

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DESENVOLVIMENTO DE LARANJEIRA VALÊNCIA E
CARACTERIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO SOB
APLICAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DE CANA**

Danilo Ricardo Yamane

Engenheiro Agrônomo

2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DESENVOLVIMENTO DE LARANJEIRA VALÊNCIA E
CARACTERIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO SOB
APLICAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DE CANA**

Danilo Ricardo Yamane

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Corá

Coorientador: Prof. Dr. Dirceu de Mattos Junior

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Produção Vegetal)

2013

Yamane, Danilo Ricardo
Y11d Desenvolvimento de laranjeira Valência e caracterização de
atributos do solo sob aplicação de cinza do bagaço de cana / Danilo
Ricardo Yamane. — — Jaboticabal, 2013
vii, 78 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013
Orientador: José Eduardo Corá
Coorientador: Dirceu de Mattos Junior
Banca examinadora: Antonio Baldo Geraldo Martins, Simone
Rodrigues da Silva
Bibliografia

1. Citros-crescimento. 2. Solo-fertilidade. 3. Nutrição-mineral. 4.
Resíduo-orgânico. 5. Solo-respiração. I. Título. II. Jaboticabal-
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 628.4042:631.452:634.31

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE LARANJEIRA VALÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO SOB APLICAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DE CANA

AUTOR: DANILO RICARDO YAMANE

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE EDUARDO CORA

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. DIRCEU DE MATTOS JÚNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE EDUARDO CORA

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. ANTONIO BALDO GERALDO MARTINS

Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Profa. Dra. SIMONE RODRIGUES DA SILVA

Universidade de São Paulo / Piracicaba/SP

Data da realização: 13 de junho de 2013.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Danilo Ricardo Yamane – Nascido no dia 3 de dezembro de 1986, na cidade de Bebedouro, SP. Coursou o ensino fundamental e o primeiro e segundo ano do ensino médio na Escola Espaço Livre, em Bebedouro. Concluiu o ensino médio no Liceu Albert Sabin, em Ribeirão Preto, SP, no ano de 2004. Em fevereiro de 2005, ingressou no Curso de Graduação em Engenharia Agrônômica na Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Câmpus de Piracicaba, SP. Durante a graduação fez estágio no Centro de Citricultura Sylvio Moreira (IAC), sendo bolsista de iniciação científica pelo programa PIBIC/CNPq, durante o período de agosto de 2008 a julho de 2009. Realizou residência agrônômica na University of Florida (Citrus Research and Education Center), nos Estados Unidos, durante o período de fevereiro a julho de 2010. Em agosto de 2010, obteve o título de Engenheiro Agrônomo. Iniciou em março de 2011 o Curso de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal, onde foi bolsista CAPES e FAPESP. No dia 13 de junho de 2013, submeteu-se à banca para a defesa da Dissertação e obteve o título de Mestre em Agronomia.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”

Albert Einstein

Aos meus pais,
Ricardo Iudi Yamane e Sônia Regina Tomiosso Yamane,
à minha irmã,
Daniela Fernanda Yamane,
aos meus avós,
Takeshi Yamane e Maria Arikawa Yamane,
e à minha amada,
Karoline Pereira dos Reis,
pelo carinho, amor e incentivo.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A **Deus e ao Nosso Senhor Jesus Cristo**, por todas as oportunidades a mim proporcionadas, e pela saúde e disposição para alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador **Prof. Dr. José Eduardo Corá**, pela oportunidade de realização desse trabalho, pelos ensinamentos, instruções, dedicação e relação de amizade, contribuindo de forma valiosa para a minha formação pessoal e profissional.

Ao meu coorientador **Prof. Dr. Dirceu de Mattos Junior**, pelos importantes ensinamentos, pela amizade e confiança e por ter sempre me apoiado ao longo dos anos, viabilizando a realização de grandes sonhos e conquistas em minha vida.

À **Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias**, pela ótima estrutura e corpo docente qualificado oferecido para a realização do curso de Mestrado.

À **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)** e à **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, pela concessão de bolsas de estudos.

À **Usina Colombo**, pelo fornecimento da cinza e apoio logístico.

Aos meus avós, **Takeshi Yamane** e **Maria Arikawa Yamane**, que vieram do Japão para o Brasil na esperança de ter uma vida melhor, e neste país escreveram uma linda história de dedicação e sucesso na agricultura, proporcionando as melhores condições possíveis para a minha formação pessoal e profissional.

Ao meu **pai**, minha **mãe** e **irmã**, pelo carinho, amor e apoio durante todo o curso de Mestrado, e por serem os maiores incentivadores na realização desse sonho.

Ao meu tio, **Roberto Yochio Yamane**, pela dedicação aos negócios da família, e por ter cedido à área experimental, viabilizando o desenvolvimento desse trabalho.

À minha prima, **Fabiana Scaramal Yamane**, pela amizade e companheirismo, e por ter sempre auxiliado nos cuidados aos meus avós, suprimindo muitas vezes a minha ausência.

À **Karoline**, por estar ao meu lado nos momentos de felicidade e tristeza, pela compreensão e amor a mim dedicados, e por ter me proporcionado todo o suporte e apoio necessários sempre que precisei.

À **Profa. Dra. Simone Rodrigues da Silva** e ao **Prof. Dr. Antônio Baldo Geraldo Martins**, pela participação na banca de defesa da dissertação e pelas sugestões apresentadas para a melhoria do presente trabalho.

À **Profa. Dra. Carolina Fernandes** e ao **Prof. Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho**, pela participação no Exame Geral de Qualificação e contribuição no presente trabalho, e pelos ensinamentos durante o curso.

Ao **Prof. Dr. José Carlos Barbosa** e ao seu orientado, **Walter Maldonado Junior**, pelo auxílio nas análises estatísticas.

Ao **Prof. Dr. Newton La Scala Júnior**, por ter disponibilizado o aparelho de medição de emissão de CO₂ do solo e pelas sugestões para melhoria do presente trabalho, e aos seus orientados, **Juliano Luciani Iamaguti** e **William de Brino Silva**, pelo auxílio nas avaliações de campo.

À **Profa. Dra. Durvalina Maria Mathias dos Santos**, por ceder as dependências de seu laboratório para a realização das avaliações relacionadas ao desenvolvimento de raízes das laranjeiras, e pelas sugestões apresentadas.

À técnica de laboratório **Sônia** e à funcionária **Thaís**, pelo auxílio nas análises laboratoriais.

Ao **Prof. Dr. Pedro Luis da Costa Aguiar Alves** e ao **Prof. Dr. Rinaldo Cesar de Paula**, pelo empréstimo do aparelho de medição da fotossíntese e pelas orientações e sugestões apresentadas nas avaliações e resultados obtidos.

Ao **Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme** e seus orientados, pelo auxílio na realização das análises de metais pesados no solo e na planta.

Ao **Prof. Dr. William Natale**, pela valiosa contribuição na minha formação profissional e pelos ensinamentos e instruções ao longo do curso de Mestrado.

Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), **Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho**, pela disponibilidade e auxílio nos momentos que precisei durante o curso.

Ao **Tiago Fieno**, pelo auxílio nas avaliações do experimento e pela amizade.

À todos os **funcionários do Depto. de Solos e Adubos**, sem os quais não seria possível a realização do presente estudo.

Aos amigos da Pós-Graduação, **Priscila Volante, Roniram, Liliane, Darlene, Priscila Truber, Júnior, Getúlio, Marcos, Llerme e Adolfo**, pela amizade, companheirismo e boa convivência.

Aos **funcionários da biblioteca** e da **seção de Pós-Graduação**, pelo excelente atendimento.

A todos os demais **amigos**, que sempre me incentivaram e permaneceram ao meu lado, me apoiando em todos os momentos, contribuindo para essa importante conquista em minha vida.

Muito Obrigado.

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
4.1. Atributos químicos do solo	19
4.1.1. Atributos químicos do solo (6 meses após aplicação da cinza)	19
4.1.2. Atributos químicos do solo (12 meses após aplicação da cinza)	26
4.2. Estado nutricional das laranjeiras	28
4.2.1. Análise química de folhas	28
4.2.2. Análise química de frutos.....	36
4.3. Determinações realizadas nas amostras de folhas.....	38
4.4. Análise química de metais pesados (Cr, Ni, As)	42
4.4.1. Solo.....	42
4.4.2. Folhas	44
4.4.3. Frutos.....	46
4.5. Determinação da emissão de CO ₂ do solo (período úmido e seco).....	46
4.6. Avaliação de trocas gasosas nas folhas das laranjeiras	50
4.6.1. Período seco (inverno).....	50
4.6.2. Período úmido (primavera)	57
4.7. Avaliação do desenvolvimento radicular das laranjeiras.....	58
4.7.1. Raízes fibrosas (classe de tamanho: < 0,2 cm de diâmetro)	58
4.7.2. Raízes lenhosas (classe de tamanho: 0,2 a 1,0 cm de diâmetro)	62
4.8. Avaliação do desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras	63

5. CONCLUSÕES	67
6. REFERÊNCIAS	69

DESENVOLVIMENTO DE LARANJEIRA VALÊNCIA E CARACTERIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO SOB APLICAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DE CANA

RESUMO – Grande quantidade de cinza do bagaço de cana-de-açúcar é produzida no estado de São Paulo. Seu destino final tem sido o solo, contudo, sem a consideração de critérios técnicos estabelecidos com base em estudos para o reaproveitamento e uso para a produção agrícola. O presente trabalho teve como objetivos avaliar os efeitos da aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar nos atributos químicos do solo, na emissão de CO₂ do solo, e no estado nutricional, atividade fisiológica e desenvolvimento de plantas jovens de laranja Valência. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com 5 tratamentos e 5 repetições, que consistiram na aplicação da cinza na superfície do solo e sem incorporação (0, 5, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ em base seca). O solo foi amostrado para determinação de características químicas aos 6 e 12 meses após a aplicação dos tratamentos. O estado nutricional das plantas foi avaliado após 12 meses, e o seu desenvolvimento após 8, 10 e 12 meses. As determinações da emissão de CO₂ do solo e das trocas gasosas nas folhas das laranjeiras foram realizadas em dois períodos distintos, referente a uma época úmida e outra seca. A cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi caracterizada principalmente como uma fonte de potássio. Os teores de potássio no solo aumentaram linearmente em função do incremento das doses da cinza. A máxima concentração estimada de potássio nas folhas, equivalente a 17,4 g kg⁻¹, foi obtida na dose de 22,4 t ha⁻¹. O incremento no teor foliar de potássio foi acompanhado por decréscimos nas concentrações de cálcio e boro nas folhas. As doses de cinza não influenciaram a concentração de metais pesados (As, Cr e Ni) no solo, folhas e frutos. Não houve efeitos da aplicação da cinza na emissão do CO₂ do solo. A condutância estomática, transpiração e taxa de fotossíntese nas folhas das laranjeiras aumentaram linearmente em função do uso de doses crescentes do resíduo na época seca (inverno). O desenvolvimento das laranjeiras não foi influenciado pela aplicação da cinza. A recomendação da dose de cinza a ser utilizada em pomares de citros, em formação, deve levar em consideração principalmente a concentração de potássio na cinza e os teores desse elemento no solo, possibilitando reciclagem racional do resíduo, associada a benefícios agrônômicos.

Palavras-chave: crescimento citros, fertilidade solo, nutrição mineral, resíduo orgânico, respiração solo

DEVELOPMENT OF VALENCIA SWEET ORANGE TREE AND CHARACTERIZATION OF SOIL ATTRIBUTES UNDER SUGARCANE BAGASSE ASH APPLICATION

ABSTRACT – Large amount of sugarcane bagasse ash is produced in São Paulo state. Its final destination has been on the soil, however, without consideration of technical criteria based on the studies for the reutilization and use for agricultural production. The objectives of this work were to evaluate the effects of the application of sugarcane bagasse ash on soil chemical attributes, emissions of CO₂ from the soil, and nutritional status, physiological activity and development of young Valencia orange trees. The experimental design used was a randomized block with five treatments and five replicates, which consisted of application of ash on the soil surface, without incorporation (0, 5, 10, 20, and 40 t ha⁻¹ on a dry basis). The soil was sampled to determine chemical characteristics at 6 and 12 months after treatment application. The nutritional status of the plants was evaluated after 12 months, and its development after 8, 10 and 12 months. Determinations of CO₂ emissions from the soil and leaf gas exchange of the orange trees were carried out in two distinct periods, referring to a wet and a dry season. The sugarcane bagasse ash was characterized mainly as a source of potassium. The K concentration on the soil increased linearly with increasing rates of ash. The maximum estimated concentration of potassium in the leaves, equivalent to 17.4 g kg⁻¹, was obtained at the dose of 22.4 t ha⁻¹. The increase of foliar potassium concentration was accompanied by decreases in the concentration of calcium and boron in the leaves. The doses of ash did not influence the concentration of heavy metals (As, Cr and Ni) on soil, leaves and fruits. There were no effects of application of ash on soil CO₂ emission. The stomatal conductance, transpiration and photosynthesis in the leaves of orange trees increased linearly with increasing doses of the residue in the dry season (winter). The development of the orange trees was not influenced by the application of ash. The recommendation of the dose of ash to be used in young citrus orchards must take into account mainly the concentration of potassium in the ash and the level of this element on the soil, enabling rational recycling of the residue, associated with agronomic benefits.

Keywords: citrus growth, soil fertility, mineral nutrition, organic residue, soil respiration

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Resultados analíticos da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, visando caracterização como corretivo e fertilizante	14
Tabela 2. Resultados analíticos da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, visando determinação de metais pesados	14
Tabela 3. Efeitos das doses de cinza nos atributos químicos do solo (seis meses após aplicação da cinza)	19
Tabela 4. Efeitos das doses de cinza nos atributos químicos do solo (seis meses após aplicação da cinza)	25
Tabela 5. Efeitos das doses de cinza nos atributos químicos do solo (doze meses após aplicação da cinza)	27
Tabela 6. Efeitos das doses de cinza nos atributos químicos do solo (doze meses após aplicação da cinza)	28
Tabela 7. Efeitos das doses de cinza nos teores de macronutrientes nas folhas	29
Tabela 8. Efeitos das doses de cinza nos teores de micronutrientes nas folhas	34
Tabela 9. Efeitos das doses de cinza nos teores de macronutrientes nos frutos	37
Tabela 10. Efeitos das doses de cinza nos teores de micronutrientes nos frutos	37
Tabela 11. Efeitos das doses de cinza nas determinações realizadas nas amostras de folhas	39
Tabela 12. Efeitos das doses de cinza nos teores de metais pesados no solo	42
Tabela 13. Efeitos das doses de cinza nos teores de metais pesados nas folhas	44
Tabela 14. Efeitos das doses de cinza na emissão de CO ₂ do solo, na temperatura e umidade do solo (época úmida: verão)	47

Tabela 15.	Efeitos das doses de cinza na emissão de CO ₂ do solo, na temperatura e umidade do solo (época seca: inverno)	47
Tabela 16.	Efeitos das doses de cinza nas variáveis de trocas gasosas nas folhas da laranjeira e na umidade do solo (período seco: inverno)	50
Tabela 17.	Efeitos das doses de cinza nas variáveis de trocas gasosas nas folhas da laranjeira e na umidade do solo (período úmido: primavera)	57
Tabela 18.	Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento radicular das laranjeiras (raízes fibrosas)	59
Tabela 19.	Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento radicular das laranjeiras (raízes lenhosas)	62
Tabela 20.	Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras (oito meses após aplicação da cinza)	63
Tabela 21.	Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras (dez meses após aplicação da cinza)	64
Tabela 22.	Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras (doze meses após aplicação da cinza)	64

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Detalhes da superfície do solo demarcada para garantir aplicação homogênea das doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar nas parcelas experimentais	13
Figura 2. Efeitos das doses de cinza no teor de K no solo (camadas 0-10 cm e 10-20 cm)	20
Figura 3. Efeitos das doses de cinza nos teores de K nas folhas	29
Figura 4. Efeito do teor foliar de potássio na concentração de cálcio nas folhas	32
Figura 5. Efeitos das doses de cinza nos teores de B nas folhas	34
Figura 6. Efeito do teor foliar de potássio na concentração de boro nas folhas	35
Figura 7. Efeito das doses de cinza na área foliar	39
Figura 8. Efeito das doses de cinza na massa específica de folhas	40
Figura 9. Efeito do teor foliar de potássio na área foliar	40
Figura 10. Efeitos das doses de cinza na transpiração foliar das laranjeiras	51
Figura 11. Efeitos das doses de cinza na fotossíntese das laranjeiras	51
Figura 12. Efeitos das doses de cinza na condutância estomática	52
Figura 13. Efeitos das doses de cinza na umidade do solo (camada 10-20 cm)	55
Figura 14. Efeitos das doses de cinza na umidade do solo (camada 0-10 cm)	55
Figura 15. Efeitos das doses de cinza na umidade do solo (camada 20-40 cm)	56

1. INTRODUÇÃO

A citricultura apresenta destacada importância no cenário agrícola do Brasil, em função da participação na receita gerada e criação de empregos. Em 2009, o PIB (Produto Interno Bruto), do setor citrícola, foi de US\$ 6,5 bilhões e o número de empregos incluiu 230 mil posições (NEVES, 2010). O Brasil é o maior produtor de suco de laranja e responsável por mais de 80% do volume exportado no mercado internacional (AGRIANUAL, 2013). O estado de São Paulo é a principal região produtora de laranja e detém, aproximadamente, 67% da área colhida nacional (AGRIANUAL, 2013).

O setor citrícola brasileiro enfrenta desafios para a manutenção dessa posição de destaque. Assim, justifica-se a necessidade da ampliação da base de informações que possibilite aumento de produtividade associada à redução de custos. Adicionalmente, a adequação do sistema produtivo a um modelo sustentável é necessária, levando-se em consideração a legislação de preservação ambiental e as restrições impostas pelos agentes compradores.

Dentre os desafios ambientais, a disposição adequada de resíduos gerados pela cadeia produtiva citrícola é fator importante no estado de São Paulo, uma vez que grande quantidade de cinza é produzida nas indústrias de suco de laranja concentrado, a partir da combustão do bagaço de cana-de-açúcar, utilizado como fonte geradora de energia nas caldeiras. A sua produção tem aumentado, não apenas nas indústrias de suco, mas também nas usinas canavieiras, devido ao crescimento da produção de etanol e da cogeração de energia.

Na safra 2011/2012 gerou-se, no estado de São Paulo, aproximadamente, 7,65 milhões de toneladas de cinza; considerando-se o processamento de cerca de 306 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (AGRIANUAL, 2013), e que cada tonelada de cana processada gera 250 kg de bagaço (SOUZA et al., 2011), que ao ser queimado produz a cinza com rendimento de 10% (PAULA et al., 2009). Entretanto, o destino final da cinza tem sido o solo, sem a consideração de critérios técnicos (BRUNELLI; PISANI Jr., 2006; FREITAS, 2005), uma vez que pesquisas relacionadas aos efeitos da aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar no solo

são escassas (BRUNELLI; PISANI Jr., 2006; FERREIRA; FAGERIA; DIDONET, 2012). Potenciais riscos de contaminação do meio ambiente têm demandado o desenvolvimento de informações que possibilitem reaproveitamento e disposição adequada desse resíduo.

Devido à composição da cinza, podem ocorrer efeitos de sua aplicação nos atributos do solo e, conseqüentemente, no desenvolvimento das plantas, determinando potencial de uso no meio agrícola. Como a ocorrência e intensidade dos efeitos da cinza no solo são determinadas principalmente pela quantidade utilizada (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; DAROLT; BLANCO NETO; ZAMBON, 1993; FERREIRA; FAGERIA; DIDONET, 2012; PANDEY et al., 2009), a recomendação de doses em solos agrícolas não deve ser feita sem a realização de estudos que possibilitem seu uso de forma segura (ABREU Jr. et al., 2005).

O ajuste de doses deve considerar a constituição da cinza, os atributos químicos do solo e as exigências da cultura, além de informações relacionadas aos efeitos no sistema solo-planta. Assim, o uso racional de resíduo nos pomares, fundamentado por pesquisas científicas, poderá contribuir para aumentos na produtividade e qualidade dos citros, com melhor relação custo/benefício, além de evitar a degradação dos recursos ambientais (ABREU Jr. et al., 2005), auxiliando na manutenção da competitividade da citricultura brasileira.

O presente estudo teve como objetivos avaliar os efeitos da aplicação de doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar nos atributos químicos do solo, na emissão de CO₂ do solo; e no estado nutricional, atividade fisiológica e desenvolvimento de plantas de um pomar jovem de laranja Valência.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo obtido no processo de geração de energia a partir da queima do bagaço de cana em caldeira (PAULA et al., 2009; SOUZA et al., 2011). As características da cinza podem ser influenciadas por fatores como manejo nutricional e variedade da cana, processo de moagem e condições de combustão (TURN et al., 2003).

As cinzas caracterizam-se principalmente por apresentar propriedades alcalinas e conter nutrientes (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; BASU et al., 2009; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001; FERREIRA; FAGERIA; DIDONET, 2012). Levando-se em consideração a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, predominam em sua composição química os macronutrientes: K, Ca, Mg e, em menores teores, P (CORDEIRO et al., 2009). O Si é abundante na cinza da queima do bagaço (CORDEIRO et al., 2009), pois a cana-de-açúcar absorve esse elemento mineral em grande quantidade. No caso das cinzas de carvão e de madeira, os principais macronutrientes constituintes são o Ca, Mg e K (PARK et al., 2004; THIND et al., 2012).

O baixo teor de N nas cinzas constitui-se como limitação ao uso na agricultura (BASU et al., 2009). Isso ocorre devido ao nitrogênio ser em grande parte perdido na forma de gases no processo de combustão da biomassa (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001). Os macronutrientes presentes na cinza apresentam diferentes solubilidades, podendo ser agrupados em três classes: a-) alta solubilidade (K e S); b-) solubilidade média (Ca e Mg), e c-) baixa solubilidade (P), como verificado em cinza de madeira (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008), determinando disponibilidades distintas dos elementos às plantas.

Com relação à composição de micronutrientes, a cinza de madeira apresenta alta variabilidade, predominando o Fe (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001). Na cinza de carvão, o Fe, Zn, Mn, Cu, B, Co e Mo estão presentes (BASU et al., 2009) e no caso específico da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, principalmente o Fe (CORDEIRO et al., 2009).

Metais pesados e elementos não essenciais podem estar presentes, como verificado na cinza de carvão: Ni, Cd e Pb (SINGH; SHARMA; AGRAWAL, 2008; CHAUDHARY et al., 2011). Augusto, Bakker e Meredieu (2008) constataram que os principais metais pesados na composição da cinza de madeira são: Pb, Cr, Ni e As.

Devido à composição da cinza, pode ocorrer influência de sua aplicação nas características químicas, físicas e biológicas do solo. No entanto, os efeitos são principalmente nos atributos químicos do solo (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001), influenciando o desenvolvimento das plantas e determinando o potencial de uso no meio agrícola.

Darolt, Blanco Neto e Zambon (1993) verificaram aumento do pH e redução do Al trocável com a aplicação de cinza vegetal em solo de textura argilosa e rico em matéria orgânica. Ferreira, Fageria e Didonet (2012) também observaram incremento do pH e diminuição na acidez total do solo (H+Al) com o uso de doses crescentes de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em Latossolo de textura argilosa.

A correção do pH possibilitada pela cinza deve-se a sua constituição química, que lhe confere propriedades alcalinas. Por meio de análises mineralógicas, Demeyer, Nkana e Verloo (2001) relataram que, no caso da cinza de madeira, os principais elementos alcalinos que a constituem são os óxidos, hidróxidos e carbonatos. Yunusa et al. (2006) observaram que a cinza de carvão é eficiente na correção do pH de solos ácidos, quando apresenta alto teor de Ca e Mg, na forma de óxidos ou carbonatos, assim como textura fina, o que melhora a sua dissolução no solo.

Estudos têm demonstrado que a aplicação de cinza de madeira apresenta reação rápida com o solo, fazendo com que o pH aumente em curto período de tempo, porém, possui baixo poder residual (MUSE; MITCHELL, 1995). Isso ocorre em virtude da elevada solubilidade dos principais elementos da cinza que conferem poder de neutralização à acidez do solo (ULERY; GRAHAM; AMRHEIN, 1993). Essa característica pode fazer com que sejam necessárias aplicações frequentes do resíduo em solos ácidos para manutenção do pH em intervalo adequado.

Considerando que os solos tropicais são geralmente ácidos, a correção do seu pH é fundamental no manejo da fertilidade, sendo a calagem uma prática importante. Contudo, o uso de calcário na agricultura contribui para o aumento do

aquecimento global, de acordo com o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), uma vez que considera-se que todo o carbono presente no calcário é liberado na forma de CO₂ para a atmosfera (BASU et al., 2009). Adicionalmente, além do dióxido de carbono, tem-se atribuído ao calcário emissão de outros gases, tais como óxido nítrico e metano, que favorecem o aquecimento global (PANDEY; SINGH, 2010).

Devido às mudanças climáticas que estão sendo relatadas, tendo como base o relatório do IPCC (2007), o qual aponta para a necessidade de alterações em diversos setores produtivos, a fim de conter o aumento da temperatura no planeta, estudos do uso e de manejos alternativos de solos agrícolas têm sido de grande interesse. Nesse contexto, a utilização de cinza como corretivo de acidez parece ser mais vantajosa em comparação ao calcário agrícola. Basu et al. (2009) e Pandey e Singh (2010) constataram a possibilidade de uso da cinza de carvão como substituta do calcário, viabilizando manejo que minimiza o aquecimento global, por meio principalmente da redução da emissão de CO₂ do solo.

Em adição a isso, Pandey e Singh (2010) relataram que a cinza de carvão, em função principalmente de suas propriedades alcalinas e características físicas, pode atuar na imobilização de metais pesados no solo, por meio de processos de adsorção, complexação e precipitação. A mobilidade e disponibilidade da maior parte dos elementos presentes nas cinzas são influenciadas pelo pH (IZQUIERDO; QUEROL, 2012). Quando a cinza apresenta propriedades alcalinas, ocorre redução da disponibilidade de vários elementos com potencial de contaminação ambiental, como: Cu, Cd, Co, Hg, Ni, Pb, Sn e Zn (IZQUIERDO; QUEROL, 2012).

Shende, Juwarkar e Dara (1994) constataram esse efeito ao estudarem a cinza de carvão como possível agente redutor da toxicidade de solos contaminados por metais pesados. Os autores semearam milho em solo franco arenoso de característica ácida (pH=4.9), tratado com concentrações definidas de Cd, Cu, Ni e Zn, em que concentrações crescentes de cinza (0%, 2%, 5%, 10%, 15% e 20% em base seca) foram aplicadas e misturadas ao solo. Os autores verificaram que a adição de quantidades crescentes de cinza ao solo contaminado com metais pesados possibilitou melhor desenvolvimento das plantas de milho. Esse efeito foi atribuído principalmente ao aumento do pH do solo, fazendo com que ocorresse a

redução da solubilidade de metais pesados e menor disponibilidade às plantas, possibilitando diminuição da absorção desses elementos.

As cinzas também podem ser consideradas fonte de nutrientes minerais para as plantas. Quando se aplica cinza, incremento na concentração de potássio constitui como um dos efeitos mais destacados em relação à alteração nos teores de nutrientes no solo, como verificado com a adição de cinza de madeira em solo de textura argilosa (NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998), e aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em Latossolo argiloso (FERREIRA; FAGERIA; DIDONET, 2012). Isso ocorre, pois, como relatado em cinza de madeira, a disponibilidade do K contido nesse tipo de resíduo é praticamente igual à de fertilizantes potássicos (ERICH, 1991; OHNO, 1992).

As plantas cítricas geralmente são cultivadas em regiões úmidas com elevado índice pluviométrico e solos com pH ácido e sujeitos a lixiviação de cátions (ASHKEVARI; ZADEH; MIRANSARI, 2010). Nessas condições, a deficiência de potássio é comum e o fornecimento desse elemento em quantidades adequadas se faz necessário (ASHKEVARI; ZADEH; MIRANSARI, 2010). Adicionalmente, as plantas cítricas são exigentes em K, uma vez que esse elemento é exportado em grande quantidade pela colheita dos frutos (BATAGLIA et al., 1977; MATTOS Jr. et al., 2003). O potássio participa de importantes funções fisiológicas e bioquímicas na planta como ativação enzimática, síntese de proteínas, taxa fotossintética, extensão celular, osmorregulação, abertura e fechamento dos estômatos (ROMHELD; KIRKBY, 2010). Tais informações evidenciam o potencial de uso da cinza na citricultura, como fonte de K.

Além do potássio, a cinza pode fornecer outros nutrientes. Park et al. (2012) estudaram efeitos da aplicação de diferentes frações de cinza de madeira nos atributos químicos do solo e no estado nutricional de 2 culturas (azevém e aveia), cultivadas em vasos. Os tratamentos consistiram da adição de cinza-volante ou cinza-escória na concentração de 1 % (em base seca), e a testemunha (em que não se aplicou cinza ao solo). Os autores observaram aumento na disponibilidade de macro e micronutrientes no solo (P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu) e incremento nos teores de K e Mo na biomassa da parte aérea das plantas em decorrência da aplicação das cinzas. A concentração de Zn no tecido de ambas as plantas

aumentou apenas com a adição da cinza-volante, enquanto o teor de Mn diminuiu nos tecidos da aveia, quando aplicou-se cinza-escória. Os autores não verificaram efeito da aplicação das cinzas na concentração de P nos tecidos de aveia e azevém, apesar desses resíduos apresentarem alto teor de P e a análise de solo ter mostrado aumento do P disponível.

Nkana, Demeyer e Verloo (1998) conduziram experimento em casa de vegetação com azevém cultivado em vasos preenchidos com solos de características ácidas e textura argilosa. Os tratamentos foram compostos de doses de cinza aplicadas e misturadas ao solo com o objetivo de obter valores de pH correspondentes a 5,5; 6,0; e 6,5 e as testemunhas (sem adição da cinza). A aplicação da cinza possibilitou aumento na produção de biomassa das plantas. A cinza atuou como corretivo da acidez do solo, reduzindo a toxicidade de Al e Mn e como fonte principalmente de Ca e K para as plantas.

Em relação a cinza de carvão, Sarangi, Mahakur e Mishra (2001) avaliaram os efeitos de doses (0, 10; 12,5; 15; 17,5 e 20 t ha⁻¹) nos atributos químicos do solo (franco arenoso) e no desenvolvimento da cultura do arroz. As plântulas de arroz de 1 mês de idade foram transplantadas para as parcelas experimentais após estabelecimento dos tratamentos. Os autores observaram aumento do P disponível e da matéria orgânica no solo com aplicação de 20 t ha⁻¹ de cinza. Em relação ao desenvolvimento das plantas, verificaram que a biomassa total de plantas e a biomassa da parte aérea aumentaram com a utilização da cinza na dose mais elevada.

Alva (1994) avaliou os efeitos da aplicação de cinza de carvão, na dose equivalente de 4,48 t ha⁻¹, nos atributos químicos do solo, no estado nutricional e desenvolvimento de mudas de tangerina Cleópatra e citrumelo Swingle cultivadas em vasos preenchidos com solo arenoso. Os resultados obtidos demonstraram que a concentração de Zn no solo aumentou. Na tangerina Cléopatra houve incremento no teor de Ca nas folhas e no citrumelo Swingle aumento nos teores de P, K e Mg, em comparação as testemunhas. O crescimento de ambos os porta-enxertos foi favorecido pela aplicação do resíduo ao solo.

Embora a aplicação de cinza no solo apresente vantagens associadas principalmente ao efeito no pH, como fonte de nutrientes às plantas, como corretivo

em solos contaminados por metais pesados e ainda como possível mitigador da emissão do CO₂ do solo, efeitos potencialmente adversos também devem ser considerados. Os efeitos em função da aplicação da cinza são dependentes principalmente da dose empregada (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; DAROLT; BLANCO NETO; ZAMBON, 1993; FERREIRA; FAGERIA; DIDONET, 2012; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998; PANDEY et al., 2009). Baixas doses favorecem o desenvolvimento de plantas, enquanto altas doses podem criar condições que inibem o seu crescimento (PANDEY et al., 2009). Portanto, é importante que a cinza seja aplicada em quantidades adequadas ao solo, como sugerido por Nkana, Demeyer e Verloo (2002), em estudo com aplicação de cinza de madeira em solos tropicais ácidos.

Efeitos adversos decorrentes da aplicação de doses elevadas de cinza ao solo podem ser devido a vários fatores, como desbalanço de nutrientes na sua constituição química (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; DAROLT; BLANCO NETO; ZAMBON, 1993; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998), possível diminuição da disponibilidade de nutrientes, em função do efeito da cinza no pH do solo (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998; PANDEY; SINGH, 2010), presença de metais pesados na cinza (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001; PANDEY et al., 2009; PANDEY; SINGH, 2010; SINGH; SHARMA; AGRAWAL, 2008), e aumento da salinidade do solo com a aplicação do resíduo (PANDEY; SINGH, 2010; PARK et al., 2012).

Em relação ao desbalanço de nutrientes na constituição química da cinza, a concentração de potássio é alta e parece ser um dos efeitos mais destacados com relação à alteração nos teores de nutrientes no solo, quando se aplica cinza vegetal (DAROLT; BLANCO NETO; ZAMBON, 1993; FERREIRA; FAGERIA; DIDONET, 2012; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 2002; PARK et al., 2004). Isso pode ocasionar problemas quando se adiciona doses altas de cinza ao solo, uma vez que o K, Ca e Mg ocupam os mesmos sítios de absorção na raiz da planta, fazendo com que elevadas quantidades de potássio, fornecidas pelo resíduo, possam prejudicar a absorção de cálcio e magnésio, caracterizando

efeito de inibição competitiva (BERNARDI; CARMELLO; CARVALHO, 2000; MARQUES et al., 2011).

Darolt, Blanco Neto e Zambon (1993), ao estudarem a influência de doses de cinza vegetal (0, 10, 15, 20 e 30 t ha⁻¹) no estado nutricional da alface, em um solo argiloso e com alto teor de matéria orgânica, observaram que houve tendência de redução da absorção do cálcio e magnésio pela planta, conforme se aumentava as doses de cinza. Esse efeito foi atribuído à elevada quantidade de potássio adicionada pelo resíduo, o que prejudicou a absorção de Ca e Mg.

Quaggio, Mattos Jr. e Boaretto (2011) também relataram esse efeito em laranjeiras 'Pêra' e 'Valência' em produção, ao avaliarem a influência de doses de potássio (0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ por ano de K₂O) e fontes (K₂SO₄ e KCl) no estado nutricional das plantas. Os autores observaram que o incremento do teor foliar de K foi acompanhado pelo decréscimo da concentração de Ca e Mg nas folhas, sendo que os teores de Ca foram inferiores ao recomendado para a cultura do citros, quando se aplicou doses elevadas de fertilizante potássico.

Além de desbalanço de cátions no solo, doses elevadas de cinza podem ocasionar alteração na disponibilidade de micronutrientes. Demeyer, Nkana e Verloo (2001) relataram que apesar de a cinza de madeira conter micronutrientes em sua composição, a sua aplicação ao solo pode diminuir a disponibilidade de Zn, Mn, Fe e Cu. Nkana, Demeyer e Verloo (1998) verificaram redução nos teores de Mn e Zn em plantas de azevém em decorrência da adição de cinza de madeira em solos de textura argilosa e características ácidas. Esses efeitos podem ser atribuídos ao aumento do pH do solo ocasionado pela aplicação da cinza, reduzindo a disponibilidade e absorção desses micronutrientes.

Outro importante potencial efeito adverso, decorrente da aplicação de doses inadequadas de cinza, advém do fato de que metais pesados podem estar presentes nesse resíduo. A ocorrência de efeitos adversos ao meio ambiente associa-se, principalmente, à concentração de metais na cinza e à mobilidade desses elementos no solo (YUNUSA et al., 2006).

No caso da cinza de carvão, a presença de metais pesados na sua composição constitui em uma das principais limitações ao uso desse resíduo na agricultura, podendo se acumular no solo ao longo do tempo, oferecendo potencial

risco de contaminação ambiental (YUNUSA et al., 2006). O incremento na concentração de metais pesados no solo pode favorecer a absorção pelas plantas, prejudicando o seu desenvolvimento (GUPTA et al., 2007; SINGH; SHARMA; AGRAWAL, 2008). É desejável que as cinzas para o uso na agricultura apresentem baixos teores, principalmente, de: As, B, Cd, Mo, Hg, Pb e Se, e em nível menor de importância, baixas concentrações de: Cr, Ni, Cu, V, Zn e F, baseando-se no risco de liberação desses elementos no ambiente (YUNUSA et al., 2006).

Singh, Sharma e Agrawal (2008) relataram efeitos adversos da utilização de cinza de carvão em experimento com beterraba. Os autores, ao avaliarem a influência da aplicação ao solo de concentrações crescentes do resíduo (0%, 5%, 10%, 15% e 20%) no acúmulo de metais pesados e desenvolvimento das plantas, observaram que a concentração de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr e Cd nas raízes e na parte aérea aumentou de forma linear, ocasionando redução no crescimento e produção de biomassa das plantas.

Pandey et al. (2009) estudaram a influência da aplicação da cinza de carvão no desenvolvimento de guandu e na translocação e acúmulo de metais pesados na planta. Foram semeados guandu em vasos preenchidos com solo tratado com diferentes concentrações da cinza (peso/peso): 0% (controle), 25%, 50%, e 100%. Os autores verificaram que o acúmulo e translocação de metais pesados na planta foram dependentes da concentração de cinza aplicada. O aumento da concentração de cinza no solo ocasionou incremento nos teores de metais nas plantas. As variáveis de crescimento da planta (comprimento da raiz, altura das plantas, área foliar total, biomassa e número de nódulos por planta) foram significativamente menores no tratamento com aplicação da dose mais elevada da cinza em comparação ao controle. Em contrapartida, a utilização de dose moderada (25%) favoreceu o desenvolvimento e a produtividade das plantas, além de manter as concentrações de metais pesados na planta dentro de níveis aceitáveis.

Pelo exposto, observa-se potencial de uso da cinza na agricultura. Devido às características de grande parte dos solos utilizados pela citricultura no estado de São Paulo, associadas à acidez e à baixa fertilidade natural (CORÁ; SILVA; MARTINS FILHO, 2005), somado aos preços elevados de fertilizantes, faz com que meios alternativos de manejo do solo, utilizando a cinza do bagaço de cana-de-

açúcar, se tornem interessantes e possam possibilitar aumento da produtividade e redução de custos, conferindo maior competitividade e sustentabilidade ao setor produtivo.

No entanto, estudos relacionados aos efeitos da adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar ao solo são escassos (BRUNELLI; PISANI Jr., 2006; FERREIRA; FAGERIA; DIDONET, 2012). Adicionalmente, existe a necessidade de normatização da aplicação de resíduos em solos agrícolas (ABREU Jr. et al., 2005). Como os efeitos da aplicação da cinza ao solo são determinados principalmente pela dose adicionada, é importante a definição de quantidades adequadas a serem utilizadas. Nesse contexto, atribui-se a pesquisa científica a responsabilidade de promover desenvolvimento tecnológico que possibilite o uso seguro de resíduos orgânicos nos pomares de citros (ABREU Jr. et al., 2005). Estudos dessa natureza podem contribuir para a utilização da cinza na agricultura, de tal forma que beneficie o desenvolvimento da cultura, sem afetar a qualidade do solo e evitando o acúmulo de metais tóxicos nas plantas em níveis que possam afetar a saúde humana.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em pomar comercial de laranjeira Valência [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] sobre limão Cravo (*Citrus limonia* Osbeck), com 18 meses de idade, no espaçamento de 6,5 m x 2,5 m, em Taquaral-SP. O solo é do tipo Argissolo Vermelho, cujas características químicas na camada de 0-20 cm de profundidade, no início do estudo, foram: P = 68 mg dm⁻³; MO = 21 g dm⁻³; pH (CaCl₂) 5,6; K = 2,9 mmol_c dm⁻³; Ca = 29 mmol_c dm⁻³; Mg = 9 mmol_c dm⁻³; H+Al = 13 mmol_c dm⁻³; soma de bases (SB) = 40,9; CTC = 53,9 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) = 76%; B = 0,24 mg dm⁻³; Cu = 9,4 mg dm⁻³; Fe = 12 mg dm⁻³; Mn = 10,8 mg dm⁻³ e Zn = 3,2 mg dm⁻³. Os teores médios de argila, silte e areia na camada de 0-20 cm foram de 139, 79 e 782 g kg⁻¹, respectivamente.

O clima da região pela classificação de Köppen é do tipo Aw, com verão quente e úmido e inverno mais acentuado com estação seca. A precipitação pluvial média anual é de 1.629 mm, concentrada no período de setembro a março. A temperatura média anual é de 23 °C.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com cinco tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos consistiram de doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (0, 5, 10, 20 e 40 t ha⁻¹ em base seca). A cinza foi aplicada na superfície do solo, sem ser incorporada, em uma faixa até 1 m do tronco, em ambos os lados da planta, em maio de 2011. A aplicação foi realizada de forma homogênea, por meio do uso de demarcações quadriculadas de 0,5 m² na área das parcelas. As parcelas experimentais foram constituídas por cinco plantas ao longo da linha de plantio, compreendendo uma área de 25 m² [12,5 m (cinco plantas espaçadas de 2,5 m) x 2 m (1 m de cada lado da planta)] (Figura 1).



Figura 1. Detalhes da superfície do solo demarcada para garantir aplicação homogênea das doses de cinza de bagaço de cana-de-açúcar nas parcelas experimentais.

As análises realizadas para caracterização da cinza da queima do bagaço da cana foram baseadas na norma NBR 10004 (ABNT, 2004), a qual permite a classificação de um resíduo, em função de suas características e grau de periculosidade. Considerando os resultados obtidos, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar foi classificada como “resíduo não inerte classe II A”. Para a caracterização da cinza como corretivo e fertilizante, e visando a determinação de metais pesados, realizaram-se análises químicas (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Resultados analíticos da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, visando caracterização como corretivo e fertilizante.

Características	Valores (%)
CaO	0,65
MgO	0,31
Soma de CaO e MgO	0,96
PN	2,63
P ₂ O ₅ total	0,12
K ₂ O	0,27
Ca	0,12
Mg	0,07
S	0,03
B	0,002
Zn	0,001
Fe	0,27
Mn	0,01
Cu	<0,001
Co	<LQ
Mo	<LQ

Observação: LQ (Limite de quantificação em mg kg⁻¹): Co=1,006, Mo=0,904.

Tabela 2. Resultados analíticos da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, visando determinação de metais pesados.

Características	Valores (mg kg ⁻¹)
As	0,28
Cd	<LQ
Pb	<LQ
Cr	49,65
Ni	3,05
Se	<LQ
Hg	<LQ

Observação: elementos determinados na matéria seca a 105°C. LQ (Limite de quantificação em mg kg⁻¹): Cd=0,88; Pb=4,81; Se=0,02; Hg=0,01.

O solo foi avaliado quimicamente em dois períodos: dezembro 2011 e maio 2012, seis e doze meses após a implantação do experimento, respectivamente. As amostragens foram realizadas nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm. Foram coletadas amostras compostas, constituídas por oito subamostras por parcela e nas profundidades mencionadas, dentro da faixa em que a cinza foi aplicada, utilizando trado tipo holandês. Nas amostras foram determinados: teores de carbono orgânico total, macronutrientes (P, Mg, Ca, K, S), micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn), Al, pH

(CaCl_2), e acidez potencial, de acordo com Raij et al. (2001). Foram calculados os valores de capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB) e porcentagem de saturação por bases (V). Em função dos resultados obtidos nas análises realizadas na cinza (Tabela 2), os teores de As, Cr e Ni também foram determinados nas amostras de solo coletadas doze meses após a implantação do experimento. Para a quantificação dos elementos-traço foi utilizado a técnica da fluorescência de raios-X por reflexão total no aparelho S-2 Picofox da Bruker. Para o preparo das suspensões de solo, as amostras foram moídas e passadas em peneira de nylon com abertura de 50 micrômetros. Em seguida, foram pesados cerca de 50 mg de cada amostra, as quais foram armazenadas em tubo tipo Falcon com 15 mL de capacidade. A cada tubo, foram adicionados 2,5 mL de solução de Triton X-100 5% v/v juntamente com 0,5 mL de solução padrão de Ga 10 mg/L. Após serem devidamente fechados, cada tubo contendo as soluções e as amostras foram agitados em Vórtex por cerca de 30 segundos. A seguir, foram pipetados 10 microlitros das amostras e colocados em porta amostras de quartzo específicos para o aparelho. Após as amostras serem secas em estufa a 65°C, procedeu-se à determinação das concentrações dos elementos de interesse (As, Cr e Ni) no aparelho Picofox. O tempo de leitura foi de 300 s, a corrente aplicada foi de 604 microampéres e o tubo para geração dos raios-X foi de Mo.

O estado nutricional das laranjeiras foi avaliado doze meses após implantação do experimento por meio da análise química de folhas e frutos para determinação dos teores totais de macro e micronutrientes. Foram coletadas oito folhas recém-maduras por planta, localizadas na altura mediana da copa e distribuídas nos diferentes quadrantes das plantas, sendo estas totalmente expandidas e geradas no ciclo da primavera (terceira ou quarta folha de ramo com fruto terminal de 2 a 4 cm diâmetro) (QUAGGIO; MATTOS Jr.; BOARETTO, 2010). No caso dos frutos, foram coletados quatro por árvore, com diâmetro de 2-4 cm, localizados na porção terminal do ramo e na altura mediana da copa e distribuídos nos diferentes quadrantes da planta. Determinou-se a área foliar das amostras descritas anteriormente conforme Mazzini, Ribeiro e Pio (2010) e estimou-se a massa específica de folhas conforme Syvertsen e Levy (1982). As folhas e frutos amostrados foram lavados, secos em

estufa com circulação forçada de ar a 60 °C até massa constante, moídos e submetidos à análise química (BATAGLIA et al., 1982).

Em função da presença na cinza, os teores de As, Cr e Ni também foram determinados nas amostras de folhas e frutos. Para tanto, foi pesado cerca de 0,500 g de cada amostra vegetal. As amostras pesadas foram, então, colocadas em tubos de teflon, aos quais foram adicionados cerca de 5 mL de ácido nítrico (HNO_3 p.a. da marca Sigma Aldrich). Em seguida, os tubos foram hermeticamente fechados para o procedimento da digestão, feita segundo o método 3051A da USEPA (1998). Neste método de digestão, ocorre a reação das amostras com o HNO_3 sob altas pressão (65 psi) e temperatura (180°C), durante cerca de 10 minutos de rampa. Após a obtenção dos extratos ácidos, procedeu-se à determinação do As, Cr e Ni em espectrofotômetro de absorção atômica com chama de ar-acetileno e forno de grafite AAnalyst 800 da marca Perkin Elmer.

A emissão de CO_2 do solo foi avaliada em dois períodos, referente a uma época úmida e outra mais seca: verão (janeiro, 8 meses após estabelecimento dos tratamentos) e inverno (julho, 14 meses após estabelecimento dos tratamentos), utilizando-se o sistema LI-8100, fabricado pela companhia LI-COR, Nebraska, EUA. Este sistema é constituído de uma câmara fechada, que é acoplada sobre os colares anteriormente inseridos no solo nos pontos a serem estudados, que possui um volume interno de 991 cm^3 e área de contato com o solo de 71,6 cm^2 . Foram utilizados quatro colares por parcela experimental. Durante o modo de medição, o ar do interior da câmara tem sua concentração de CO_2 continuamente mensurada a partir de um espectrômetro de absorção ótica. Variações da concentração de CO_2 do ar no interior da câmara ao longo do tempo basicamente compõem o cálculo da emissão de CO_2 do solo (LA SCALA Jr. et al., 2000). Em cada ponto, próximo ao local em que se inseriu o colar, determinou-se a umidade do solo, utilizando TDR, e a temperatura do solo, por meio de um termômetro acoplado ao sistema LI-8100, ao mesmo tempo em que as emissões de CO_2 do solo estavam sendo determinadas.

As avaliações de trocas gasosas nas folhas das laranjeiras também foram realizadas em períodos distintos, referente a uma época seca e outra úmida: inverno (agosto, 15 meses após estabelecimento dos tratamentos) e primavera (outubro, 17 meses após estabelecimento dos tratamentos). As avaliações consistiram de leituras

da taxa de fotossíntese ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), obtidas entre 8:00 e 10:00 h, com um aparelho portátil de medida da fotossíntese (ADC-LCPro⁺). As leituras foram realizadas em folhas totalmente desenvolvidas, localizadas na porção mediana da árvore e expostas a incidência da radiação solar, em uma planta por parcela, escolhida aleatoriamente dentre as três plantas centrais de cada parcela. Por ocasião das avaliações fisiológicas das laranjeiras, também foi avaliada a umidade volumétrica (EMBRAPA, 1997) do solo nas camadas 0-10, 10-20 e 20-40 cm.

O sistema radicular das plantas foi avaliado 12 meses após a implantação do experimento, utilizando trado modificado (dimensões: 7 cm de diâmetro e 10 cm de altura) para amostrar as raízes. Foram coletadas amostras compostas de solo para avaliação do sistema radicular, constituídas por três subamostras por parcela em cada profundidade avaliada (0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm), a uma distância de 0,50 a 0,57 m do tronco da planta, no sentido da linha de plantio.

As amostras foram levadas ao laboratório em sacos plásticos e as raízes foram separadas do solo pela dispersão em água, utilizando-se uma peneira de malha de 0,2 cm de diâmetro (ABNT n°10), e lavadas cuidadosamente. Duas classes de tamanho de raízes foram separadas (a) <0,2 cm de diâmetro e (b) 0,2 a 1,0 cm de diâmetro (MATTOS Jr.; GRAETZ; ALVA, 2003). Em seguida as raízes foram acondicionadas em recipientes contendo solução de álcool a 20% (v/v) e mantidas sob refrigeração para as futuras determinações das variáveis relacionadas ao desenvolvimento do sistema radicular.

Posteriormente, cada amostra de raízes foi colorida com azul de metileno por aproximadamente dois minutos, e disposta sobre uma bandeja de vidro transparente contendo água. Procedeu-se a disposição de forma a minimizar a sobreposição das raízes. A leitura da imagem foi efetuada por um scanner Hewlett Packard modelo 5 C. As imagens do sistema radicular foram analisadas pelo software Delta-T Scan Root Analysis System, que por meio do método Harris e Campbell (1989) determina o comprimento (mm), área (mm^2) e diâmetro médio (mm) das raízes. Em seguida, as raízes foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar em temperatura de 80°C até a obtenção da massa constante. Para determinação da massa seca foi utilizada uma balança analítica. Calculou-se a

densidade de raízes de duas formas, dividindo-se: a-) massa seca de raiz pelo volume de solo amostrado (mg de raiz/cm^3 de solo), b-) o comprimento da raiz pelo volume de solo amostrado (mm de raiz/cm^3 de solo).

O desenvolvimento das laranjeiras (parte aérea) foi avaliado em 3 períodos, correspondentes à 8, 10 e 12 meses após a aplicação dos tratamentos, o qual se constituiu da medida da altura das plantas, perímetro do tronco, e estimativas do volume da copa e diâmetro do tronco. A altura das plantas foi determinada por meio de régua graduada. O perímetro do tronco foi mensurado com fita métrica acima do ponto de enxertia, a uma altura de cerca de 20 cm do solo. O volume da copa (m^3) foi calculado usando a fórmula $V = \frac{2}{3} \pi r^2 h$, sendo V referente ao volume da copa, r ao raio da copa, e h à altura da copa (QUAGGIO et al., 2004). O raio da copa foi determinado medindo-se os diâmetros longitudinal e transversal da copa, utilizando-se régua graduada, e dividindo-se o valor médio por dois ($\text{Raio} = \text{Diâmetro}/2$). O diâmetro do tronco foi calculado utilizando-se a fórmula $D = \text{Pr}/\pi$, sendo D correspondente ao diâmetro do tronco e Pr ao perímetro do tronco (MATTOS Jr. et al., 2004).

Os tratos culturais do pomar foram feitos de acordo com as especificações técnicas da cultura.

Os dados obtidos durante a condução do experimento foram avaliados seguindo o delineamento em blocos casualizados e submetidos à análise de variância. No caso das análises químicas de solo, em duas profundidades, e da avaliação do sistema radicular, em quatro profundidades, os dados foram avaliados seguindo o delineamento de parcelas subdivididas e submetidos à análise de variância. Os dados referentes ao desenvolvimento do sistema radicular (massa seca, área, comprimento e densidades) foram transformados em $[\log(x+5)]$. As variáveis avaliadas foram relacionadas com as doses de cinza utilizadas e ajustadas a equações baseadas em análise de regressão. As comparações das médias entre profundidades nas análises químicas de solo e na avaliação do sistema radicular foram realizadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As variáveis referentes aos teores de nutrientes nas folhas foram submetidas à análise de correlação ($p < 0,10$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Atributos químicos do solo

4.1.1. Atributos químicos do solo (6 meses após aplicação da cinza)

A adição de cinza no solo influenciou significativamente os teores de potássio trocável (Tabela 3), cujos teores aumentaram linearmente em função das doses crescentes do resíduo, variando de 3,5 a 5,0 mmol_c dm⁻³ na camada de 0-10 cm de profundidade e de 2,5 a 3,6 mmol_c dm⁻³ naquela de 10-20 cm (Figura 2).

Tabela 3. Efeitos das doses de cinza nos atributos químicos do solo (seis meses após aplicação da cinza).

Tratamentos t ha ⁻¹	pH CaCl ₂	C org. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K -----mmol _c dm ⁻³ -----	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V (%)
0	5,5	7,6	52	3,0	31	11	20	44,2	64,1	68
5	5,4	7,0	44	3,3	29	9	20	41,7	62,0	67
10	5,4	7,0	46	3,4	28	10	21	40,8	62,2	65
20	5,5	7,4	48	3,6	30	10	20	43,6	63,1	69
40	5,5	7,3	51	4,3	29	10	19	43,9	62,8	70
F (Trat.)	0,51 ^{ns}	0,57 ^{ns}	1,35 ^{ns}	12,13 ^{**}	0,20 ^{ns}	1,21 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,31 ^{ns}
CV (%)	5,15	14,09	19,9	12,49	27,82	14,55	25,40	21,86	9,19	14,14
Profundidades										
0-10 cm	5,4 b	7,9 a	68 a	4,1 a	28 b	10	21	41,5	62,1	67
10-20 cm	5,5 a	6,6 b	29 b	2,9 b	31 a	10	19	44,2	63,5	69
F (Prof.)	6,10 [*]	35,85 ^{**}	249,32 ^{**}	226,91 ^{**}	6,51 [*]	0,79 ^{ns}	2,58 ^{ns}	2,71 ^{ns}	1,25 ^{ns}	3,01 ^{ns}
F (TratxProf)	0,24 ^{ns}	0,90 ^{ns}	1,86 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,75 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,96 ^{ns}	0,07 ^{ns}
CV (%)	2,62	10,59	18,05	7,71	16,42	14,44	14,08	13,50	7,11	7,68

^{ns} = não significativo; *, ** significativos (p<0,05) e (p<0,01), respectivamente. Médias seguidas por letras diferentes na coluna são diferentes (teste de Tukey, p<0,05).

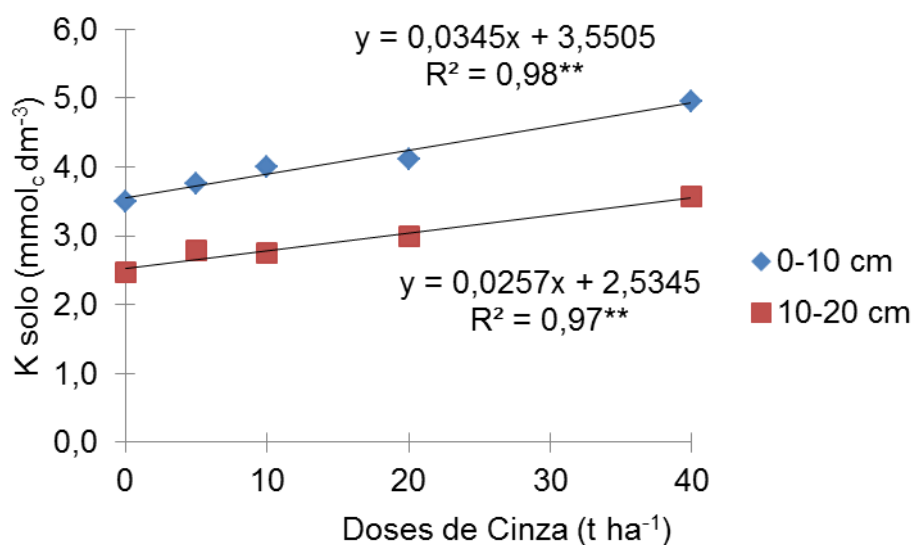


Figura 2. Efeitos das doses de cinza no teor de K no solo (camadas 0-10 cm e 10-20 cm). ** Significativo ($p < 0,01$).

O potássio é o nutriente presente em maior proporção na constituição da cinza da queima do bagaço de cana-de-açúcar (Tabela 1), sendo que as doses adicionadas do resíduo, correspondentes a 0; 5; 10; 20 e 40 $t\ ha^{-1}$, forneceram K_2O nas quantidades equivalentes de 0; 13,5; 27; 54 e 108 $kg\ ha^{-1}$, respectivamente. Adicionalmente, esse elemento apresenta alta solubilidade, como relatado em cinza de madeira (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001), fazendo com que a disponibilidade do K presente no resíduo seja praticamente igual à de fertilizantes potássicos (ERICH, 1991; OHNO, 1992). Esses fatores justificam os aumentos dos teores de K no solo com o incremento das doses aplicadas da cinza.

O maior teor de K trocável na camada de 0-10 cm (Tabela 3) deve-se ao fato de a cinza ter sido aplicada superficialmente, sem incorporação, concentrando-se principalmente na camada superficial. No entanto, o K apresenta mobilidade no solo (ERNANI et al., 2007; PARK et al., 2004; ULERY; GRAHAM; AMRHEIN, 1993). Isso fez com que a aplicação da cinza influenciasse também o teor de K trocável na camada de 10-20 cm (Figura 2), devido à movimentação vertical desse elemento no solo.

Darolt, Blanco Neto e Zambon (1993), ao avaliarem o efeito de doses de cinza vegetal (0,10, 15, 20 e 30 t ha⁻¹) nos atributos químicos de um solo argiloso e com alto teor de matéria orgânica cultivado com alface, verificaram que com a utilização de doses crescentes da cinza houve desbalanceamento entre cátions. De acordo com os autores, isso ocorreu principalmente em relação ao potássio, uma vez que por ser um dos principais constituintes da cinza, a elevação de seus teores foi acentuada, de maneira que grande quantidade ficou disponível na forma trocável no solo.

Augusto, Bakker e Meredieu (2008), revisando a literatura em relação a aplicação de cinza de madeira, também observaram que a disponibilidade do K no solo pode ser modificada no curto prazo, em decorrência da dissolução dos sais presentes nas cinzas. Nkana, Demeyer e Verloo (2002) concluíram que o aumento da concentração de K na solução do solo parece ser o efeito mais importante da aplicação da cinza de madeira em solos tropicais ácidos.

As plantas cítricas geralmente são cultivadas em regiões úmidas com elevado índice pluviométrico e solos com pH ácido e sujeitos a lixiviação de cátions (ASHKEVARI; ZADEH; MIRANSARI, 2010). Nessas condições, a deficiência de potássio é comum e o fornecimento desse elemento em quantidades adequadas é importante (ASHKEVARI; ZADEH; MIRANSARI, 2010). Em adição a isso, as plantas cítricas são exigentes em K. Esse elemento, juntamente com o N, são os nutrientes exportados em maiores quantidades pela colheita dos frutos (BATAGLIA et al., 1977; MATTOS Jr. et al., 2003).

A importância da adubação potássica assume maior destaque quando se cultiva laranja Valência, como no presente estudo. Os frutos dessa variedade exportam maiores quantidades de potássio em comparação a outras variedades precoces ou tardias (BATAGLIA et al., 1977). Isso faz com que a laranja Valência apresente demanda maior por K e, consequentemente, uma resposta mais destacada à fertilização potássica (QUAGGIO; MATTOS Jr; BOARETTO, 2011). Com base no aumento do teor disponível de K no solo proporcionado pela aplicação da cinza, constatado no presente experimento, verifica-se que esse resíduo apresenta relevância no manejo de nutrientes na citricultura.

As doses de cinza adicionadas ao solo não influenciaram significativamente os teores de carbono orgânico, P, Ca e Mg (Tabela 3). Em relação ao carbono orgânico, não foi influenciado pela aplicação da cinza, pois, provavelmente, devido à queima do bagaço de cana-de-açúcar, este se encontra em uma forma inorgânica na constituição da cinza, não sendo detectado pelo método utilizado. A ausência do efeito da aplicação da cinza nas concentrações de P, Ca e Mg pode ser atribuída principalmente a baixa quantidade desses elementos na sua constituição (Tabela 1), sendo que a adição desse resíduo ao solo possibilitou o fornecimento de até 48 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e Ca, e até 28 kg ha⁻¹ de Mg. Além disso, de acordo com os padrões de fertilidade para interpretação de resultados de análise de solo na camada arável para citros (QUAGGIO et al., 1997), os teores de P e Mg, assim como a saturação por bases no início do experimento já estavam em níveis altos.

No caso do fósforo, outro aspecto a ser considerado é o fato de que esse macronutriente apresenta baixa solubilidade, como relatado em cinza de madeira (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001), uma vez que está ligado a compostos pouco solúveis, como óxidos de Fe e Al (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008). As maiores concentrações desse elemento na camada de 0-10 cm (Tabela 3) deve-se principalmente a baixa mobilidade do P no solo, resultante da adsorção específica do nutriente, processo característico de solos tropicais, e ao fato de a cinza ter sido aplicada superficialmente, sem incorporação.

Em relação ao Ca e Mg, o não incremento dos teores desses elementos no solo com a aplicação da cinza está associado também ao deslocamento de parte desses cátions das cargas elétricas negativas do complexo coloidal pelo K adicionado. Isso pode ter ocorrido devido a quantidade de potássio veiculada pela cinza ser elevada em comparação à de Ca e Mg (Tabela 1). Efeitos similares foram relatados por Ernani et al. (2007), avaliando a mobilidade de cátions em diferentes tipos de solos ácidos (Cambissolo Húmico álico e Nitossolo Vermelho) em função do método de aplicação (superfície ou incorporado) e da dose de cloreto de potássio (0, 150 e 300 mg kg⁻¹). Os autores observaram aumento da percolação de Ca e Mg com aplicação de KCl, atribuindo esse efeito ao deslocamento desses elementos das cargas elétricas negativas pelo K adicionado, uma vez que este deve ter tido elevação de sua atividade na solução do solo. Esse efeito associado à mobilidade

do Ca no solo, como constatado com aplicação de cinza de madeira (PARK et al., 2004), contribuíram para maiores concentrações de Ca observadas na camada de 10-20 cm do solo no presente experimento (Tabela 3).

A ausência de efeitos nos teores de Ca e Mg trocáveis no solo em função da aplicação do resíduo levaram a efeitos não significativos na soma de base e saturação por bases (Tabela 3). O Ca e o Mg representam maior porcentagem de cátions retidos no complexo coloidal do solo em comparação ao K. Isso provavelmente fez com que o incremento somente do teor do K não ocasionasse efeitos pronunciados na SB e V%.

No presente estudo, não foi constatado efeito significativo da aplicação da cinza no pH do solo (Tabela 3). Isso ocorreu devido ao baixo valor de poder de neutralização (PN) desse resíduo (Tabela 1). A cinza é eficiente na correção do pH do solo, quando apresenta alto teor de Ca e Mg, na forma de óxidos ou carbonatos, como relatado em resíduo originado da queima de carvão (YUNUSA et al., 2006), o que não caracteriza a cinza utilizada no presente experimento, justificando a ausência de efeito observado no pH.

Adicionalmente, deve-se considerar que estudos têm demonstrado que, no caso da cinza de madeira, a reação com o solo ocorre de forma rápida, possibilitando incremento destacado do pH, porém, com baixo poder residual (MUSE; MITCHELL, 1995). Isso é em decorrência da elevada solubilidade dos elementos da cinza que conferem poder de neutralização à acidez do solo, como hidróxidos, óxidos e carbonatos de K e Na (ULERY; GRAHAM; AMRHEIN, 1993). O baixo poder residual da cinza também pode ter contribuído para a não detecção de efeitos da aplicação do resíduo no pH do solo, determinado seis meses após a implantação do experimento. Como os tratamentos não influenciaram o pH do solo, também não houve efeito na acidez potencial (H+Al) (Tabela 3).

Efeitos mais destacados nos atributos químicos do solo em decorrência da aplicação de cinzas foram observados por Ferreira, Fageria e Didonet (2012). Os autores avaliaram a influência da adição de cinzas em um Latossolo de textura argilosa cultivado sob sistema de produção orgânica, no qual o solo tem sido mantido com cobertura de leguminosa, seguido pelas culturas de arroz e feijão. Os tratamentos consistiram de diferentes fontes (cinza de bagaço de cana, e compostos

formados pela mistura das cinzas oriundas da queima do bagaço de cana e de subprodutos bovinos), e doses (0; 5; 15 e 30 t ha⁻¹) aplicadas no verão, anteriormente a instalação da cultura do arroz. Observou-se que o efeito dose foi mais evidente em comparação ao efeito fonte utilizada. A análise de solo na profundidade de 0-20 cm, efetuada cerca de 4 meses após a adição das cinzas, demonstrou que doses crescentes possibilitaram aumento do pH, da saturação de bases e dos teores de Mg, P e K, além de reduzir a acidez total do solo (H+Al). Esses resultados diferentes em comparação aos obtidos no presente estudo ocorreram principalmente em função da concentração mais elevada de nutrientes na composição das cinzas utilizadas por Ferreira, Fageria e Didonet (2012), possibilitando um efeito fertilizante mais pronunciado, além do pH alcalino dos resíduos, o que também proporcionou correção da acidez do solo.

Além de estudos relacionados à aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em solos agrícolas, que são relativamente escassos na literatura, observa-se maior quantidade de informações sobre cinza oriundas da combustão de outros materiais. Saarsalmi et al. (2012) estudaram os efeitos de doses de cinzas de madeira combinada com N nos atributos químicos da camada orgânica do solo ("Haplic podzol") cultivado com pinheiros, 30 anos após o estabelecimento dos tratamentos. A cinza apresentava em sua composição 1,8% de P₂O₅; 7,5% de K₂O e 28% de Ca. Os tratamentos consistiram da testemunha (sem adição de cinza e nitrogênio), aplicação do N isoladamente e a combinação de N com três doses de cinza de madeira (1; 2,5; e 5 t ha⁻¹), sendo que os tratamentos que receberam adubação nitrogenada, a dose correspondeu a 185 kg ha⁻¹ (ureia). Os autores observaram efeitos significativos mesmo após longo período de tempo decorrido da aplicação do resíduo, como o aumento do pH e redução da acidez trocável na camada orgânica no tratamento em que aplicou-se 5 t ha⁻¹ de cinza combinada com N. As concentrações de Ca, Mg e K trocáveis foram maiores nos tratamentos com adubação nitrogenada combinada com 2,5 ou 5 t ha⁻¹ de cinza em comparação ao controle e ao tratamento com aplicação de N isoladamente. Os tratamentos com doses de cinza em combinação com N possibilitaram aumento da disponibilidade de P.

Com o objetivo de avaliar os efeitos da aplicação de cinza de madeira nos atributos químicos do solo, Nkana, Demeyer e Verloo (1998) conduziram experimento em casa de vegetação com azevém, cultivado em vasos preenchidos com solos de textura argilosa e características ácidas. Os tratamentos foram constituídos de doses de cinza aplicadas e misturadas ao solo a fim de obter valores de pH correspondentes a 5,5; 6,0; e 6,5 e a testemunha (sem aplicação da cinza). A cinza atuou como corretivo da acidez do solo, reduzindo a toxicidade de Al e Mn e como fonte de nutrientes, sendo as plantas beneficiadas pelo fornecimento principalmente de Ca e K. Os efeitos da cinza como fertilizante ocorreu devido à concentração elevada desses nutrientes em sua composição (Ca=7,8%; K=1,6%), e a correção do pH foi possibilitada pelo alto poder de neutralização do resíduo (PN=27,3%) em comparação à cinza utilizada no presente experimento.

Em relação aos micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn) e ao S não foram verificados efeitos significativos das doses de cinza nos teores desses elementos no solo (Tabela 4), e a concentração de Al foi nula em todos os tratamentos.

Tabela 4. Efeitos das doses de cinza nos atributos químicos do solo (seis meses após aplicação da cinza).

Tratamentos t ha ⁻¹	B	Cu	Fe	Mn	Zn	S
	-----mg dm ⁻³ -----					
0	0,22	7,3	15	15,5	1,4	3
5	0,24	6,4	11	14,5	1,2	3
10	0,25	6,0	12	16,1	1,3	2
20	0,23	7,5	11	13,6	1,5	3
40	0,24	7,5	13	15,9	1,5	4
F (Trat.)	0,95 ^{ns}	2,23 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,83 ^{ns}	1,44 ^{ns}	0,82 ^{ns}
CV (%)	15,56	21,15	44,64	24,46	23,27	62,06
Profundidades						
0-10 cm	0,22 b	8,6 a	13	17,2 a	1,9 a	2 b
10-20 cm	0,25 a	5,3 b	12	13,1 b	0,9 b	4 a
F (Prof.)	9,80 ^{**}	228,57 ^{**}	1,38 ^{ns}	88,75 ^{**}	303,12 ^{**}	15,23 ^{**}
F (TratxProf)	0,51 ^{ns}	1,23 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,72 ^{ns}	1,23 ^{ns}
CV (%)	17,67	11,14	15,46	10,27	14,75	71,74

^{ns} = não significativo; ^{**} significativo (p<0,01). Médias seguidas por letras diferentes na coluna são diferentes (teste de Tukey, p<0,05).

Não foram observados efeitos da aplicação da cinza nos teores de micronutrientes e S no solo em decorrência dos baixos teores na constituição do

resíduo (Tabela 1). Apesar de o Fe estar presente em concentração significativa na cinza (Tabela 1), a ausência de influência da aplicação do resíduo no teor desse elemento no solo deve-se provavelmente à sua baixa solubilidade, assim como o Al, por ser componente estrutural da cinza (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001).

Um dos principais efeitos adversos que pode limitar a aplicação da cinza em solos agrícolas é a diminuição da disponibilidade de micronutrientes, em virtude do aumento do pH do solo (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998). Esse efeito pode ocorrer principalmente com aplicação de doses elevadas. No presente experimento, como não houve influência da aplicação da cinza no pH do solo, contribuiu para a ausência de efeitos na disponibilidade dos micronutrientes no solo.

A maior concentração de Cu, Mn e Zn na camada superficial (Tabela 4) deve-se a baixa mobilidade desses elementos no solo, enquanto a concentração mais elevada de B na camada de 10-20 cm (Tabela 4) é explicada pela sua alta mobilidade, uma vez que está no solo sob a forma de ácido bórico, que apresenta carga zero. O S também se concentrou na camada de 10-20 cm (Tabela 4), pois o sulfato é pouco retido em solos com predominância de cargas elétricas negativas, favorecendo perdas por lixiviação (RAIJ, 2011).

4.1.2. Atributos químicos do solo (12 meses após aplicação da cinza)

As doses de cinza não influenciaram, significativamente, as variáveis estudadas relacionadas aos atributos químicos do solo, 12 meses após a sua aplicação (pH, carbono orgânico, P, K, Ca, Mg, acidez potencial, soma de bases CTC e V%) (Tabela 5). Foram observadas diferenças apenas com relação às profundidades amostradas, em que valores e/ou teores mais elevados de carbono orgânico, P, acidez potencial e CTC foram observados na camada de 0-10 cm do solo (Tabela 5). Em contrapartida, valores e/ou teores mais altos de pH, K, Ca, Mg, soma de bases e V% foram verificados na camada de 10-20 cm (Tabela 5).

Tabela 5. Efeitos das doses de cinza nos atributos químicos do solo (doze meses após aplicação da cinza).

Tratamentos t ha ⁻¹	pH CaCl ₂	C org. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V (%)
					-----mmol _c dm ⁻³ -----					
0	5,2	7,6	67	4,7	24	9	27	37,3	64,2	57
5	5,1	7,5	68	5,0	21	7	26	33,8	59,8	57
10	5,1	7,6	64	5,0	21	7	28	32,9	60,5	54
20	5,1	7,3	67	5,2	22	7	26	34,4	60,5	56
40	5,1	7,7	60	5,3	20	8	26	33,1	59,1	56
F (Trat.)	0,13 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,61 ^{ns}	2,46 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,10 ^{ns}
CV (%)	6,58	12,74	20,56	9,86	45,34	32,26	21,87	35,76	12,44	22,99
Profundidades										
0-10 cm	4,9 b	8,2 a	91 a	4,6 b	19 b	7 b	31 a	30,8 b	62,3 a	49 b
10-20 cm	5,3 a	6,9 b	39 b	5,4 a	24 a	9 a	22 b	37,8 a	59,3 b	63 a
F (Prof.)	107,82**	215,73**	511,19**	45,46**	35,63**	24,25**	96,55**	55,94**	13,79**	98,1**
F (TratxProf)	0,69 ^{ns}	2,83 ^{ns}	1,41 ^{ns}	0,48 ^{ns}	1,20 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,43 ^{ns}	1,04 ^{ns}	2,90 ^{ns}	0,22 ^{ns}
CV (%)	2,45	4,30	12,45	7,85	11,23	19,24	13,46	9,53	4,71	9,15

^{ns} = não significativo; ** significativo (p<0,01). Médias seguidas por letras diferentes na coluna são diferentes (teste de Tukey, p<0,05).

Como discutido anteriormente, devido principalmente aos baixos teores da maioria dos nutrientes na composição da cinza, associado às boas condições de fertilidade do solo avaliado, a influência da aplicação desse resíduo nos atributos químicos do solo foi pouco destacada, como também constatado na primeira análise de solo.

Os efeitos da cinza, como fertilizante do solo, tende a diminuir no decorrer do tempo (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008), principalmente em relação ao K; em decorrência da sua alta mobilidade no solo (PARK et al., 2004; ERNANI et al., 2007). Isso contribuiu para a maior concentração de K verificada na camada de 10-20 cm, o que indica a movimentação desse elemento da camada superficial, onde tinha sido depositado em maior quantidade pela aplicação da cinza, para a camada subsuperficial, sugerindo potenciais perdas por lixiviação. Como a cinza foi caracterizada principalmente como fonte de potássio, esse comportamento do K no solo contribuiu para que os efeitos fossem ainda menos pronunciados, justificando a ausência da influência da adição da cinza em todos os atributos químicos estudados, doze meses após a implantação dos tratamentos.

Os teores de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn) e do S e Al não foram influenciados significativamente pelas doses de cinza aplicadas ao solo (Tabela 6). Foram observados teores maiores desses micronutrientes e do Al na camada superficial do solo (0-10 cm), enquanto os teores de enxofre foram mais elevados na camada de 10-20 cm (Tabela 6).

Tabela 6. Efeitos das doses de cinza nos atributos químicos do solo (doze meses após aplicação da cinza).

Tratamentos t ha ⁻¹	B	Cu	Fe	Mn	Zn	S	Al
	mg dm ⁻³						mmol _c dm ⁻³
0	0,36	7,2	23	18,4	3,1	5	0,6
5	0,35	6,9	17	17,4	3,2	4	0,2
10	0,38	7,0	19	20,0	3,4	4	0,6
20	0,36	8,1	19	16,0	3,6	4	0,2
40	0,37	7,6	19	18,0	3,4	5	0,2
F (Trat.)	0,44 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,88 ^{ns}	1,03 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,46 ^{ns}	1,57 ^{ns}
CV (%)	15,48	24,96	35,92	25,84	24,52	29,08	153,41
Profundidades							
0-10 cm	0,44 a	9,7 a	23 a	22,2 a	4,8 a	3 b	0,72 a
10-20 cm	0,29 b	5,0 b	16 b	13,7 b	1,9 b	6 a	0,00 b
F (Prof.)	46,83 ^{**}	434,98 ^{**}	108,1 ^{**}	243,61 ^{**}	932,61 ^{**}	40,12 ^{**}	17,05 ^{**}
F (TratxProf)	0,10 ^{ns}	1,72 ^{ns}	2,38 ^{ns}	1,18 ^{ns}	1,15 ^{ns}	0,17 ^{ns}	1,26 ^{ns}
CV (%)	21,19	10,84	13,12	10,73	10,23	37,55	171,23

^{ns} = não significativo; ^{**} significativo (p<0,01). Médias seguidas por letras diferentes na coluna são diferentes (teste de Tukey, p<0,05).

4.2. Estado nutricional das laranjeiras

4.2.1. Análise química de folhas

Houve efeito significativo das doses de cinza somente no teor de K nas folhas (Tabela 7). As concentrações de potássio nas folhas variaram conforme um modelo quadrático (Figura 3). A máxima concentração estimada de potássio, equivalente a 17,4g kg⁻¹, foi obtida na dose de cinza de 22,4 t ha⁻¹.

Tabela 7. Efeitos das doses de cinza nos teores de macronutrientes nas folhas.

Tratamentos t ha ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
0	26,5	1,5	14,7	37,0	3,3	2,5
5	27,0	1,5	16,1	34,0	3,0	2,5
10	27,1	1,6	16,6	34,4	3,1	2,6
20	26,4	1,5	17,2	32,9	3,1	2,5
40	27,0	1,5	15,9	34,9	3,2	2,6
F (Trat.)	0,59 ^{ns}	0,71 ^{ns}	17,98 ^{**}	2,07 ^{ns}	1,20 ^{ns}	0,79 ^{ns}
CV (%)	3,66	7,61	3,05	6,79	6,21	4,57

^{ns} = não significativo; ^{**} significativo (p<0,01).

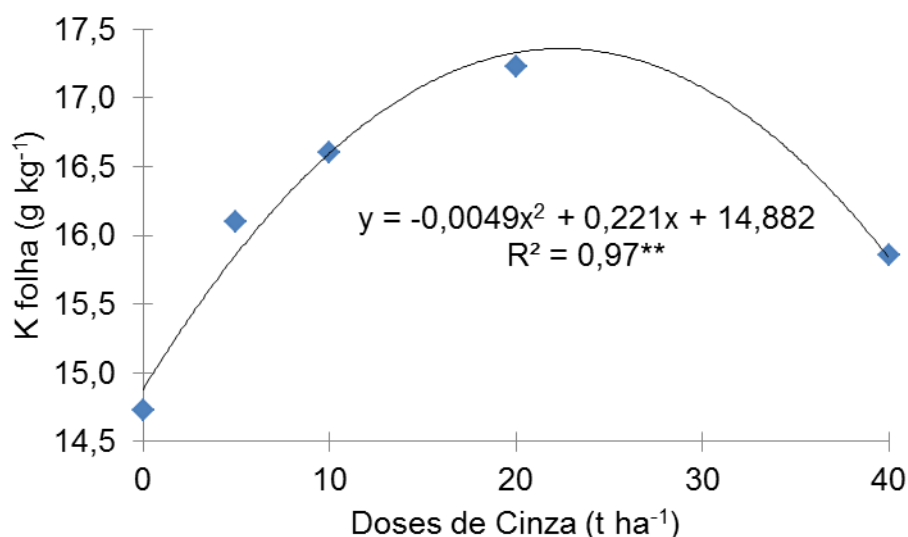


Figura 3. Efeitos das doses de cinza nos teores de K nas folhas.
^{**}Significativo(p<0,01).

Como o potássio é o elemento presente em maior concentração na cinza do bagaço de cana-de-açúcar (Tabela 1) e apresenta alta solubilidade, como relatado em cinza de madeira (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001), a aplicação do resíduo contribuiu para o fornecimento de quantidades significativas desse elemento, aumentando a sua disponibilidade no solo (Figura 2). Isso favoreceu a absorção do potássio, justificando a resposta nos teores foliares desse nutriente na planta em função das doses crescentes de cinza utilizadas (Figura 3).

No entanto, a dose aplicada de cinza, correspondente a 40 t ha^{-1} , ocasionou diminuição do teor foliar de potássio (Figura 3). De acordo com a tabela de recomendação de adubação para citros em formação, em função da idade das plantas e da análise do solo (QUAGGIO; MATTOS Jr.; CANTARELLA, 2005), a dose de cinza utilizada de 10 t ha^{-1} foi a que melhor atendeu a demanda de potássio pela planta. Quando se aplicou 40 t ha^{-1} do resíduo, foi fornecido mais do que o triplo da quantidade de K_2O demandada pelas laranjeiras, contribuindo para o decréscimo do teor de K nas folhas. As plantas apresentam capacidade limitada para absorção de nutrientes (MALAVOLTA, 2005), sendo que esse processo pode ter sido afetado em virtude de concentrações elevadas do K no solo (Tabelas 3 e 5). Deve-se também considerar que as plantas testemunhas apresentavam teores foliares de K dentro da faixa considerada como adequada por Quaggio, Mattos Jr. e Cantarella (2005), correspondente a $10\text{-}15 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 7), podendo ter contribuído para o decréscimo dos teores de K nas folhas, quando da adição da dose mais elevada do resíduo.

Além disso, doses altas da cinza podem ter favorecido o aumento da salinidade do solo. Elevação na condutividade elétrica em solo de textura franco-siltosa foi constatada por Park et al. (2012), em estudo com aplicação de cinza de madeira na concentração de 1%, inferindo aumento da concentração de sais solúveis. A salinidade pode diminuir o potencial osmótico da solução do solo, dificultando a absorção de água pelas plantas; além de possíveis problemas associados ao desequilíbrio nutricional ou toxicidade causada por determinados íons (MILLER; CURTIN, 2008). Portanto, esses potenciais efeitos adversos causados pelo aumento na concentração de sais solúveis no solo também podem ter levado à diminuição da absorção de potássio pelas laranjeiras com a aplicação da dose mais alta do resíduo.

Em relação à resposta da concentração do K nas folhas em função do fornecimento de potássio, Quaggio, Mattos Jr. e Boaretto (2011), ao avaliarem os efeitos de doses (0, 100, 200 e 300 kg ha^{-1} por ano de K_2O) e fontes (K_2SO_4 e KCl) na produção e qualidade de frutos de laranja 'Pêra' e 'Valência' enxertadas em limão Cravo, observaram que a concentração foliar de K, considerando-se média de 4 safras, aumentou de acordo com um modelo quadrático até 15 g kg^{-1} . Mattos Jr. et

al. (2004), estudando a resposta do tangor Murcott sobre limoeiro Cravo, inicialmente com 4 anos de idade, à adubação NPK, em Latossolo Vermelho Amarelo, verificaram que a fertilização potássica (30, 110, 190 e 270 kg ha⁻¹ por ano de K₂O) ocasionou incremento dos teores foliares desse elemento de forma linear até 14 g kg⁻¹, considerando-se a média de 6 safras. As respostas da concentração de K nas folhas em função da adubação potássica nesses estudos diferiram das obtidas no presente experimento, provavelmente devido as plantas estudadas por Quaggio, Mattos Jr. e Boaretto (2011) e Mattos Jr. et al. (2004) serem mais desenvolvidas, apresentando produção de frutos mais elevada e, conseqüentemente, maior demanda por K, além de os teores iniciais de K no solo e nas folhas terem sido mais baixos em comparação às condições do presente experimento.

Os teores foliares dos demais macronutrientes (N, P, Ca, Mg, e S) não foram influenciados significativamente pelos tratamentos (Tabela 7). Isso ocorreu principalmente em razão da baixa concentração desses nutrientes na cinza (Tabela 1), e no caso do P, Ca Mg e S devido também ao fato de o uso do resíduo não ter afetado a disponibilidade desses elementos no solo (Tabelas 3, 4, 5 e 6). Deve-se ainda considerar que os teores foliares desses nutrientes estavam adequados nas plantas testemunhas (Tabela 7), de acordo com Quaggio, Mattos Jr. e Cantarella (2005), contribuindo para a diminuição da superfície de resposta das plantas. É importante destacar que no caso do nitrogênio, a quantidade desse elemento na constituição das cinzas é baixa ou até mesmo nula, pois é perdido na forma de gases no processo de combustão da biomassa (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001). O baixo teor de N nas cinzas constitui em limitação ao uso na agricultura (BASU et al., 2009). Isso faz com que, geralmente, seja necessária a aplicação conjunta da cinza com fertilizantes nitrogenados para um manejo adequado da fertilidade do solo (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001).

No entanto, no presente estudo, com a aplicação da cinza, observou-se que os teores de Ca nas folhas foram inferiores a faixa de teor considerada adequada para a cultura dos citros (35-45 g kg⁻¹) (QUAGGIO; MATTOS Jr.; CANTARELLA, 2005) (Tabela 7). Os teores foliares dos citros são afetados por uma série de fatores: idade e posição das folhas nos ramos, variedade copa/porta-enxerto e interações

entre os nutrientes (SMITH, 1966). Como não foi verificado efeito da aplicação da cinza nos teores trocáveis de Ca no solo (Tabelas 3 e 5), a redução no teor de Ca foliar em função do uso da cinza pode ser atribuída a interações entre nutrientes. Observa-se que com o aumento das concentrações de K nas folhas houve decréscimo da concentração de Ca foliar (Figura 4).

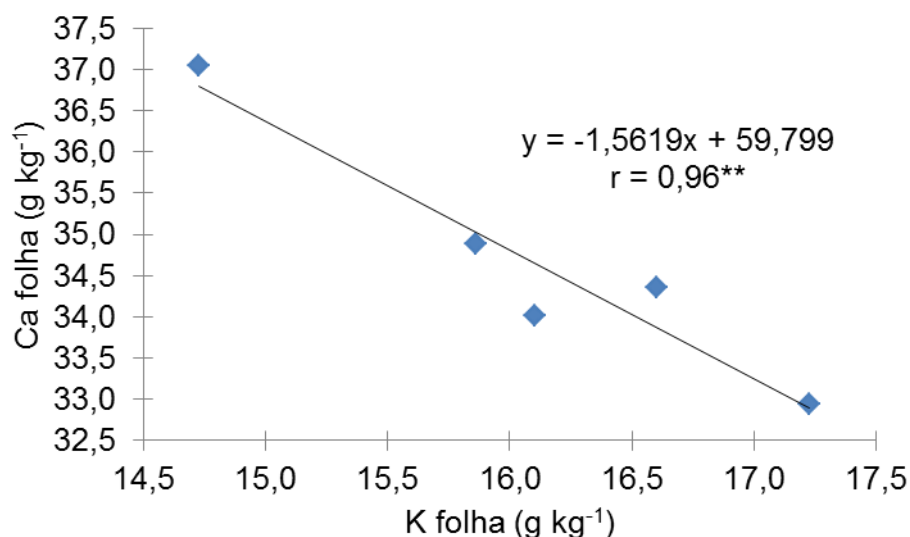


Figura 4. Efeito do teor foliar de potássio na concentração de cálcio nas folhas.
**Significativo ($p < 0,01$).

Elevada quantidade de potássio pode prejudicar a absorção de cálcio, caracterizando efeito de inibição competitiva (BERNARDI; CARMELLO; CARVALHO, 2000; MARQUES et al., 2011). Quaggio, Mattos Jr. e Boaretto (2011), em experimento com adubação potássica em laranjeiras 'Pêra' e 'Valência' em produção, enxertadas sobre limão Cravo, também observaram que o aumento do teor foliar de K foi acompanhado pelo decréscimo da concentração de Ca nas folhas. Os autores verificaram que os níveis de Ca foliar foram inferiores ao considerado como adequado para a cultura do citros, quando se aplicou doses elevadas de fertilizante potássico. Esse efeito foi atribuído ao equilíbrio de cátions trocáveis no solo, o qual é proporcional à razão de atividade do K em relação aos cátions divalentes na solução do solo, fazendo com que doses crescentes de fertilizante potássico ocasionassem incremento da atividade de K na solução do solo, prejudicando a absorção de Ca. Efeitos semelhantes do antagonismo iônico do K

com o Ca, em que os teores foliares de Ca foram reduzidos pelas doses de K também foram descritos em mudas de laranja Valência enxertada em limoeiro Cravo (BERNARDI; CARMELLO; CARVALHO, 2000) e em tangor Murcott, em produção, enxertado sobre limão Cravo (MATTOS Jr. et al., 2004).

Considerando-se estudos com cinza, os resultados obtidos no presente experimento corroboram com aqueles obtidos por Darolt, Blanco Neto e Zambon (1993), ao avaliarem o efeito de doses de cinza vegetal (0, 10, 15, 20 e 30 t ha⁻¹) incorporadas em solo argiloso e com alto teor de matéria orgânica, no estado nutricional da alfaca. Esses autores verificaram que houve tendência de redução da absorção do cálcio pela planta, conforme se aumentava as doses aplicadas do resíduo.

As plantas cítricas apresentam elevada demanda por Cálcio, sendo que, dentre os nutrientes, o conteúdo de Ca na árvore é o mais elevado, como verificado em laranja Hamlin, com 6 anos de idade (MATTOS Jr. et al., 2003). Portanto, o estado nutricional das laranjeiras deve ser monitorado quando da aplicação da cinza. O fornecimento de doses elevadas desse resíduo pode ocasionar problemas associados à desequilíbrios de nutrientes no solo, em virtude do fornecimento de grandes quantidades de potássio. Isso pode prejudicar o desenvolvimento da planta e a produção de frutos se aplicações constantes de cinza forem realizadas ao solo.

Em relação aos micronutrientes, o teor de boro nas folhas foi influenciado significativamente pela aplicação da cinza (Tabela 8). A concentração desse elemento respondeu às doses de cinza aplicadas ao solo de acordo com um modelo quadrático (Figura 5). O teor mínimo estimado de boro nas folhas (49,75 mg kg⁻¹) ocorreu com a adição da cinza na dose de 23,9 t ha⁻¹. Apesar do efeito das doses de cinza na concentração de B nas folhas, este não apresenta relevância no estado nutricional da planta, uma vez que a variação foi pequena, considerando-se que a faixa de teor de boro considerada como adequada nas folhas dos citros é ampla (80-160 mg kg⁻¹) (QUAGGIO; MATTOS Jr.; CANTARELLA, 2005).

Tabela 8. Efeitos das doses de cinza nos teores de micronutrientes nas folhas.

Tratamentos t ha ⁻¹	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----mg kg ⁻¹ -----				
0	57	7	78	54	14
5	56	7	88	51	25
10	51	6	87	56	13
20	50	6	98	47	14
40	53	6	93	55	14
F (Trat.)	3,62*	0,77 ^{ns}	1,24 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,32 ^{ns}
CV (%)	6,76	25,17	16,18	20,77	122,38

^{ns} = não significativo; * significativo (p<0,05).

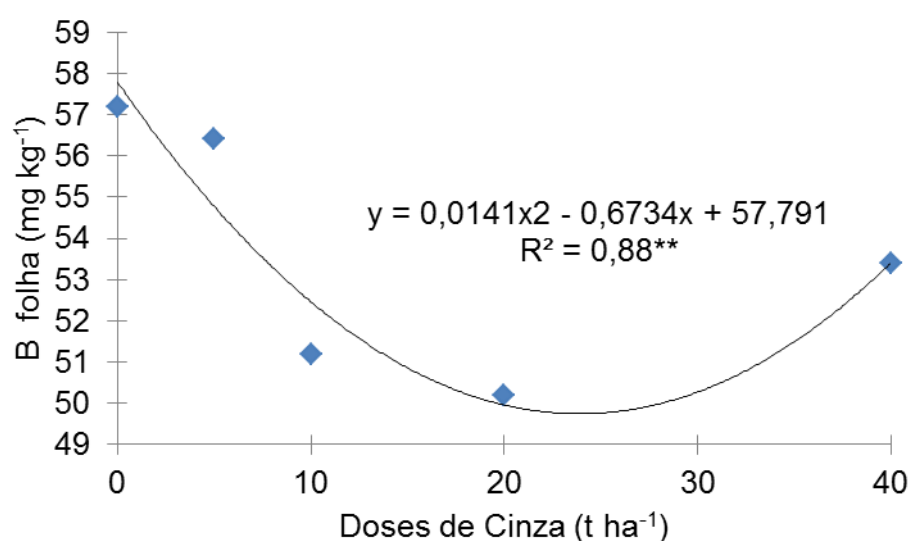


Figura 5. Efeitos das doses de cinza nos teores de B nas folhas. **Significativo (p<0,01).

Como a aplicação da cinza não influenciou os teores de boro no solo (Tabelas 4 e 6), o efeito observado das doses do resíduo nos teores foliares desse elemento nas laranjeiras pode ser devido a interações entre o B, e o K fornecido pela cinza e absorvido pelas plantas. Verifica-se que o aumento dos teores de K nas folhas foi acompanhado pela redução da concentração foliar de B (Figura 6).

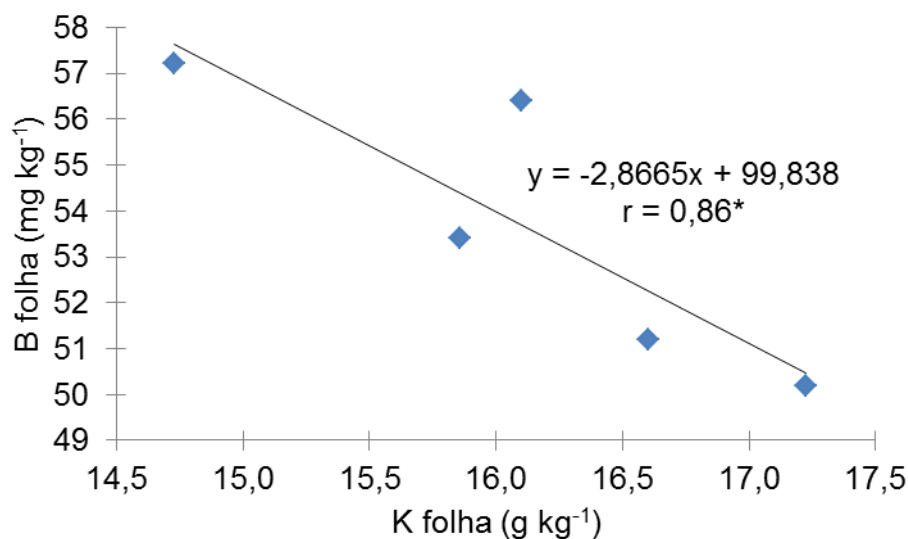


Figura 6. Efeito do teor foliar de potássio na concentração de boro nas folhas.
*Significativo ($p < 0,10$).

Quaggio, Mattos Jr. e Boaretto (2011), ao estudarem efeitos de doses de potássio e diferentes fontes em laranjeiras, também constataram que o aumento do teor de K nas folhas foi acompanhado por decréscimo nas concentrações foliares de B. Entretanto, os autores relataram que não se conhece o mecanismo específico ao nível da planta que explique tais resultados.

Os teores foliares dos demais micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) não foram influenciados significativamente pela aplicação da cinza (Tabela 8) em virtude da sua composição, que, de forma geral, apresentou baixos teores desses elementos (Tabela 1). Isso contribuiu para a ausência de influência da adição da cinza na disponibilidade dos micronutrientes no solo (Tabelas 4 e 6), não afetando também os teores nas folhas das laranjeiras.

Em experimento conduzido por Alva (1994) com mudas de tangerina Cleópatra e citrumelo Swingle em vaso (solo arenoso), avaliou-se os efeitos da aplicação de cinza de carvão, na dose equivalente de $4,48 \text{ t ha}^{-1}$, no estado nutricional das plantas. A cinza apresentava na sua composição, em porcentagem (base seca), principalmente Ca (15,3%), Fe (6,32%), K (3,34%), Mg (1,49%) e P (0,62%). Os autores observaram que a concentração de micronutrientes nas folhas foi pouco influenciada. Na tangerina Cleópatra houve incremento no teor de Ca nas

folhas e no citrumelo Swingle aumento nos teores de P, K e Mg em comparação à testemunha.

Park et al. (2012) estudaram efeitos da aplicação de dois tipos de cinza de madeira (cinza-escória ou cinza-volante), na concentração de 1% (base seca), no estado nutricional de 2 culturas (azevém e aveia) cultivadas em vasos preenchidos com solo de textura franco-siltosa. Os autores observaram aumento nas concentrações de K e Mo na biomassa da parte aérea das duas plantas em decorrência da aplicação das cinzas. A concentração de Zn no tecido de ambas as plantas aumentou apenas com a adição da cinza-volante; enquanto o teor de Mn diminuiu nos tecidos de aveia, quando aplicou-se cinza-escória, provavelmente devido ao incremento do pH do solo.

Nkana, Demeyer e Verloo (1998) compararam efeitos da cinza de madeira e do CaCO_3 aplicados em vasos preenchidos com solos de características ácidas e textura argilosa, cultivados com azevém. Os tratamentos foram estabelecidos com a aplicação de doses de cinza ou CaCO_3 , objetivando obter valores de pH correspondentes a 5,5; 6,0; e 6,5, e as testemunhas. As respostas das plantas foram mais destacadas com a utilização da cinza. Houve aumento da concentração de K e Ca nas plantas com aplicação das doses de cinza de madeira, em decorrência da predominância desses elementos na constituição desse resíduo (7,8% de Ca e 1,6% de K). Em contrapartida, os autores constataram decréscimo nos teores de Mn e Zn nas plantas, devido ao pH alcalino do solo proporcionado pela adição da cinza, reduzindo a solubilidade desses elementos.

4.2.2. Análise química de frutos

As doses de cinza estudadas não influenciaram significativamente os teores de macro e micronutrientes nos frutos (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9. Efeitos das doses de cinza nos teores de macronutrientes nos frutos.

Tratamentos t ha ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
0	15,1	1,8	11,5	6,4	1,3	0,9
5	14,8	1,8	12,9	6,0	1,3	1,0
10	15,1	1,9	11,9	6,2	1,3	0,8
20	14,3	1,8	12,0	6,2	1,3	1,0
40	14,7	1,8	11,9	6,2	1,3	1,0
F (Trat.)	1,06 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,17 ^{ns}	2,87 ^{ns}
CV (%)	4,84	3,90	10,23	7,27	5,83	8,66

^{ns} = não significativo.

Tabela 10. Efeitos das doses de cinza nos teores de micronutrientes nos frutos.

Tratamentos t ha ⁻¹	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹				
0	31	3	24	10	29
5	30	3	26	9	23
10	31	3	23	10	17
20	31	2	27	9	20
40	31	4	27	9	26
F (Trat.)	0,43 ^{ns}	1,54 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,29 ^{ns}
CV (%)	4,25	31,17	21,06	23,31	88,06

^{ns} = não significativo.

A ausência de influência da aplicação da cinza nos teores de nutrientes nos frutos deve-se a constituição desse resíduo, que de forma geral, apresentou concentrações baixas de nutrientes (Tabela 1). Em adição a isso, não foram observados efeitos das doses de cinza na disponibilidade de macro e micronutrientes no solo, com exceção do K (Tabelas 3, 4, 5 e 6). Esses fatores contribuíram para minimização dos efeitos da aplicação do resíduo na absorção dos nutrientes pela planta e, posterior, translocação para os frutos.

Apesar de a aplicação de cinza ter promovido o incremento do K tanto nos teores trocáveis no solo (Figura 2), como também nas concentrações foliares das laranjeiras (Figura 3), a ausência de efeito na concentração desse elemento nos frutos deve-se possivelmente ao fato de as plantas testemunhas apresentarem concentrações adequadas de potássio nas folhas, de acordo com Quaggio, Mattos Jr. e Cantarella (2005). Isso indica um bom estado nutricional da planta em relação à

nutrição potássica, podendo ter contribuído para a redução da superfície de resposta dos teores desse elemento nos frutos em função da aplicação da cinza.

Adicionalmente, o transporte do potássio, provavelmente, deu-se principalmente às folhas após a absorção pelas raízes. Mattos Jr. et al. (2003) observaram que as concentrações de nutrientes em laranjeira são geralmente mais elevadas nas folhas em comparação aos outros componentes da biomassa da parte aérea da planta. Os autores atribuíram esse aspecto ao fato de os nutrientes absorvidos no sistema radicular serem transportados principalmente às folhas, sítio em que ocorrem importantes reações bioquímicas, como o processo fotossintético.

Ao longo do tempo, com o desenvolvimento dos frutos, pelo fato de o K ser altamente móvel na planta (MALAVOLTA, 2005), e os frutos serem importante drenos desse elemento (MATTOS Jr. et al., 2003), talvez ocorra efeito mais pronunciado da aplicação da cinza no estado nutricional dos frutos. No entanto, o K é mobilizado das reservas das folhas para os frutos, a fim de atender suas necessidades nutricionais, principalmente em condições de deficiência de K (MALAVOLTA, 2005), o que não caracteriza as condições do presente experimento.

Como a cinza atuou como fonte principalmente de potássio, um importante fator a ser monitorado é a alteração na composição mineral do fruto em decorrência de possíveis desbalanços nutricionais na planta, tal como verificado na análise química de folhas, principalmente quando da utilização de doses altas da cinza.

No presente experimento, não foram observados efeitos adversos na nutrição mineral dos frutos em virtude da adição de potássio fornecido pela cinza, mesmo com a utilização de doses elevadas. No entanto, Nava e Dechen (2009), avaliando os efeitos de adubações potássica anuais em longo prazo (8 anos) na composição mineral da maçã 'Fuji' enxertada em Marubakaido, constataram redução da concentração de cálcio nos frutos em função do fornecimento de potássio.

4.3. Determinações realizadas nas amostras de folhas

Ocorreu efeito significativo das doses de cinza na área foliar e massa específica das folhas (Tabela 11). O modelo quadrático ajustou-se à variação da

área foliar em função das quantidades de cinza aplicadas (Figura 7). A área foliar máxima estimada ($28,11 \text{ cm}^2$) foi obtida com a dose de $23,29 \text{ t ha}^{-1}$. Em relação à massa específica de folhas, a resposta à adição da cinza também foi de acordo com o modelo quadrático (Figura 8). O valor mínimo estimado dessa variável ($12,15 \text{ mg cm}^{-2}$) ocorreu com a dose de cinza correspondente à 20 t ha^{-1} . Não foram observados efeitos do uso do resíduo na massa fresca e massa seca das folhas (Tabela 11).

Tabela 11. Efeitos das doses de cinza nas determinações realizadas nas amostras de folhas.

Tratamentos t ha^{-1}	Massa Fresca g	Massa Seca g	Área Foliar cm^2	Massa Específica mg cm^{-2}
0	0,848	0,312	25,10	12,44
5	0,913	0,333	26,32	12,65
10	0,949	0,344	28,13	12,22
20	0,922	0,331	27,43	12,06
40	0,925	0,337	26,81	12,56
F (Trat.)	2,22 ^{ns}	1,80 ^{ns}	3,15*	4,09*
CV (%)	6,25	5,89	5,40	2,14

^{ns} = não significativo; * significativo ($p < 0,05$).

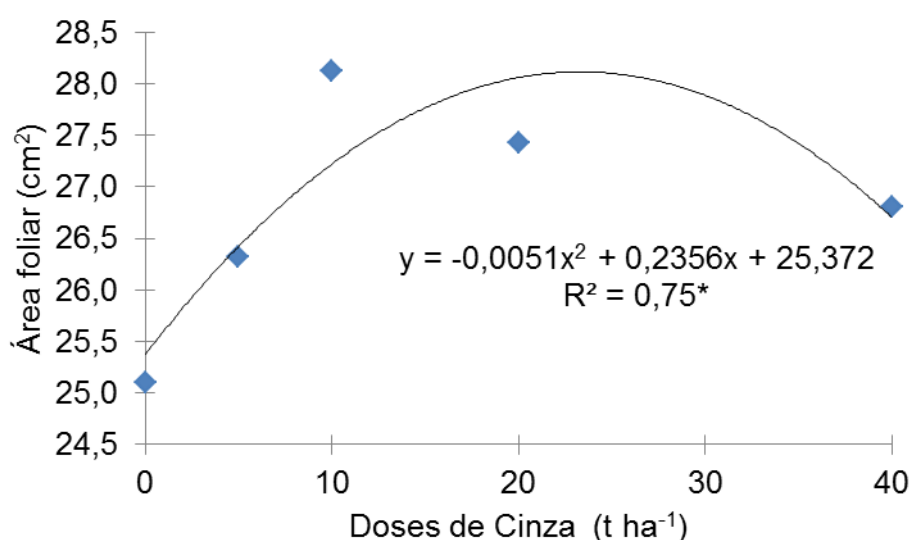


Figura 7. Efeito das doses de cinza na área foliar. *Significativo ($p < 0,05$).

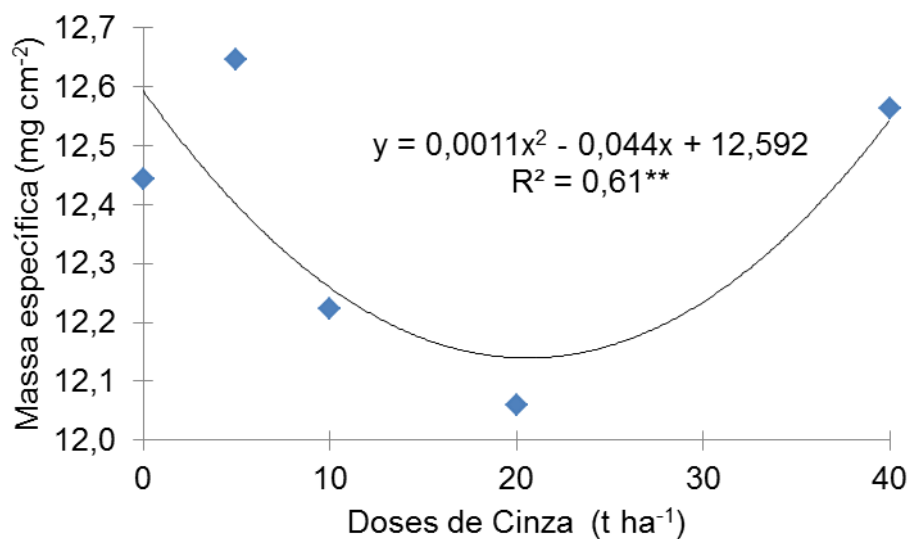


Figura 8. Efeito das doses de cinza na massa específica de folhas. ****Significativo** ($p < 0,01$).

O aumento da área foliar até a dose de $23,29\ t\ ha^{-1}$ e posterior declínio do valor dessa variável de estudo, provavelmente está associado à variação dos teores de potássio nas folhas, em função dos tratamentos (Figura 3). Aumentos dos teores de potássio nas folhas levaram ao incremento da área foliar (Figura 9).

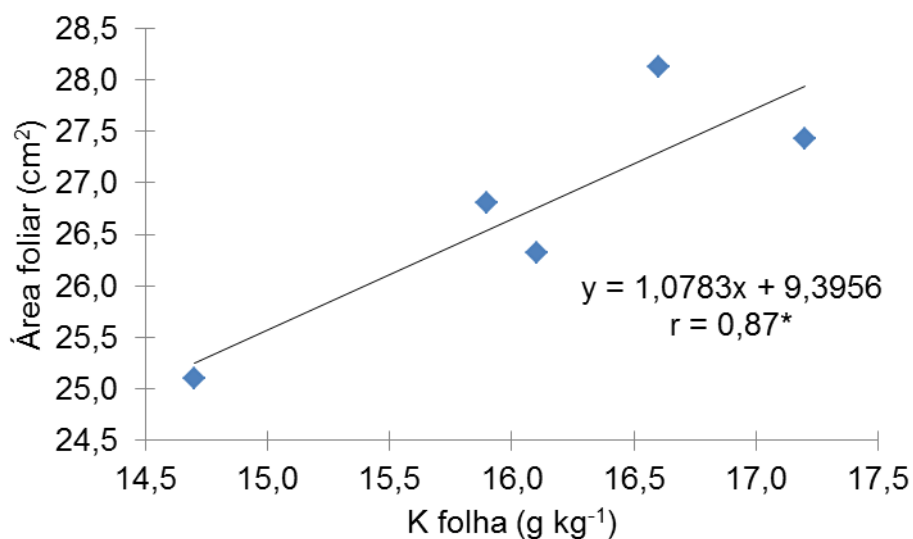


Figura 9. Efeito do teor foliar de potássio na área foliar. ***Significativo** ($p < 0,10$).

Esse efeito pode ser atribuído às funções do potássio na planta. A expansão das folhas é promovida principalmente pelo N e K, por meio do aumento da divisão celular e do volume das células das folhas (ROMHELD; KIRKBY, 2010). O K é fundamental nesse processo, pois, possibilita a manutenção de turgor adequado (ROMHELD; KIRKBY, 2010).

O papel do potássio no desenvolvimento das folhas é importante, uma vez que um dos principais fatores determinantes do crescimento das plantas e da obtenção de elevados índices de produtividade é o processo de expansão rápido das folhas na primavera, aumentando a eficiência de assimilação de CO₂ e sua conversão em açúcar e matéria seca no processo de fotossíntese (ROMHELD; KIRKBY, 2010).

Moorby e Besford (1983) também verificaram relações positivas entre o crescimento das folhas e o suprimento de K. Ashraf et al. (2010) relataram que em pomar de citros deficiente em potássio, as plantas apresentaram menor taxa de crescimento e tamanho das folhas reduzido, evidenciando a relação do potássio com o desenvolvimento foliar.

4.4. Análise química de metais pesados (Cr, Ni, As)

4.4.1. Solo

As doses de cinza não afetaram significativamente os teores de Cr, Ni e As no solo (Tabela 12). Os teores desses elementos no solo também não diferiram entre as profundidades estudadas (Tabela 12).

Tabela 12. Efeitos das doses de cinza nos teores de metais pesados no solo.

Tratamentos t ha ⁻¹	Cr	Ni	As
	-----mg kg ⁻¹ -----		
0	146,18	25,27	11,18
5	142,57	30,74	12,29
10	132,00	25,00	10,62
20	157,01	28,09	12,05
40	153,73	27,34	11,49
F (Trat.)	0,66 ^{ns}	1,01 ^{ns}	0,70 ^{ns}
CV (%)	26,25	26,93	22,05
Profundidades			
0-10 cm	139,02	24,42	11,26
10-20 cm	153,58	30,16	11,80
F (Prof)	1,51 ^{ns}	3,62 ^{ns}	0,56 ^{ns}
F (TratxProf)	0,33 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,67 ^{ns}
CV (%)	28,66	39,11	22,10

^{ns} = não significativo.

Uma das principais preocupações associadas ao uso de cinzas na agricultura refere-se à presença de metais pesados em sua composição (AUGUSTO et al., 2008; BASU et al., 2009; PANDEY; SINGH, 2010; SINGH; SHARMA; AGRAWAL, 2008; YUNUSA et al., 2006), podendo afetar a qualidade do solo (GUPTA et al., 2007; PANDEY; SINGH, 2010) e prejudicar o desenvolvimento de plantas (PANDEY et al., 2009; SINGH; SHARMA; AGRAWAL, 2008).

O risco de ocorrência de efeitos adversos ao meio ambiente devido à adição de cinzas é associado principalmente à concentração de metais pesados nesse resíduo, aos teores presentes no solo anteriormente à aplicação da cinza, e à mobilidade desses elementos no solo (YUNUSA et al., 2006). Estudos com cinza apontam que desde que seja aplicada em quantidades adequadas, não ocorrem

problemas de contaminação ambiental (BASU et al., 2009; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001).

No presente estudo, a baixa concentração de Cr, Ni e As na cinza do bagaço de cana-de-açúcar (Tabela 2), contribuiu para a ausência de influência significativa das doses da cinza nos teores de metais pesados no solo. Contudo, a concentração de metais pesados na cinza pode não ter associação com o potencial de impacto ambiental que estes podem causar (IZQUIERDO; QUEROL, 2012). Por isso que determinar o potencial de contaminação ambiental analisando-se somente a concentração dos elementos constituintes da cinza não é adequado, podendo gerar estimativas não confiáveis dos níveis de riscos decorrentes da aplicação do resíduo, limitando a sua utilização (IZQUIERDO; QUEROL, 2012). Essas informações justificam a importância de estudos relacionados à caracterização e avaliação da mobilidade e disponibilidade, no solo, dos metais pesados presentes nas cinzas.

A mobilidade e disponibilidade da maior parte dos elementos presentes na cinza são dependentes principalmente do pH do meio (IZQUIERDO; QUEROL, 2012). O As apresenta elevada solubilidade quando o pH encontra-se na faixa de 7-11 (IZQUIERDO; QUEROL, 2012). Em relação ao Cr, sua solubilidade é baixa em pH próximo a neutralidade, e no caso do Ni, apresenta alta mobilidade no solo na faixa de pH de 4-6 (IZQUIERDO; QUEROL, 2012). Os valores de pH do solo nos tratamentos do presente experimento (Tabelas 3 e 5) não favoreceram a disponibilidade do As e do Cr, enquanto o Ni pode ter sido perdido por lixiviação, em virtude de sua elevada mobilidade nas condições do presente estudo, contribuindo para a ausência de efeitos das doses crescentes de cinza aplicadas nos teores dos metais estudados no solo.

Augusto, Bakker e Meredieu (2008) constataram que a aplicação de cinza de madeira, em ecossistemas florestais, geralmente não ocasiona o aumento de metais pesados na composição da solução do solo. Isso ocorre devido ao fato de a maioria desses elementos terem sua solubilidade reduzida em virtude principalmente do incremento do pH proporcionado pela cinza.

Shende, Juwarkar e Dara (1994) constataram esse efeito ao avaliarem a cinza de carvão como possível agente redutor da toxicidade de solos contaminados por metais pesados. Os autores estabeleceram o experimento semeando milho em

solo franco arenoso ácido ($\text{pH} = 4.9$), tratado com quantidades definidas de Cd, Cu, Ni e Zn, em que diferentes concentrações de cinza (0%, 2%, 5%, 10%, 15% e 20%, em base seca) foram aplicadas e misturadas ao solo. Os autores constataram que a adição de quantidades crescentes de cinza proporcionou aumento da taxa de germinação e crescimento das plantas de milho. O maior desenvolvimento das plantas foi atribuído principalmente ao aumento do pH do solo, fazendo com que ocorresse a redução da solubilidade de metais pesados e menor disponibilidade às plantas. Isso favoreceu a diminuição da absorção dos metais e a minimização da toxicidade ao milho.

Apesar de as cinzas geralmente conterem metais pesados, Pandey e Singh (2010) observaram que a cinza de carvão, em função principalmente de suas propriedades alcalinas e características físicas, pode ser considerada como um corretivo de solos contaminados com metais pesados, pois, atua na imobilização destes, por meio de processos de adsorção, complexação e precipitação, diminuindo a mobilidade e disponibilidade desses elementos no solo.

4.4.2. Folhas

Não foram verificadas diferenças significativas nos teores de Ni e As nas folhas das laranjeiras em função da aplicação de doses crescentes da cinza (Tabela 13). A concentração de Cr nas folhas foi menor do que o limite de quantificação da análise.

Tabela 13. Efeitos das doses de cinza nos teores de metais pesados nas folhas.

Tratamentos t ha^{-1}	Cr	Ni ----- $\mu\text{g kg}^{-1}$ -----	As
0	<LQ	791,36	235,87
5	<LQ	161,97	206,37
10	<LQ	140,01	180,20
20	<LQ	117,83	100,71
40	<LQ	133,24	110,33
F (Trat.)		2,12 ^{ns}	2,49 ^{ns}
CV (%)		166,86	50,43

^{ns} = não significativo; <LQ = menor do que o limite de quantificação.

A absorção de metais pesados pelas plantas é dependente de uma série de fatores, tais como quantidade de cinza aplicada ao solo, concentração de metais na cinza, o tipo de solo e seu pH, assim como as características de cada espécie de planta, dentre outros (SHARMA; KALRA, 2006). No presente estudo, as doses aplicadas do resíduo, em função principalmente da baixa concentração de metais pesados na sua constituição (Tabela 2), e do pH do meio, não afetaram os teores de Cr, Ni e As no solo (Tabela 12), contribuindo para a ausência de influência na absorção desses elementos pelas plantas. Isso justifica a obtenção de efeitos não significativos na concentração dos metais estudados nas folhas das laranjeiras com a aplicação de doses crescentes de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (Tabela 13).

Adicionalmente, a translocação de metais pesados da raiz para a parte aérea depende do tipo de elemento. Singh, Sharma e Agrawal (2008), estudando os efeitos da incorporação de cinza de carvão ao solo no acúmulo de metais pesados em plantas de beterraba, constataram quantidades mais elevadas de Ni, Pb e Cr no sistema radicular das plantas. O acúmulo de metais pesados pode ocorrer principalmente na raiz devido à formação de complexos com grupos “sulfidril”, diminuindo o transporte desses elementos para a parte aérea (SINGH et al., 2004). Isso também pode ter contribuído para a não verificação de efeitos das doses crescentes aplicadas de cinza na concentração foliar de Cr, Ni e As nas laranjeiras, no presente experimento.

Alva (1994) avaliou os efeitos da aplicação de cinza de carvão, na dose equivalente de $4,48 \text{ t ha}^{-1}$, na concentração de metais pesados (Cd, Cr, Ni e Pb) em mudas de tangerina Cleópatra e citrumelo Swingle cultivadas em vasos preenchidos com solo arenoso. A cinza apresentava em sua composição: 115 mg kg^{-1} de Cr, 82 mg kg^{-1} de Pb, 56 mg kg^{-1} de Ni e 20 mg kg^{-1} de Cd. Não foram observados incrementos das concentrações de metais pesados nas folhas das plantas.

Resultados diferentes foram obtidos por Pandey et al. (2009), estudando a influência da aplicação da cinza de carvão no desenvolvimento de guandu e na translocação e acúmulo dos metais pesados na planta. As sementes de guandu foram semeadas em vasos preenchidos com solo tratado com diferentes concentrações da cinza (peso/peso): 0% (controle), 25%, 50%, e 100%. Os autores verificaram que o acúmulo e translocação de metais pesados analisados (Fe, Zn,

Cu, Cr e Cd) foram dependentes da concentração de cinza aplicada. Os teores de metais nas raízes, parte aérea e sementes foram mais elevados nos tratamentos com maior concentração de cinza (100 e 50%) em comparação ao controle. Os autores concluíram que a utilização de dose moderada (25%) favoreceu o desenvolvimento e a produtividade das plantas, além de manter as concentrações de metais pesados na planta dentro de níveis aceitáveis.

Singh, Sharma e Agrawal (2008) também observaram efeitos adversos da aplicação de cinza nas concentrações de metais pesados em beterraba. Os autores conduziram estudo objetivando avaliar os efeitos da incorporação de concentrações de cinza de carvão ao solo (0%, 5%, 10%, 15% e 20%) no acúmulo de metais pesados na planta. Foi verificado que a concentração de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr e Cd nas raízes e na parte aérea aumentou linearmente com aplicação de doses crescentes do resíduo.

4.4.3. Frutos

Os teores de Cr, Ni e As nos frutos foram menores do que os limites de quantificação, não sendo detectados na análise.

Uma das principais preocupações relacionadas ao uso de cinza no meio agrícola é em relação à segurança alimentar e a possibilidade de contaminação do produto a ser colhido por metais pesados presentes na cinza (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; PANDEY; SINGH, 2010; YUNUSA et al., 2006). Como não houve efeito das doses de cinza nos teores dos metais estudados no solo (Tabela 12) e nas folhas (Tabela 13), justifica-se o fato de a concentração desses elementos nos frutos também não ter sido influenciada pela aplicação de quantidades crescentes da cinza. Isso indica que os frutos podem ser consumidos de forma segura.

4.5. Determinação da emissão de CO₂ do solo (período úmido e seco)

As doses de cinza não influenciaram significativamente a emissão de CO₂ do solo, a temperatura e a umidade do solo, tanto na época úmida (verão), como na época seca (inverno) (Tabelas 14 e 15).

Tabela 14. Efeitos das doses de cinza na emissão de CO₂ do solo, na temperatura e umidade do solo (época úmida: verão).

Tratamentos t ha ⁻¹	Fluxo CO ₂ μmol m ⁻² s ⁻¹	Temperatura °C	Umidade %
0	2,01	24,51	12,28
5	2,08	24,43	12,18
10	2,13	24,43	12,39
20	2,14	24,27	12,49
40	2,26	24,45	13,51
F (Trat.)	0,60 ^{ns}	0,57 ^{ns}	1,36 ^{ns}
CV (%)	12,62	1,11	8,22

^{ns} = não significativo.

Tabela 15. Efeitos das doses de cinza na emissão de CO₂ do solo, na temperatura e umidade do solo (época seca: inverno).

Tratamentos t ha ⁻¹	Fluxo CO ₂ μmol m ⁻² s ⁻¹	Temperatura °C	Umidade %
0	1,10	23,18	3,45
5	1,13	23,64	3,43
10	1,15	23,61	3,53
20	1,14	24,07	3,50
40	1,20	23,21	3,85
F (Trat.)	0,62 ^{ns}	0,65 ^{ns}	1,04 ^{ns}
CV (%)	9,30	4,29	10,63

^{ns} = não significativo.

O CO₂ emitido do solo é produzido principalmente pela respiração das raízes das plantas e atividade de microrganismos na decomposição da matéria orgânica, sendo dependente também do transporte do gás do interior do solo até a sua superfície (PANOSSO et al., 2008). Como no presente experimento os pontos selecionados para avaliação da respiração do solo eram desprovidos de vegetação, a emissão de CO₂ deveu-se principalmente à atividade dos microrganismos.

A ausência de influência da aplicação da cinza na emissão de CO₂ tanto na época úmida, como na época seca pode ser atribuída aos efeitos pouco pronunciados nos atributos químicos do solo proporcionados pela adição do resíduo (Tabelas 3, 4, 5, 6 e 12). A emissão de CO₂ do solo tem sido relacionada aos atributos químicos do solo (LA SCALA Jr. et al, 2000; MARCELO; CORÁ; LA SCALA

Jr., 2012), os quais podem ser modificados pelo manejo do solo, resultando em alterações na atividade de microrganismos e consequentemente, na dinâmica de emissão de dióxido de carbono do solo (PATI; SAHU, 2004). Entretanto, como no presente estudo somente os teores de potássio foram influenciados pelas doses utilizadas do resíduo, pode ter contribuído para que tanto a biomassa microbiana como a atividade respiratória dos microrganismos não fossem afetadas, fazendo com que a emissão de CO₂ do solo não fosse influenciada pelo uso da cinza.

Outro fator importante a ser considerado é que o Carbono presente na cinza deve, possivelmente, estar em uma forma inorgânica. Isso pode ser inferido por meio das análises químicas de solo realizadas, em que não foram detectados aumentos do teor de Carbono orgânico com aplicação de doses crescentes da cinza (Tabelas 3 e 5).

O conteúdo de carbono no solo influencia a emissão de CO₂ em solos tropicais. La Scala Jr. et al. (2000) verificaram que a quantidade de CO₂ emitida pelo solo aumenta com o incremento do conteúdo de carbono no solo, atribuindo ao fato desse elemento ser utilizado pelas bactérias no processo de decomposição. Contudo, no presente experimento, a forma inorgânica do carbono presente na cinza, provavelmente inviabilizou a sua utilização pelos microrganismos do solo, fazendo com que este ficasse “sequestrado” no solo.

Resultados diferentes foram obtidos por Marcelo, Corá e La Scala Junior (2012), avaliando o efeito de doses de calcário (0; 0,9; 1,8; 2,7 e 3,6 t ha⁻¹) nas emissões de CO₂ do solo, em sistema de plantio direto, dois anos após a calagem. Os autores verificaram incremento linear da emissão de dióxido de carbono em função do aumento de doses do calcário, atribuindo como uma das possíveis causas desse efeito, o incremento da atividade de microrganismos no solo, em decorrência da melhoria nos atributos químicos do solo proporcionada pela calagem. Foram observadas correlações positivas da emissão de CO₂ com os teores de Ca⁺², Mg⁺², P, valores de pH e saturação de bases.

Em relação a estudos com cinza, Pati e Sahu (2004) avaliaram, sob condições controladas em laboratório, a emissão do CO₂ em solo franco arenoso tratado com cinza de carvão, na presença e ausência de minhocas. Foram utilizadas sete concentrações de cinza no solo (0; 2,5; 5; 10; 15; 25; 50% peso/peso). Os

autores verificaram diminuição das taxas de respiração do solo com aplicação de doses elevadas de cinza (>5%), independentemente da presença ou ausência de minhocas. Esse efeito pode ser associado às alterações ocasionadas nos atributos químicos do solo, como o aumento do pH, condutividade elétrica e concentração de metais pesados, além da redução do carbono orgânico e nitrogênio, que provavelmente afetaram a atividade dos microrganismos no solo. Em contrapartida, a aplicação da cinza em concentrações de até 5% em solo com presença de minhocas levou ao aumento da taxa de respiração do solo. Os autores atribuíram esse efeito ao pH favorável, à ausência de efeitos no conteúdo de carbono orgânico do solo e à concentração adequada de nutrientes, favorecendo as funções fisiológicas das minhocas e eventuais microrganismos.

Além dos efeitos pouco pronunciados da aplicação da cinza nos atributos químicos do solo, que contribuíram para a ausência da influência na respiração do solo no presente experimento, também deve-se considerar que não foram observadas diferenças significativas na umidade e temperatura do solo nos diferentes tratamentos (Tabelas 14 e 15). Essas variáveis são importantes na determinação da atividade dos microrganismos, além de poderem afetar o transporte do gás do interior do solo até a sua superfície, influenciando a emissão de CO₂. Panosso et al. (2008) constataram a importância dessas variáveis no processo de respiração do solo, tendo obtido correlação linear negativa da emissão de CO₂ com a umidade do solo, e positiva com a sua temperatura, em um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar, em sistema de manejo de cana queimada. Portanto, a ausência de influência dos tratamentos na umidade e temperatura do solo pode ter contribuído para a minimização dos efeitos da aplicação da cinza na atividade de microrganismos e na difusão dos gases do solo para a atmosfera, e, conseqüentemente, na emissão de CO₂. Considerando-se o aspecto ambiental, os resultados referentes à respiração do solo, obtidos no presente experimento, sugerem a viabilidade de disposição da cinza em solos agrícolas, sem que favoreça o aquecimento global.

4.6. Avaliação de trocas gasosas nas folhas das laranjeiras

4.6.1. Período seco (inverno)

As doses de cinza influenciaram significativamente a taxa de transpiração das laranjeiras (Tabela 16). Os valores dessa variável aumentaram linearmente com o incremento das quantidades de cinza aplicadas ao solo (Figura 10). Na análise de regressão polinomial, observou-se que as variações da fotossíntese e da condutância estomática, em função das doses de cinza, também apresentaram adequações a modelos lineares positivos (Figuras 11 e 12).

Tabela 16. Efeitos das doses de cinza nas variáveis de trocas gasosas nas folhas da laranjeira e na umidade do solo (período seco: inverno).

Tratamentos	Fotossíntese	Condutância	Transpiração	Umidade (0-10 cm)	Umidade (10-20 cm)	Umidade (20-40 cm)
t ha ⁻¹	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	g cm ⁻³	g cm ⁻³	g cm ⁻³
0	3,39	0,05	1,12	7,92	10,19	13,18
5	3,63	0,05	1,15	8,22	9,94	12,04
10	3,79	0,06	1,24	8,76	11,28	13,02
20	4,62	0,07	1,42	9,13	11,46	13,45
40	5,32	0,08	1,56	9,10	13,31	15,47
F (Trat.)	2,89 ^{ns}	2,49 ^{ns}	3,21*	1,75 ^{ns}	5,20**	1,80 ^{ns}
CV (%)	25,46	23,89	18,15	10,52	11,61	15,57

^{ns} = não significativo; *, ** significativos (p<0,05) e (p<0,01), respectivamente.

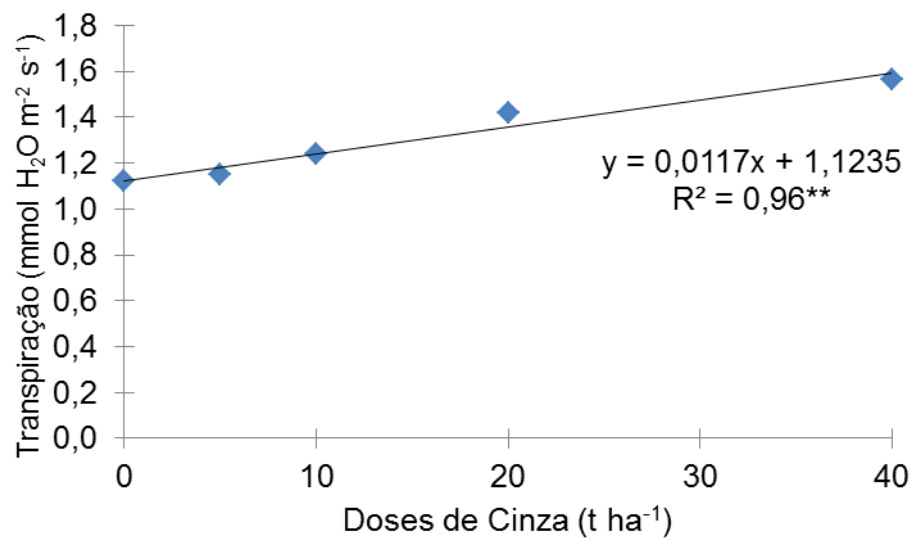


Figura 10. Efeitos das doses de cinza na transpiração foliar das laranjeiras.
 ** Significativo ($p < 0,01$).

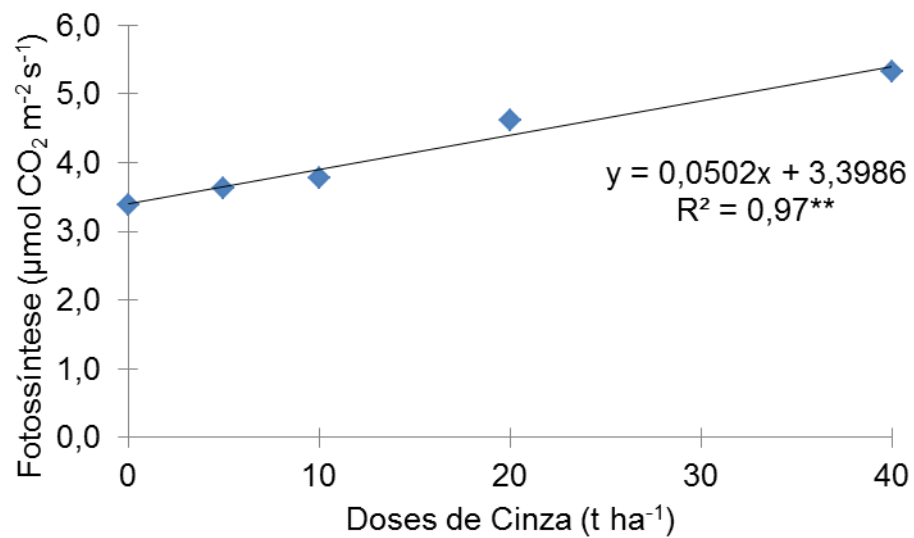


Figura 11. Efeitos das doses de cinza na fotossíntese das laranjeiras. ** Significativo ($p < 0,01$).

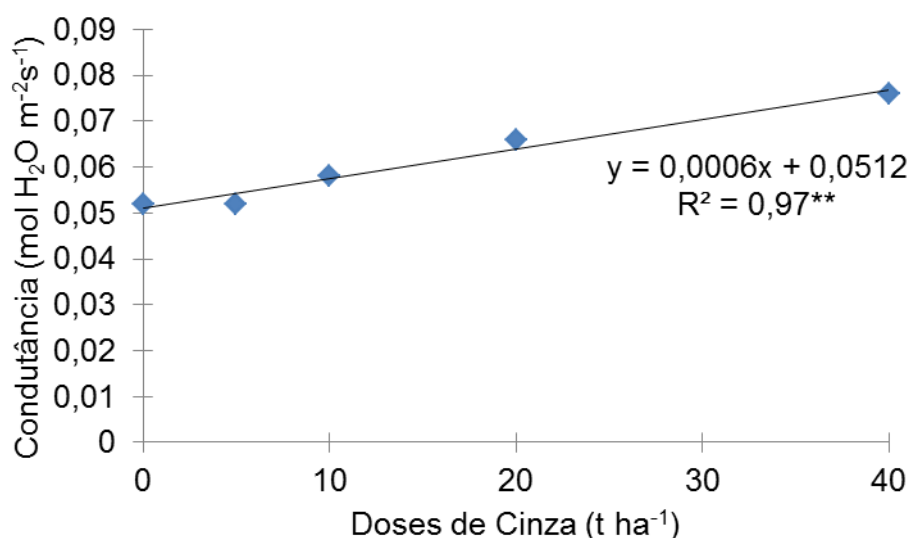


Figura 12. Efeitos das doses de cinza na condutância estomática. **Significativo ($p < 0,01$).

Os efeitos da cinza na transpiração da planta, condutância estomática e fotossíntese devem-se, provavelmente, ao fato de a cinza atuar como fonte principalmente de potássio, uma vez que esse elemento participa de importantes funções fisiológicas e bioquímicas na planta, como: ativação enzimática, síntese de proteínas, taxa fotossintética, extensão celular, osmorregulação, abertura e fechamento dos estômatos (ROMHELD; KIRKBY, 2010).

Luo, He e Lee (2012) constataram a importância do potássio na atividade fisiológica das plantas. Os autores cultivaram plantas de Alface mantendo três temperaturas na zona radicular (25°C, 30°C e temperatura ambiente) em sistema aeropônico. A cada temperatura na zona radicular, aplicaram soluções com concentrações distintas de K (199,05 mg L⁻¹; 265,3 mg L⁻¹; 331,55 mg L⁻¹). O decréscimo de K na solução nutritiva causou efeitos inibitórios no processo de fotossíntese. Adicionalmente, os autores observaram que, independentemente da temperatura na zona radicular, a eficiência fotoquímica foi menor nas plantas de alface cultivadas com menor concentração de K. Em contrapartida, verificaram que taxas fotossintéticas mais elevadas foram obtidas nas plantas cultivadas sob temperatura na zona radicular de 25°C, associada a maior concentração de K fornecida, correspondente a 331,55 mg L⁻¹.

Apesar de a análise química foliar das laranjeiras, no presente experimento, ter demonstrado redução da concentração de potássio na dose mais elevada (Figura 3), deve-se levar em consideração que a amostragem de folhas para avaliação do estado nutricional foi realizada em abril, enquanto as avaliações relacionadas à atividade fisiológica das laranjeiras foram feitas em agosto (três meses após a coleta de folhas). Como verificado nas análises químicas de solo, o K apresentou elevada mobilidade no perfil do solo, favorecendo perdas desse elemento por lixiviação ao longo do tempo. Isso pode ter contribuído para que, na época da avaliação da atividade fisiológica das plantas, os teores de potássio no solo fossem mais adequados nos tratamentos com aplicação de doses mais elevadas da cinza, favorecendo a absorção do elemento pelas laranjeiras e beneficiando, assim, as trocas gasosas nas folhas das plantas.

Adicionalmente, como a avaliação de trocas gasosas foi realizada no final do inverno, as plantas estavam submetidas a um longo período de deficiência hídrica. Essa condição pode ter feito com que a difusão e o fluxo de massa, principais processos de contato do K com a raiz (ROSOLEM; SILVA; ESTEVES, 2003), fossem prejudicados, afetando consequentemente a absorção do elemento. Asgharipour e Heidari (2011) observaram redução da concentração de K nas folhas de sorgo submetido à condições de estresse hídrico, demonstrando a importância da disponibilidade de água no solo para o processo de absorção do potássio.

Esse efeito negativo da baixa umidade do solo na absorção do K pode ser compensado elevando-se a concentração de K no meio (ASGHARIPOUR; HEIDARI, 2011). Portanto, concentração maior de K na solução do solo, promovida por doses mais altas da cinza, pode ter favorecido o contato do K com a raiz, beneficiando a sua absorção pelas plantas (ASGHARIPOUR; HEIDARI, 2011; ROSOLEM; SILVA; ESTEVES, 2003), favorecendo, assim, a atividade fisiológica das laranjeiras.

Plantas submetidas ao estresse hídrico requerem quantidades mais elevadas de potássio para manutenção de suas atividades fisiológicas em condições otimizadas (SEN GUPTA; BERKOWITZ; PIER, 1989). Por isso é importante, sob condições de déficit hídrico, o fornecimento de potássio, minimizando os efeitos adversos da seca nas trocas gasosas nas folhas das plantas e, consequentemente, no seu desenvolvimento. Quando a planta apresenta deficiência de K, observa-se

maior vulnerabilidade nas horas mais quentes do dia, podendo ocorrer danos na estrutura foliar, devido ao seu murchamento, seguido de desidratação dos tecidos e necrose (ROMHELD; KIRKBY, 2010).

Asgharipour e Heidari (2011) avaliaram o efeito de diferentes níveis de potássio na resistência ao estresse hídrico de sorgo cultivado em solo franco arenoso, por meio da avaliação do crescimento e produtividade das plantas, determinação do conteúdo de nutrientes (N, K e Na) nos grãos e clorofila nas folhas. Para tanto, instalaram experimento em parcelas subdivididas, em que nas parcelas principais foram estabelecidos três níveis de irrigação (70%, 50% e 30% da capacidade de campo), e nas subparcelas os tratamentos consistiram de cinco doses de K (0, 100, 150, 200, 250 kg ha⁻¹ de K₂SO₄). Adubação potássica que possibilitou teores adequados de potássio no solo (nesse caso aplicação na faixa de 150-250 kg ha⁻¹ de K₂SO₄) aumentou a resistência das plantas de sorgo às condições de estresse hídrico, verificado no aumento do desenvolvimento vegetativo e produtividade, assim como no maior teor de clorofila e concentração de N e K nas plantas.

Estudos relacionados a efeitos da aplicação da cinza na atividade fisiológica das plantas são relativamente escassos. Algumas pesquisas foram realizadas, objetivando avaliar a influência da sua aplicação nos pigmentos fotossintéticos nas folhas das plantas. Gupta et al. (2007) conduziram experimento com feijão semeado em vasos preenchidos com solo tratado com diferentes concentrações de cinza de carvão (testemunha, 10% e 25% de cinza). Os autores observaram que os conteúdos de clorofila *a* e *b* e clorofila total foram maiores no tratamento que recebeu a dose mais elevada de cinza. Esse efeito foi atribuído à presença de nutrientes nesse resíduo, os quais são necessários a biossíntese de clorofila.

Outro fator importante que pode ter favorecido o incremento da condutância estomática, transpiração e taxa de fotossíntese nas folhas das laranjeiras com o aumento das doses de cinza aplicadas, é a diferença observada na umidade do solo nos diferentes tratamentos. Constatou-se efeito significativo dos tratamentos na umidade do solo na camada de 10-20 cm (Tabela 16), sendo que o valor dessa variável aumentou de forma linear com o incremento das doses da cinza (Figura 13). Na análise de regressão polinomial, observou-se que as variações da umidade do

solo nas camadas de 0-10 e 20-40 cm também se adequaram a modelos lineares positivos em função das quantidades crescentes de cinza adicionadas ao solo (Figuras 14 e 15).

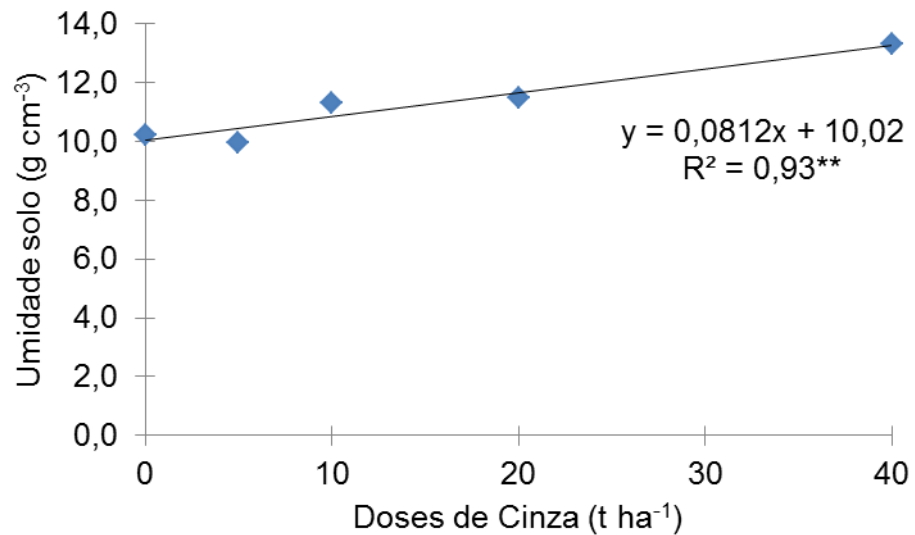


Figura 13. Efeitos das doses de cinza na umidade do solo (camada 10-20 cm).
^{**}Significativo ($p < 0,01$).

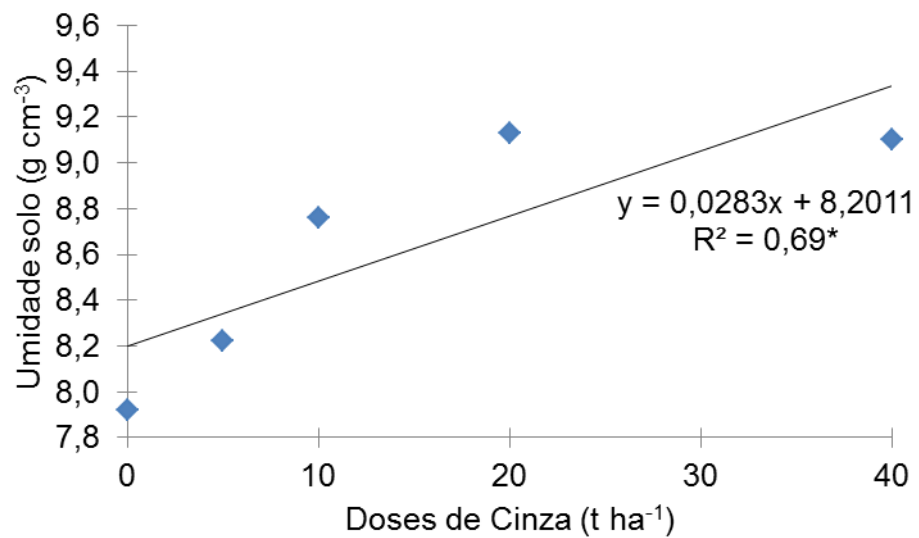


Figura 14. Efeitos das doses de cinza na umidade do solo (camada 0-10 cm).
^{*}Significativo ($p < 0,05$).

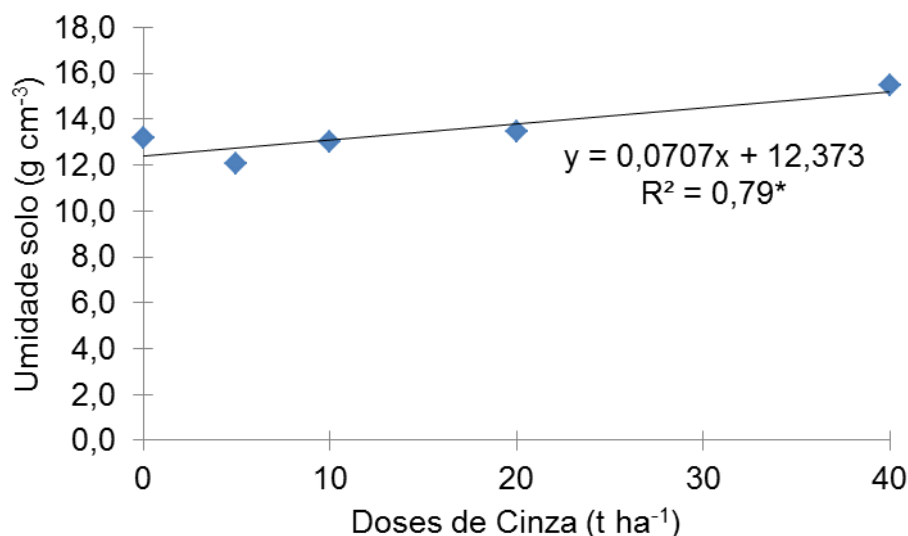


Figura 15. Efeitos das doses de cinza na umidade do solo (camada 20-40 cm).
*Significativo ($p < 0,05$).

Esse efeito da aplicação da cinza na umidade do solo deve ter ocorrido, pois, a cinza do bagaço de cana possui elevada capacidade de retenção de água, contribuindo para maior capacidade de armazenamento de água no solo (BRUNELLI; PISANI Jr., 2006). Efeitos positivos da aplicação de cinza nas propriedades físicas de um solo franco arenoso, aumentando a sua capacidade de retenção de água, também foram reportados por Pati e Sahu (2004).

A umidade do solo influencia a atividade fisiológica da laranjeira, como foi constatado por Magalhães Filho et al. (2008). Esses autores, ao avaliarem o efeito da deficiência hídrica nas trocas gasosas em mudas de laranjeira Valência enxertada sobre limoeiro Cravo, observaram redução da condutância estomática, transpiração e eficiência de carboxilação, levando a queda da taxa fotossintética das plantas.

Em condições de estresse hídrico, o fechamento dos estômatos possibilita diminuição da perda de água pela transpiração, sendo considerado mecanismo de escape à deficiência hídrica nos citros (MEDINA et al., 2005). No entanto, concomitantemente, também ocorre diminuição da assimilação de CO₂ no processo fotossintético (MAGALHÃES FILHO et al., 2008).

A suscetibilidade dos citros às condições de seca, provavelmente, associa-se ao seu caráter mesofítico, devido ao centro de origem dessas plantas serem o

sudeste do continente asiático, principalmente áreas de florestas úmidas e baixas latitudes (DONADIO; MOURÃO FILHO; MOREIRA, 2005; MAGALHÃES FILHO et al., 2008). Adicionalmente, os citros parecem apresentar pouca eficiência na absorção de água, devido ao pequeno número de pêlos radiculares e por possuírem razão parte-aérea/raízes desfavorável (MEDINA et al., 2005). Essas informações reiteram a importância da umidade do solo no processo fotossintético das laranjeiras, explicando os resultados obtidos no presente experimento, em que o aumento da umidade do solo, possibilitado pelas doses crescentes de cinza, favoreceu as trocas gasosas nas folhas das plantas.

4.6.2. Período úmido (primavera)

Não foram observados efeitos significativos das doses de cinza nas variáveis de trocas gasosas nas folhas das laranjeiras (fotossíntese, condutância estomática, transpiração) (Tabela 17).

Tabela 17. Efeitos das doses de cinza nas variáveis de trocas gasosas nas folhas da laranjeira e na umidade do solo (período úmido: primavera).

Tratamentos	Fotossíntese	Condutância	Transpiração	Umidade (0-10 cm)	Umidade (10-20 cm)	Umidade (20-40 cm)
t ha ⁻¹	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	g cm ⁻³	g cm ⁻³	g cm ⁻³
0	4,78	0,10	2,84	15,11	17,84	20,24
5	4,77	0,12	3,07	16,21	18,69	18,51
10	5,68	0,12	3,22	16,70	20,23	21,16
20	5,51	0,11	3,10	15,72	18,94	21,30
40	5,22	0,11	2,90	16,61	19,13	20,68
F (Trat.)	0,51 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,64 ^{ns}
CV (%)	25,11	29,78	19,41	13,35	11,12	15,44

^{ns} = não significativo.

Como essa avaliação foi realizada após o restabelecimento das chuvas, a deficiência hídrica provavelmente não foi mais limitante para a atividade fisiológica das laranjeiras. As folhas, possivelmente, apresentavam potencial de água elevado,

possibilitando condutância estomática elevada, que implica também em altas taxas de assimilação de CO₂ e transpiração, favorecendo o processo fotossintético.

Essa condição de umidade do solo não restritiva, fez com que as respostas das plantas à adição de cinza, fonte principalmente de potássio, não fossem evidentes como na época seca. Isso deve ter ocorrido, pois o potássio detém funções principalmente na regulação da condutância estomática, participando do equilíbrio osmótico da planta, podendo atuar na manutenção da pressão de turgor nas folhas com baixo potencial hídrico, como discutido anteriormente. Essa função assume importância destacada em épocas de deficiência hídrica, em que ocorre diminuição do potencial de água na folha, ocasionando fechamento dos estômatos, e afetando conseqüentemente a assimilação de CO₂ e a transpiração, pois, ambos são processos difusivos (MAGALHÃES FILHO et al., 2008).

Outro fator a ser considerado no entendimento da ausência de efeitos das doses de cinza nas trocas gasosas, nas folhas das laranjeiras, nesse período, é que devido às precipitações pluviométricas, pode ter ocorrido lixiviação de parte do potássio para fora da zona de concentração das raízes. Isso se deve a alta mobilidade do elemento no solo, podendo ter contribuído para ausência de resposta positiva da planta às doses do resíduo.

Adicionalmente, não foram observados efeitos significativos dos tratamentos na umidade do solo nas profundidades estudadas (Tabela 17). A umidade do solo é importante na determinação da atividade fotossintética da planta, como discutido anteriormente. Esse fator também pode ter condicionado a ausência do efeito das doses de cinza nas variáveis de trocas gasosas nas laranjeiras.

4.7. Avaliação do desenvolvimento radicular das laranjeiras

4.7.1. Raízes fibrosas (classe de tamanho: < 0,2 cm de diâmetro)

As doses de cinza não influenciaram significativamente as variáveis relacionadas ao desenvolvimento de raízes fibrosas (massa seca, área, diâmetro médio, comprimento, densidades) (Tabela 18).

Tabela 18. Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento radicular das laranjeiras (raízes fibrosas).

Tratamentos t ha ⁻¹	Massa Seca mg	Área mm ²	Diâmetro mm	Comprimento mm	Densidade mg cm ⁻³	Densidade mm cm ⁻³
0	85,96	546,76	0,58	944,33	0,223	2,45
5	91,55	537,78	0,59	900,66	0,238	2,34
10	79,10	555,26	0,54	1011,71	0,206	2,63
20	76,63	469,10	0,55	838,22	0,199	2,18
40	80,74	474,26	0,57	835,57	0,210	2,17
F (Trat.)	0,22 ^{ns}	0,36 ^{ns}	1,60 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,51 ^{ns}
CV (%)	16,18	10,26	11,80	8,38	1,66	8,02
Profundidades						
0-10 cm	78,21 ab	508,98	0,57 a	892,01	0,203 ab	2,32
10-20 cm	92,69 a	545,56	0,59 a	913,51	0,241a	2,37
20-30 cm	102,41 a	602,01	0,57 a	1040,75	0,266 a	2,70
30-40 cm	57,87 b	409,98	0,53 b	778,12	0,150 b	2,02
F (Prof.)	4,82**	1,77 ^{ns}	10,96**	0,83 ^{ns}	5,93**	1,43 ^{ns}
F (TratxProf)	1,66 ^{ns}	1,23 ^{ns}	0,78 ^{ns}	1,22 ^{ns}	1,64 ^{ns}	1,25 ^{ns}
CV (%)	11,11	8,63	7,73	7,88	1,19	7,39

^{ns} = não significativo; ** significativo (p<0,01). Médias seguidas por letras diferentes na coluna são diferentes (teste de Tukey, p<0,05). As variáveis de massa seca, área, comprimento e densidades de raiz foram transformadas em [log (x+5)].

A resposta da planta à adição de cinza ao solo é decorrente essencialmente de alterações nos atributos químicos do solo (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001). Nesse aspecto, considerando-se o crescimento de raízes, este é favorecido principalmente pela neutralização da acidez do solo e do alumínio tóxico às plantas, e pelo fornecimento de cálcio (AULER et al., 2011). Como os efeitos da cinza sobre esses atributos químicos do solo não foram significativos, justifica-se a ausência da influência da aplicação da cinza no desenvolvimento das raízes fibrosas.

Em adição a isso, Auler et al. (2011) não observaram efeitos da calagem no desenvolvimento do sistema radicular de laranjeira Valência, enxertada em limoeiro Cravo, em um Latossolo Vermelho distrófico de textura arenosa média, que inicialmente apresentava na camada de 0-20 cm: pH (CaCl₂)=4,5 e V%=34,8. Essas informações sugerem que essa combinação copa/porta-enxerto apresenta sistema radicular com elevada plasticidade e boa adaptação às condições de baixa fertilidade do solo, o que faz com que seja pouco responsivo a eventuais alterações nos atributos químicos do solo, contribuindo para os resultados obtidos no presente experimento.

A cinza possibilitou incremento apenas nos teores de potássio no solo. O fornecimento desse elemento pode favorecer o crescimento das raízes, como verificado em algodoeiro cultivado em vasos contendo Latossolo Vermelho-Escuro (ROSOLEM; SILVA; ESTEVES, 2003). Luo, He e Lee (2012) também observaram efeitos positivos no desenvolvimento radicular em função do suprimento de potássio às plantas. Esses autores cultivaram alface, mantendo três temperaturas na zona radicular (25°C, 30°C e temperatura ambiente) em sistema aerônico, e a cada temperatura aplicaram soluções com concentração distinta de K (199,05 mg L⁻¹; 265,3 mg L⁻¹; 331,55 mg L⁻¹). Para cada temperatura na zona radicular, as plantas cultivadas nos tratamentos com concentração mais elevada de K apresentaram maior comprimento total do sistema radicular e da área superficial das raízes, além de maior produção de matéria seca. Esse efeito foi relacionado à concentração mais alta de carboidratos solúveis, verificada nas raízes das plantas cultivadas com maior concentração de potássio, em decorrência, provavelmente, do favorecimento do processo fotossintético e do transporte de fotoassimilados.

Entretanto, no presente experimento, os teores de potássio no solo estavam relativamente altos (Tabelas 3 e 5) e nas folhas das plantas testemunhas estavam em níveis adequados (Tabela 7), contribuindo para a ausência de efeitos positivos no desenvolvimento radicular em função do fornecimento de potássio pelas doses de cinza utilizadas.

Augusto, Bakker e Meredieu (2008) observaram que estudos relacionados aos efeitos da aplicação de cinza de madeira no desenvolvimento radicular em sistemas florestais são escassos e, os que existem, apresentam resultados contrastantes. De forma geral, a adição de cinza em solos ácidos de florestas ocasionam alterações não significativas ou pouco evidentes no sistema radicular (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008).

Alva (1994) também não observou efeito da aplicação de cinza de carvão, na dose equivalente de 4,48 t ha⁻¹, no desenvolvimento do sistema radicular de mudas de tangerina Cleópatra e citrumelo Swingle, cultivadas em vasos preenchidos com solo arenoso, por meio da determinação da massa seca das raízes das plantas, coletadas após 140 dias de cultivo.

No entanto, Singh, Sharma e Agrawal (2008) relataram redução no comprimento, massa fresca e massa seca de raízes de beterraba com a aplicação de concentrações crescentes de cinza de carvão ao solo (0%, 5%, 10%, 15% e 20%). Esse efeito foi atribuído à presença de metais pesados na cinza, compactação das partículas de cinza, atuando como impedimento físico a elongação radicular; e ao aumento da salinidade associado aos baixos teores de N no solo ocasionados pela aplicação do resíduo.

Em relação à distribuição do sistema radicular nas profundidades estudadas, foram observadas diferenças significativas em algumas variáveis (massa seca e densidade de raízes) (Tabela 18). De forma geral, valores mais elevados dessas variáveis foram observados nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade no solo. Adicionalmente, foram verificadas diferenças no diâmetro médio das raízes nas profundidades estudadas (Tabela 18). Raízes de maior diâmetro foram encontradas nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade em comparação as raízes da camada de 30-40 cm (Tabela 18).

Estudos demonstram que a maior parte do sistema radicular usualmente encontra-se distribuída nos primeiros centímetros de profundidade. Mattos Jr., Graetz e Alva (2003) avaliaram a distribuição de biomassa do sistema radicular de laranja Hamlin enxertada em citrumelo Swingle, com 6 anos de idade, em solo arenoso e irrigado, analisando 3 profundidades (0-15 cm, 15-30 cm e 30-45 cm) e 3 distâncias em relação ao tronco (50 cm, 100 cm e 150 cm). Os autores observaram que o sistema radicular concentrou-se principalmente na camada de 0-15 cm do solo. Victória Filho et al. (1985) também relataram que em amostragem de raízes realizada em 2 profundidades (0-15 cm e 15-30 cm) e 3 distâncias em relação ao tronco (80 cm, 160 cm e 240 cm), com laranjeiras Natal enxertada sobre limão Cravo em Latossolo, com 14 anos de idade, as radicelas localizaram-se em sua maior parte na camada de 0-15 cm, representando 70% do total amostrado em ambas profundidades.

4.7.2. Raízes lenhosas (classe de tamanho: 0,2 a 1,0 cm de diâmetro)

Não foram verificadas diferenças significativas nas variáveis relacionadas ao desenvolvimento de raízes lenhosas (massa seca, área, diâmetro médio, comprimento e densidades) em função da aplicação da cinza (Tabela 19). Foram observados maiores valores de densidades de raízes na camada 10-20 cm (Tabela 19). Em relação ao diâmetro médio de raízes, valores mais elevados foram observados na camada 30-40 cm (Tabela 19).

Tabela 19. Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento radicular das laranjeiras (raízes lenhosas)

Tratamentos t ha ⁻¹	Massa Seca mg	Área mm ²	Diâmetro mm	Comprimento mm	Densidade mg cm ⁻³	Densidade mm cm ⁻³
0	202,80	128,50	2,71	40,94	0,53	0,11
5	302,23	216,07	3,42	65,76	0,79	0,17
10	186,45	159,16	3,08	53,77	0,48	0,14
20	267,63	187,96	2,87	61,30	0,70	0,16
40	186,78	122,54	2,76	38,08	0,49	0,10
F (Trat.)	0,86 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,77 ^{ns}
CV (%)	38,86	35,45	22,24	31,64	9,02	1,85
Profundidades						
0-10 cm	125,60	102,43	2,64 b	38,26	0,33 b	0,10 ab
10-20 cm	427,74	273,76	3,05 ab	79,77	1,11 a	0,21 a
20-30 cm	271,49	193,44	2,96 ab	63,22	0,71 ab	0,16 ab
30-40 cm	91,89	81,75	3,22 a	26,63	0,24 b	0,07 b
F (Prof.)	3,28 ^{ns}	3,09 ^{ns}	3,94*	3,29 ^{ns}	4,08*	3,31*
F (TratxProf)	1,06 ^{ns}	0,98 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,94 ^{ns}	1,26 ^{ns}	0,89 ^{ns}
CV (%)	48,03	46,03	20,49	40,31	8,55	1,99

^{ns} = não significativo; * significativo (p<0,05). Médias seguidas por letras diferentes na coluna são diferentes (teste de Tukey, p<0,05). As variáveis de massa seca, área, comprimento e densidades de raiz foram transformadas em [log (x+5)].

Como os efeitos da aplicação da cinza nos atributos químicos do solo foram pouco evidentes e a combinação copa/porta enxerto, utilizada no presente experimento, apresenta-se como pouco responsiva a eventuais modificações na fertilidade do solo em relação ao crescimento das raízes, como discutido anteriormente, justifica-se a ausência de influência da aplicação da cinza nas variáveis de desenvolvimento das raízes lenhosas.

Resultados similares foram obtidos por Sarangi, Mahakur e Mishra (2001), ao avaliarem os efeitos da aplicação de doses de cinza de carvão (0; 10; 12,5; 15; 17,5; e 20 t ha⁻¹) em solo franco arenoso no desenvolvimento radicular de plantas de arroz. Os autores observaram que a biomassa de raízes não foi influenciada significativamente pela aplicação do resíduo.

No entanto, Pandey et al. (2009) verificaram efeitos adversos no desenvolvimento radicular em função da aplicação de doses elevadas de cinza de carvão. Os autores conduziram experimento em que foram semeadas sementes de guandu em vasos preenchidos com solo tratado com diferentes concentrações da cinza (peso/peso): 0% (controle), 25%, 50%, e 100%. O comprimento da raiz foi significativamente menor com a aplicação de cinza na concentração de 100% em comparação ao controle. Por outro lado, não houve diferenças no comprimento da raiz no tratamento controle em comparação aos tratamentos em que se adicionou cinza ao solo nas concentrações de 25 e 50%.

4.8. Avaliação do desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras

Não foram observados efeitos significativos das doses de cinza nas variáveis relacionadas ao desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras (altura da planta, perímetro e diâmetro do tronco, volume da copa) nas três avaliações realizadas (8, 10 e 12 meses após a aplicação da cinza) (Tabelas 20, 21 e 22).

Tabela 20. Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras (oito meses após aplicação da cinza).

Tratamentos t ha ⁻¹	Altura m	Perímetro do tronco cm	Diâmetro tronco cm	Volume copa m ³
0	1,92	18,57	5,91	3,24
5	1,89	18,09	5,76	3,17
10	1,89	17,89	5,70	3,28
20	1,93	17,73	5,64	3,29
40	1,89	17,81	5,67	3,08
F (Trat.)	0,15 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,09 ^{ns}
CV (%)	6,10	6,28	6,30	20,31

^{ns} = não significativo.

Tabela 21. Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras (dez meses após aplicação da cinza).

Tratamentos t ha ⁻¹	Altura m	Perímetro do tronco cm	Diâmetro tronco cm	Volume copa m ³
0	1,98	21,10	6,72	3,62
5	1,94	20,78	6,62	3,57
10	1,95	20,56	6,54	3,73
20	2,01	20,52	6,53	3,75
40	1,95	20,46	6,51	3,45
F (Trat.)	0,24 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,14 ^{ns}
CV (%)	6,31	5,42	5,42	19,71

^{ns} = não significativo.

Tabela 22. Efeitos das doses de cinza nas variáveis de desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras (doze meses após aplicação da cinza).

Tratamentos t ha ⁻¹	Altura m	Perímetro do tronco cm	Diâmetro tronco cm	Volume copa m ³
0	2,06	21,98	7,00	4,22
5	2,02	21,62	6,88	4,20
10	2,03	21,55	6,86	4,24
20	2,05	21,32	6,79	4,11
40	2,03	21,38	6,81	3,85
F (Trat.)	0,07 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,29 ^{ns}
CV (%)	6,55	5,16	5,14	16,14

^{ns} = não significativo.

Considerando-se cinzas em geral, estudos apontam que a sua aplicação pode beneficiar o desenvolvimento das plantas (ALVA, 1994; DAROLT; BLANCO NETO; ZAMBON, 1993; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998; PARK et al., 2012) ou prejudicar o seu crescimento (PANDEY et al., 2009; SINGH; SHARMA; AGRAWAL, 2008).

Efeitos positivos da aplicação de cinza, no desenvolvimento das plantas, podem ser possibilitados principalmente pelo fornecimento de nutrientes, associado à correção do pH do solo (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; BASU et al., 2009; DAROLT; BLANCO NETO; ZAMBON, 1993; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001; FERREIRA; FAGERIA; DIDONET, 2012; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998; PANDEY; SINGH, 2010). Em contrapartida, efeitos negativos no crescimento da planta, em função da aplicação do resíduo, podem ser atribuídos ao desbalanço

de nutrientes na sua constituição química (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; DAROLT; BLANCO NETO; ZAMBON, 1993; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998), presença de metais pesados (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001; PANDEY et al., 2009; PANDEY; SINGH, 2010; SINGH; SHARMA; AGRAWAL, 2008), aumento da salinidade do solo (PANDEY; SINGH, 2010; PARK et al., 2012), e possível diminuição da disponibilidade de nutrientes, em função do efeito no pH do solo (DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001; NKANA; DEMEYER; VERLOO, 1998; PANDEY; SINGH, 2010). Esses efeitos são determinados principalmente pela composição da cinza, dose aplicada e atributos químicos do solo avaliado.

Diante do exposto, constata-se que a ausência de influência dos tratamentos no desenvolvimento da parte aérea das laranjeiras justifica-se principalmente pelos baixos teores da maioria dos elementos nas cinzas (Tabelas 1 e 2), associado às boas condições iniciais de fertilidade do solo e do estado nutricional das plantas. Isso fez com que a aplicação do resíduo proporcionasse efeitos pouco pronunciados nos atributos químicos do solo (Tabelas 3, 4, 5, 6 e 12) e na nutrição das plantas (Tabelas 7, 8, 9, 10 e 13), contribuindo para a minimização da resposta das laranjeiras.

A cinza utilizada no presente estudo foi caracterizada como fonte principalmente de potássio. Quaggio et al. (2004) observaram, em solo com baixo teor de K trocável, efeitos positivos da aplicação de doses crescentes de fertilizante potássico no volume de copa de laranjeira Pêra enxertada em limão cravo, com idade de 4-5 anos. Entretanto, no presente experimento, os teores de potássio no solo estavam relativamente altos (Tabelas 3 e 5) e nas folhas das plantas testemunhas estavam em níveis adequados (Tabela 7). Em adição a isso, as laranjeiras eram jovens (2-3 anos), e sua produção de frutos ainda não era significativa, diminuindo a demanda por esse elemento em comparação à laranjeiras mais desenvolvidas (MATTOS Jr. et al., 2003). Esses fatores condicionaram a ausência de efeitos do fornecimento de potássio pela cinza no crescimento das plantas, justificando os resultados diferentes em relação aos obtidos por Quaggio et al. (2004).

Ainda considerando a cinza como fonte de potássio, salienta-se que, como constatado na avaliação do estado nutricional das laranjeiras, o fornecimento de doses elevadas do resíduo pode ocasionar desbalanços nutricionais na planta, em virtude da adição de grandes quantidades de potássio. Isso também pode ter contribuído para a minimização da resposta das laranjeiras em relação ao desenvolvimento da parte aérea, podendo até mesmo prejudicar o crescimento das plantas no longo prazo, caso adições do resíduo em doses inadequadas forem realizadas ao solo.

Quando se avalia o crescimento de plantas, é importante considerar o fornecimento de nitrogênio, uma vez que esse nutriente é fundamental no desenvolvimento vegetativo dos citros. Influência da adubação nitrogenada no crescimento dos citros foi reportada em vários estudos, como em tangor Murcott (MATTOS Jr. et al., 2004) e laranjeira Pêra (QUAGGIO et al., 2004). No entanto, esse elemento é presente em baixos teores na cinza; tendo essa característica sido apontada como principal fator que justifica a ausência do efeito da aplicação desse resíduo no desenvolvimento de plantas em solos minerais (AUGUSTO; BAKKER; MEREDIEU, 2008).

Resultados similares aos obtidos no presente experimento foram verificados por Park et al. (2004), que ao analisarem os efeitos da aplicação da cinza de madeira (0, 10 e 20 t ha⁻¹ por ano) em solo de textura franco-siltosa, no desenvolvimento de salgueiro, também não observaram influência no crescimento das plantas, averiguado por meio da produção de biomassa lenhosa. Em contrapartida, Nkana, Demeyer e Verloo (1998), avaliando os efeitos da cinza de madeira no crescimento de azevém, cultivado em vasos preenchidos com solos tropicais ácidos de textura argilosa, constataram que a adição da cinza favoreceu o crescimento das plantas em comparação à testemunha. Esse efeito pode ser associado às alterações causadas nos atributos químicos do solo, principalmente a correção do pH e o fornecimento de Ca e K, beneficiando assim o estado nutricional da planta e favorecendo o seu desenvolvimento.

5. CONCLUSÕES

- A cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi caracterizada principalmente como uma fonte de potássio. Os teores de potássio trocável no solo aumentaram linearmente em função do incremento das doses da cinza.
- A máxima concentração foliar estimada de potássio, equivalente a $17,4 \text{ g kg}^{-1}$, foi obtida na dose de $22,4 \text{ t ha}^{-1}$, e a adição de quantidade maior da cinza ao solo causou redução do teor desse nutriente nas folhas.
- O incremento no teor foliar de potássio foi acompanhado por decréscimos nas concentrações de cálcio e boro nas folhas.
- As doses de cinza estudadas não influenciaram a concentração de metais pesados (As, Cr e Ni) no solo, folhas e frutos, não ocasionando problemas de contaminação no sistema solo-planta.
- A emissão de CO_2 do solo não foi influenciada pelas doses de cinza aplicadas, o que viabiliza a disposição desse resíduo em solos agrícolas, sem que favoreça a ocorrência de mudanças climáticas, como o aquecimento global.
- A condutância estomática, transpiração e taxa de fotossíntese das laranjeiras aumentaram linearmente em função da utilização de doses crescentes da cinza na época seca (inverno). Não houve efeitos das doses do resíduo nas variáveis de trocas gasosas nas folhas das plantas no período úmido (primavera).
- O desenvolvimento das laranjeiras (sistema radicular e parte aérea) não foi influenciado pelas doses de cinza estudadas.

- A recomendação da dose de cinza a ser aplicada em pomares de citros, em formação, deve levar em consideração principalmente a concentração de potássio na cinza e os teores desse elemento no solo, possibilitando reaproveitamento racional desse resíduo, associado a benefícios agronômicos.

6. REFERÊNCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 77 p.

ABREU Jr., C. H.; OLIVEIRA, F. C.; SILVA, F. C.; BERTON, R. S. Uso de resíduos orgânicos no pomar. In: MATTOS Jr., D.; NEGRI, J. D.; PIO, R. M.; POMPEU Jr., J. (Ed.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2005. cap. 29, p. 873-896.

AGRIANUAL 2013: anuário da agricultura brasileira. São Paulo: IFNP, 2013. p. 229, 256, 261-262.

ALVA, A. K. Possible utilization of flue-gas desulfurization gypsum and fly ash for citrus production: evaluation of crop growth response. **Waste Management**, Oxford, v. 14, n. 7, p. 621-627, 1994. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0956-053X\(94\)90034-5](http://dx.doi.org/10.1016/0956-053X(94)90034-5)>.

ASGHARIPOUR, M. R.; HEIDARI, M. Effect of potassium supply on drought resistance in sorghum: plant growth and macronutrient content. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, Faisalabad, v. 48, n. 3, p. 197-204, 2011.

ASHKEVARI, A.; ZADEH, S. H. H.; MIRANSARI, M. Potassium fertilization and fruit production of page citrus on a punsir rootstock: quantitative and qualitative traits. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 33, n. 10, p. 1564-1578, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2010.490075>>.

ASHRAF, M. Y.; GUL, A.; ASHRAF, M.; HUSSAIN, F.; EBERT, G. Improvement in yield and quality of kinnow (*Citrus deliciosa* x *Citrus nobilis*) by potassium fertilization. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 33, n. 11, p. 1625-1637, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2010.496887>>.

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, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-008-9570-z>>.

AULER, P. A. M.; NEVES, C. S. V. J.; FIDALSKI, J.; PAVAN, M. A. Calagem e desenvolvimento radicular, nutrição e produção de laranja 'Valência' sobre porta-enxertos e sistemas de preparo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 3, p. 254-261, 2011.

BASU, M.; PANDE, M.; BHADORIA, P. B. S.; MAHAPATRA, S. C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science**, London, v. 19, n. 10, p. 1173-1186, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.12.006>>.

BATAGLIA, O.; RODRIGUEZ, O.; HIROCE, R.; GALLO, J. R.; FURLANI, P. R.; FURLANI, A. M. C. Composição mineral de frutos cítricos na colheita. **Bragantia**, Campinas, v. 36, n. 1, p. 215-221, 1977. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87051977000100021>>.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1982. 48 p. (Boletim Técnico, 78).

BERNARDI, A. C. C.; CARMELLO, Q. A. C.; CARVALHO, S. A. Macronutrientes em mudas de citros cultivadas em vasos em resposta à adubação NPK. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 761-767, 2000. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162000000400026>>.

BRUNELLI, A. M. M. P.; PISANI Jr., R. Proposta de disposição de resíduo gerado a partir da queima do bagaço de cana em caldeiras como fonte de nutriente e corretivo do solo. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 30., 2006, Punta del Leste. **Anais...** Punta del Leste: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2006. v. 1, p. 1-8.

CHAUDHARY, S. K.; RAI, U. N.; MISHRA, K.; HUANG, H. G.; YANG, X. E.; INOUE, M.; GUPTA, D. K. Growth and metal accumulation potential of *Vigna Radiata* L. grown under fly ash amendments. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 37, n. 10, p. 1583-1588, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.04.004>>.

CORÁ, J. E.; SILVA, G. O.; MARTINS FILHO, M. V. Manejo do solo sob citros. In: MATTOS Jr., D.; NEGRI, J. D.; PIO, R. M.; POMPEU Jr., J. (Ed.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2005. cap. 12, p. 345-368.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 39, n. 2, p. 110-115, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>>.

DAROLT, M. R.; BLANCO NETO, V.; ZAMBON, F. R. A. Cinza vegetal como fonte de nutrientes e corretivo de solo na cultura de alface. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 11, n. 1, p. 38-40, 1993.

DEMEYER, A.; NKANA, J. C. V.; VERLOO, M. G. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 77, n. 3, p. 287-295, 2001. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00043-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00043-2)>.

DONADIO, L. C.; MOURÃO FILHO, F. A. A.; MOREIRA, C. S. Centros de origem, distribuição geográfica das plantas cítricas e histórico da citricultura no Brasil. In: MATTOS Jr., D.; NEGRI, J. D.; PIO, R. M.; POMPEU Jr., J. (Ed.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2005. cap. 1, p. 1-18.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p. (Documentos, 1).

ERICH, M. S. Agronomic effectiveness of wood ash as a source of phosphorus and potassium. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 20, n. 3, p. 576-581, 1991.

ERNANI, P. R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J. A.; CASSOL, P. C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 393-402, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000200022>>.

FERREIRA, E. P. B.; FAGERIA, N. K.; DIDONET, A. D. Chemical properties of an Oxisol under organic management as influenced by application of sugarcane bagasse ash. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 2, p. 228-236, 2012.

FREITAS, E. S. **Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2005.

GUPTA, A. K.; DWIVEDI, S.; SINHA, S.; TRIPATHI, R. D.; RAI, U. N.; SINGH, S. N. Metal accumulation and growth performance of *Phaseolus vulgaris* grown in fly ash amended soil. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 98, n. 17, p. 3404-3407, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.016>>.

HARRIS, G. A.; CAMPBELL, G. S. Automated quantification of roots using a simple image analyser. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 6, p. 935-938, 1989.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. New York: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

IZQUIERDO, M.; QUEROL, X. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: an overview. **International Journal of Coal Geology**, Amsterdam, v. 94, p. 54-66, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2011.10.006>>.

LA SCALA Jr., N.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00051-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00051-1)>.

LA SCALA Jr., N.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1469-1473, 2000. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00053-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00053-5)>.

LUO, H. Y.; HE, J.; LEE, S. K. Interaction between potassium concentration and root-zone temperature on growth and photosynthesis of temperate lettuce grown in the tropics. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 35, n. 7, p. 1004-1021, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2012.671404>>.

MAGALHÃES FILHO, J. R.; AMARAL, L. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MEDINA, C. L.; MACHADO, E. C. Deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento de raízes em laranjeira 'Valência' sobre dois tipos de porta-enxerto. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 75-82, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052008000100009>>.

MALAVOLTA, E. Potássio: absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. cap. 8, p. 179-238.

MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; LA SCALA Jr., N. Influence of liming on residual soil respiration and chemical properties in a tropical no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 1, p. 45-50, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000100005>>.

MARQUES, D. J.; BROETTO, F.; SILVA, E. C.; CARVALHO, J. G. Dinâmica de cátions na raiz e folhas de berinjela cultivada sobre doses crescentes de potássio oriundas de duas fontes. **Idesia**, Arica, v. 29, n. 2, p. 69-77, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000200009>>.

MATTOS Jr, D.; GRAETZ, D. A.; ALVA, A. K. Biomass distribution and Nitrogen-15 partitioning in citrus trees on a sandy entisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, n. 2, p. 555-563, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2003.5550>>.

MATTOS Jr., D.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ALVA, A. K. Nutrient content of biomass components of Hamlin sweet orange trees. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 1, p. 155-160, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162003000100023>>.

MATTOS Jr., D.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; CARVALHO, S. A. Superfícies de resposta do tangor 'Murcott' à fertilização com N, P e K. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 164-167, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452004000100043>>.

MAZZINI, R. B.; RIBEIRO, R. V.; PIO, R. M. A simple and non-destructive model for individual leaf area estimation in citrus. **Fruits**, Paris, v. 65, n. 5, p. 269-275, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/fruits/2010022>>.

MEDINA, C. L.; RENA, A. B.; SIQUEIRA, D. L.; MACHADO, E. C. Fisiologia dos citros. In: MATTOS Jr., D.; NEGRI, J. D.; PIO, R. M.; POMPEU Jr., J. (Ed.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2005. cap. 7, p. 147-195.

MILLER, J. J.; CURTIN, D. Electrical conductivity and soluble ions. In: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 713-725.

MOORBY, J.; BESFORD, R. T. Mineral nutrition and growth. In: GOTTING, A. P.; HARVARD, M. H. **Inorganic plant nutrition**. Berlim: Springer-Verlag, 1983. v. 15B, p. 481-527.

MUSE, J. K.; MITCHELL, C. C. Paper mill boiler ash and lime by-products as soil liming materials. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, n. 3, p. 432-438, 1995.

NAVA, G.; DECHEN, A. R. Long term annual fertilization with nitrogen and potassium affect yield and mineral composition of 'Fuji' apple. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 3, p. 377-385, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162009000300013>>.

NEVES M. F. (Coord.). **O retrato da citricultura brasileira**. Ribeirão Preto: Markestrat, 2010. p. 8-9, 34-39.

NKANA, J. C. V.; DEMEYER, A.; VERLOO, M. G. Chemical effects of wood ash on plant growth in tropical acid soils. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 63, n. 3, p. 251-260, 1998. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00134-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00134-X)>.

NKANA, J. C. V.; DEMEYER, A.; VERLOO, M. G. Effect of wood ash application on soil solution chemistry of tropical acid soils: incubation study. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 85, n. 3, p. 323-325, 2002. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00140-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00140-2)>.

OHNO, T. Neutralization of soil acidity and release of phosphorus and K by wood ash. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 21, n. 3, p. 433-438, 1992.

PANDEY, V. C.; SINGH, N. Impact of fly ash incorporation in soil systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 136, n. 1-2, p. 16-27, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.013>>.

PANDEY, V. C.; ABHILASH, P. C.; UPADHYAY, R. N.; TEWARI, D. D. Application of fly ash on the growth performance and translocation of toxic heavy metals within *Cajanus Cajan* L.: Implication for safe utilization of fly ash for agricultural production. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 166, n. 1, p. 255-259, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.016>>.

PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES Jr., J.; LA SCALA Jr., N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 227-236, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000200003>>.

PARK, B. B.; YANAI, R. D.; SAHM, J. M.; BALLARD, B. D.; ABRAHAMSON, L. P. Wood ash effects on soil solution and nutrient budgets in a willow bioenergy plantation. **Water, Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 159, n. 1, p. 209-224, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/B:WATE.0000049177.60761.37>>.

PARK, N. D.; RUTHERFORD, P. M.; THRING, R. W.; HELLE, S. S. Wood pellet fly ash and bottom ash as an effective liming agent and nutrient source of rye grass (*Lolium perenne* L.) and oats (*Avena sativa*). **Chemosphere**, Oxford, v. 86, n. 4, p. 427-432, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.10.052>>.

PATI, S. S.; SAHU, S. K. CO₂ evolution and enzyme activities (dehydrogenase, protease and amylase) of fly ash amended soil in the presence and absence of earthworms (*Drawilda willsi* Michaelsen) under laboratory conditions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 118, n. 3-4, p. 289-301, 2004. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00213-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00213-1)>.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009.

QUAGGIO, J. A.; MATTOS Jr., D.; BOARETTO, R. M. Sources and rates of potassium for sweet orange production. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 369-375, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162011000300015>>.

QUAGGIO, J. A.; MATTOS Jr., D.; CANTARELLA, H.; STUCHI, E. S.; SEMPIONATO, O. R. Sweet orange trees grafted on selected rootstocks fertilized with nitrogen, phosphorus and potassium. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 55-60, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004000100008>>.

QUAGGIO, J. A.; MATTOS Jr., D.; CANTARELLA, H. Manejo da fertilidade do solo na citricultura. In: MATTOS Jr., D.; NEGRI, J. D.; PIO, R. M.; POMPEU Jr., J. (Ed.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2005. cap. 17, p. 483-507.

QUAGGIO, J. A.; MATTOS Jr., D.; BOARETTO, R. M. Citros. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**: culturas. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. cap. 9, p. 378-379.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van; TOLEDO PIZA JUNIOR, C. Frutíferas. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 1997. p. 121-153. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. p. 191-195.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

ROMHELD, V.; KIRKBY, E. A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 335, n. 1-2, p. 155-180, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-010-0520-1>>.

ROSOLEM, C. A.; SILVA, R. H.; ESTEVES, J. A. F. Potassium supply to cotton roots as affected by potassium fertilization and liming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 5, p. 635-641, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2003000500012>>.

SAARSALMI, A.; SMOLANDER, A.; KUKKOLA, M.; MOILANEN, M.; SARMAKI, J. 30-Year effects of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes and stand growth in a Scots pine stand. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 278, p. 63-70, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.006>>.

SARANGI, P. K.; MAHAKUR, D.; MISHRA, P. C. Soil biochemical activity and growth response of rice *Oryza sativa* in fly ash amended soil. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 76, n. 3, p. 199-205, 2001. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00127-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00127-9)>.

SEN GUPTA, A.; BERKOWITZ, G. A.; PIER, P. A. Maintenance of photosynthesis at low leaf water potential in wheat. Role of potassium status and irrigation history. **Plant Physiology**, Rockville, v. 89, n. 4, p. 1358-1365, 1989.

SHARMA, S. K.; KALRA, N. Effect of fly ash incorporation on soil properties and productivity of crops: A review. **Journal of Scientific and Industrial Research**, New Delhi, v. 65, p. 383-390, 2006.

SHENDE, A.; JUWARKAR, A. S.; DARA, S. S. Use of fly ash in reducing heavy metal toxicity to plants. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 12, n. 3-4, p. 221-228, 1994. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90010-8](http://dx.doi.org/10.1016/0921-3449(94)90010-8)>.

SINGH, A.; SHARMA, R. K.; AGRAWAL, S. B. Effects of fly ash incorporation on heavy metal accumulation, growth and yield responses of *Beta vulgaris* plants. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 99, n. 15, p. 7200-7207, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.064>>.

SINGH, S.; SAXENA, R.; PANDEY, K.; BHATT, K.; SINHA, S. Responses of antioxidants in sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown on different amendments of tannery sludge: its metal accumulation potential. **Chemosphere**, Oxford, v. 57, n. 11, p. 1663-1673, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.07.049>>.

SMITH, P. F. Citrus nutrition. In: CHILDERS, N. F. (Ed.). **Nutrition of fruit crops, temperate to tropical fruit**. New Brunswick: Rutgers the State of University, 1966. p. 174-207.

SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B.; LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, London, v. 92, n. 10, p. 2774-2780, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.020>>.

SYVERTSEN, J. P.; LEVY, Y. Diurnal changes in leaf thickness, leaf water potential, and leaf to air temperature difference. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 33, n. 4, p. 783-789, 1982. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1093/jxb/33.4.783>>.

THIND, H. S.; SINGH, Y.; SINGH, B.; SINGH, V.; SHARMA, S.; VASHISTHA, M.; SINGH, G. Land application of rice husk ash, bagasse ash and coal fly ash: Effects on crop productivity and nutrient uptake in rice-wheat system on an alkaline loamy sand. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 135, p. 137-144, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.012>>.

TURN, S. Q.; KINOSHITA, C. M.; JAKEWAY, L. A.; JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; WU, B. C.; BLEVINS, L. G. Fuel characteristics of processed, higher-fiber sugarcane. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 35-55, 2003. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00252-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00252-7)>.

ULERY, A. L.; GRAHAM, R. C.; AMRHEIN, C. Wood-ash composition and soil pH following intense burning. **Soil Science**, Philadelphia, v. 156, n. 5, p. 358-364, 1993.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Test methods for evaluation solid waste physical and chemical methods**: microwave assisted acid digest of sediments, sludges, soils and oils, SW-846. Washington: Government Printing Office, 1998. p. 1-20.

VICTÓRIA FILHO, R.; DURIGAN, J. C.; ANDRIOLI, I.; GUSMÃO, E. M. Efeito de herbicidas residuais, aplicados por vários anos consecutivos, na distribuição do sistema radicular da laranjeira Natal (*Citrus sinensis* (L.) OSBECK). **Planta Daninha**, Jaboticabal, v. 8, n. 1-2, p. 81-96, 1985. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83581985000100010>>.

YUNUSA, I. A. M.; EAMUS, D.; DESILVA, D. L.; MURRAY, B. R.; BURCHETT, M. D.; SKILBECK, G. C.; HEIDRICH, C. Fly-ash: an exploitable resource for management of Australian agricultural soils. **Fuel**, London, v. 85, n. 16, p. 2337-2344, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2006.01.033>>.