em geral a área foliar específica apresenta relação positiva com a taxa fotossintética, produtividade e crescimento. A taxa de fotossíntese (A) seguiu a mesma tendência dos parâmetros biométricos, proporcional às doses de bio sólido. A maior área foliar e AFE foi registrada para dose de 5t de BS que apresentou fotossíntese líquida da ordem de $17\text{ }\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$. Por outro lado, a maior taxa fotossintética foi registrada em plantas tratadas com doses de 10t (19,01; 21,87 μmol

$\text{CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Os resultados parecem indicar que plantas que receberam maior dose de BS possivelmente apresentaram maior eficiência fotossintética e, por isso, acumularam mais matéria seca (foliar e total) no Estádio R7, mesmo com uma área foliar menor para interceptação e conversão de energia. Essas plantas também apresentaram maior volume ocupado das raízes, o que possibilitou área efetiva para absorção de águas e nutrientes. Um sistema radicular com maior vigor da raiz tem profundidade maior de enraizamento (POLANIA et al., 2017).

Por outro lado, as plantas com maior área foliar, tem uma ampla superfície de transpiração, o que gera rápido esgotamento de água do solo e por não terem desenvolvido um sistema radicular profundo, só conseguiram absorver a água enquanto disponível na camada superficial. Como consequência fisiológica, esse fator pode ter levado as plantas ao fechamento dos estômatos para evitar a transpiração e consequentemente diminuição de suas taxas fotossintéticas líquidas.

A partir do fechamento estomático verificado (Tabela. 22), as plantas iniciam processo de proteólise, promovendo um aumento no conteúdo de aminoácidos livres, e consequentemente diminuição na concentração de proteínas, possivelmente um dos fatores que fizeram as plantas desse tratamento apresentarem uma concentração menor de proteínas.

Enquanto, que para o convencional que teve concentração de proteína comparável as doses mais baixas, pode estar relacionado ao início do processo de remobilização de N, que aumenta o acúmulo da proteína, levando a degradação de proteínas e peptídeos ou aminoácidos que começam a ser transportados para órgãos em crescimento.

Em situação de estresse as plantas estabelecem reações em escala visando dismutar eventos oxidativos em nível celular. Em função da elevada atividade metabólica são suscetíveis de iniciar a ativação de grupos enzimáticos. Portanto, os fatores bioquímicos são parâmetros de grande importância para o entendimento da capacidade de resposta das plantas frente a situação de estresse, e assim ser possível apontar sua ocorrência.

A atividade das enzimas antioxidativas superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT) foram maiores em todas as plantas suplementadas com as maiores doses de biossólido e no tratamento convencional e inferior nas menores doses de cinza. Esses resultados divergem de Wyrwicka e Urbaniak et al. (2018) que concluíram que o BS

exerce um efeito protetor nos tecidos das contra estresse oxidativos, com a redução da atividade da CAT que só foi ativada em doses elevadas.

É possível que baixa fertilidade do solo e as barreiras para transporte da água nos tecidos tenha contribuído para ocorrência do estresse oxidativo. Porém como já foi constatado, a aplicação de BS influencia positivamente as plantas sobre estresse hídrico, através de maiores taxas de fotossíntese e menor concentração de CO₂ (ANTOLÍN; MURO e SÁNCHEZ-DÍAZ, 2010).

Portanto, mesmo que a maior atividade enzimática seja nas maiores doses (5 e 10 t), seguidas pelo tratamento convencional, as plantas tiveram maiores ganho de produtividade dentre os tratamentos (comprimento de vagens, quantidade de vagens por planta e produtividade Kg). Isso porque, possivelmente essas plantas tiveram uma capacidade de resposta melhor do seu sistema oxidativo sinalizando o funcionamento eficiente dos tecidos do feijoeiro nesses tratamentos.

Aparentemente a ativação da atividade da CAT protegeu o tecido de danos oxidativos. Como observado por Wyrwicka e Urbaniak (2018) em plantas de salgueiro, que a capacidade de resposta do sistema antioxidativo possibilitou a produção de uma maior biomassa, e proteção das plantas quanto a inibição do crescimento na ocorrência de danos oxidativos. Reforçado por Wyrwicka et al. (2019) que também identificou a proteção dos tecidos vegetativos a partir da ativação da enzima de plantas de pepino exposto a diferentes doses de BS.

Segundo Mehmood et al. (2018) essa condição também está associada ao fornecimento de N e P por serem os principais reguladores da atividade dessas enzimas. Como observou-se na PCA essa enzima apresentou uma correlação positiva com a atividade do nitrato redutase. Assim, é possível que as maiores doses aplicadas induziram maior atividade, possivelmente foram porque essas plantas receberam maior fornecimento de nitrogênio e fósforo. Importante salientar que, provavelmente a cinza exerceu influência significativa por meio do fornecimento de K e Si. Como avaliado por Yasin et al. (2018) o potássio auxilia no transporte de água e nutrientes através do xilema estando envolvidos na ativação de outras enzimas potenciais. Comparável a esses autores, Girotto et al. (2013) salienta que a baixa disponibilidade de P e K no cultivo de milho, refletiu na menor produção de biomassa. Além disso, esse nutriente atua diretamente no transporte de açúcares e nitrato (AHMAD; MAATHUIS, 2014; WHITE, 2011). Com isso, não coincidentemente é que na maior

dose de cinza associado com a maior de biossólido registrou-se os maiores teor de acúmulo de proteína e glicose.

Sabendo que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar tem em sua composição alto teor de silício, e sendo esse um elemento que pode contribuir com o desenvolvimento das culturas, foi verificado o feijoeiro embora não seja uma planta acumulador de silício, durante esse ensaio foi verificado a absorção Si pelas plantas de feijão.

O fornecimento de silício pelas cinzas também pode ter atuado no gerenciamento do estresse abiótico, justificando a atividade das enzimas POD (2,25) e SOD (2,43) nas plantas que não receberam doses BS, mas conseguiram sintetizar e ter um ganho de proteína e acúmulo de açúcares.

Por outro, o comportamento da atividade enzimática da peroxidase (POD) foi diferente do verificado para CAT e SOD, com maior atividade na menor dose de CBC sem lodo. Como observou-se na correlação de componentes principais o T1 Teve um comportamento isolado

Todas as avaliações demonstraram que alterações nos parâmetros biométricos, fisiológicos e bioquímicos influenciou nos índices de produtividade da cultura: vagem por planta, grãos por vagem, comprimento das vagens e produtividade

2.5 Conclusão

Os resultados obtidos permitem concluir que a cultura do feijoeiro foi afetada negativamente em parâmetros biométricos, fisiológicos e componentes da produção com a aplicação de cinzas em seus efeitos isolados e doses aplicadas. A associação com biossólido, sobretudo na maior dose (10 t), foi capaz de reverter parte do efeito deletério causado pelas doses de cinzas utilizadas, em função da melhoria das condições físicas do solo e aporte de nutrientes.

As maiores doses de biossólido influenciou nos parâmetros biométricos; altura, diâmetro de caule, área foliar.

Referências

- ANDRADE, A et al. Innovative Soluble Silicon Leaf Source Increase Gas Exchange, Grain Yield and Economic Viability in Common Bean, **Silicon**, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s12633-021-01142-z>
- ALVARENGA, P. et al. Recycling organic wastes to agricultural land as a way to improve its quality: A field study to evaluate benefits and risks. **Waste Manage**, v.61, p.582–592. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.004>
- AHMAD, I.; MAATHUIS, F. J. M. Cellular and tissue distribution of potassium: physiological relevance, mechanisms and regulation. **Journal of Plant Physiology**, v.171, n. 9, p.708-714. 2014.<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.10.016>.
- AZEEM, M et al. Effect of Bagasse ash and Lime on the Compaction and Strength Properties of Black Cotton Soil. **International Journal of Engineering Research and** and.v, 9,n.5, 2020
- BASU, M. et al. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science**, London, v. 19, n. 10, p. 1173-1186, nov. /dez. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.12.006>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007109001579>. Acesso em: 13 jan.2020
- BARR, H.D.; WEATHERLEY, P.E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. **Aust. J. Biol. Sci.** p. 413-428. 1962
- BLOND et al. Particulate matter produced during commercial sugarcane harvesting and processing: A respiratory health hazard. **Atmospheric Environment**, v.149, p.34–46, jan.2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.012>
- BITTENCOURT, S.; AISSE, M.M.; SERRAT, B. Me. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do paran , brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 1129-1139, dez. 2017.
<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017156260>.
- BOUDJABI, Sonia; CHENCHOUNI, Haroun. On the sustainability of land applications of sewage sludge: how to apply the sewage biosolid in order to improve soil fertility and increase crop yield. **Chemosphere**, v. 282, p. 131122, nov. 2021.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131122>.
- BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye-binding. **Anal Biochem**, v, p. 72:248–254, 1976
- BRASIL. **Resolução Conama N 375, 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto. Brasília, DF: Presid ncia da República, 2006. Disponível em:
<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em: 06.jul.2021

CARDOSO, E. et al. Biometrics and gas exchange of ornamental palm trees in different fertilizer sources. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p.1-18, 4 abr. 2021. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14001>.

CORDEIRO, G. et al. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 89, p. 269-275, nov. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.020>.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. 1017 p

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. Irriga, Botucatu, v. 14, n.1, p.1-11, 2009.

DUBOIS, M. et al Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v.28, p.350-356.1956

DHANKER, Rinku; CHAUDHARY, Suman; GOYAL, Sneh; GARG, Vinod Kumar. Influence of urban sewage sludge amendment on agricultural soil parameters. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101642, ago. 2021.. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2021.101642>.

CAMARGO, M et al. Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 937-944, dez. 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87052010000400020>.

ETESAMI, H., JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 147, p.881–896. <http://doi:10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>.

FANOURAKIS, D et al. Low air humidity during cultivation promotes stomatal closure ability in rose. **European Journal of Horticultural Science**, v.84, n.4, p.245-252.

FAVARE, H et al. Potential use of ash from sugarcane bagasse to produce passion fruit seedlings. **Australian Journal Crop Science**, v.14, n.3, p. 408-414, 2021 [10.21475/ajcs.20.14.03.p1734](https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.03.p1734)

FORMANN et al. Beyond Sugar and Ethanol Production: Value Generation Opportunities. Through Sugarcane Residues. **Front Energy Res** v.8, nov.2020. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.579577>.

GIANNOPOLITIS, C.N, RIES, S.K Superóxido dismutases. I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, p.309–314, 1977

HELLIWELL J.R. et al. 2019. The role of plant species and soil condition in the structural development of the rhizosphere. **Plant, Cell & Environment**, v.42, p.1974–1986. DOI: 10.1111/pce.13529

HUSSAIN, S et al. Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions. **Plant Physiology And Biochemistry**, v. 159, p. 43-52, fev. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.053>.

JAWORSKI, E. G. Nitrate reductase assay in intact plant tissues. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, Orlando, v. 43, p. 1274-1279, 1971.

JALAL, A et al. Common Bean Yield and Zinc Use Efficiency in Association with Diazotrophic Bacteria Co-Inoculations. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 959, 12. maio.2021.
<http://dx.doi.org/10.3390/agronomy11050959>.

KACPRZAK, M. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. **Environmental Research**, v.156, jul.2017, p. 39-46.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>.

KOLAWOLE, J et al. State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. **Cement And Concrete Composites**, v. 118, p. 103975, abr. 2021. [zttp://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975](http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975).

KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., NOLLA, A. Análise de silício no solo, planta e fertilizante. **Boletim Técnico nº 02**, Uberlândia: GPSi, 2004. 50p

LESHARADEVI, K; PARTHASARATHI, T.; MUNEER, S. Silicon biology in crops under abiotic stress: a paradigm shift and cross-talk between genomics and proteomics. **Journal Of Biotechnology**, v. 333, p. 21-38, jun. 2021.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.04.008>.

LAFUENTE, et al. Effect of the temperature conditioning on chilling injury of cucumber cotyledons. **Plant Physiology**, v.95, p.443-449, Jul./out. 1991.

LEE, D.W., BREMMEIER, S.; SMITH, A.P. The selective advantage of anthocyanins in developing leaves of mango and cacao. **Biotropica**, v. 19, n.1, p. 40-49, mar. 1987.

LOCK, H. Catalase. In: Bergmeyer HU (ed) **Methods of enzymatic analysis**, vol 2. Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr, p. 885–894, 1963

MARTINS, Marcela Ravanelli. **Aplicação de lodo de esgoto no solo: avaliação da estabilização e da toxicidade**. 2020. 108 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Mestra em Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Tecnologia, Limeira, 2019. Cap. 1.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**, 2. ed. Piracicaba: Editora Potafos, p. 319, 1997.

MEHMOOD, S; et al. Impact of different amendments on biochemical responses of sesame (*Sesamum indicum* L.) plants grown in lead-cadmium contaminated soil. **Plant Physiology And Biochemistry**, v. 132, p. 345-355, nov. 2018 <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.09.019>.

MARECO, R.A.; LOPES, N.F. **Fisiologia vegetal. Viçosa, MG: Fotossíntese Respiração Relações Hídricas Nutrição Mineral**, 2011.cap.2.

MAZZEO et al. Effects of biostimulation by sugarcane bagasse and coffee grounds on sewage sludges, focusing agricultural use: Microbial characterization, respirometric assessment and toxicity reduction. **Waste Management**, v.118, p.110-121, dez.2020. doi: 10.1016/j.wasman.2020.08.033.

MISRAN, E. Industri Tebu Menuju Zero Waste Industry. **Jurnal Teknologi Proses**, v.4, n.2, p.6 -10, jul.2005.

NASRIN, Shamima; AL-AMIN, Muhammad; MABUD, A. K. M. Golam; SANI, Md. Nasir Hossain. Growth and Yield Response of Bush Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as Influenced by Different Levels of Nitrogen and Phosphorus Application. **Asian Journal Of Research In Crop Science**. p. 1-8, 15 jul. 2019. <http://dx.doi.org/10.9734/ajrcs/2019/v4i230071>.

OLESZCZUK, P.; HOLLERT, H. Comparison of sewage sludge toxicity to plants and invertebrates in three different soils. **Chemosphere**, v. 83, n. 4, p. 502-509, abr. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.12.061>.

POLANIA, J; et al. and their potential links to plant ideotypes to improve drought resistance in common bean. **Theoretical And Experimental Plant Physiology**, v. 29, n. 3, p. 143-154, 31 ago. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40626-017-0090-1>.

RAMPIREZ, et al. Effects of Application of Organic and Inorganic Wastes for Restoration of Sulphur-Mine Soil. **Water Air Soil Pollut**, v. 223, p. 6123–6131, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1345-8>

SHAN, Y. et al. Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat soil. **Sci Rep** 11, 1402 ,2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80358-2>

SHARMA et al. Biomass as a sustainable resource for value-added modern materials: a review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 14, n. 3, p. 673-695, 13 jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.2079>.

SILVA, L et al. Specific leaf area is modulated by nitrogen via changes in primary metabolism and parenchymal thickness in pepper. *Planta*, v.16, n.1, p.253, 2021 doi: 10.1007/s00425-020-03519-7

SOEGIANTO et al. The Effects of Filter Cake and Bagasse Ash to Growth and NPK Uptake by Sugarcane (*Saccharum Officinarum* L.) at Ultisols in Tulang Bawang,

Lampung, Indonesia. **Ilmu Pertanian (Agricultural Science)**, v. 2, n. 3, p. 112. 14 dez. 2018. [http://doi: 10.22146/ipas.30098](http://doi:10.22146/ipas.30098).

TAVARES, R. et al. Avaliação da toxicidade do lodo de estação de tratamento de água e esgoto, antes e após vermicompostagem, usando teste de germinação com semente de alface (*Lactuca sativa*). **Revista Dae**, [S.L.], v. 67, n. 218, p. 156-167, 2019. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2019.040>.

TAO, R et al. Supplementing chemical fertilizer with an organic component increases soil biological function and quality. **Appl. Soil Ecol.** 2015, 96, 42–5. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.07.009>

TENNANT, D. Tests of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 63, n. 3, p. 995 -1001, nov. 1975.

TRIPATHI, D.K. et al. **Silicon in Plants Advances and Future Prospects**, 2021, 398p

VERMA, K. et al. The protective role of silicon in sugarcane under water stress: photosynthesis and antioxidant enzymes **Biomed. J. Sci. Tech. Res.**, 15, 2019 DOI: [doi:10.26717/BJSTR.2019.15.002685](https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.15.002685)

WEI, X et al. Using Si-rich materials for increasing fodder grass quality and quantity **Earth and Environmental Science**, v.2021. [10.1088/1755-1315/663/1/012062](https://doi.org/10.1088/1755-1315/663/1/012062)

WYRWICKA, A; URBANIAK, M. The biochemical response of willow plants (*Salix viminalis* L.) to the use of sewage sludge from various sizes of wastewater treatment plant. **Science Of The Total Environment**, v. 615, p. 882-894, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.005>.

WYRWICKA A, URBANIAK M, PRZYBYLSKI M. to the application of sewage sludge contaminated by PCB and urban sediments, 2019 <https://doi.org/10.7717/peerj.6743>

WHITE, P. J. Long-distance transport in the xylem and phloem. In: MARSCHNER, P. (Org.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Waltham: Academic Press, 2011. p.49-70.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A plantas submetidas a adubação recomendada (NPK), apresentou maior produtividade e melhor resposta quanto aos parâmetros biométricos. Entretanto teve baixo teor de Fe, micronutriente essencial para cultura do feijão.

A área foliar e acúmulo de biomassa aumenta com o incremento das doses de bio sólido no solo.

Embora a produtividade das plantas submetida as doses dos resíduos tenham sido abaixo do esperado, os resultados mostram o potencial da aplicação do resíduo, considerando que as plantas de feijão são extremamente exigentes em nutrientes como N, K e P, e mesmo sem nenhum tipo de adubação, as plantas conseguiram se desenvolver e produzir.

Também ficou evidente o potencial da cinza com uma fonte de Si, pelo seu acúmulo no sistema radicular e no grão, ainda que o Feijão seja considerado uma planta que não tem característica de ser acumuladora de Si.

As doses testadas também interferiram nas propriedades químicas do solo, assinalando um efeito sobre o V% e disponibilidade de micronutrientes

Ainda que de acordo com a PNRS as cinzas estejam dentro dos resíduos gerados a partir da agroindústria, o que a classificaria como um resíduo agrossilvopastoris (devido ao material de origem-cana-de-açúcar). O mais indicado é que de acordo com suas características fosse classificado como um resíduo industrial.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ et al. Effects of soluble Silicate and Nanosilica Application on Rice Nutrition in an Oxisol. **Pedosphere**, v.28, n.4, p.597-606, ago.2018
doi:10.1016/S1002-0160(18)60035-9. Disponível em: Effects of Soluble Silicate and Nanosilica Application on Rice Nutrition in an Oxisol - ScienceDirect. Acesso em: 05 de maio.2021
- ANGUISSOLA, S.; SILVA, S.; BOTTESCHI, G. Effect of fly ash on the availability of Zn, Cu, Ni and Cd to chicory. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.72, n.2, p.159 - 163, jun./set. 1999.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(98\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00170-4).
- ARRUDA et al. Uso da cinza de biomassa na agricultura: efeitos sobre atributos do solo e resposta das culturas. **Revista principia**, João Pessoa, n.30, p.18-30, 2016.
<http://doi.org10.18265/1517-03062015v1n30p18-30>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- BASU, M. et al. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science**, London, v. 19, n. 10, p. 1173-1186, nov. /dez. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.12.006>.
- BARR, H.D.; WEATHERLEY, P.E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. **Aust. J. Biol. Sci.** p. 413-428. 1962.
- BENBI et al. Pulp Ash Application Stimulates Agricultural Soil C Squestrationn without inhibiting Soil Accelerator Activity, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.48, n.15, p.1822-1833, out.2017.
- BIDAI, T.D.T., LELEI, J.J., OUMA, J.P. Effect of sugarcane bagasse ash and manure amendments on selected soil properties in Western Kenya. **African Journal of Agricultural**, v.16, n.11, p1554-1561, nov.2020. doi.org/10.5897/AJAR2020.15194
- BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 13 mar. 2021.
- CONAB—Companhia Nacional de Abastecimento, **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar**. Terceiro Levantamento da Safra 2020/2021.Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/>. Acesso em: 01 de maio de 2021
- CHINDAPRASIRT, P., RATTANASAK, U. Eco-production of silica from sugarcane bagasse ash for use as a photochromic pigment filler. **Scientific Reports**, v. 10, p.9890, maio. /Jun. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66885-y>.

CHIRENJE, T.; MA, L. Q. Impact of high-volume wood-fired boiler ash amendment on soil properties and nutrients. **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, v. 33, n. 1-2, p. 1-17, 30 jan. 2006. <http://dx.doi.org/10.1081/css->

CREUTZIG, et al. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. **GCB Bioenergy**, v. 7, n. 5, p.916-944, abr./mai. 2014. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>.

DEL LONGO, O. T.; GONZÁLES, C. A.; PASTORI, G. M.; TRIPPI, V. S. Antioxidant defenses under hyperoxygenic and hyperosmotic conditions in leaves of two lines of maize with differential sensitivity to drought. **Plant Cell Physiology**, v. 34, p. 1023-1028, 1993

EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos, Rio de Janeiro, p.353, 2013.3. ed.

ETESAMI, H., JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 147, p.881–896, jan.2018.<http://doi:10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>.Disponível

FAVARE et al. Potential use of ash from sugarcane bagasse to produce passion fruit seedling. **Australian Journal Crop Science**, v.14, n.14, p.408-4014, 2020. doi: 10.21475/ajcs.20.14.03.p1734. Disponível em: Potential of ash from sugarcane bagasse for the production of passion fruit seedlings (cropj.com).

FIESP- Federação das Indústrias do Estado de São Paulo/ Centro das Indústrias do Estado de São Paulo, Ampliação da Oferta de Energia Através da Biomassa, Fiesp/Ciesp - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo/Centro das Indústrias do Estado de São Paulo, Diadema, Brasil, 2012.

FORMANN et al. Beyond Sugar and Ethanol Production: Value Generation Opportunities. **Through Sugarcane Residues**, v.8, nov.2020. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.579577>.Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.579577/full>.Acesso em: 21 de maio.2021

GLĄB, T et al. Fertilization effects of compost produced from maize, sewage sludge and biochar on soil water retention and chemical properties. **Soil And Tillage Research**,. 197, p. 104493, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.104493>.

HUOTARI et al. Recycling. of Ash-for the Great of the Setting. **Forest Ecology and Management**, v. 348, p.226-240, mar.2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.008>

HYUNGWOO, L et al. Effects of whole-tree harvesting at thinning and subsequent compensatory nutrient additions on carbon sequestration and soil acidification in a boreal forest. **GCB – Bioenergy**, v.12, p.992-1001, jun./jul.2020.

<https://doi.org/10.1111/gcbb.12737>.

KACPRZAK, M. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. **Environmental Research**, v.156, jul.2017, p. 39-46.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>.Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935117304322?casa_token=aLmxfBVEo0sAAAAA:pRjQrOt_oo54I5XnaxfDxJL2SF7ZDCrlwwUuUPUzxuz03c5OGjLTOi3T5I4N9ZELTMXluXtUa_8.Acesso em : 03 maio.2021

KATZ, O. Silicon content is a plant functional trait: implications in a changing world.

Flora, v.254, p.88–94, maio.2019. <http://doi:10.1016/j.flora.2018.08.007>.Disponível em: Silicon content is a plant functional trait: implications in a changing world – Science Direct.

KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., NOLLA, A. Análise de silício no solo, planta e fertilizante. **Boletim Técnico nº 02**, Uberlândia: GPSi, 2004. 50p

LOPES et al. Sewage sludge compost as a substrate for croton seedlings production.

Ornamental Horticultura, v. 24, n. 4, p. 380-386, maio. /set.2018

<https://doi.org/10.14295/oh.v24i4.1234>.

LAFUENTE, et al. Effect of the temperature conditioning on chilling injury of cucumber cotyledons. **Plant Physiology**, v.95, p.443-449, Jul./out. 1991.

LEE, D.W., BREMMEIER, S.; SMITH, A.P. The selective advantage of anthocyanins in developing leaves of mango and cacao. **Biotropica**, v. 19, n.1, p. 40-49, mar. 1987.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**, 2. ed. Piracicaba: Editora Potafos, p. 319, 1997.

MARÇAL, D.A., SILVA, C.E. Evaluation of the impact of the effluent from the sewage treatment plant STP-Pirajá over the Parnaíba river, Teresina (Piauí, Brazil).

Engenharia Sanitária Ambiental, v.22, n.4, jul./ago.2017.

<https://doi.org/10.1590/S1413-41522017148242>.Disponível:

MARTINEZ et al. Production and characterization of coffeepine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v.123, abr.2019, p.70-77. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013>

NASCIMENTO, C. et al. Influence of Silicon Fertilization on Nutrient Accumulation, Yield and Fruit Quality of Melon Grown in Northeastern Brazil. **Silicon**, v. 12, p.937–943, maio/jun.2020. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00187-5>

NEGIM, O.; SWEED, A. Immobilization of heavy metals from the contaminated soil using application of sugarcane organic wastes by- products. **Egyptian Journal Of**

Soil Science, v.60, n.2, p.145-155, fev. 2020.
<http://dx.doi.org/10.21608/ejss.2020.20405.1331>

NORSURAYA, S., FAZLENA, H.; NORHASYIMI, R. Sugarcane Bagasse as a Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15). **Procedia Engineering**, V. 148, P.839-846, 2016
<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.627>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/>. Acesso em: 26 jul.2021

OLIVEIRA, R. F. et al. Composição Química de Cinzas de Caldeira da Agroindústria do Dendê. **Comunicado técnico** 155, 2006. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA.

PEIXOTO, H. et al. M. Aluminium effects on lipid peroxidation and the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Rev. Bras. Fis. Vegetal**, v.11, n.3 p.137-43, 1999.

RENCHE, A. C., CHRISTENSEN, W. F. Methods of Multivariate Analysis. John Wiley & Sons, Inc.: Toronto, ON, Canada. <https://doi.org/10.1002/0471271357>, 2002

ROBINSON et al. Phosphorus transformations in plant-based and bio-waste materials induced by pyrolysis. **Ambio**, v.47, p. 73–82, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s13280-017-0990-y>.

RADIN, J.W. In vivo assay of nitrate reductase in cotton leaf discs. Effect of oxygen and ammonium. **Plant Physiology**, v.51, p.332-6, 1973.

RAIJ, B. et al. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. **Boletim técnico**, 100. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 285 p, 1997.

RAIJ, V. B. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SAVANT et al. Silicon Nutrition and Sugarcane Production: A Review. **Journal of Plant Nutrition**, v.22, p. 1853–1903. doi:10.1080/01904169909365761.

SELEIMAN, M.F., KHEIR, A.M.S. Saline soil properties, quality and productivity of wheat grown with bagasse ash and thiourea in different climatic zones. **Chemosphere**, v.193, p.538-546 fev.2018.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.053>

SEVERINO, L. S. et al. Composição química de onze materiais orgânicos utilizados em substratos para produção de mudas. Campina Grande, Embrapa Algodão, **Comunicado Técnico**, n. 278, 2006.

SUGARCANE. Sustainability the Brazilian Experience. Disponível em : <https://www.sugarcane.org/sustainability-the-brazilian-experience/>. Acesso em: 26 de maio.2021

SHARMA et al. Biomass as a sustainable resource for value-added modern materials: a review. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, n. 3, p. 673-695, 13 jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.2079>.

TENNANT, D. Tests of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 63, n. 3, p. 995 -1001, nov. 1975.

UKWATTAGE, N. L.; RANJITH, P. G.; BOUAZZA, M. The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon). **Fuel**, v.109, p.400 - 408, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.016>. Disponível em:

UESUGI et al. Economic and Financial Analysis of Tree Seedling Production Using Composted Biosolids Substrate. **Floresta Ambient**, v. 26, n.2, p.1-9, 2019 <https://doi.org/10.1590/2179-8087.074017>.

VAN GENUTCHEN, M. T. H. A closed - form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Riverside, v. 44, p. 892 – 898, mai.1980. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

XAVIER et al. Evaluation of carbon content and humification index of soils under the application of by-products from sugarcane processing. **Microchemical Journal**, v. 149, set.2019.doi: doi.org/10.1016/j.microc.2019.104041.

WANG et al. Yuwen *et al.* Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. **Environmental And Experimental Botany**, v. 158, p. 117-124, fev. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.022>.

WEI et al. Using Si-rich materials for increasing fodder grass quality and quantity. **Earth and Environmental Science**, v. 754, 2021.

ZHANG, F.S.; YAMASAKI, S.; KIMURA, K. Waste ashes for use in agricultural production: I. Liming effect, contents of plant nutrients and chemical characteristics of some metals. **The Science of the Total Environment**, n.284, p.215-225, dez./mar.2001. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00887-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00887-7).
ABREU et al. Characterization of biosolids and potential use in the production of seedlings of *Schinus terebinthifolia* Raddi. **Eng. Sanit. Ambient**, v.24, n.3, p.591-599, maio. /jun.2019 <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019108265>.

AGUIAR, A. T. E.; GONÇALVES, C.; AYRES, M. E.; PATERNIANI, G. Z. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas, **Boletim Técnico** IAC, Campinas, n.200, p. 452, 2014. 7. ed.

ALVAREZ et al. Effects of soluble Silicate and Nanosilica Application on Rice Nutrition in an Oxisol. **Pedosphere**, v.28, n.4, p.597-606, ago.2018
doi:10.1016/S1002-0160(18)60035-9

ANGUISSOLA, S.; SILVA, S.; BOTTESCHI, G. Effect of fly ash on the availability of Zn, Cu, Ni and Cd to chicory. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.72, n.2, p.159 - 163, jun./set. 1999.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(98\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00170-4).

AUGUSTO, L.; BAKKER, M.R.; MEREDIEU, C. Wood ash applications to temperate forest ecosystems: potential benefits and drawbacks. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 306, n. 1-2, p. 181-198, fev./mar. 2008.

ARRUDA et al. Uso da cinza de biomassa na agricultura: efeitos sobre atributos do solo e resposta das culturas. **Revista principia**, João Pessoa, n.30, p.18-30, 2016.DOI:<http://doi.org/10.18265/1517-03062015v1n30p18-30>.Disponível em: Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB. Acesso em: 13 jan.2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AZEEM Effect of Bagasse ash and Lime on the Compaction and Strength Properties of Black Cotton Soil

BASU, M. et al. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science**, London, v. 19, n. 10, p. 1173-1186, nov./dez. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.12.006>.

BARBUCEA, M et al. Effects of Sewage Sludge Amendments on the Growth and Physiology of Sweet Basil. **Agronomy**, v.9, p.2-22.
<http://dx.doi.org/10.3390/agronomy9090548>

BARR, H.D.; WEATHERLEY, P.E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. **Aust. J. Biol. Sci.** p. 413-428. 1962.

BENBI et al. Pulp Ash Application Stimulates Agricultural Soil C Squestrationn without inhibiting Soil Accelerator Activity, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.48, n.15, p.1822-1833, out.2017.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1395455>.

BIDAI, T.D.T., LELEI, J.J., OUMA, J.P. Effect of sugarcane bagasse ash and manure amendments on selected soil properties in Western Kenya. **African Journal of Agricultural**, v.16, n.11, p1554-1561, nov.2020. doi.org/10.5897/AJAR2020.15194.

BITTENCOURT, S et al. Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 315-324, set. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522012000300008>.

BLOND et al. Particulate matter produced during commercial sugarcane harvesting and processing: A respiratory health hazard. **Atmospheric Environment**, v.149, p.34–46, jan.2017. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.012>.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 13 mar. 2021.

CONAB—Companhia Nacional de Abastecimento, **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar**. Terceiro Levantamento da Safra 2020/2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/>. Acesso em: 01 de maio de 2021

CHINDAPRASIRT, P., RATTANASAK, U. Eco-production of silica from sugarcane bagasse ash for use as a photochromic pigment filler. **Scientific Reports**, v. 10, p.9890, maio. /Jun. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66885-y>.

CHIRENJE, T.; MA, L Q. Impact of high-volume wood-fired boiler ash amendment on soil properties and nutrients. **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, v. 33, n. 1-2, p. 1-17, 30 jan. 2006. <http://dx.doi.org/10.1081/css-120002373>.

CREUTZIG, et al. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. **GCB Bioenergy**, v. 7, n. 5, p.916-944, abr./mai. 2014. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>.

DEL LONGO, O. T.; GONZÁLES, C. A.; PASTORI, G. M.; TRIPPI, V. S. Antioxidant defenses under hyperoxygenic and hyperosmotic conditions in leaves of two lines of maize with differential sensitivity to drought. **Plant Cell Physiology**, v. 34, p. 1023-1028, 1993

DUBOIS, M. et al Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v.28, p.350-356.1956

EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos, Rio de Janeiro, p.353, 2013.3. ed.

ETESAMI, H., JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 147, p.881–896, jan.2018.<http://doi:10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>

FAVARE et al. Potential use of ash from sugarcane bagasse to produce passion fruit seedling. **Australian Journal Crop Science**, v.14, n.14, p.408-4014, 2020.

doi: 10.21475/ajcs.20.14.03.p1734. Disponível em: Potential of ash from sugarcane bagasse for the production of passion fruit seedlings (cropj.com). Acesso em 20 de maio.2021

FIESP- Federação das Indústrias do Estado de São Paulo/ Centro das Indústrias do Estado de São Paulo, Ampliação da Oferta de Energia Através da Biomassa, Indústrias do Estado de São Paulo, Diadema, Brasil,2012. Disponível em: Ampliação da oferta de energia através de biomassa – FIESP. Acesso em 01 maio.2021

FORMANN et al. Beyond Sugar and Ethanol Production: Value Generation Opportunities. **Through Sugarcane Residues**, v.8, nov.2020. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.579577>.

GLAß, T et al. Fertilization effects of compost produced from maize, sewage sludge and biochar on soil water retention and chemical properties. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 197, p. 104493, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.104493>.

HUOTARI et al. Recycling. of Ash-for the Great of the Setting. **Forest Ecology and Management**, v. 348, p.226-240, mar.2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.008>.

HYUNGWOO, L et al. Effects of whole-tree harvesting at thinning and subsequent compensatory nutrient additions on carbon sequestration and soil acidification in a boreal forest. **GCB – Bioenergy**, v.12, p.992-1001, jun./jul.2020. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12737>.

KATZ, O. Silicon content is a plant functional trait: implications in a changing world. **Flora**, v.254, p.88–94, maio.2019. <http://doi:10.1016/j.flora.2018.08.007>.Disponível em: Silicon content is a plant functional trait: implications in a changing world – Science Direct. Acesso em:05 maio.2021

LOPES et al. Sewage sludge compost as a substrate for croton seedlings production. **Ornamental Horticultura**, v. 24, n. 4, p. 380-386,maio./set.2018 <https://doi.org/10.14295/oh.v24i4.1234>.

LAFUENTE, et al. Effect of the temperature conditioning on chilling injury of cucumber cotyledons. **Plant Physiology**, v.95, p.443-449, Jul./out. 1991.

LEE, D.W., BREMMEIER, S.; SMITH, A.P. The selective advantage of anthocyanins in developing leaves of mango and cacao. **Biotropica**, v. 19, n.1, p. 40-49, mar. 1987.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**, 2. ed. Piracicaba: Editora Potafos, p. 319, 1997.

MARÇAL, D.A., SILVA, C.E. Evaluation of the impact of the effluent from the sewage treatment plant STP-Pirajá over the Parnaíba river, Teresina (Piauí, Brazil).

Engenharia Sanitária Ambiental, v.22, n.4, jul./ago.2017.
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522017148242>.

MARTINEZ et al. Production and characterization of coffeepine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenerg**, v.123, abr.2019, p.70-77. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013>

MAZZEO et al. Effects of biostimulation by sugarcane bagasse and coffee grounds on sewage sludges, focusing agricultural use: Microbial characterization, respirometric assessment and toxicity reduction. **Waste Management**, v.118, p.110-121, dez.2020. doi:10.1016/j.wasman.2020.08.033.

MISRAN, E. Industri Tebu Menuju Zero Waste Industry. **Jurnal Teknologi Proses**, v.4, n.2, p.6 -10, jul.2005.

MORETTI, Sarah Mello Leite; BERTONCINI, Edna Ivani; ABREU-JUNIOR, Cassio

NASCIMENTO, C. et al. Influence of Silicon Fertilization on Nutrient Accumulation, Yield and Fruit Quality of Melon Grown in Northeastern Brazil. **Silicon**, v. 12, p.937–943, maio/jun.2020. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00187-5>.

NEGIM, O.; SWEED, A. Immobilization of heavy metals from the contaminated soil using application of sugarcane organic wastes by- products. **Egyptian Journal Of Soil Science**, v.60, n.2, p.145-155, fev. 2020.
<http://dx.doi.org/10.21608/ejss.2020.20405.1331>.

NORSURAYA, S., FAZLENA, H.; NORHASYIMI, R. Sugarcane Bagasse as a Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15). **Procedia Engineering**, V. 148, P.839-846, 2016
<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.627>

OLIVEIRA, R. F. et al. Composição Química de Cinzas de Caldeira da Agroindústria do Dendê. **Comunicado técnico** 155, 2006. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA.

PEIXOTO, H et al. M. Aluminium effects on lipid peroxidation and the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Rev. Bras. Fis. Vegetal**, v.11, n.3 p.137-43, 1999.

QUINTANA, N. R. G; CARMO, M.S.; MELO, W. J. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. *Nucleus*, v. 8, n. 1, p. 183-191, 2011.

QUINTANA, N. R. G. **Análise econômica da aplicação de bio sólido na agricultura**. 2006. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)

RENCHE, A. C., CHRISTENSEN, W. F. *Methods of Multivariate Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.: Toronto, ON, Canada. <https://doi.org/10.1002/0471271357>, 2002

ROBINSON et al. Phosphorus transformations in plant-based and bio-waste materials induced by pyrolysis. **Ambio**, v.47, p. 73–82, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s13280-017-0990-y>.

RADIN, J.W. In vivo assay of nitrate reductase in cotton leaf discs. Effect of oxygen and ammonium. **Plant Physiology**, v.51, p.332-6, 1973.

RAIJ, B. et al. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. **Boletim técnico**, 100. Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, 285 p, 1997.

RAIJ, V. B. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SAVANT et al. Silicon Nutrition and Sugarcane Production: A Review. **Journal of Plant Nutrition**, v.22, p. 1853–1903. doi:10.1080/01904169909365761

SEVERINO, L. S. et al. Composição química de onze materiais orgânicos utilizados em substratos para produção de mudas. Campina Grande, Embrapa Algodão, Comunicado Técnico, n. 278, 2006.

SOEGianto et al. The Effects of Filter Cake and Bagasse Ash to Growth and NPK Uptake by Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) at Ultisols in Tulang Bawang, Lampung, Indonesia. **Ilmu Pertanian (Agricultural Science)**, v. 2, n. 3, p. 112. 14 dez. 2018.<http://doi:10.22146/ipas.30098>.

SUGARCANE. Sustainability the Brazilian Experience. Disponível em : <https://www.sugarcane.org/sustainability-the-brazilian-experience/>. Acesso em: 26 de maio.2021

TENNANT, D. Tests of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 63, n. 3, p. 995 -1001, nov. 1975.

UKWATTAGE, N et al. The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon). **Fuel**, v.109, p.400 - 408, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.016>.

UESUGI et al. Economic and Financial Analysis of Tree Seedling Production Using Composted Biosolids Substrate. **Floresta Ambient**, v. 26, n.2, p.1-9, 2019
<https://doi.org/10.1590/2179-8087.074017>.

VAN GENUTCHEN, M. T. H. A closed - from equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**,

Riverside, v. 44, p. 892 – 898, mai.1980.

<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

XAVIER et al. Evaluation of carbon content and humification index of soils under the application of by-products from sugarcane processing. **Microchemical Journal**, v. 149, set.2019.doi: doi.org/10.1016/j.microc.2019.104041.

WANG et al. Yuwen *et al.* Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. **Environmental And Experimental Botany**, v. 158, p. 117-124, fev. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.022>.

WEI et al. Using Si-rich materials for increasing fodder grass quality and quantity. **Earth and Environmental Science**, v. 754, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/663/1/012062>. Acesso em:01. jun. 2021

YADAV, D. V.; JAIN, Radha; RAI, R. K.. Impact of Heavy Metals on Sugarcane. **Soil Biology**, [S.L.], p. 339-367, 6 out. 2009. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02436-8_16.

ZHANG, F.S.; YAMASAKI, S.; KIMURA, K. Waste ashes for use in agricultural production: I. Liming effect, contents of plant nutrients and chemical characteristics of some metals. **The Science of the Total Environment**, n.284, p.215-225, dez./mar.2001. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00887-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00887-7).