UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA VEGETAL

LUANA MORATI CAMPOS

EFEITO DOS RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DO CAFÉ E DO GRANITO NA FERTILIDADE DO SOLO E NO DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays* L.)

VITÓRIA - ES

2018

LUANA MORATI CAMPOS

EFEITO DOS RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DO CAFÉ E DO GRANITO NA FERTILIDADE DO SOLO E NO DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays* L.)

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Biologia Vegetal.

Área de concentração: Fisiologia Vegetal.

Orientadora: Dr.ª Adelaide de Fátima Santana da Costa

Coorientador: Dr. André Guarçoni Martins

VITÓRIA - ES

2018

EFEITO DOS RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DO CAFÉ E DO GRANITO NA FERTILIDADE DO SOLO E NO DESENVOLVIMENTO DO MILHO (*Zea mays* L.)

LUANA MORATI CAMPOS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Biologia Vegetal na área de concentração Fisiologia Vegetal.

Aprovada em 12 de março de 2018.

Comissão Examinadora:

_____
Dr.ª Adelaide de Fátima Santana da Costa –Ufes/Incaper
Orientadora e Presidente da Comissão

_____
Dr. André Guarçoni Martins - Incaper
Coorientador

_____
Dr.ª Camilla Rozindo Dias Milanez - Ufes
Examinador Interno

_____
Dr.ª Diolina Moura Silva - Ufes
Examinadora Interno

_____
Dr. Rogério Carvalho Guarçoni - Incaper
Examinador Externo

_____
Dr. João Batista Silva Araújo - Incaper
Examinador Externo

Aos meus amados pais, Jorge e Tânia, e ao Willian, dedico com carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida. E a Ele por ser tão maravilhoso e ter me dado pais com um amor imenso. Além de serem parceiros em todo o tempo da minha existência, nunca mediram esforços para me verem feliz. Amo vocês.

Ainda, sou grata a Deus por ter apresentado o Willian a mim. Não foi à toa que ele chegou ao momento mais agitado da minha vida. Aliás, foram também por todo seu carinho, encorajamento, companheirismo e toda confiança essenciais que conseguimos realizar a reta final deste estudo. Sou para sempre agradecida por toda calma e simplicidade, por ter doado inúmeras horas do seu tempo para me ajudar, em tudo. Obrigada, meu amor.

Ao meu amigo Ualas pela irmandade ao longo de toda minha vida acadêmica na Universidade Federal do Espírito Santo e, por mais uma vez, ter me ajudado nos experimentos de doutorado com seu esforço físico e com suas risadas.

À Universidade Federal do Espírito Santo por dez anos de formação acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo pela infraestrutura disponibilizada e aos professores do programa pelo conhecimento transmitido.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo pela bolsa de doutorado concedida no período de um ano.

Aos Laboratórios de Anatomia Vegetal e de Fisiologia e Bioquímica de Plantas, bem como ao Núcleo de Estudos da Fotossíntese da Universidade Federal do Espírito Santo, sou grata pela estrutura e pelo apoio na realização das análises deste trabalho, especialmente agradeço aos amigos Leonardo Valandro Zanetti, Thaís Araújo dos Santos, Tiago Pereira da Silva, Fabiano Caprini Volponi, Débora Aviz Reis Freitas, Gislane Chaves Oliveira Silvares, Hiulana Pereira Arrivabene e Tatiane Aparecida Zorzal.

À Prof.ª Dr.ª Adelaide de Fátima Santana da Costa sou grata pela orientação desta tese.

Ao Dr. André Guarçoni Martins pela coorientação imprescindível ao longo de todo processo de produção da pesquisa.

À banca examinadora pela disponibilidade e empenho na correção desta tese.

Ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural por disponibilizar infraestrutura para a execução dos experimentos na Fazenda Experimental Engenheiro Agrônomo Reginaldo. Especialmente agradeço aos funcionários Afonso Carlos Valentim, Max Giovani Lodi, Ana Paula Terra de Souza e Mirian por todo auxílio.

Às empresas Zucchi e Realcafé Solúvel do Brasil S/A pelo fornecimento dos materiais (potenciais fertilizantes) utilizados nos experimentos.

RESUMO

Os setores de beneficiamento de rochas ornamentais e de café são relevantes para a economia capixaba. Entretanto, tais atividades industriais produzem grande quantidade de resíduos e seus reusos apresentam-se como um modo de promover a sustentabilidade dos processos produtivos. O aproveitamento desses resíduos na agricultura como fontes de nutrientes para plantas é um processo que requer estudos que identifiquem suas influências no crescimento vegetal e nos atributos do solo. Assim, o atual trabalho é o produto de três experimentos, cujos objetivos foram, a saber: 1) Avaliar o crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) e o índice de clorofila foliar, bem como os teores de nutrientes do solo, decorrentes da aplicação de doses crescentes de resíduo de granito obtido em tear multifio e duas doses de calcário; 2) Determinar o crescimento e os teores de nutrientes na parte aérea de plantas de milho, além de definir os teores de nutrientes do solo, em função de doses crescentes da mistura de lodo seco e de cinza provenientes do beneficiamento do café solúvel e duas doses de calcário; 3) Estabelecer o crescimento, a anatomia foliar e radicular, a fotossíntese, a fluorescência da clorofila, os teores foliares de clorofilas e carotenoides totais, o conteúdo de carboidratos solúveis e a concentração de nutrientes da parte aérea de plantas de milho, bem como determinar os teores de nutrientes do solo, em virtude da aplicação de uma dose de resíduo de granito obtido em tear multifio e do emprego de uma dose da mistura de lodo seco e de cinza gerados na industrialização do café solúvel, com e sem calcário. Os resultados demonstram que ambos os resíduos utilizados nos experimentos, isolados ou com aplicação de calagem, podem proporcionar, de maneira geral, incremento dos valores das variáveis analisadas. Nos experimentos 1 e 2, a aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do granito e do café elevou o pH do solo e reduziu a acidez potencial (H+Al). Além disso, os resíduos elevaram os valores de soma de bases e os teores de nutrientes no solo, como: cálcio, magnésio, manganês e cobre. Contudo, no caso da aplicação da lama granítica, essa proporcionou incremento excessivo de cobre no solo. A adição de calcário elevou o pH do solo e reduziu a H+Al. Ademais, maiores altura, diâmetro do colmo e biomassa ocorreram em relação aos tratamentos controle. Entretanto, o teor de cobre do resíduo de granito e a cafeína que compõe o resíduo de café possivelmente impossibilitaram um maior incremento dessas variáveis. No experimento 3, os tratamentos com resíduo de granito mais superfosfato simples (SS) elevaram a concentração de fósforo no solo em relação aos demais tratamentos, ao passo que os tratamentos com resíduo de café aumentaram os teores de potássio, cálcio e manganês em relação aos demais tratamentos. O uso de resíduo de granito mais SS proporcionou, em

via de regra, maiores crescimento e conteúdo de nutrientes por massa de matéria seca da parte aérea por vaso quando comparado ao uso de resíduo de café, que por sua vez, propiciou maiores valores dessas variáveis em relação a não aplicação de resíduos. A adição de calcário tendeu a elevar os valores de soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação de bases, bem como de alguns nutrientes, em relação a não adição de calcário. Além disso, a calagem tendeu a elevar o pH e a reduzir a H+Al, mas em pequena magnitude. Em geral, a aplicação de ambos os resíduos propiciaram o incremento das variáveis anatômicas, de trocas gasosas, da fluorescência transiente e modulada da clorofila *a*, de teor de clorofila *a* e de carboidratos solúveis totais quando comparada a não aplicação de resíduos. O resíduo de beneficiamento do granito via fio diamantado mais SS pode ser utilizado na dose de 10 t ha^{-1} e o resíduo de beneficiamento do café pode ser usado na dose de 29 t ha^{-1}, favorecendo o crescimento inicial adequado das plantas de milho, porém, em maior evidência no caso do uso do resíduo de granito mais SS. Portanto, pode-se afirmar que a utilização agrícola desses materiais é uma opção ecologicamente correta e economicamente viável, que possibilita benefícios a todas as partes envolvidas na sua geração e descarte.

Palavras-chave: Cinza de café, crescimento, fertilizante alternativo, fio diamantado, lodo seco.

ABSTRACT

The sectors for the processing of ornamental stones and coffee are relevant to the economy of Espírito Santo. However, such industrial activities produce tons of waste daily and their reuse is a way to promote the sustainability of productive processes. The use of these residues in agriculture as sources of nutrients for plants is a process that requires studies that identify their influence on plant growth and soil attributes. Thus, this work is the product of three experiments, whose objectives were: 1) To evaluate the growth of maize plants (*Zea mays* L.) and leaf chlorophyll index, as well as the soil nutrient contents, due to application of increasing doses of granite processing waste obtained in multi wire saw and two liming levels; 2) To determine the growth and nutrient content in the aerial parts of maize plants, as well as to define the soil nutrient contents, in function of increasing doses of the mix of dry sludge and ash from the industrial processes of soluble coffee and two liming levels; 3) To establish growth, foliar and root anatomy, photosynthesis, chlorophyll fluorescence, leaf chlorophyll and total carotenoid content, soluble carbohydrate content and nutrient concentration of aerial parts of maize plants, as well as determine the soil nutrient contents due to the application of a dose of granite processing waste obtained in multi wire saw and the use of a dose of the mix of dry sludge and ash from industrial processes of soluble coffee with and without lime. The results show that both residues used in the experiments, without or with lime, can generally increase the values of the analyzed variables. In experiments 1 and 2, the application of increasing doses of the granite and coffee processing waste induced an increase on soil pH and a reduction on potential acidity (H+Al). In addition, the residues increased the sum of bases and soil nutrient contents, such as calcium, magnesium, manganese and copper. However, in the case of the application of granite processing waste, this provided an excessive increase of copper in the soil. The lime increased soil pH and reduced H+Al. Besides that, higher height, stem diameter and biomass occurred in relation to the control treatments. However, the copper content of granite processing waste and the caffeine of coffee processing waste may have made it impossible to increase these variables. In the experiment 3, the treatments with granite processing waste plus simple superphosphate (SS) increased the phosphorus concentration in the soil in relation to the other treatments, while the treatments with coffee processing waste increased the contents of potassium, calcium and manganese in relation to the other treatments. The use of granite processing waste plus SS provided, as a rule, higher growth and nutrient content by mass of dry matter of the aerial part per vessel when compared to the use of coffee processing waste, which, in turn, provided

higher values of these variables in relation to non-application of waste. The addition of lime tended to increase the values of sum of bases, cation exchange capacity and base saturation, as well as some nutrients, in relation to the non-addition of lime. In addition, liming tended to increase pH and reduce H+Al, but at a small magnitude. Generally, the application of both residues allowed the increment of the anatomical variables, gas exchanges, chlorophyll *a* fluorescence, chlorophyll *a* content and total soluble carbohydrates when compared to non-application of residues. The granite processing waste of diamond multi wire saw plus SS can be used at a dose of 10 t ha^{-1} and the coffee processing waste can be used at 29 t ha^{-1}, favoring the adequate initial growth of the maize plants, however, in greater evidence in the case of the use of the granite processing waste plus simple SS. Therefore, it can be affirmed that the agricultural use of these materials is an ecologically correct and economically viable option, which provides benefits to all parties involved in its generation and disposal.

Keywords: Alternative fertilizer, coffee ash, diamond multi wire saw, dry sludge, growth.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Estimativa de valores de pH, H+Al ($cmol_c$ dm^{-3}), saturação por bases (V, %) e soma de bases (SB, $cmol_c$ dm^{-3}) no solo, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de granito (RG), em dois níveis de calagem. Equações não apresentadas representam ŷ = y; **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. 52

Figura 2. Estimativa de teores de Cu, Mn, Mg^{2+} e Ca^{2+} no solo, em mg dm^{-3}, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de granito (RG), em dois níveis de calagem. Equação não apresentada representa ŷ = y; **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. 53

Figura 3. Estimativa de teores de matéria orgânica (MO, dag kg^{-1}), Zn, Fe e B (mg dm^{-3}), no solo, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de granito (RG), em dois níveis de calagem. Equações não apresentadas representam ŷ = y; **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente..... 54

Figura 4. Estimativa de valores de altura de plantas (cm), diâmetro do colmo (DC, mm), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA, g) e massa de matéria seca de raízes (MSR, g), decorrentes da aplicação de doses crescentes de resíduo de granito (RG), em dois níveis de calagem. Equações não apresentadas representam ŷ = y; **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente..... 55

CAPÍTULO 2

Figura 1. Estimativa de valores de pH, H+Al ($cmol_c$ dm^{-3}), saturação por bases (V, %) e soma de bases (SB, $cmol_c$ dm^{-3}) no solo, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. 71

Figura 2. Estimativa de valores de CTC efetiva (t, $cmol_c$ dm^{-3}), CTC a pH 7,0 (T, $cmol_c$ dm^{-3}) e matéria orgânica (dag kg^{-1}), decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. 72

Figura 3. Estimativa de valores de K (mg dm^{-3}), Mg^{2+} ($cmol_c$ dm^{-3}) e Ca^{2+} ($cmol_c$ dm^{-3}), decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. 73

Figura 4. Estimativa de valores de Cu, Mn e Zn (mg dm^{-3}), decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. 74
Figura 5. Estimativa de valores de altura de planta (altura, cm) aos 7 (altura 1), 28 (altura 2) e 39 (altura 3) dias de experimento, após o desbaste das plantas, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. 75
Figura 6. Estimativa de valores de diâmetro do colmo (DC, mm) aos 7 (DC 1), 28 (DC 2) e 39 (DC 3) dias de experimento, após o desbaste das plantas, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. 76
Figura 7. Estimativa de valores de massa de matéria seca de parte aérea (MSPA, g), massa de matéria seca de raiz (MSR, g) e comprimento da folha maior (COMPF, cm), decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente. 77

CAPÍTULO 3

Figura 1. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a anatomia foliar de plantas de milho. (A-F) Secções transversais. (A-B) Tratamentos controle absoluto (T1) e somente calcário (T2), respectivamente. (C-D) Tratamentos resíduo de granito + superfosfato simples (T3) e resíduo de granito + superfosfato simples + calcário (T4), respectivamente. (E-F) Tratamentos resíduo de café (T5) e resíduo de café + calcário (T6), respectivamente. As barras são iguais a 100 µm. Epiderme adaxial = EPAD; epiderme abaxial = EPAB. 105
Figura 2. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a nervura mediana foliar de plantas de milho. (A-F) Secções transversais. (A-B) Tratamentos controle absoluto (T1) e somente calcário (T2), respectivamente. (C-D) Tratamentos resíduo de granito + superfosfato simples (T3) e resíduo de granito + superfosfato simples + calcário (T4), respectivamente. (E-F) Tratamentos resíduo de café (T5) e resíduo de café + calcário (T6), respectivamente. As barras são iguais a 100 µm. 106
Figura 3. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a anatomia

radicular de plantas de milho. (A-F) Secções transversais. (A-B) Tratamentos controle absoluto (T1) e somente calcário (T2), respectivamente. (C-D) Tratamentos resíduo de granito + superfosfato simples (T3) e resíduo de granito + superfosfato simples + calcário (T4), respectivamente. (E-F) Tratamentos resíduo de café (T5) e resíduo de café + calcário (T6), respectivamente. As barras são iguais a 100 µm. EP = epiderme; córtex = CX; metaxilema = MX; cilindro vascular = CV. 107

Figura 4. Variáveis da fluorescência da clorofila a obtidos a partir do Teste JIP em folhas expostas ao resíduo de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e ao resíduo de beneficiamento do café, na ausência e na presença de calcário. Os valores foram normalizados utilizando o controle absoluto (=1) como referência e igual à unidade (n=5)..... 110

Figura 5. Curvas da indução rápida da fluorescência variável relativa da clorofila a (WOP = $(F_t-F_0)/(FM-F_0)$) e as diferenças cinéticas normalizadas observadas em folhas expostas ao resíduo de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e ao resíduo de beneficiamento do café, na ausência e na presença de calcário ($\Delta WOP = WOP_{tratamento} - WOP_{controle}$). O tempo está representado em escala logarítmica (ms) (n=5)..... 111

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Resultados analíticos da amostra de solo utilizada como substrato no experimento antes da aplicação dos tratamentos. 49
Tabela 2. Características físicas do solo utilizado como substrato no experimento antes da aplicação dos tratamentos. 49
Tabela 3. Caracterização do resíduo de beneficiamento do granito (RG) utilizado no experimento. 49

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Resultados analíticos da amostra de solo utilizada no experimento antes da aplicação dos tratamentos. 68
Tabela 2. Características físicas do solo utilizado como substrato no experimento antes da aplicação dos tratamentos. 68
Tabela 3. Caracterização dos resíduos de café, cinza e lodo seco, utilizados no experimento. 68

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Descrição das misturas utilizadas no experimento e sigla de seus respectivos tratamentos. 90
Tabela 2. Resultados analíticos da amostra de solo utilizada no experimento antes da aplicação dos tratamentos. 90
Tabela 3. Características físicas do solo utilizado como substrato no experimento antes da aplicação dos tratamentos. 90
Tabela 4. Caracterização do resíduo de beneficiamento do granito (RG) utilizado no experimento. 91
Tabela 5. Caracterização dos resíduos de café, cinza e lodo seco, utilizados no experimento. 91
Tabela 6. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre os teores de nutrientes do solo após o experimento. 98

Tabela 7. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre os teores de macro e micronutrientes da parte aérea de plantas de milho. 99
Tabela 8. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre o conteúdo absoluto de macro e micronutrientes na massa de matéria seca da parte aérea por vaso. 100
Tabela 9. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre altura, diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), área foliar total (AFT), área foliar unitária (AFU), área foliar específica (AFE), massa de matéria seca foliar total (MSF total), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), massa de matéria seca radicular (MSR), massa de matéria seca do colmo (MSC), massa de matéria seca total (MST), massa foliar específica (MFE), razão de área foliar (RAF), razão raiz/parte aérea (R:PA), razão de massa foliar (RMF), razão de massa do colmo (RMC), razão de massa radicular (RMR), taxa de assimilação líquida de carbono (TAL), taxa de crescimento relativo (TCR) e teor de água foliar (TAF) de plantas de milho, além do Índice de Qualidade de Dickson (IQD). 102
Tabela 10. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a anatomia foliar e radicular de plantas de milho. 104
Tabela 11. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre as concentrações de clorofilas e de carotenoides em folhas de plantas de milho. 108
Tabela 12. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre as variáveis de fluorescência da clorofila *a* de plantas de milho. 110
Tabela 13. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a assimilação líquida de CO_2 (A), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO_2 (Ci), transpiração (E), eficiência do uso da água (A/E), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) e eficiência intrínseca de uso da água (A/g_s) de plantas de milho. 112
Tabela 14. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre as concentrações de carboidratos solúveis de folhas de plantas de milho. 113

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL 19
2. OBJETIVO GERAL 22
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 22
4. REFERÊNCIAS 23
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 25
5.1 Beneficiamento do granito e o reuso dos resíduos na agricultura 25
5.2 Beneficiamento do café e o reuso dos resíduos na agricultura 26
5.3 Zea mays L. 29
5.4 Morfologia, anatomia e fisiologia: solo e planta 30
5.4.1 Análises químicas do solo e de nutrientes da parte aérea 30
5.4.2 Morfologia 31
5.4.3 Anatomia 32
5.4.4 Fisiologia 32
6. REFERÊNCIAS 35
CAPÍTULO 1 – EFEITOS DE CONCENTRAÇÕES CRESCENTES DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DO GRANITO NO TEOR DE NUTRIENTES DO SOLO, NO CRESCIMENTO E NO ÍNDICE DE CLOROFILA DE PLANTAS DE *ZEA MAYS* L. 45
RESUMO 45
1. INTRODUÇÃO 46
2. MATERIAL E MÉTODOS 48
2.1 Área de estudo e instalação do experimento 48
2.2 Análise química do solo 49
2.3 Análises de crescimento 50
2.4 Índice de clorofila 50
2.5 Análises estatísticas 50
3. RESULTADOS 51
3.1 Análise química do solo 51
3.2 Análises de crescimento 54
3.3 Índice de clorofila 55
4. DISCUSSÃO 56
5. CONCLUSÕES 60

6. REFERÊNCIAS 61
CAPÍTULO 2 – EFEITOS DE DOSES CRESCENTES DE RESÍDUO DE CAFÉ NO TEOR DE NUTRIENTES DO SOLO E NO CRESCIMENTO E TEOR DE NUTRIENTES DA PARTE AÉREA DE PLANTAS DE *ZEA MAYS* L. 64
RESUMO 64
1. INTRODUÇÃO 65
2. MATERIAL E MÉTODOS 67
2.1 Área de estudo e instalação do experimento 67
2.2 Análise química do solo 68
2.3 Análises de macro e micronutrientes da parte aérea 69
2.4 Análise de crescimento 69
2.5 Análises estatísticas 69
3. RESULTADOS 70
3.1 Análise química do solo 70
3.2 Análises de macro e micronutrientes de parte aérea 74
3.3 Análises de crescimento 74
4. DISCUSSÃO 78
5. CONCLUSÕES 81
6. REFERÊNCIAS 82
CAPÍTULO 3 – EFEITOS DOS RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DO CAFÉ E DO GRANITO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE FERTILIDADE DO SOLO E SOBRE A MORFOANATOMIA E A FISIOLOGIA DE PLANTAS DE *ZEA MAYS* L. 85
RESUMO 85
1. INTRODUÇÃO 87
2. MATERIAL E MÉTODOS 89
2.1 Área de estudo e instalação do experimento 89
2.2 Análise química do solo 91
2.3 Análise de macro e micronutrientes da parte aérea 91
2.4 Conteúdo absoluto de macro e micronutrientes na massa de matéria seca da parte aérea por vaso 92
2.5 Análise de crescimento vegetal 92
2.6 Anatomia vegetal 93
2.7 Extração e determinação de clorofilas e carotenoides totais 93
2.8 Fluorescência da clorofila a 94

2.9 Trocas gasosas 94
2.10 Extração de carboidratos solúveis 95
2.11 Análises estatísticas 95
3. RESULTADOS 96
3.1 Análises químicas do solo 96
3.2 Análises de macro e micronutrientes da parte aérea 98
3.3 Conteúdo de macro e de micronutrientes totais na massa de matéria seca de parte aérea total por vaso 99
3.4 Análises de crescimento 100
3.5 Anatomia vegetal 103
3.6 Extração e determinação de clorofilas e de carotenoides totais 108
3.7 Fluorescência da clorofila a 109
3.8 Trocas gasosas 111
3.9 Quantificação de carboidratos solúveis: glicose, frutose e sacarose 112
4. DISCUSSÃO 114
5. CONCLUSÕES 129
6. REFERÊNCIAS 130

1. INTRODUÇÃO GERAL

No estado do Espírito Santo, os setores de rochas ornamentais e de café são considerados importantes para a economia capixaba. Entretanto, com o aumento da produtividade, elevam-se também as preocupações com a quantidade de resíduos produzidos. Assim, o reuso de resíduos é um tema que se destaca por sua forte contribuição na sustentabilidade dos processos produtivos.

O Brasil é o quarto maior produtor de rochas ornamentais do mundo (MONTANI, 2017). O saldo entre a produção e o balanço comercial (exportação menos importação) de rochas ornamentais no Brasil no ano de 2016 resultou em cerca de 7,5 milhões de toneladas de blocos de rochas disponíveis para serem trabalhadas, das quais aproximadamente 40% são resíduos, resultado do desdobramento de blocos em chapas e do beneficiamento com polimento das peças serradas (ABIROCHAS apud MONTANI, 2017).

Em relação ao café, o Brasil é o maior produtor mundial (ICO, 2018). No processo de industrialização dos grãos do fruto, toneladas de resíduos sólidos e líquidos são geradas, e os tipos e as quantidades dependem boa parte do método de processamento utilizado (vias úmida, seca ou semiúmida). Segundo Adams e Ghaly (2007) e Cleves (2009), aproximadamente 92% dos frutos do cafeeiro são considerados resíduos. Dentre os tipos de resíduos, pode-se citar a borra obtida no processo de fabricação do café solúvel; cerca 1 tonelada de café cru libera 480 kg de borra (CLARKE; MACRAE, 1987; PUJOL, 2013). Outro tipo de resíduo é a cinza, produzida quando cascas (DULTRA, 2013) ou borra de café (VIOTTO, 1991; ADANS; DOUGAN, 1985) são queimadas com a finalidade de produzir energia para os processos de beneficiamento. Para que a borra possa ser utilizada como combustível nas caldeiras, ela precisa passar por um processo de secagem, eliminando o excesso de umidade, o que gera resíduos líquidos (VIOTTO, 1991). Esses últimos podem passar por um preparo em estações de tratamento dando origem ao lodo seco.

Os resíduos gerados são, frequentemente, descartados de maneira inadequada e podem alcançar os recursos hídricos e até mesmo os reservatórios naturais de água, o que provoca problemas de assoreamento e também contaminação da água e do solo (CALMON; SILVA, 2006; RIGUEIRA et al., 2010).

Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela lei n° 12.305/2010 (BRASIL, 2010), atribui responsabilidade da gestão dos resíduos às entidades públicas, sociedade civil e setor empresarial, e prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável, além da

destinação ambientalmente adequada dos resíduos - aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado - por meio da reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, entre elas a disposição final. Quanto à disposição adequada dos rejeitos - aquilo que não pode ser reciclado ou reutilizado -, a distribuição é ordenada em aterros. Todas essas destinações devem observar as normas operacionais específicas, de maneira a prevenir danos ou riscos à saúde da população e reduzir os impactos ambientais adversos. Desse modo, se manejados adequadamente, os resíduos adquirem valor comercial e podem ser utilizados em forma de novas matérias-primas. O reuso de resíduos se apresenta, portanto, como uma prática viável para diminuir o volume de resíduos e promover adequada preservação ambiental, além de aumentar o retorno financeiro.

Pode-se citar o aproveitamento dos resíduos advindos do beneficiamento do granito e do café como fontes alternativas de nutrientes para plantas, que é um processo que exige estudos para identificar suas influências no crescimento das culturas e nos teores de nutrientes do solo. Há pesquisas que apontam o uso do resíduo de granito na agricultura como corretivo de acidez de solo (COSTA et al., 2010) e adubo (THEODORO; LEONARDOS, 2006), bem como a utilização de borra do café como fertilizante orgânico, por oferecer às plantas riqueza nutricional e permitir ainda melhoria nas qualidades químicas, físicas e biológicas do solo (CLAUDE, 1979; LEITE et al., 2011; CRUZ, 2015). Além disso, os recursos minerais que fornecem fósforo e potássio utilizados na produção dos adubos convencionais são finitos (LOPES et al., 2007). Portanto, do ponto de vista ambiental, o reuso de resíduos na agricultura pode diminuir a necessidade dos adubos minerais.

Logo, o objetivo do presente estudo foi determinar o crescimento de plantas de milho (Z*ea mays* L.) e os teores de nutrientes do solo decorrentes da aplicação do lodo seco e da cinza, bem como da lama granítica, provenientes dos beneficiamentos do café instantâneo e do granito, respectivamente.

A presente tese foi dividida em três capítulos. No primeiro capítulo, verificou-se o crescimento das plantas de milho e as condições do solo de acordo com doses crescentes de resíduo de beneficiamento de granito via fio diamantado. No segundo capítulo, investigou-se o efeito das concentrações crescentes de resíduos de café na proporção cinza : lodo seco (1:1) sobre o crescimento/nutrição de plantas de milho e sobre os teores de nutrientes do solo. O último capítulo da tese traz um estudo comparativo entre o controle e duas doses de resíduos, uma de granito e uma de café, com e sem aplicação de calcário, sobre o crescimento e os

aspectos funcionais das plantas de milho, além da influência sobre os teores de nutrientes do solo.

2. OBJETIVO GERAL

Determinar o crescimento do milho (Z*ea mays* L.) e os teores de nutrientes do solo decorrentes da aplicação do lodo seco e da cinza do beneficiamento de café e do resíduo de beneficiamento do granito.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

I. Determinar as características químicas do solo e as variáveis relevantes de desempenho agrícola: crescimento e teor de clorofila de plantas de milho (*Zea mays* L.) em função de concentrações crescentes de lama de beneficiamento do granito e duas doses de calcário.

II. Determinar as características de crescimento e os teores de nutrientes na parte aérea de plantas de milho (*Zea mays* L.), bem como os teores de nutrientes do solo em consequência da aplicação de doses crescentes da mistura de lodo seco e de cinza provenientes do beneficiamento do café e duas doses de calcário.

III. Estabelecer os teores de nutrientes do solo, bem como a concentração de nutrientes da parte aérea, o crescimento, a anatomia foliar e radicular, a fluorescência da clorofila, as taxas fotossintéticas, os teores foliares de clorofilas e carotenoides totais e os conteúdos foliares de carboidratos solúveis de plantas de milho (*Zea mays* L.), decorrentes da aplicação de resíduo de granito e da mistura de lodo seco e de cinza, na presença e na ausência de calcário, por meio das medidas das variáveis de: teores de nutrientes da parte aérea e do solo, crescimento, estrutura das folhas e raízes, concentrações de pigmentos fotossintéticos, transiente da fluorescência da clorofila *a*, trocas gasosas e fotoassimilados.

4. REFERÊNCIAS

ADAMS, M.; GHALY, A.E. Maximizing sustainability of the Costa Rican coffee industry. **Journal of Cleaner Production**, v.15, p.1716–1729, 2007.

ADANS, M. R.; DOUGAN, W. **Waste products:** coffee technology. Londres: Elsevier Applied Science, 1985.

BRASIL. Lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Brasília. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 9 fev. 2018.

CALMON, J.L.; SILVA, S.A.C. da. Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: DOMINGUES, A.F.; BOSON, P.H.G.; ALÍPAZ, S.A. (Eds.). **A gestão de recursos hídricos e a mineração**. Brasília: Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), 2006. p.199-231.

CLARKE, R. J.; MACRAE, R. **Coffee volume 2:** Technology. 1. ed. New York: Elsevier Science Publishers, 1987.

CLAUDE, B. Étude bibliographique: utilisation dês sous-produits du café. **Café, Cacao, Thé**, v.23, n.2, p.146-152, 1979.

CLEVES, R. Ecological processing of coffee and use of byproducts. In: WINTGENS, J.N. (Ed.). **Coffee:** Growing, Processing, Sustainable Production. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. p. 725–738.

COSTA, A.S.V. da et al. Uso do resíduo de granito oriundo da serraria e polimento como corretivo e fertilizante de solos agrícolas. **Geonomos**, v.18, n.1, 2010.

CRUZ, S.A.F. **Avaliação do potencial da borra de café fresca na mineralização do nitrogênio e do fósforo em culturas hortícolas**. 2015. 59 f. Dissertação (Mestrado em Instituto Superior de Agronomia), Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

DULTRA, E.J.V. **Adição de subprodutos da cinza da casca de café (*coffea canephora*) em massa cerâmica para porcelanato**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

International Coffee Organization. Disponível em: <www.ioc.org/trade_statistics.asp>. Acesso em: 9 jan. 2018.

LEITE, S.T. et al. A compostagem como alternativa para aproveitamento da borra de café. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.7, n.13, p.1068, 2011.

LOPES, A.S.; BASTOS, A.R.R.; DAHER, E. Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados e sulfatados na agricultura brasileira: uma visão do futuro. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira.** Piracicaba: INPI Brasil, p. 161-187, 2007.

MONTANI, C. **XXVIII RapportoMarmo e Pietrenel Mondo 2017 (XXVIII World Marble and Stones Report 2017)**. Carrara: Aldus, 2017.

PUJOL, D. et al. The chemical composition of exhausted coffee waste. **Industrial Crops and Products**, v.50, p. 423-429, 2013.

RIGUEIRA, R.J.A.; LACERDA FLHO, A.F.; MATOS, A.T. Alteração nas características físicas, químicas e bioquímicas da água no processo de lavagem, despolpa e desmucilagem de frutos do cafeeiro. **Engenharia na Agricultura**, v.18, n.2, p.131-139, 2010.

VIOTTO, L.A., **Projeto e avaliação econômica de sistemas de secagem de borra de café**. 1991. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

THEODORO, S.; LEONARDOS, O.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.78, n.4, p.721-730, 2006.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Beneficiamento do granito e o reuso dos resíduos na agricultura

O Brasil é o quarto maior produtor de rochas ornamentais do mundo e fica atrás somente da China, Índia e Turquia (MONTANI, 2017), sendo o estado do Espírito Santo (ES) o principal produtor e maior processador e exportador de rochas ornamentais do país, com dois pólos importantes em Cachoeiro de Itapemirim e em Nova Venécia (RUBEN FILHO et al, 2013). A diferença entre a produção e o balanço comercial (exportação menos importação) de rochas ornamentais brasileiras no ano de 2016 resultou em aproximadamente 7,5 milhões de toneladas de blocos de rochas disponíveis para serem trabalhados, das quais foram geradas 4,4 milhões de toneladas de produtos manufaturados e 3,1 milhões de toneladas de resíduos no país, resultado do beneficiamento das rochas. No mundo, em 2016, foram produzidas aproximadamente 59,4 milhões de toneladas de resíduos provenientes do processamento de rochas ornamentais (ABIROCHAS apud MONTANI, 2017).

A lama granítica, resultante dos processos de desdobramento de blocos de granito em chapas e de beneficiamento com polimento das peças serradas, resultando em produtos acabados para o mercado, é geralmente classificada como não biodegradável de classe II B – inertes (ABNT NBR 10004/04). Esse resíduo pode ser de dois tipos, a depender da tecnologia empregada: 1) resíduo produzido nos teares convencionais (multilâminas), que é uma lama composta por rocha, cal, água, granalha de aço ou de ferro e lâmina desgastada; 2) lama dos teares que utilizam a tecnologia do corte com fio diamantado (multifios), formada basicamente por água, pó de rocha e alguns micro cristais de diamante que podem vir a se desprender do fio diamantado (BRAGA et al., 2010). Nessa última técnica, o corte da rocha é mais preciso e, assim, produz menos resíduo (FILGUEIRA, 2001), no entanto, o aumento da capacidade produtiva e de exportação faz com que a quantidade de resíduo produzido continue elevada.

Os resíduos de granito são caracterizados na maioria das vezes como contaminantes e são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana, e, portanto, não devem ser lançados na rede pública de esgotos ou corpos de água. Entretanto, com frequência, são depositados no ambiente de modo inadequado, em tanques sem a devida impermeabilização, ou em alguns casos, são lançados diretamente em cursos de água, o que causa poluição, assoreamento, alteração da cor e do pH, gerando prejuízos à fauna e à flora (CALMON; SILVA, 2006).

Ainda, a poeira gerada pela lama granítica quando seca pode provocar silicose, doença pulmonar causada pela inalação de finas partículas de sílica cristalina.

Se manuseados adequadamente, os resíduos adquirem valor comercial e podem ser utilizados como novas matérias-primas. Nesse cenário, pesquisas têm objetivado o reaproveitamento de resíduo de granito na produção de blocos pré-moldados para alvenaria de vedação (MOURA; LEITE, 2011), cerâmica vermelha (MOREIRA et al., 2005), cimento, produção de fibras para isolamento termo-acústico (ALVES et al., 2015) e tijolos (MADIVATE et al., 2012). Além disso, estudos apontam seu reuso na agricultura como corretivo de acidez de solo (COSTA et al., 2010) e como fertilizante por conter nutrientes como magnésio, potássio e cálcio essenciais às plantas (GUARÇONI; FANTON, 2011). Isso indica a utilização do resíduo de granito como uma oportunidade de fornecer nutrição adequada às culturas vegetais. Ainda, o reaproveitamento por si só já é um possível modo de diminuir custos com insumos pelos agricultores, pois se trata do uso de um material com potencial para a agricultura que seria descartado. Ademais, há o interesse das próprias empresas do ramo de rochas ornamentais no reaproveitamento do resíduo gerado por elas, pois isso aumentaria o valor adicionado da indústria e, por consequência, diminuiria o número de aterros onde são dispostos os resíduos, que muitas vezes é fator limitante (MONTANI, 2017).

Portanto, o uso do resíduo de granito se apresenta como uma alternativa viável, refletindo positivamente no âmbito social, econômico e ambiental, pois diminui os impactos provocados pela disposição inadequada dos resíduos, diminui a dependência brasileira por fertilizantes minerais, no caso do reaproveitamento como adubos, e ainda aumenta o retorno financeiro industrial. Contudo, esse aproveitamento de resíduo como fonte alternativa de nutrientes para plantas é um processo que necessita de pesquisas para apontar suas consequências sobre o crescimento vegetal e sobre os teores de nutrientes do solo.

5.2 Beneficiamento do café e o reuso dos resíduos na agricultura

Em relação à produção do café, o Brasil está em primeiro lugar, além de ser também o maior exportador, de acordo com a Organização Internacional do Café (ICO, 2018). Em relação às exportações da agroindústria brasileira, o café teve uma receita de aproximadamente US$ 6,15 bilhões em 2015. Desse valor, cerca de 90% representam vendas de café cru e apenas uma pequena participação é dada pelos subsetores de café beneficiado: solúvel e torrado/moído (ABIC, 2016). É importante ressaltar que 50% da produção mundial

de café é processada em café solúvel (ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012). O ES é o segundo maior produtor de café do país, depois de Minas Gerais, no entanto, é o maior produtor de café conilon, segundo estimativa da Companhia Nacional de Abastecimento. O mesmo padrão ocorre para o café beneficiado, sendo o ES o segundo maior produtor nacional (CONAB, 2017).

Quanto ao processo de beneficiamento pós-colheita do café, são geradas diariamente toneladas de resíduos orgânicos agroindustriais, normalmente classificados como II A – não inerte (ABNT NBR 10004/04); cerca de 5,5 kg de café em coco são necessários para obter 1 kg de grãos beneficiados no processamento úmido, isto é, aproximadamente 82% dos frutos são considerados resíduos e 18% são grãos beneficiados (ADAMS; GHALY, 2007; CLEVES, 2009). Conforme Dias et al., (2014), pode-se inferir que 25 toneladas de águas residuais são geradas por tonelada de grãos beneficiados e 1,1 tonelada de resíduos sólidos (casca, polpa, mucilagem, pergaminho, película prateada, borra de café) é produzida por tonelada de grãos de cafés.

Após a colheita, os frutos do cafeeiro podem passar por tipos distintos de processamento, que geram tipos diferentes de resíduos (DURÁN et al., 2016), a saber: 1) Via seca (gera cascas, pergaminho e outros); 2) Via úmida (gera folhas, paus, casca, mucilagem, polpa, água residuária, pergaminho); 3) Via semiúmida, uma variável do processo pela via úmida. Após esses processamentos, os grãos são armazenados e depois submetidos à torrefação.

Especialmente, a borra de café, que equivale a aproximadamente 50% do café torrado na indústria do café solúvel (PUJOL et al., 2013; CLAUDE, 1979), é o resíduo obtido quando grãos passam por uma fase de extração de sólidos solúveis e compostos voláteis por meio de água quente (175 °C) e posterior realização da etapa de concentração e secagem até obtenção do produto desejado (MUSSATTO, 2011). Os resíduos eliminados de todo processo de compressão da borra podem passar por um preparo em estações de tratamento, o que resulta na formação de lodo seco. Já a cinza, é o resíduo obtido quando cascas (DULTRA, 2013) ou borra de café (VIOTTO, 1991) são queimadas nas caldeiras a fim de produzir energia para os processos de industrialização do fruto.

Os resíduos de café, em seus diferentes tipos, que não são aproveitados, podem constituir uma fonte de contaminação ambiental quando não tratados de modo adequado (VENTURIM, 2002; MATOS et al., 2007; FIA et al., 2010), pois possuem matéria orgânica, além de compostos tóxicos como cafeína, taninos e polifenóis (FAN; SOCCOL, 2005; MUSSATTO et al., 2011, BRITO, 2013), que podem ameaçar a vida aquática quando

despejados diretamente nos cursos hídricos, devido à hipóxia. Além disso, há um alto teor de minerais (DULTRA, 2010), açúcares e proteínas, que formam um meio favorável para o desenvolvimento de micro-organismos, contribuindo para problemas ambientais (RATTAN et al., 2015).

Simultaneamente, as diferentes maneiras de aplicações dos resíduos criam uma oportunidade para melhorar a eficiência econômica do processamento do café (DURÁN et al., 2016), evitando suas deposições em aterros (MORENO, 2001) ou inadequadamente no meio ambiente.

Para o resíduo de café, podem-se apontar a inclusão da borra na ração para alimentação de peixe (PIMENTA et al., 2011), formulação de biscoitos (MARTINEZ-SAEZ et al., 2017), aproveitamento na modelagem de briquetes (SOARES et al., 2015), produção de carvão ativado (JUNG et al., 2016), fabricação de roupas (PRS, 2013) e botões (LOUROPEL, 2014), além de ser frequentemente usada na geração de energia em caldeiras para secadores mecânicos (FARIA, 2016). Outros estudos apontam a borra como substrato excelente para a produção de cogumelos (FAN et al., 2000). Além disso, a borra é um dos recursos mais abundantes no mundo para o uso como energia limpa na produção de biodiesel por apresentar conteúdo de óleo elevado (KONDAMUDI et al., 2008; JENKINS et al., 2017). Outra aplicação dos subprodutos do café (polpa, casca, mucilagem) é a produção de enzimas (MURTHY; NAIDU, 2012; PANDEY et al., 2000). A cafeína obtida dos resíduos da produção de café descafeinado pode ser usada de modo alternativo na indústria farmacêutica (DURÁN et al., 2016). Na agricultura, o reuso de resíduo de café em suas diferentes formas tem sido pesquisado por alguns autores: Tango (1971) indica a borra de café como adubo orgânico; Lo Monaco et al. (2007) sugerem o uso de águas residuárias do processamento dos frutos do cafeeiro na fertirrigação da cultura do próprio cafeeiro; Mendonça et al. (2014) recomendam o aproveitamento da palha do café como substrato na produção de mudas por apresentar permeabilidade, retenção de umidade e disponibilidade de nutrientes; Meneghelli e colaboradores (2016) indicam o uso de resíduo gerado na etapa de secagem de grãos de café (folhas, galhos, restos de inflorescências e grãos mal formados) como substrato alternativo para mudas de café conilon; Leite et al. (2011) indicam a borra do café como fertilizante orgânico a partir da compostagem, por oferecer as plantas nutrientes permitindo ainda melhoraria das qualidades químicas, físicas e biológicas do solo; Cruz et al. (2012) demonstraram que o teor de clorofila pode ser elevado pela presença de pequenas quantidades de borra de café fresca no meio de cultura; Borra (1993) citado por Vegro e Carvalho (1994) menciona a aplicação no solo de lodo proveniente do tratamento dos resíduos líquidos

advindos da produção do café instantâneo; a decantação e subsequente lançamento do lodo no solo é processo que apresentou resultados bons, pois há uma boa incorporação do resíduo ao solo.

Existem também estudos que apontam o uso de cinza de biomassa vegetal, produto resultante da queima de vegetais quando da combustão incompleta e variável da madeira na agricultura. A aplicação da cinza contribui para melhorias nas propriedades químicas e físicas do solo, por elevar o pH, reter a água e fornecer nutrientes às plantas (JORDAN et al., 2002; BRUNELLI; PISANI JÚNIOR, 2006), além de elevar o crescimento das plantas (ARRUDA et al., 2016).

Desse modo, o resíduo de café, em suas diversas formas, possui elevado potencial fertilizante, apresentando-se como uma alternativa à adubação convencional, que vem se tornando cada vez mais custosa para o produtor rural. Costa e demais (2010) ressaltam que o uso de fontes alternativas de resíduos industriais ou agroindustriais elimina um problema ambiental da indústria, já que os resíduos são aproveitados e dispostos de forma adequada no meio ambiente, e, simultaneamente, promove a redução nos custos de produção da agropecuária, beneficiando toda a cadeia, do produtor ao consumidor.

Portanto, o reaproveitamento do resíduo de café se apresenta como uma alternativa possível. Todavia, sobretudo o reuso do lodo seco e da cinza como fonte alternativa de nutrientes é um processo que requer estudos que apontem seus efeitos sobre o crescimento de plantas e sobre os teores de nutrientes do solo.

5.3 Zea mays L.

Zea mays L. (milho), membro da Família Poaceae, é uma espécie anual, cespitosa, ereta, com baixo perfilhamento e com ampla adaptação a diferentes condições de ambiente. É classificada no grupo das plantas C4, com alta eficiência na utilização da luz, e tem todas as características típicas de uma C4, tais como: anatomia Kranz (DOWNTON, 1975), atividade elevada da fosfoenolpiruvato carboxilase (PEP), alta taxa fotossintética líquida (BLACK et al., 1971), ponto de compensação de CO_2 baixo (KRENZER et al., 1975), produtos fotossintéticos iniciais de quatro carbonos (KENNEDY; WILLIAMS, 1977) e uma relação 13C/12C típica das plantas C4 (REIBACH; BENEDICT, 1977).

A temperatura ideal para o desenvolvimento do milho, da emergência à floração, está compreendida entre 24 e 30ºC. Além disso, essa cultura é muito exigente em água. A radiação solar é também um dos fatores de extrema importância, sem a qual o processo fotossintético é

inibido e a planta é impedida de expressar o seu máximo potencial produtivo. Grande parte da matéria seca do milho, cerca de 90%, provém da fixação de CO_2 pelo processo fotossintético (CRUZ et al., 2006). A espécie possui elevado potencial produtivo e acentuada habilidade fisiológica na conversão de compostos minerais em orgânicos (SEVERINO et al., 2005; CRUZ et al., 2008). É utilizada amplamente em diversos ensaios morfofisiológicos como planta teste (MENCH; MARTIN, 1991) por apresentar também crescimento rápido (USDA, 2018).

5.4 Morfologia, anatomia e fisiologia: solo e planta

5.4.1 Análises químicas do solo e de nutrientes da parte aérea

Segundo Malavolta (2006), as condições do solo e a nutrição mineral de plantas estão correlacionadas com os fatores fisiológicos, estruturais e de crescimento dos vegetais. Assim, o maior teor de nutrientes do solo pode promover adequada nutrição vegetal, que por sua vez promove melhores condições de fixação de CO_2, ou seja, transformação da energia luminosa em compostos orgânicos. Essa transformação ocorre por intermédio de pigmentos fotossintéticos, presentes em teores maiores nas folhas, que estão relacionados com a quantidade de radiação solar absorvida. Tudo isso resulta em maior produção de biomassa (STREIT et al.,2005).

Ainda, de acordo com a Teoria da Nutrição Mineral de Plantas, formulada por Sprengel-Liebig, “a produção das culturas no campo aumenta ou diminui na exata proporção em que aumentam ou diminuem a quantidade de substâncias minerais que podem ser liberadas do esterco” (CANELAS et al., 2006).

Todavia, uma nutrição não adequada pode interferir negativamente o crescimento vegetal. A lei do mínimo de Sprengel-Liebig, diz que o crescimento das plantas pode ser limitado pela quantidade do nutriente mais escasso (EPSTEIN; BLOOM, 2006), ou seja, a produção de uma planta é limitada pelo nutriente que estiver em menor quantidade no solo, mesmo que os demais nutrientes estejam em quantidades adequadas. A deficiência de algum nutriente limita a produtividade, mesmo que os demais tenham sido aplicados em quantidades adequadas pelo produtor rural. A análise do solo e a análise foliar são desse modo, imprescindíveis para viabilizar a correta aplicação de fertilizantes. A suplementação de nutrientes para a planta através da adubação via solo pode afetar diretamente o crescimento da

parte aérea, do sistema radicular e conferir tolerância a pragas e doenças (HOPPE et al., 2004).

Assim, uma planta normal é aquela que tem em seus tecidos todos os nutrientes em quantidades e proporções adequadas, e é capaz de alcançar elevadas produtividades. Ademais, pode-se pressupor como normal a planta cultivada em condições controladas de nutrição, que não são expostas a restrições de crescimento e de produção quanto à quantidade e à proporção de nutrientes (MALAVOLTA et al., 1997).

Nesse contexto, a análise de solo determina quimicamente o conteúdo de nutrientes em uma amostra de solo da zona das raízes. Essa análise reflete os níveis de nutrientes potencialmente disponíveis nele para as raízes das plantas, mas não dá a informação da quantidade de determinado mineral de que a planta realmente precisa ou é capaz de absorver. Essa informação adicional é mais bem determinada pela análise de macro e micronutrientes do tecido vegetal. O uso adequado da análise de tecidos vegetais exige um conhecimento das relações entre o crescimento vegetal e a concentração de um nutriente em amostras de tecidos vegetais, pois a concentração de um nutriente nos tecidos depende do balanço entre a absorção e a diluição da quantidade do nutriente através do crescimento (TAIZ et al., 2017).

5.4.2 Morfologia

Monteith (1972) ressalta que a taxa de crescimento de um indivíduo pode ser expressa em consequência da quantidade de energia luminosa incidente, da interceptação e da transformação dessa energia em massa de matéria seca, e depende também de inúmeros fatores como temperatura, condições hídricas e de nutrição do solo. Uma maneira de avaliar a transformação de energia luminosa em energia química é mensurando a massa de matéria seca produzida pelas plantas por meio de análises destrutivas. Outra análise destrutiva que pode ser citada é a mensuração da área foliar, importante fator para determinar a produtividade de uma comunidade vegetal (WINTER; OHLROGGE, 1973; ASTEGIANO et al., 2001). Com os valores de massa de matéria seca pode-se calcular a taxa de crescimento relativo, que é uma medida apropriada para avaliar o crescimento vegetal em um intervalo de tempo predeterminado (OLIVEIRA; GOMIDE, 1986 citados por GUIMARÃES, 1994). Ademais, por meio dos valores de massa de matéria seca e de área foliar, pode-se determinar a taxa de assimilação líquida, que reflete, aproximadamente, o balanço entre o material produzido pela fotossíntese e as perdas com a respiração (MACHADO et al., 1982). Adicionalmente, a análise de crescimento não destrutiva visa também estudar o desenvolvimento das plantas,

tendo como valores primários a altura e o diâmetro do caule/colmo. Esse método é muito utilizado para investigar a influência de práticas agronômicas sobre o crescimento das plantas (CARDOSO, 2006). Assim, a análise de crescimento constitui um meio acessível e bastante preciso para compreender o comportamento vegetal (BENINCASA, 1988; SHARMA et al., 1993).

5.4.3 Anatomia

Os estudos anatômicos são de suma importância quando relacionados aos aspectos ecológicos e fisiológicos vegetal, porque oferecem detalhes da resposta estrutural da planta a determinado fator, o que contribui com informações que amparam a interpretação de outros dados obtidos sobre o comportamento da planta (SEGATTO et al., 2004). Mais especificamente, a anatomia vegetal pode ser relacionada à nutrição mineral de plantas, e estudos anatômicos podem revelar os efeitos dos níveis dos nutrientes na anatomia bem como a influência da anatomia na translocação de nutrientes (GAMA et al., 2017).

5.4.4 Fisiologia

A fotossíntese é essencial para os processos de crescimento e manutenção das formas de vida (MARENCO; LOPES, 2007). Ela pode variar devido a vários fatores, como a idade da folha, a condutância estomática e os fatores ambientais, como intensidade de luz, temperatura, disponibilidade de água, disponibilidade de nutrientes e outros.

Durante a fotossíntese, as moléculas de clorofila atuam na absorção de luz e transferência de energia e de elétrons. Assim, esses pigmentos são essenciais na conversão da radiação luminosa em energia química na forma de ATP e NADPH durante a etapa fotoquímica da fotossíntese (JESUS; MARENCO, 2008; NOBEL, 2009), sendo assim, importante a realização de sua quantificação. Entre os métodos de avaliação da clorofila, tem-se a extração com etanol 95% e determinação das concentrações segundo as equações de Lichtenthaler e Buschmann (2001). Ainda, existe o método que se vale do medidor portátil de clorofila SPAD-502 (Minolta, Japão), capaz de fornecer leituras proporcionais aos teores de clorofila presentes nas folhas (ARGENTA et al., 2001), apresentando a vantagem de mensurar de maneira rápida, prática e com baixo custo. Existem estudos que utilizam a análise de clorofila como variável indicativa de boa nutrição vegetal, maior produção de matéria seca (VALE e PRADO, 2009) e crescimento adequado de plantas (PIAS et al., 2013).

Segundo Baker (2008), a luz que chega ao fotossistema II pode seguir três caminhos distintos, que competem entre si: as reações fotoquímicas, a fluorescência da clorofila *a* e a perda por calor. Inúmeros fatores ambientais podem causar mudanças no aparato fotossintético e seus efeitos podem ser avaliados por meio da análise da fluorescência da clorofila *a* (SILVA et al., 2015), que pode fornecer informações relevantes acerca do estado fisiológico do vegetal (MAXUELL; JOHSON 2000; PERCIVAL et al., 2003), por avaliar a atividade do fotossistema II (FSII), alvo de estresses abióticos (GUIDI; DEGL'INNOCENTI, 2011; MARTINAZZO et al., 2012). Inúmeros trabalhos mostram a capacidade da análise da fluorescência da clorofila em detectar alterações na etapa fotoquímica decorrentes de fatores genéticos ou ambientais como, por exemplo, mutações e status nutricional (KALAJI et al, 2014). Com o uso de fluorômetro portátil, variáveis importantes indicadoras da eficiência fotossintética – menor fluorescência - podem ser mensuradas, como o índice de desempenho potencial do FSII (PI_{ABS}), o índice de desempenho potencial para conservação de energia a partir de um éxciton até a redução do aceptor final do FSI (PI_{TOTAL}) e o rendimento quântico máximo do FSII (F_v/F_M). O PI_{ABS} é considerado um indicador do vigor da planta permitindo uma análise ampla do fotossistema II, relativamente ao F_v/F_M, relacionando a densidade de centros de reação ativos, a eficiência de absorção de fótons, a captura de energia de excitação e a possibilidade da energia de excitação movimentar um elétron para além de quinona (Q_A) (GONÇALVES et al., 2001). Já o PI_{TOTAL}, segundo Hermans et al. (2003), é variável usada para diferenciar o comportamento fotossintético de plantas. De acordo com Iivonen e colaboradores (2001) e Kaakinen et al. (2004), de maneira geral, a maior oferta de nutrientes está relacionada ao aumento da eficiência fotoquímica (F_v/F_M) e de fotoassimilados em caules de arbóreas de regiões temperadas.

Em relação às taxas fotossintéticas, Rodrigues e colaboradores (1998) enfatizam que as mesmas podem ser mensuradas por inúmeros métodos, sendo os mais precisos aqueles que quantificam o CO_2 absorvido. Uma das técnicas refere-se à utilização do analisador de gás por infravermelho (Infra-Red Gas Analizer, IRGA), a qual permite a avaliação de diversas variáveis relacionadas às trocas gasosas, tais como assimilação líquida de CO_2, condutância estomática, concentração intracelular de CO_2 e transpiração.

Em se tratando de carboidratos solúveis (glicose, frutose e sacarose), produtos resultantes da fase bioquímica da fotossíntese (TAIZ et al., 2017), suas concentrações podem refletir o estado nutricional de plantas e estão ligados às taxas fotossintéticas (KASTORI, R. et al., 1995; SALES et al., 2012; ROBERTO, et al., 2015). Por exemplo, Silva et al. (2011)

registraram o incremento de carboidratos nas folhas de *Coffea arabica* submetidas a alta disponibilidade de fósforo no solo.

6. REFERÊNCIAS

ABIC - Associação Brasileira da Indústria de Café, 2016. Disponível em: www.abic.com.br>. Acesso em: 15 set. 2016.

ADAMS, M.; GHALY, A.E. Maximizing sustainability of the Costa Rican coffee industry. **Journal of Cleaner Production**, v.15, p.1716–1729, 2007.

ALVES, J.O et al. Resíduo do corte de granito: inovação tecnológica para a destinação final. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v.12, n.2, p.123, 2015.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. **Ciência Rural**, v.31, n.3, p.715-722, 2001.

ARRUDA, J.A. de et al. Uso da cinza de biomassa na agricultura: efeitos sobre atributos do solo e resposta das culturas. **Revista Principia**, v.1, n.30, p.18-30, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASTEGIANO, E.D.; FAVARO, J.C.; BOUZO, C.A. Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. **Investigación Agraria Producción y Protección Vegetal**, v.16, n.2, p.249-256, 2001.

BAKER, N.R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.89-113, 2008.

BENINCASA, M.M.P. **Análise de crescimento de plantas**. Jaboticabal: FUNEP, p.43, 1988.

BLACK, C.C. et al. Photosynthetic assimilation of carbon in certain higher plants. PROCEEDINGS OF SECOND INTERNATIONAL CONGRESS ON PHOTOSYNTHESIS RESEARCH. v.3, p.1745-1757, 1971.

BORRA de café vira vapor. Globo Rural, São Paulo, ano 8, v.93, n.97, 1993. In: VEGRO, C.L.R.; CARVALHO, F.C. de. **Disponibilidade e utilização de resíduos gerados no processamento agroindustrial do café**. 1994.

BRAGA, F. dos S. et al. Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.15, p.237-244, 2010.

BRITO, A.D. de. **Características químicas de resíduo de café (borra) e seu efeito em cafeeiro orgânico adensado e em plântulas de cafeeiro e tomateiro**. 2013. 122 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

BRUNELLI, A.M.M.P.; PISANI JÚNIOR, 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: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENAL , 2006, Puntadel Leste. **Anais…** Montevideo: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, v.1, p.1-9, 2006.

CALMON, J.L.; SILVA, S.A.C. da. Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: DOMINGUES, A.F.; BOSON, P.H.G.; ALÍPAZ, S.A. (Ed.). **A gestão de recursos hídricos e a mineração**. Brasília: Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), p.199-231, 2006.

CANELLAS L.P. et al. Efeitos fisiológicos de substâncias húmicas – O estímulo às H^+-ATPases. In: FERNANDES, M.S (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.175-200.

CARDOSO, G.D. et al. Uso da análise de crescimento não destrutiva como ferramenta para avaliação de cultivares de mamoneira. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, v.6, n.2, p.79-84, 2006.

CLAUDE, B. Étude bibliographique: utilisation dês sous-produits du café. **Café, Cacao, Thé**, v.23, n.2, p.146-152, 1979.

CLEVES, R. Ecological processing of coffee and use of byproducts. In:WINTGENS, J.N. (Ed.). **Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, p.725–738, 2009.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café,** v. 4, Safra 2017, n.4, Quarto levantamento, Brasília: Conab, 2017. p. 1-84.

COSTA, A.S.V. da et al. Uso do resíduo de granito oriundo da serraria e polimento como corretivo e fertilizante de solos agrícolas. **Geonomos**, v.18, n.1, 2010.

CRUZ, R. et al. Carotenoids of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown on soil enriched with spent coffee grounds. **Molecules**, v.17, n.2, p.1535-1547, 2012.

CRUZ; S.C.S. et al. Parcelamento da adubação nitrogenada na cultura do milho irrigado em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.370-375, 2008.

CRUZ, J. C. et al. **Manejo da cultura do milho.** Embrapa Milho e Sorgo - Circular Técnica. Sete Lagoas: Embrapa, 2006.

DIAS, D.R. et al. Management and utilization of wastes from coffee processing. In: SCHWAN, R. F.; FLEET, G. H. (Eds.). **Cocoa and coffee fermentations**. Boca Raton: CRC Taylor e Francis, 2014, p. 545-588.

DOWNTON, W.J.S.: Occurrence of C4 photosynthesis among plants. **Photosynthetica,** v.9, p. 96-105, 1975.

DULTRA, E.J.V. **Incorporação de cinzas de casca de café na produção de placas cerâmicas para revestimento**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

DULTRA, E.J.V. **Adição de subprodutos da cinza da casca de café**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

DURÁN, C.A.A. et al. Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida. **Revista Virtual de Química**, v.9, n.1, p.107-134, 2016.

ESQUIVEL, P.; JIMÉNEZ, V. M. Functional properties of coffee and coffee by-products. **Food Research International**, v.46, n.2, p.488-495, 2012.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas**: princípios e perspectivas. Londrina: Editora Planta, 2006.

FAN, L.; SOCCOL, C. Shiitake Bag Cultivayion. Parte I Shiitake. Coffee Residues. Mushroom Grower´s Handbook. Mushworld All 2, p.92-94. 2005.

FAN, L.; PANDEY, A.; MOHAN, R. SOCCOL, C.R. Use of various coffee industry residues for the cultivation of Pleurotusostreatus in solid state fermentation. **Engineering in Life Sciences**, v.20, n.1, p.41-52, 2000.

FARIA, W.S. et al. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. **Coffee Science**, v.11, n.1, p.137-147, 2016.

FIA, R. et al. Tratamento das águas do processamento dos frutos do cafeeiro em filtro anaeróbio seguido por sistema alagado construído: I - remoção de matéria orgânica. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.6, p.1191-1202, 2010.

FILGUEIRA, M.. **Produção de fios diamantados**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2001.

GAMA, T.C.P. da et al. Anatomia foliar, fisiologia e produtividade de cafeeiros em diferentes níveis de adubação. **Coffee Science**, v.12, n.1, p.42-48, 2017.

GONÇALVES, J.F.C., MARENCO, R.A., VIEIRA, G. Concentration of photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence of mahogany and tonka bean under two light environments. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, n.2, p.149-157, 2001.

GUARÇONI, A. M., FANTON, C. J. Resíduo de beneficiamento do granito como fertilizante alternativo na cultura do café. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.1, p.16-26, 2011.

GUIDI L.; DEGL'INNOCENTI E. Imaging of chlorophyll a fluorescence: a tool to study abiotic stress in plants. Prof. ArunShanker (Ed.). In: **Abiotic Stress in Plants- Mechanisms and Adaptations**, InTech, 2011.

HERMANS, C. et al. Quality assessment of urban trees: a comparative study of physiological characterization, airborne imaging and on site fluorescence monitoring by the OJIP-test. **Journal of Plant Physiology**, v.160, n.1, p-81-90, 2003.

HOPPE, J. M. **Produção de sementes e mudas florestais**, Caderno Didático nº 1. 2. ed. Santa Maria, 2004.

IIVONEN, S.; RIKALA, R.; VAPAAVUORI, F**.** Seasonal root growth of Scots pine seedlings in relation to shoot phenology, carbohydrate status and nutrient supply. Canadian **Journal of Forest Research**, v.31, n.9, p.1569-1578, 2001.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. Disponível em: <www.ioc.org/trade_statistics.asp>. Acesso em: 9 jan. 2018.

JENKINS, R.W. et al. Production of biodiesel from Vietnamese waste coffee beans: biofuel yield, saturation and stability are all elevated compared with conventional coffee biodiesel. **Waste and Biomass Valorization**, v.8, n.4, p.1237-1245, 2017.

JESUS, S.V.; MARENCO R.J. O SPAD-502 como alternativa para a determinação dos teores de clorofila em espécies frutíferas. **Acta Amazônica**, v.38, p.815-818, 2008.

JORDAN, M. et al. Kraft mill residues effects on Monterey pine growth and soil microbial activity. **Journal of Environmental Quality**, v.31, n.3, p.1004-1009, 2002.

JUNG, K-W. et al. Fabrication of granular activated carbons derived from spent coffee grounds by entrapment in calcium alginate beads for adsorption of acid orange 7 and methylene blue. **Bioresource technology**, v.219, p.185-195, 2016.

KAAKINEN, S. et al. Growth, allocation and tissue chemistry of *Piceaabies*seedlings affected by nutrient supply during the second growing season. **Tree Physiology**, v.24, n.6, p.707-719, 2004.

KALAJI, H.M. et al. Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence: practical issues. Photosynthesis Research, v.122, n.2, p. 121-158, 2014.

KASTORI, R. et al. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and soluble carbohydrates in sunflower leaves as affected by boron deficiency. **Journal of Plant Nutrition**, v.18, n.9, p.1751-1763, 1995.

KENNEDY, R.A.; WILLIAMS, L.E. Effect of different killing tech niques on early labelled photosynthetic products in C4 plants. **Plant physiology**, v.59, n.2, p.207-210, 1977.

KRENZER, E.G.; MOSS, D.N.; CROOKSTON, R.K. Carbon dioxide compensation points of flowering plants. **Plant Physiology**, v.56, n.2, p.194-206, 1975.

KONDAMUDI, N.; MOHAPATRA, S.K.; MISRA, M. Spent coffee grounds as a versatile source of green energy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.56, n.24, p.11757-11760, 2008.

LEITE, S.T. et al. A compostagem como alternativa para aproveitamento da borra de café. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.7, n.13, p.1068, 2011.

LICHTENTHALER H.K.; BUSCHMANN C. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. In: **Current protocols in food analytical chemistry**. Wiley, New York, 2001. p. F4.3.1-F4.3.8.

LO MONACO, P.; MATOS, A.T.; MARTINEZ, H.P.; FERREIRA, P.A.; RAMOS, M.M. Avaliação do estado nutricional do cafeeiro após a fertirrigação com águas residuárias da lavagem e descascamento de seus frutos. **Engenharia na Agricultura**, v.15, n.4, p.392-399, 2007.

LOUROPEL, **Fabrica de Botões**. Há café nos botões portugueses da Louropel. 2014. Disponível em:<observador.pt/2014/09/19/botoes-de-cafe/>. Acesso em: 20 jan. 2018.

MACHADO, E.C., et al. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.17, n.9, p.1323-1329, 1982.

MADIVATE, C. et al. Reutilization of solid waste from ornamental rocks processing. **Molecular Crystals and Liquid Crystals**, v.555, n.1, p.129-137, 2012.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 319 p.

MARENCO, R.A.; LOPES, N.F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. Viçosa: UFV, 2007.

MARTINAZZO, E.G. et al. Fluorescência da clorofila *a* em plantas de pessegueiro da cultivar maciel enxertada sobre diferentes porta-enxertos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.34, p.678-685, 2012.

MARTINEZ-SAEZ, N. et al. Use of spent coffee grounds as food ingredient in bakery products. **Food chemistry**, v.216, p.114-122, 2017.

MATOS, A.T. de et al. Tratamento de água para reuso no descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro. **Engenharia na Agricultura**, v.15, n.2, p.173-178, 2007.

MAXUELL, K.; JOHNSON, G.N. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v.51, n.345, p.659-668, 2000.

MENCH, M.; MARTIN, E. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L., *Nicotiana tabacum* L. and *Nicotiana rustica* L. **Plant and soil**, v.132, n.2, p.187-196, 1991.

MENDONÇA, A. et al. Palha de café e de arroz na produção de mudas de Freijó. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, v.3, n.1, p. 105-112, 2014.

MENEGHELLI, C.M. et al. Resíduo da secagem dos grãos de café como substrato alternativo em mudas de café Conilon. **Coffee Science**, v.11, n.3, p.330 - 335, 2016.

MONTANI, C..**XXVIII RapportoMarmo e Pietrenel Mondo 2017 (XXVIII World Marble and Stones Report 2017)**. Carrara: Aldus, 2017.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, p. 747-766, 1972.

MOREIRA, J.M.S.; MANHÃES, J.P.V.T.; HOLANDA, J.N.F. Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica vermelha. (Utilization of ornamental rock waste from Northwest Fluminense in red ceramic). **Revista Cerâmica**, v. 51, n. 319, p. 180-186, 2005.

MORENO, J.L. **La matéria orgânica em los agrosistemas:** aproximación al conocimiento de la dinámica, lagestión y la reutilización de la matéria orgánica en los agrosistemas. Ministério da Agricultura, Pesca y Alimentation. Adiciones Mundi-Prensa, Madrid, 2001. p.123.

MOURA, A.W.; LEITE, M.B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Rem: Revista Escola de Minas**, v.64, n.2, p.147-154, 2011.

MURTHY, P.S.; NAIDU, M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v.66, p.45–58, 2012.

MUSSATTO, S.I. et al. Production, composition and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v.4, n.5, p.661-672, 2011.

NOBEL, P.S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. 4. ed. San Diego: Academic Press, 2009.

OLIEVEIRA, L.E.M de; GOMIDE, M.B. Fisiologia Gegetal. Lavras, ESAL, 72p, 1986.
GUIMARÃES, R.J. **Análise do crescimento e da quantificação de nutrientes em mudas de cafeeiro, (*Coffeaarabica* L.), durante seus estádios de desenvolvimento em substrato padrão**. 1994. 113 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1994.

PANDEY, A. et al. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. **Biochemical Enginnering Journal**, v.6, n.2, p.153-162, 2000.

PERCIVAL, G.C.; FRASER, G.A.; OXENHAM, G. Foliar salt tolerance of Acer genotypes using chlorophyll fluorescence. **Journal of Arboriculture**, v.29, n.2, p.61-65, 2003.

PIAS, O.H de C. et al. Doses de fertilizante de liberação controlada no índice de clorofila e na produção de mudas de grápia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.33, n.73, p.19-25, 2013.

PIMENTA, C.J. et al. Aproveitamento do resíduo do café na alimentação de tilápia do Nilo. **Archivos de zootecnia**, v.60, n.231, p.583-593, 2011.

PRS - Portal dos Resíduos Sólidos. **Vestindo borras de café**. 2013. Disponível em: <www.portalresiduossolidos.com/vestindo-borras-de-cafe/>. Acesso em: 20 jan. 2018.

PUJOL, D. et al. The chemical composition of exhausted coffee waste. **Industrial Crops and Products**, v.50, p.423-429, 2013.

RATTAN, S.; PARANDE, A.K.; NAGARAJU, V. D.A comprehensive review on utilization of waste water from coffee processing. **Environmental Science and Pollution Research**, v.22, n.9, p.6461-6472, 2015.

REIBACH, P.H.; BENEDICT, C.R. Fractionation of stable carbon isotopes by phosphoenolpyruvate carboxylase from C4 plants. **Plant Physiology**, v.59, n.4, p.564-568, 1977.

ROBERTO, et al. Variação da fotossíntese e dos teores de carboidratos induzidos por etefom e déficit hídrico na fase de maturação da cana-de-açúcar. **Bragantia**, v.74, n.4, 2015.

RODRIGUES, T.J.D., LEITE, I.C., SANTOS, D.M.M. **Roteiro Para Aulas Práticas De Fisiologia Vegetal**. Jaboticabal: FUNEP, 1998.79 p.

RUBEN FILHO, S. et al. **Atlas de rochas ornamentais do Estado do Espírito Santo**. Brasília: CPRM, Serviços Geológicos do Brasil, 2013.

SALES, et al. Trocas gasosas e balanço de carboidratos em plantas de cana-de-açúcar sob condições de estresses radiculares. **Bragantia**, v.71, n.3, 2012.

SEGATTO, F.B. et al. Técnica para o estudo da anatomia da epiderme foliar de batata. **Ciência Rural**, v.34, n.5, p.1597-1561, 2004.

SEVERINO, F.J.; CARVALHO, S.J.P.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Mutual Interferences among Corn Crop, Forage Species and Weeds under a Consortium System - Implications on Corn Crop (*Zea mays*). **Planta Daninha,** v.23, p.589-596, 2005.

SILVA, F.G. da et al. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental-Agriambi**, v.19, n.10, 2015.

SILVA, L. da et al. Fotossíntese, relações hídricas e crescimento de cafeeiros jovens em relação à disponibilidade de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.9, p.965-972, 2011.

SHARMA, B.D.; KAUL, H. N.; SINGH, M. Growth analysis of potato varieties in autumn in subtropical conditions. **New Botanist**, v.20, n.54, p.55-64, 1993.

SOARES, L. de S.S. et al. Use of Waste Coffee Grounds and Sawdust in Briquettes Molding and Evaluation of Properties. **Matéria**, v.20, n.2, p.550-560, 2015.

STREIT, N.M. et al. The chlorophylls. **Ciência Rural**, v.35, n.3, p.748-755, 2005.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegra: Artmed, 2017.

TANGO, J.S. Utilização industrial do café e dos seus subprodutos. **Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos - ITAL**, Campinas, v.28, p.49-73, 1971.

VALE, D.W do; PRADO R de M. Adubação com NPK e o estado nutricional de ‘citrumelo’ por medida indireta de clorofila. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, n.2, p.266-271, 2009.

VENTURIM, J.B. **Gestão de resíduos orgânicos produzidos no meio rural: o caso do beneficiamento do café**. 2002. 101 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

VIOTTO, L.A., **Projeto e avaliação econômica de sistemas de secagem de borra de café**. 1991. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

USDA - United States Department of Agriculture. **Natural Resources Conservation Service (NRCS)**. Disponível em: <https://www.usda.gov/ >. Acesso em: 11 jan. 2018.

WINTER, S.R., OHLROGGE, A.J. Leaf angle, leaf area, and corn (*Zea mays* L.) yield. **Agronomy Journal**, v.65, n.3, p.395-97, 1973.

CAPÍTULO 1 – Efeitos de concentrações crescentes do resíduo de beneficiamento do granito no teor de nutrientes do solo, no crescimento e no índice de clorofila de plantas de *Zea mays* L.

RESUMO

As indústrias de beneficiamento do granito são citadas como fontes de poluição do meio ambiente, em virtude do grande volume de resíduos produzidos e, muitas vezes, lançados nos ecossistemas. Nesse cenário, pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de aproveitar esse tipo de resíduo; dentre elas, podem-se destacar as referentes ao uso agrícola visando enriquecimento nutricional do solo e nutrição de plantas. No presente estudo, foi investigado o efeito de doses de resíduo de granito, obtido com corte via fio diamantado, sobre as características químicas do solo, o crescimento e o índice de clorofila de plantas de milho (*Zea mays* L). Foram adicionadas às amostras de solo seis doses de resíduo (5; 20; 40; 60; 80; 100 g dm^{-3}, equivalentes a 10; 40; 80; 120; 160; 200 t ha^{-1}), em dois níveis de calagem (0,3 e 1,0 vezes a necessidade de calagem). As plantas foram cultivadas, em vasos, por 60 dias. O solo foi analisado quimicamente e características de crescimento e o índice de clorofila das plantas foram mensurados. A partir dos resultados pôde-se concluir que: a adição de calcário elevou o pH do solo e reduziu a acidez potencial de modo mais pronunciado no maior nível de calagem testado; a aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do granito elevou o pH do solo e reduziu a acidez potencial sendo o efeito mais efetivo no menor nível de calagem; o resíduo de beneficiamento do granito aumentou os teores de cálcio e de magnésio e os valores de soma de bases e saturação por bases do solo, mas de maneira irrisória em relação à quantidade aplicada; doses crescentes do resíduo proporcionaram o incremento adequado nos teores de manganês e de boro no solo, mas excessivo no teor de cobre; ocorreu decréscimo no crescimento das plantas até a dose onde o resíduo proporcionou potencial de hidrogênio do solo de aproximadamente 5,6, a partir da qual o crescimento foi incrementado; apesar de o resíduo apresentar maior concentração de ferro em relação aos demais micronutrientes, o teor desse elemento no solo reduziu à medida que as doses de resíduo foram aumentadas; o resíduo de beneficiamento do granito produzido via fio diamantado pode ser utilizado para fins agrícolas, especialmente, mas não deve ultrapassar a dose de 10 t ha^{-1} por aplicação.

Palavras-chave: Crescimento, fertilizante alternativo, fio diamantado, milho, multifios.

1. INTRODUÇÃO

O Estado do Espírito Santo é o principal produtor de rochas ornamentais do Brasil, responsável por cerca de 80% da produção nacional, com dois pólos importantes: Cachoeiro de Itapemirim e Nova Venécia. Essa atividade industrial gera empregos e lucros expressivos. No entanto, as indústrias de beneficiamento do granito são citadas como fontes de poluição do meio ambiente, em virtude de toneladas de resíduos sólidos geralmente não biodegradáveis de classe III – inertes (ABNT NBR 10004/04) produzidos diariamente e, frequentemente, descartados de maneira inadequada. Esses resíduos podem alcançar os recursos hídricos e até mesmo os reservatórios naturais de água, o que provoca problemas de assoreamento e também contaminação do solo (MOTHÉ FILHO et al., 2001; SILVA, 2005). Além disso, a poeira gerada pela lama quando seca pode provocar danos à saúde humana, como por exemplo, a silicose, doença pulmonar causada pela inalação de finas partículas de sílica cristalina.

O aproveitamento desses resíduos como matéria-prima por outros setores econômicos pode se apresentar como uma prática viável para aumentar o retorno financeiro, gerar renda, diminuir o volume de resíduos e promover adequada preservação ambiental. Pode-se citar seu reaproveitamento como aditivo na fabricação de produtos cerâmicos para construção civil (MENEZES et al., 2002) e cimento (RAMOS et al., 2013), além do seu uso agrícola com incremento nos teores de nutrientes do solo (FYFE et al., 2006; THEODORO; LEONARDOS, 2006). Isso porque o granito possui grande diversidade mineralógica e o resíduo do corte pode conter quantidades razoáveis nutrientes para plantas, como fósforo, potássio, magnésio e cálcio.

A serragem dos blocos de granito é a etapa que consiste no desdobramento dos blocos em chapas, realizada nos teares (MORAES, 2006). Em seguida, é feito o processo de polimento nas peças serradas, o que resulta em produtos acabados para o mercado. Este processo de desdobramento e beneficiamento gera enormes quantidades de resíduos, que podem ser de dois tipos: 1) o resíduo produzido nos teares convencionais (multilâminas) é uma lama composta por rocha, cal, água, granalha de aço ou de ferro e lâmina desgastada (BRAGA et al., 2010); 2) nos teares que utilizam a tecnologia do corte com fio diamantado (multifios), a lama é formada basicamente por água, pó de rocha e alguns micro cristais de diamante que podem vir a se desprender do fio diamantado (BRAGA, et al., 2010). Nessa última técnica, o corte da rocha é mais preciso e, assim, produz menos resíduo (FILGUEIRA,

2001). Entretanto, o aumento da capacidade produtiva e de exportação faz com que a quantidade de resíduos produzidos continue elevada.

Em comparação aos adubos minerais convencionais, o custo por unidade de nutriente pode ser menor, já que seu efeito é prolongado devido à lenta solubilização do material (BOLLAND; BAKER, 2000), o que pode gerar uma fertilização mais eficaz e em longo prazo e, desse modo, a economia com insumos agrícolas. Além disso, os recursos minerais que fornecem fósforo e potássio utilizados na produção dos adubos convencionais não são renováveis (LOPES et al., 2007). Portanto, do ponto de vista ambiental, o resíduo de granito, mesmo possuindo baixas concentrações de nutrientes, ao invés de ser depositado em aterro, o que é um enorme desperdício energético, pode ser aproveitado na agricultura diminuindo a necessidade dos adubos minerais. No caso da utilização de resíduos oriundos do beneficiamento com corte diamantado, em substituição ao corte com limalha de ferro, a vantagem é ainda maior, uma vez que não apresenta granalha e, consequentemente, metais prejudiciais às plantas e ao ambiente em geral.

Alguns trabalhos, mesmo que raros, destacam os efeitos positivos do uso do resíduo de beneficiamento do granito via limalha de ferro sobre o solo e a produtividade de culturas vegetais (altura das plantas, matéria seca), como do sorgo (SILVA et al., 2001a), da cenoura (SILVA et al., 2001b) e do café conilon (GUARÇONI; FANTON, 2011). O beneficiamento com corte via fio diamantado, em contrapartida, gera resíduo com melhor possibilidade de ser usado como fertilizante, pois é composto essencialmente por água e rocha, e não contem teores elevados de ferro, que podem causar toxidez às plantas. Todavia, pesquisas destinadas a avaliar os efeitos dessa lama granítica sobre os vegetais ainda são escassas.

O objetivo desse estudo foi determinar os efeitos de doses crescentes de resíduo de granito, produzido a partir do corte com fio diamantado, sobre plantas de milho (*Zea mays* L.), avaliando variáveis de crescimento relevantes de desempenho agrícola, e sobre características químicas do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e instalação do experimento

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação, na Fazenda Experimental Engenheiro Agrônomo Reginaldo Conde (20°25’23.9”S 40°28’38.1”W), pertencente ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper). Utilizou-se resíduo de beneficiamento de granito (pó de rocha) obtido em tear multifio (corte com fio diamantado) de uma beneficiadora de Jacaraípe/ES. Os tratamentos foram originados de um fatorial 6 x 2, sendo: seis doses de resíduo (5; 20; 40; 60; 80; 100 g dm^{-3}, equivalentes a 10; 40; 80; 120; 160; 200 t ha^{-1}) x duas doses de calcário dolomítico PRNT 96% (0,3 e 1,0 vezes a necessidade de calagem - NC, calculadas pelo método da Saturação por Bases, utilizando-se Ve = 60%) (12 tratamentos). O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, gerando 48 unidades experimentais, cada uma composta por um vaso contendo quatro plantas de milho, variedade ‘Capixaba Incaper 203’, desenvolvida pelo Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), com o apoio da Embrapa Milho e Sorgo, visando atender, sobretudo, o agricultor familiar do Estado do Espírito Santo.

A lama granítica foi posta espaçadamente à sombra para que fosse reduzida a sua umidade. O solo e o resíduo de granito foram peneirados em malha de 6 mm e de 2 mm, respectivamente. Foram realizadas análises físico-químicas do solo - camada mais profunda, eliminando-se o horizonte a e b -, segundo metodologia da Embrapa (SILVA et al., 1998) (Tabelas 1 e 2) e do resíduo (MAPA, 2014) (Tabela 3). Os tratamentos foram aplicados do seguinte modo: misturaram-se, de forma homogênea, as doses de resíduo de granito, de calcário dolomítico e o solo (4,5 dm^3). As misturas foram acondicionadas em vasos com capacidade de 5 L por 60 dias com aplicação de água destilada, mantendo-se a umidade das amostras de solo próxima à capacidade de campo (100% da água disponível no solo). Após a incubação, foram acrescentadas, de maneira uniforme, as doses de superfosfato simples e de cloreto de potássio, baseadas no trabalho de Guarçoni et al. (2005), utilizando-se 200 mg dm^{-3} e 100 mg dm^{-3}, nessa ordem. Passados dois dias, oito sementes de milho foram plantadas em cada vaso, a 1 cm de profundidade. Mantiveram-se os vasos irrigados. Sete dias após a germinação, foi realizado o desbaste, deixando-se quatro plantas por vaso. Estas foram cultivadas por 60 dias com manutenção da irrigação.

Tabela 1. Resultados analíticos da amostra de solo utilizada como substrato no experimento antes da aplicação dos tratamentos.

pH[1/]	P Mehlich[2/]	K[2/]	$Ca^{+23/}$	$Mg^{2+3/}$	$Al^{3+3/}$	MO[4/]	P-rem[5/]	t	T	V	m
	--- mg dm^{-3} ---		------ $cmol_c$ dm^{-3} ------			dag kg^{-1}	mg L^{-1}	$cmol_c$ dm^{-3}		------ % ------	
5,1	5	10	0,3	0,1	0,4	0,2	7	0,8	3,5	12,1	48

Metodologia conforme Silva et al. (1998): [1/]pH em água (1:2,5); [2/]HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,025 mol L^{-1}; [3/]KCl, 1 mol L^{-1}, [4/]Oxidação: $Na_2Cr_2O_7$ 2 H_2O + 4 molL^{-1} H_2SO_4 10 mol L^{-1}; [5/]P em solução de equilíbrio, obtido com $CaCl_2$ 10mm L^{-1}. Onde: MO=matéria orgânica; t=capacidade de troca catiônica efetiva; T=capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V=saturação de bases e m=saturação por alumínio.

Tabela 2. Características físicas do solo utilizado como substrato no experimento antes da aplicação dos tratamentos.

Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila[1/]	Classificação textual[2/]
---------- g kg^{-1} ----------				
242	124	194	440	Argila

Metodologia conforme Silva et al. (1998): [1/]Argila: Método do densímetro; [2/]Classificação textural de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Tabela 3. Caracterização do resíduo de beneficiamento do granito (RG) utilizado no experimento.

Material	N[1/]	K_2O[2/]	P_2O_5[2/]	Ca[2/]	Mg[2/]	S[2/]	Zn[2/]	Fe[2/]	Mn[2/]	Cu[2/]	Cd[2/]	Cr[2/]	Pb[2/]	Ni[2/]
								%						
RG	0,48	0,025	0,014	0,128	0,038	0,017	0,0004	0,119	0,029	0,022	0,0002	0,001	0,0003	0,036

Metodologia preconizada pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2014): [1/]Digestão sulfúrica; [2/]Digestão nitro-perclórica.

2.2 Análise química do solo

Ao final do experimento, quatro amostras do solo de cada tratamento, totalizando 48 amostras, foram coletadas, secas à sombra e peneiradas em malha de 2 mm para a caracterização química: ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na) foram extraídos com extrator Mehlich 1, enquanto cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1}. A acidez potencial (H+Al) foi obtida com extrator SMP. O potencial de hidrogênio (pH) em água foi determinado na relação 1:2,5, enquanto o teor de matéria orgânica foi extraído com oxidação de $Na_2Cr_2O_7$ 4mol L^{-1} + L^{-1}+$H_2SO_4$10 mol L^{-1}. O enxofre (S) foi extraído com fosfato monocálcico em ácido acético e o boro (B) extraído em água quente.

2.3 Análises de crescimento

Ao final do experimento, foram medidas a altura das plantas, o diâmetro do colmo com auxílio de paquímetro analógico (141-112, Cosa), a área foliar total e as massas de matéria seca de raiz e de parte aérea. A área foliar foi realizada em scanner de geração de imagens (Area Meter LI-COR 3100, Nebrasca, EUA). Para a obtenção da massa de matéria seca, o material vegetal foi acondicionado em estufa a 70 ºC, até a obtenção de massa constante, e depois pesado.

2.4 Índice de clorofila

O índice de clorofila foi estimado por meio do clorofilômetro digital portátil SPAD-502 (Minolta Camera Co. Ltda.), entre 8 e 10h. Foram realizadas sete medições por planta na região central do limbo foliar, totalizando 112 medições por tratamento, sendo utilizada a média para representar os tratamentos.

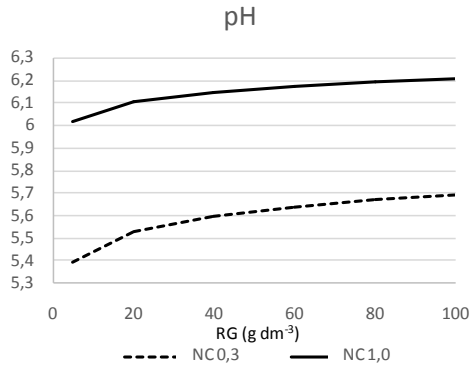
2.5 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de regressão para avaliar os efeitos das concentrações do resíduo de beneficiamento do granito e concentrações de calcário nas plantas de milho. Todas as avaliações foram executadas pelo programa Saeg (2013), UAEG-CTRN-UFCG, Campina Grande – PB.

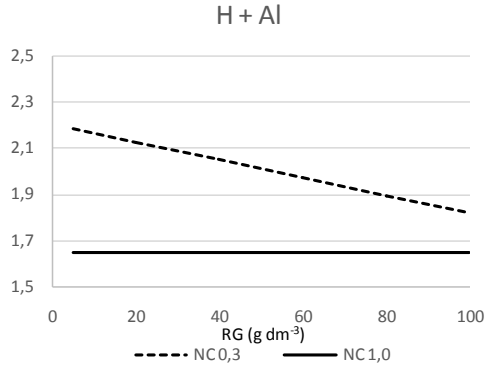
3. RESULTADOS

3.1 Análise química do solo

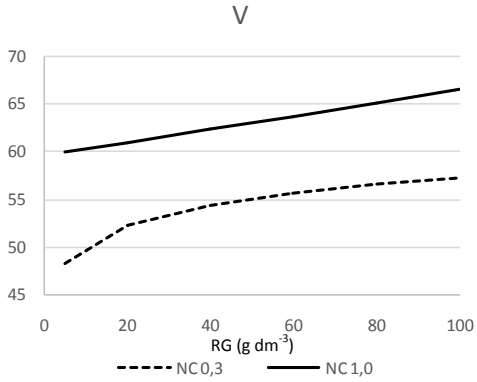
A aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do granito elevou os valores de pH e de saturação de bases (V%), nos dois níveis de calagem e aumentou a soma de bases (SB) apenas no nível de calagem 1,0 x NC. O valor da acidez potencial (H + Al) diminuiu somente no menor nível de calagem 0,3 x NC (Figura 1). Tanto os teores de cálcio (Ca^{2+}) quanto de magnésio (Mg^{2+}) aumentaram com aplicação de doses crescentes de resíduo de granito, especialmente no maior nível de calagem (1,0 x NC) (Figura 2). Quanto aos micronutrientes avaliados, somente manganês (Mn), cobre (Cu), boro (B) e ferro (Fe) sofreram influência de doses crescentes do resíduo. Enquanto Mn, Cu (Figura 2) e B (Figura 3) apresentaram acréscimo no solo a partir de doses crescentes de resíduo de granito, o Fe (Figura 3) apresentou comportamento inverso, sendo seus teores reduzidos linearmente a partir da aplicação de resíduo, no nível de calagem mais baixo.



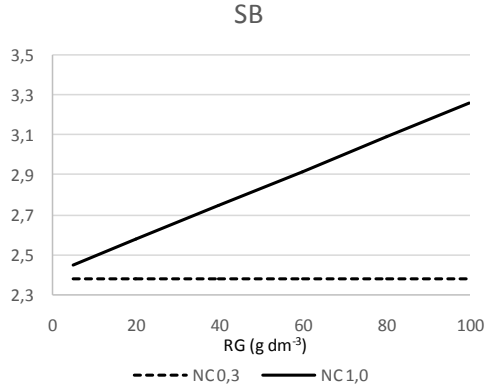
Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 5{,}2376^{**}RG^{0{,}0181*}$	0,77
1,0 NC	$\hat{y} = 5{,}9147^{**}RG^{0{,}0105*}$	0,72



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 2{,}2055^{**} - 0{,}00387859^{**}RG$	0,84
1,0 NC	$\hat{y} = y = 1{,}65$	

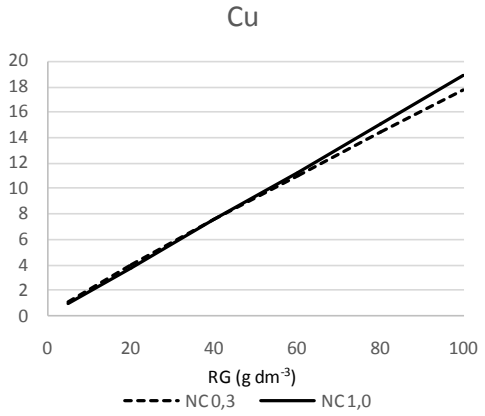


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 44{,}024^{**}RG^{0{,}0571*}$	0,79
1,0 NC	$\hat{y} = 59{,}5401^{**} + 0{,}0690479^{*}RG$	0,73

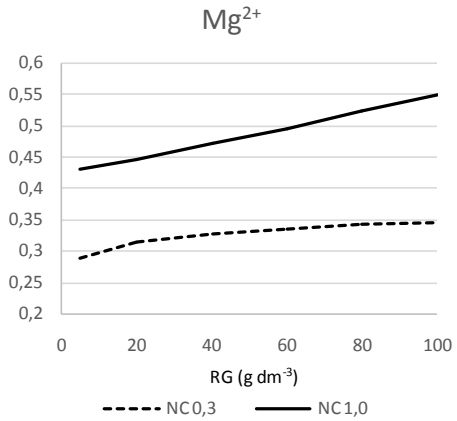


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = y = 0{,}24$	-
1,0 NC	$\hat{y} = 2{,}407899^{**} + 0{,}0085495°RG$	0,63

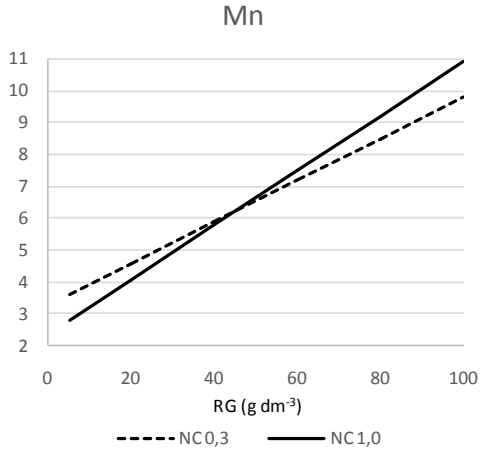
Figura 1. Estimativa de valores de pH, H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$), saturação por bases (V, %) e soma de bases (SB, $cmol_c\ dm^{-3}$) no solo, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de granito (RG), em dois níveis de calagem. Equações não apresentadas representam $\hat{y} = y$; **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.



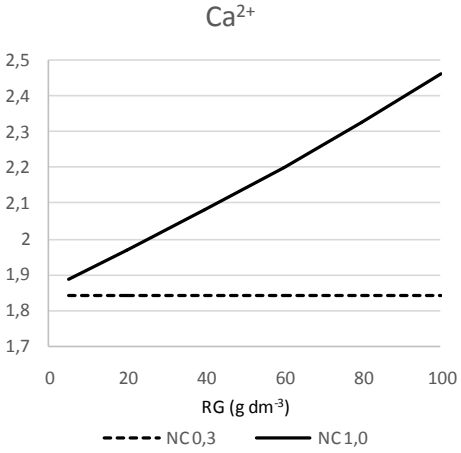
Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 0{,}2530RG^{0{,}9221}$	0,99
1,0 NC	$\hat{y} = 0{,}1887^{**}RG$	0,99



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 0{,}2623^{**}RG^{0{,}0605*}$	0,73
1,0 NC	$\hat{y} = 0{,}425^{**}e^{0{,}0026*RG}$	0,69

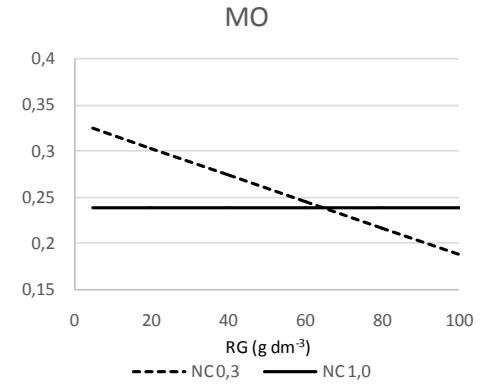


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 3{,}28128^{**} + 0{,}0649585^{**}RG$	0,95
1,0 NC	$\hat{y} = 2{,}35399^{*} + 0{,}0854952^{**}RG$	0,94

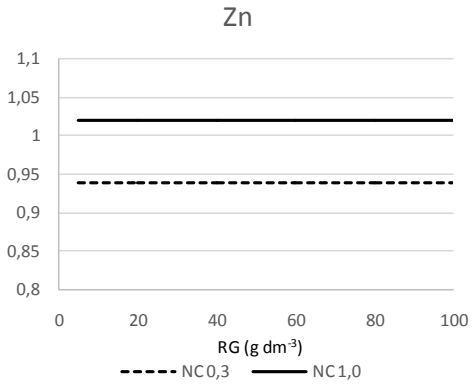


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = y = 1{,}84$	-
1,0 NC	$\hat{y} = 1{,}8595^{**}e^{0{,}0028*RG}$	0,67

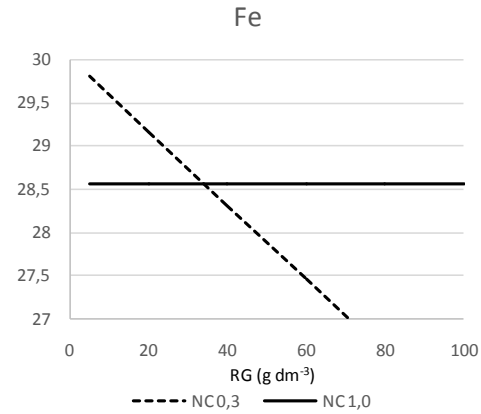
Figura 2. Estimativa de teores de Cu, Mn, Mg^{2+} e Ca^{2+} no solo, em mg dm^{-3}, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de granito (RG), em dois níveis de calagem. Equação não apresentada representa $\hat{y} = y$; **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.



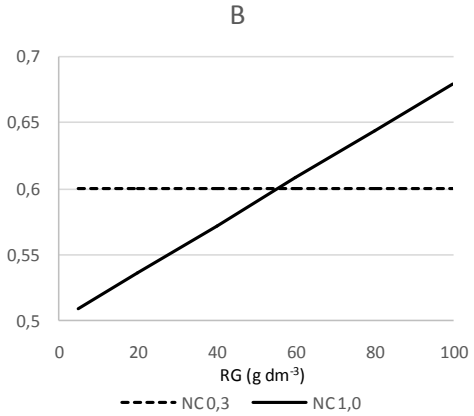
Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 0{,}332802^{**} - 0{,}00144856^{*}RG$	0,71
1,0 NC	$\hat{y} = y = 0{,}24$	-



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = y = 0{,}94$	-
1,0 NC	$\hat{y} = y = 1{,}02$	-



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 30{,}0109^{**} - 0{,}0425911^{*}RG$	0,68
1,0 NC	$\hat{y} = y = 28{,}6$	-

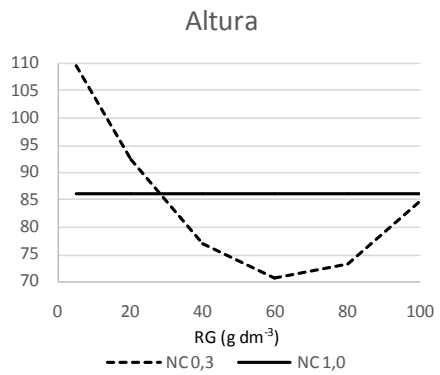


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = y = 0{,}60$	-
1,0 NC	$\hat{y} = 0{,}500719^{**} + 0{,}00178914^{*}RG$	0,74

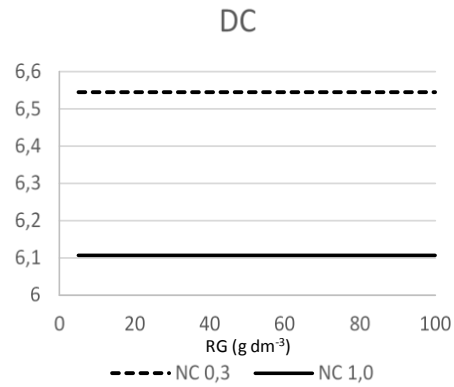
Figura 3. Estimativa de teores de matéria orgânica (MO, dag kg^{-1}), Zn, Fe e B (mg dm^{-3}), no solo, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de granito (RG), em dois níveis de calagem. Equações não apresentadas representam $\hat{y} = y$; **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.

3.2 Análises de crescimento

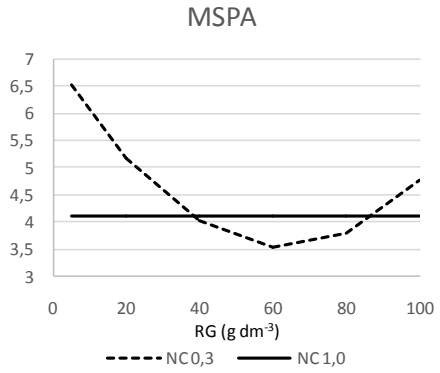
Os resultados de diâmetro do colmo e massa de matéria seca de raízes (MSR) não puderam ser explicados por um modelo estatístico. Todavia, tanto a altura de planta (altura) quanto à produção de massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) diminuíram, de maneira quadrática, com a aplicação de doses crescentes de resíduo de granito no menor nível de calagem (Figura 4). A partir da dose de 60 g dm^{-3} de resíduo de granito, a altura de planta e a matéria seca da parte aérea voltaram a aumentar (Figura 4).



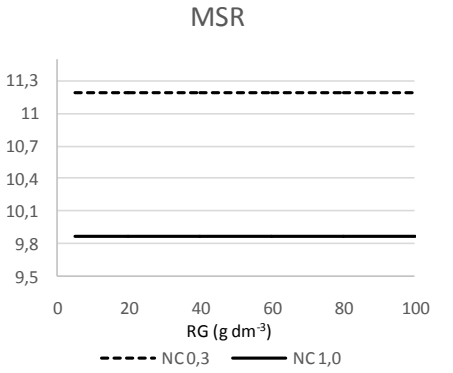
Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 116{,}52^{**} - 1{,}4343^{**}RG + 0{,}0112^{**}RG^2$	0,99
1,0 NC	$\hat{y} = y = 86{,}2$	-



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = y = 6{,}54$	-
1,0 NC	$\hat{y} = y = 6{,}12$	-



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = 7{,}0749^{**} - 0{,}1122^{**}RG + 0{,}00089^{*}RG^2$	0,94
1,0 NC	$\hat{y} = y = 4{,}11$	-



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,3 NC	$\hat{y} = y = 11{,}18$	-
1,0 NC	$\hat{y} = y = 9{,}87$	-

Figura 4. Estimativa de valores de altura de plantas (cm), diâmetro do colmo (DC, mm), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA, g) e massa de matéria seca de raízes (MSR, g), decorrentes da aplicação de doses crescentes de resíduo de granito (RG), em dois níveis de calagem. Equações não apresentadas representam $\hat{y} = y$; **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.

3.3 Índice de clorofila

Não houve diferenças significativas entre os valores de índice Spad em relação às aplicações de doses crescentes de resíduo de granito e duas doses de calagem.

4. DISCUSSÃO

A aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do granito elevou os valores de pH e de saturação de bases (V), nos dois níveis de calagem, contudo aumentou a soma de bases (SB) apenas no nível de calagem 1,0 x NC. Por outro lado, o valor de acidez potencial (H+Al) diminuiu de maneira consistente somente no menor nível de calagem 0,3 x NC (Figura 1).

Os resultados obtidos para o pH, H+Al, V e SB revelam que os níveis de calagem a que foi submetido o solo foram fatores determinantes em relação ao efeito do resíduo de granito (Figura 1). O aumento do nível de calagem de 0,3 x NC para 1,0 x NC elevou o valor de pH do solo em 9% sob a maior dose de granito (pH=5,7 sob a menor dose de calcário para pH=6,2 sob a maior dose de calcário) (Figura 1). Essa observação é confirmada por Caires et al. (2008), que também observaram aumento no pH ao aplicarem doses mais elevadas de calcário. Entretanto, o resíduo de granito, no nível de calagem mais baixo, influencia mais o pH do solo, que se elevou de 5,4 sob a menor dose de resíduo aplicada para 5,7 sob a maior dose de resíduo aplicada (Figura 1), o que já era de se esperar, uma vez que o efeito de qualquer material passível de reduzir a acidez dos solos é maior em condições nas quais o pH do solo é mais baixo (Figura 1) (CAIRES et al, 2002).

O incremento da calagem no pH, embora pequeno, se fez exatamente no valor de pH do solo onde ocorre a maioria das modificações relativas à disponibilidade de elementos químicos (pH = 5,5), especialmente micronutrientes metálicos. Vale ressaltar que o pH e a V iniciais do solo eram de 5,1 e 12,1 %, respectivamente (Tabela 1), e a calagem foi realmente efetiva em elevar tanto o pH quanto a saturação por bases a níveis adequados (Figura 1). Ao final do experimento, o solo apresentou valores estimados de V = 57 %, para o menor nível de calagem e V = 66 % para o maior nível de calagem sob a maior dose de granito. Para Embrapa (2010), solos que apresentam porcentagem de saturação de bases igual ou acima de 50% são considerados férteis, ou seja, eutróficos. Assim, pode-se afirmar, segundo esses critérios, que a calagem foi capaz de transformar um solo pobre em um solo fértil.

De qualquer modo, com a aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do granito, os valores de pH aumentaram (Figura 1). Isso porque o resíduo é proveniente de rocha magmática, composta também por mica e feldspato (MENEZES et al., 2002), que pode elevar o pH, que segundo Abreu Júnior et al. (2003), tem correlação positiva com valores de Ca^{2+}, Mg^{2+}, V e SB no solo. No entanto, os reduzidos valores dos coeficientes das equações revelaram que a declividade dos modelos potenciais selecionados para essas situações foi

pequena (Figura 1), o que demonstra baixa eficiência desse tipo de resíduo na correção do solo, fato este também observado por Guarçoni e Fanton (2011). Sendo assim, passando a aplicação de resíduo de 10 para 200 t ha^{-1}, ocorreria um aumento no pH do solo de apenas três e dois décimos, aproximadamente, para os níveis de 0,3 e 1,0 vez a necessidade de calagem, nessa ordem. Exatamente por isso, a redução no valor de H+Al do solo se fez presente apenas no menor nível de calagem, uma vez que a redução da acidez a partir do resíduo foi um pouco mais efetiva neste nível (Figura 1).

O aumento da V e da SB (Figura 1) está diretamente ligado ao acréscimo de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo via resíduo de granito. Tanto os teores de Mg^{2+} quanto de Ca^{2+} aumentaram com aplicação de doses crescentes de resíduo de granito, especialmente no maior nível de calagem (1,0 x NC) (Figura 2). Esse resultado não era esperado, pois, em tese, haveria menor dissolução do resíduo quando os valores de pH do solo fossem mais elevados. Entretanto, o resíduo continuou se solubilizando adequadamente mesmo em pH 6,2; fato corroborado pelos incrementos lineares de SB e V (Figura 1) e exponenciais de Mg^{2+} e Ca^{2+} (Figura 2), no nível de calagem mais elevado (1,0 x NC). Além de a solubilização ser aparentemente contínua até pH 6,2, a disponibilidade desses nutrientes se eleva quanto maior for o pH do solo, até o ponto ideal próximo a 6,5, que possibilita a maior disponibilidade desses elementos (PRADO, 2008).

O incremento nos teores de Ca^{2+} de Mg^{2+}, e consequente elevação da SB e da V, em relação às doses crescentes de resíduo, pode ser explicado, novamente, pela constituição básica do granito que originou o resíduo - mica e feldspato, segundo Menezes et al. (2002). Esses resultados reforçam os obtidos por Silva et al. (2001a), que constataram aumentos nas concentrações de Mg^{2+} e Ca^{2+}e no valor percentual de V% no solo, quando cultivaram sorgo granífero em lama de granito.

Quanto aos micronutrientes avaliados, manganês (Mn), cobre (Cu) (Figura 2), boro (B) e ferro (Fe) (Figura 3) sofreram influência de doses crescentes do resíduo. Enquanto Mn, Cu e B apresentaram acréscimo no solo a partir de doses crescentes de resíduo de granito, o Fe apresentou comportamento inverso, sendo seus teores reduzidos linearmente a partir da aplicação de resíduo, no nível de calagem mais baixo. Esse fato surpreende, uma vez que o Fe é o micronutriente presente em maior concentração no resíduo de granito (Tabela 3). Entretanto, a mesma aplicação de resíduo de granito que reduziu linearmente o teor de Fe (Figura 3) no solo, aumentou o pH do solo de 5,4 para 5,7 (Figuras 1) e, este fato pode ter relação com o decréscimo observado, mesmo que o extrator utilizado para determinação de Fe no solo seja ácido (Mehlich 1), este fato pode ter relação com o decréscimo observado.

Somente o Cu ultrapassou a concentração considerada alta para micronutrientes no solo, acima de 1,8 mg dm^{-3} (CFESMG, 1999) (Figura 2). Esse teor, todavia, é estabelecido basicamente para subsidiar recomendações de adubação com cobre e não tem conotação de efeito tóxico. Porém, é necessária cautela na interpretação de resultados de determinação de nutrientes no solo, pois concentrações pouco além das consideradas como suficientes podem dar início repentino à região de toxicidade.

No presente estudo, a concentração de Cu chegou a 20 mg dm^{-3}, na maior dose de resíduo aplicada na amostra de solo que recebeu o maior nível de calagem (Figura 2), valor extremamente elevado.

Considerando o crescimento das plantas de milho, não foi possível selecionar um modelo que explicasse os resultados de diâmetro de colmo (DC) e de massa de matéria seca de raízes (MSR). Todavia, tanto a altura de planta (altura) quanto à produção de massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) foram negativamente afetadas pela aplicação de doses crescentes de resíduo de granito no menor nível de calagem, mas de forma quadrática (Figura 4), o que tem relação direta com a condição criada no solo após aplicação do resíduo.

A redução quadrática da matéria seca da parte aérea e da altura das plantas pode estar ligada ao excesso de Cu que se adicionou ao solo quando se elevou as doses de resíduo de granito. O Cu em excesso inibe o crescimento de plantas e impede importantes processos celulares, como, por exemplo, o transporte de elétrons na fotossíntese (YRUELA, 2005) e tem efeito destrutivo na integridade das membranas dos cloroplastos, o que diminui o conteúdo de clorofila e também a fotossíntese (MOCQUOT et al., 1996; PRASAD; STRZALKA, 1999); apesar disso, não houve diferença significativa nos valores de índice Spad após o experimento. No atual estudo, não foram realizadas análises de conteúdo mineral na parte aérea das plantas, entretanto, sabe-se que a absorção de Cu pelo milho ocorre de acordo com a disponibilidade do nutriente na solução do solo e que a faixa ótima foliar de Cu para o milho varia entre 1,14 a 8,83 mg kg^{-1} (GARLÃO; SOUZA, 1985; LEITE, 2003). Ainda, de acordo com Leite (2003), que avaliou os níveis críticos de alguns micronutrientes em milho, as plantas apresentaram produção máxima quando submetidas à concentração 8 mg kg^{-1} de Cu, a partir da qual a produção das plantas começou a decrescer. Porém, ao se aplicar 10 t ha^{-1} de resíduo de granito, estaria sendo adicionada ao solo uma dose de Cu duas vezes maior do que a usualmente recomendada, que é de 1 kg ha^{-1} de Cu (CFSEMG, 1999).

É importante ressaltar sobre a composição do fio diamantado, o qual é feito de um cordão de aço inoxidável, sobre o qual são postos segmentos anulares, as pérolas diamantadas, espaçadas uniformemente. Normalmente, essas pérolas são processadas através

das técnicas da Metalurgia do Pó, na qual, em geral, se usa um ligante metálico como ferro e cobre para aderir os diamantes (OLIVEIRA; FILGUEIRA, 2008). Devido a isso, o resíduo de granito utilizado no presente estudo pode ter apresentado quantidades consideráveis de Cu, que se desgastou do fio durante a operação abrasiva no processo de corte do granito.

A partir da dose de 60 g dm^{-3} de resíduo de granito, a altura de planta e a matéria seca da parte aérea voltaram a aumentar (Figura 4). Nesta dose de resíduo, o pH do solo se encontra acima de 5,6, no nível de calagem mais baixo. Então, é possível que o aumento do pH do solo tenha reduzido substancialmente a toxidez do Cu, permitindo que a planta voltasse a se desenvolver.

Dessa maneira, embora o resíduo de beneficiamento do granito apresente alguns nutrientes, com presença mais evidente de Ca e de Mg, é possível que forneça elementos que podem causar efeitos tóxicos para as plantas e/ou nocivos à saúde humana, quando em concentrações elevadas, caso esse do cobre. Assim, sua aplicação, em doses mais elevadas, para plantios convencionais estaria descartada, como proposto por Rosen (2002). Por outro lado, em plantios orgânicos, e mesmo convencionais, em doses menores do que 10 t ha^{-1}, esse resíduo poderia ser aplicado como fonte alternativa de micronutrientes, especialmente de Cu, Mn, Fe e B.

5. CONCLUSÕES

1. A adição de calcário elevou o pH do solo e reduziu a acidez potencial (H+Al) de forma mais pronunciada no maior nível de calagem testado.
2. A aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do granito elevou o pH do solo e reduziu a acidez potencial (H+Al), mas em pequena magnitude, sendo o efeito mais efetivo no menor nível de calagem.
3. O resíduo de beneficiamento do granito aumentou os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e os valores de soma de bases e saturação por bases do solo, mas de maneira irrisória em relação à quantidade aplicada.
4. Doses crescentes do resíduo proporcionaram o incremento adequado nos teores de Mn e B no solo, mas excessivo no teor de Cu.
5. Apesar de o resíduo apresentar maior concentração de Fe em relação aos demais micronutrientes, o teor de Fe no solo reduziu à medida que as doses de resíduo foram aumentadas.
6. Ocorreu decréscimo no crescimento das plantas até a dose onde o resíduo proporcionou pH do solo de aproximadamente 5,6, a partir da qual o crescimento foi incrementado.
7. O resíduo de beneficiamento do granito via fio diamantado pode ser utilizado especialmente como fonte de micronutrientes, não devendo ser ultrapassada a dose de 10 t ha^{-1}.

6. REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABREU JÚNIOR, C.H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A.F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. Scientia Agricola, v.60, p.337-343, 2003.

BOLLAND, M.D.A.; BAKER, M.J. Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.56, n.1, p.59-68, 2000.

BRAGA, F.S. et al. Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.15, p.237-244, 2010.

CAIRES, E.F. et al. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1011-1022, 2002.

CAIRES, E.F. et al. Soilacidity, limingandsoybean performance under no-till. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 05, p. 532-540, 2008.

CFSEMG - Comissão de Fertilidade de Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**; 5ª aproximação. Lavras: CFSEMG, 1999.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**: Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite, 2010.

FILGUEIRA, M.. **Produção de fios diamantados**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2001.

FYFE, W.; LEONARDOS, O.H.; THEODORO, S.C.H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v.4, p.715-720, 2006.

GARLÃO, E.Z.; SOUZA, D.M.G. Resposta do trigo à aplicação de cobre em um solo orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, n.2, p.149-153, 1985.

GUARÇONI, A. et al.. Efeito da localização de adubos fosfatados sobre o crescimento de plantas de milho. **Revista Ceres**, v. 52, p.939-961, 2005.

GUARÇONI, A., FANTON, C.J. Resíduo de beneficiamento do granito como fertilizante alternativo na cultura do café. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.1, p.16-26, 2011.

LEITE, U.T. et al. Níveis críticos foliares de boro, cobre, manganês e zinco em milho. **Bioscience Jounal**, v.19, n.2, p115-125, 2003.

LOPES, A.S.; BASTOS, A.R.R.; DAHER, E. Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados e sulfatados na agricultura brasileira: uma visão do futuro. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira.** Piracicaba: INPI Brasil, p. 161-187, 2007.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilidade e corretivos**. Brasília: Mapa, 2014.

MENEZES, R.R.; FERREIRA, H. S.; NEVES G. DE A. The use of granite wastes as ceramic raw materials. **Cerâmica**, v.48, n.306, p.92-101, 2002.

MOCQUOT, B. et al. Copper toxicity in young maize (*Zea mays* L.) plants: effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and enzyme activities. **Plantand Soil**, v.182, p.287-300, 1996.

MORAES, I.V.M. **Mármore e Granito:** lavra, beneficiamento e tratamento de resíduo. Dossiê técnico. Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. 2006.

MOTHÉ FILHO, H.F.; POLIVANOV H.; MOTHÉ, C.G.. Propriedades térmica e mecânica do cerâmico obtido com resíduo da indústria do granito e do mármore. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, p.401-412, 2001.

OLIVEIRA, L.J. de ; FILGUEIRA, M. Pérolas diamantadas obtidas por metalurgia do pó: Nacionalização da tecnologia. **Matéria**. 13, n.1, p. 23-32, 2008.

PRADO, R. **Nutrição de Plantas**. São Paulo: Unesp, 2008.

PRASAD M.N.V, STRZALKA, K. Impactof heavy metals on photosynthesis. In: PRASAD, M.N.V; HAGEMEYER, J. (Eds.). **Heavy Metal Stress in Plants**. Berlin: Springer Publishers, 1999. p. 117-138.

RAMOS, T. et al. Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. **Construction and Building Materials**, v.47, p. 1001-1009, 2013.

ROSEN, C. Agricultural use of rock fines as a sustainable soil amendment. In: Minnesota Department of Agriculture (Ed.). **Greenbook**. St. Paul: Minnesota Department of Agriculture, 2002. p. 49-51.

SILVA, F.C da et al. **Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**: métodos usados na Embrapa Solos. Campinas: Embrapa, 1998.

SILVA, F.C.P. et al. Lama de granito como fonte de nutrientes em sorgo granífero. In CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Resumos...** Londrina: SBCS, 2001a.

SILVA, F.C.P. et al. Efeitos da lama de granito em cenoura (*Daucuscarota* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001. **Resumos.** Londrina: SBCS, 2001b.

SILVA, J.B.. et al.Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, São Paulo, v.51, p.325-330, 2005.

THEODORO, S.H.; LEONARDOS, O.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v.78, p.721-730, 2006.

YRUELA, I. Copper in Plants. **Brazil Journal Plant Physiology**, v.17, n.1, p. 145-156, 2005.

CAPÍTULO 2 – Efeitos de doses crescentes de resíduo de café no teor de nutrientes do solo e no crescimento e teor de nutrientes da parte aérea de plantas de *Zea mays* L.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor e exportador de café em grãos do mundo, entretanto, o processamento do café gera grandes quantidades de resíduo sólido, que em muitos casos não é devidamente tratado, gera despesas e preocupação ambiental, mas é fonte de compostos com propriedades funcionais. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi analisar o efeito de concentrações de resíduo de café, obtido no processo de produção do café solúvel, sobre o teor de nutrientes do solo e sobre o crescimento e teor de nutrientes da parte aérea de plantas de milho (*Zea mays* L.). Foram adicionadas às amostras de solo cinco doses de resíduo (3,63; 7,25; 10,88; 14,50; 18,13 g dm^{-3}, equivalentes a 7,26; 14,50; 21,76; 29,00, 36,26 t ha^{-1}) mais o controle (0 g dm^{-3}), em dois níveis de calagem (0,2 e 1,0 vezes a necessidade de calagem). As plantas foram cultivadas, em vasos, por 40 dias. O solo foi analisado quimicamente e características de crescimento e o teor de nutrientes da parte aérea das plantas foram mensurados. A partir dos resultados pôde-se concluir que: a adição de calcário elevou o pH do solo e reduziu a acidez potencial (H+Al) de forma mais pronunciada no maior nível de calagem testado; a aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do café elevou o pH do solo e reduziu H+Al, em grande magnitude, sendo o efeito mais efetivo no menor nível de calagem; o resíduo de beneficiamento do café aumentou muito os teores de Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} e os valores de soma de bases e saturação por bases do solo; doses crescentes do resíduo proporcionaram o incremento adequado nos teores de Mn e Cu no solo, mas causou diminuição no teor de Zn; ocorreu acréscimo no crescimento das plantas com a aplicação do resíduo; o resíduo de beneficiamento do café pode ser utilizado especialmente como fonte de macro e micronutriente, não devendo ser ultrapassada a dose aproximada de 29 t ha^{-1} conforme doses entre 12,71 g dm^{-3} (NC 1,0) e 15,62 g dm^{-3} (NC 0,2), que maximizam a massa de matéria seca de parte aérea.

Palavras-chave: Cinza de café, crescimento, fertilizante alternativo, lodo seco, milho.

1. INTRODUÇÃO

A produção crescente de resíduos orgânicos e inorgânicos – advindos de atividades urbanas, industriais, agrícolas e pecuárias – constitui um problema sócio-ambiental atual importante e emergente. O reuso de resíduos se destaca, assim, por sua forte contribuição na sustentabilidade dos processos produtivos.

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo (FAOSTAT, 2016) e o Espírito Santo (ES) se destaca com a segunda maior produção entre os estados brasileiros, depois apenas de Minas Gerais. Contudo, o ES é o maior produtor de café conilon, conforme estimativa da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017).

Apesar da importância do setor cafeeiro para a economia mundial, brasileira e capixaba, o processamento do café gera anualmente grandes quantidades de resíduos sólidos. Pode-se inferir, segundo Dias et al., (2014), que cerca de 8,36 milhões de toneladas de resíduos sólidos são gerados, como: casca, folhas, polpa, mucilagem, pergaminho, película prateada, cinza e borra de café, e aproximadamente 191 milhões de toneladas de resíduos líquidos ou águas residuárias são produzidas em decorrência da lavagem dos frutos, despolpadores, tanques de fermentação e desmiuciladores (DURÁN et al., 2016).

Em especial, a borra de café é um resíduo obtido em grandes volumes no processo de fabricação do café solúvel (650 kg de borra por tonelada de café verde) (CLAUDE, 1979). A cinza é o resíduo obtido quando cascas ou borra de café são queimadas a fim de produzir calor para os processos de industrialização do fruto (DULTRA, 2013; VIOTTO, 1991). Contudo, os resíduos de café em suas diversas formas podem apresentar elevadas concentrações de açúcares, matéria orgânica, compostos orgânicos e inorgânicos, que podem causar graves problemas ambientais de despejados de maneira inadequada no ambiente (FAN; SOCCOL, 2005). O lodo seco do café é produzido a partir do resíduo proveniente da compressão da borra durante o processo de produção do café solúvel.

Assim, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei nº 12.305/10 (BRASIL, 2010) obriga os grandes empreendedores a fazer uma opção entre redução, reuso e reciclagem dos resíduos, reconhecendo o valor econômico dos resíduos.

Dessa maneira, se manipulados devidamente, os resíduos obtêm valor comercial e podem ser utilizados como novos insumos. O reuso de resíduos se apresenta, então, como uma prática viável que tem como consequência a diminuição do volume de resíduos e a promoção da preservação ambiental, além de aumentar o valor agregado do produto.

Pode-se citar, em relação ao resíduo de café, a utilização dos subprotudos da indústria na produção de ração animal (PIMENTA et al., 2011), na modelagem de briquetes (SOARES et al., 2015), na produção de biodiesel (KONDAMUDI et al., 2008), na produção de cogumelos (FAN et al., 2000) e na formação de adsorvente de baixo custo e facilmente disponível para a remoção de corantes catiônicos no tratamento de águas residuais (FRANCA et al., 2009). Entretanto, muitas vezes os processos não são tecnologicamente eficientes, causam poluição secundária ou são economicamente inviáveis. Na agricultura, seus reusos têm sido estudados por alguns pesquisadores: pode-se citar o uso de resíduo gerado na etapa de secagem de grãos de café como substrato alternativo para mudas de café conilon (MENEGHELLI et al.,2016) e a indicação da borra de café como fertilizante orgânico a partir da compostagem, por oferecer as plantas nutrientes permitindo ainda melhorar as qualidades químicas, físicas e biológicas do solo (LEITE et al., 2011).

No entanto, é limitada a literatura sobre as alterações no solo (KASONGO et al., 2011) e no crescimento das plantas causadas pela aplicação de resíduo de café, embora esse resíduo apresente indícios de potencial como adubo orgânico, oferecendo uma alternativa aos adubos químicos ou uso concomitante aos mesmos e propiciando desenvolvimento rural sustentável e preservação dos agroecossistemas.

Portanto, o reaproveitamento de resíduo de café se apresenta como um meio possível, todavia, seu reuso como fonte de nutrientes é um processo que requer estudos que apontem seus efeitos sobre o crescimento de plantas e sobre os teores de nutrientes do solo. O objetivo desse trabalho foi determinar as características de crescimento e os teores de nutrientes na parte aérea de plantas de milho (*Zea mays* L.), bem como a fertilidade do solo em consequência da aplicação de doses crescentes da mistura de lodo seco e de cinza provenientes do beneficiamento do café e duas doses de calcário.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e instalação do experimento

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação, na Fazenda Experimental Engenheiro Agrônomo Reginaldo Conde (20°25’23.9”S 40°28’38.1”W), pertencente ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper). Foi utilizado resíduo de processamento do café, obtido de uma beneficiadora de café de Viana/ES. Os tratamentos foram originados de um fatorial 5 x 2, sendo: doses da mistura de resíduo de café na proporção cinza : lodo seco (1:1) (0,0; 3,63; 7,25; 14,50; 18,13 g dm^{-3}, equivalentes a 7,26; 14,50; 29,00, 36,26 t ha^{-1}) x duas doses de calcário dolomítico PRNT 96% (0,2 e 1,0 vezes a necessidade de calagem - NC, calculadas pelo método da Saturação por Bases, utilizando-se Ve = 60%) (10 tratamentos). A cinza e o lodo seco são obtidos da seguinte maneira: na produção do café solúvel, os grãos torrados e moídos passam pela etapa de extração de substâncias solúveis com água quente. A borra é o resíduo sólido obtido após essa etapa de extração. Então, ela é prensada para reduzir a umidade e posteriormente é usada, juntamente com cavaco de eucalipto, na proporção 70% de borra e 30% de cavaco, como combustível na caldeira. A queima dessa mistura de borra e de cavaco origina a cinza. O caldo resultante da prensa da borra vai para a estação de tratamento de efluentes (ETE), onde é processado para retirar a umidade, resultando no lodo seco. O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, com três repetições, gerando um total de 10 tratamentos e 30 unidades experimentais, cada uma composta por um vaso contendo três plantas de milho, variedade ‘Capixaba Incaper 203’, desenvolvida pelo Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), com o apoio da Embrapa Milho e Sorgo, visando atender, sobretudo, o agricultor familiar do Estado do Espírito Santo.

O lodo seco foi posto espaçadamente à sombra para que fosse reduzida a sua umidade. O solo e o lodo foram peneirados em malha de 6 mm e de 2 mm, respectivamente. Foram realizadas análises para caracterização do solo - camada mais profunda, eliminando-se o horizonte a e b -, segundo Embrapa (SILVA et al., 1998) (Tabelas 1 e 2) e do resíduo (MAPA, 2014) (Tabela 3) utilizados no experimento. Os tratamentos foram aplicados do seguinte modo: misturaram-se, de forma homogênea, as doses da mistura de resíduos de café, o calcário dolomítico e o solo (4,5 dm^3). As misturas foram colocadas em vasos com capacidade de 5 L por 30 dias com aplicação de água destilada, mantendo-se a umidade das

amostras de solo próxima à capacidade de campo (100% da água disponível no solo), para que pudesse ocorrer a mineralização dos nutrientes. Logo após, seis sementes de milho foram plantadas em cada vaso, a 1 cm de profundidade. Mantiveram-se os vasos irrigados. Quatorze dias após a germinação, foi realizado o desbaste, deixando-se três plantas por vaso. Estas foram cultivadas por 40 dias com manutenção da irrigação.

Tabela 1. Resultados analíticos da amostra de solo utilizada no experimento antes da aplicação dos tratamentos.

pH[1/]	P Mehlich[2/]	K[2/]	$Ca^{+23/}$	$Mg^{2+3/}$	$Al^{3+3/}$	MO[4/]	P-rem[5/]	t	T	V	m
	--- mg dm^{-3} ---		------ $cmol_c$ dm^{-3} ------			dag kg^{-1}	mg L^{-1}	$cmol_c$ dm^{-3}		------ % ------	
5,1	5	10	0,3	0,1	0,4	0,2	7	0,8	3,5	12,1	48

Metodologia conforme Silva et al. (1998): [1/]pH em água (1:2,5); [2/]HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,025 mol L^{-1}; [3/]KCl, 1 mol L^{-1}, [4/]Oxidação: $Na_2Cr_2O_7$ 2 H_2O + 4 molL^{-1} H_2SO_4 10 mol L^{-1}; [5/]P em solução de equilíbrio, obtido com $CaCl_2$ 10mm L^{-1}. Onde: MO=matéria orgânica; t=capacidade de troca catiônica efetiva; T=capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V=saturação de bases e m=saturação por alumínio.

Tabela 2. Características físicas do solo utilizado como substrato no experimento antes da aplicação dos tratamentos.

Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila[1/]	Classificação textual[2/]
---------- g kg^{-1} ----------				
242	124	194	440	Argila

Metodologia conforme Silva et al. (1998): [1/]Argila: Método do densímetro;[2/]Classificação textural de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Tabela 3. Caracterização dos resíduos de café, cinza e lodo seco, utilizados no experimento.

Material	Umidade a 60-65°C	N[2/]	K_2O[3/]	P_2O_5[3/]	C[1/]	Ca[3/]	Mg[3/]	MOt	MOc	Na[3/]	S[3/]	Fe[3/]	Zn[3/]	Mn[3/]
	---------- % ----------											----- ppm -----		
Cinza	38,83	0,86	2,86	1,81	15	17,2	1,56	51,3	27	0,18	0,96	0,6	127	2827
Lodo seco	15,34	4,66	0,24	0,71	40	1,37	0,16	86,8	72	2,55	0,53	0,24	55,6	169

Metodologia preconizada pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2014): [1/]Oxidação com bicromato de potássio; [2/]Digestão sulfúrica; [3/]Digestão nitro-perclórica. C = carbono orgânico; MOt = matéria orgânica total; MOc = matéria orgânica compostável.

2.2 Análise química do solo

Ao final do experimento, três amostras do solo de cada tratamento, totalizando 30 amostras, foram coletadas, secas à sombra e peneiradas em malha de 2 mm para a caracterização química, de acordo com os métodos da Embrapa (SILVA et al. 1998) a seguir: ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na)

foram extraídos com extrator Mehlich 1, enquanto cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1}. A acidez potencial (H+Al) foi obtida com extrator SMP. O potencial de hidrogênio (pH) em água na relação 1:2,5, enquanto o teor de matéria orgânica foi extraído com oxidação de $Na_2Cr_2O_7$ 4mol L^{-1} + L^{-1} + $H_2SO_4$10 mol L^{-1}. O enxofre (S) foi extraído com fosfato monocálcico em ácido acético, o boro (B) em $BaCI_2$ $2H_2O$ 0,125% e o cloro (Cl) em H_2O 1:5.

2.3 Análises de macro e micronutrientes da parte aérea

Ao final do experimento, amostras de parte aérea foram acondicionadas em estufa a 60 ºC, até a obtenção de massa constante. Três amostras de cada tratamento foram embaladas, etiquetadas e enviadas para a caracterização de macro e micronutrientes, conforme os métodos da Embrapa (SILVA et al. 1998) a seguir: N por digestão ácida a quente; P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn e Na por digestão nitro-perclórica; B e Al por digestão seca; e Cl por digestão aquosa.

2.4 Análise de crescimento

Foi determinada a altura das plantas e mensurado o diâmetro do colmo, com auxílio de paquímetro analógico (141-112, Cosa), aos 7, 28 e 39 dias de experimento, após o desbaste das plantas. Ao final do experimento, foi também determinado o comprimento foliar da maior folha de cada indivíduo, com auxílio de fita métrica. A colheita foi realizada com corte rente ao solo, sendo separadas parte aérea e raízes. Essas frações foram secas em estufa de circulação forçada de ar (70ºC) até atingirem peso constante, sendo obtida, então, a massa de matéria seca de cada fração.

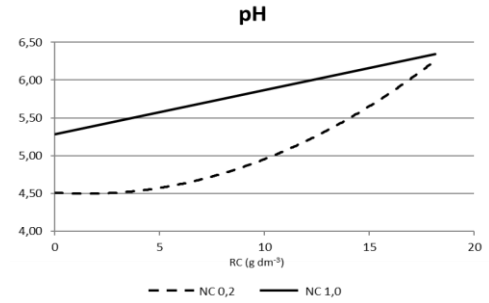
2.5 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de regressão para avaliar os efeitos das doses do resíduo de beneficiamento do café e doses de calcário nas plantas de milho. Todas as avaliações foram executadas pelo programa Saeg (2013), UAEG-CTRN-UFCG, Campina Grande – PB.

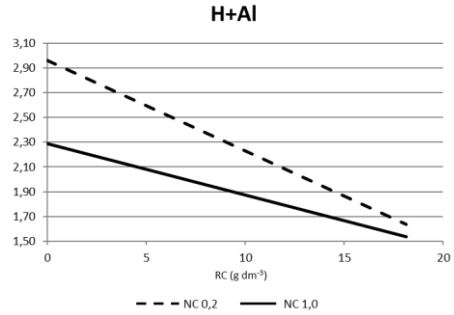
3. RESULTADOS

3.1 Análise química do solo

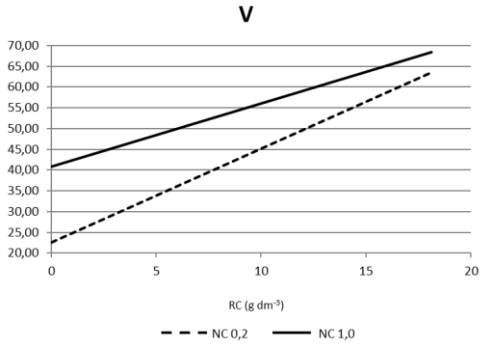
A aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do café elevou os valores de pH, de saturação de bases (V), de soma de bases (SB), da capacidade de troca catiônica efetiva (t) e da capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T) nos dois níveis de calagem. Por outro lado, o valor da acidez potencial (H + Al) diminuiu de maneira consistente nos dois níveis de calagem (Figuras 1 e 2). Tanto os teores de cálcio (Ca^{2+}) quanto de magnésio (Mg^{2+}) aumentaram com aplicação de doses crescentes de resíduo de café, especialmente no maior nível de calagem (1,0 x NC) (Figura 3). Do mesmo modo os teores de potássio (K) se elevaram à medida que a concentração de resíduo de café aumentou, principalmente sob a maior dose de calcário (Figura 3). Quanto aos micronutrientes avaliados, somente Mn, Cu e Zn, sofreram influência de doses crescentes do resíduo (Figura 4). Enquanto Mn e Cu apresentaram acréscimo no solo a partir de doses crescentes de resíduo de café, o Zn apresentou comportamento inverso, sendo seus teores reduzidos a partir da aplicação de resíduo, em ambos os níveis de calagem, mas de maneira mais acentuada sob a menor dose. A matéria orgânica (MO) decresceu até as concentrações aproximadas de 10 g dm^{-3} e de 14,5 g dm^{-3}, sob a dose menor e a maior de calcário, respectivamente, a partir das quais voltaram a crescer (Figura 2).



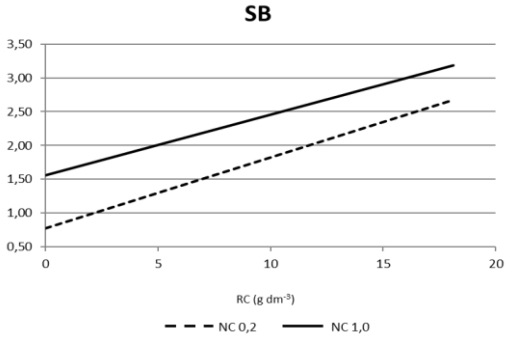
Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 4,5111-0,01931RC+0,006376°RC^2$	0,92
1,0 NC	$\hat{y} =5,2844^{**}+0,05848^{**}RC$	0,93



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 2,9620^{**} - 0,07302^{*}RC$	0,95
1,0 NC	$\hat{y} = 2,2877^{**}-0,0414^{*}8RC$	0,91

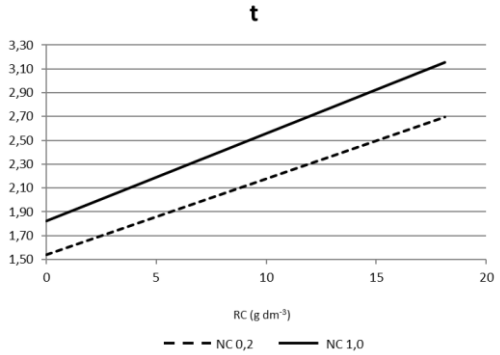


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 22,5073^{*}+2,2653^{*}RC$	0,87
1,0 NC	$\hat{y} = 40,9106^{**}+1,5126^{**}RC$	0,97

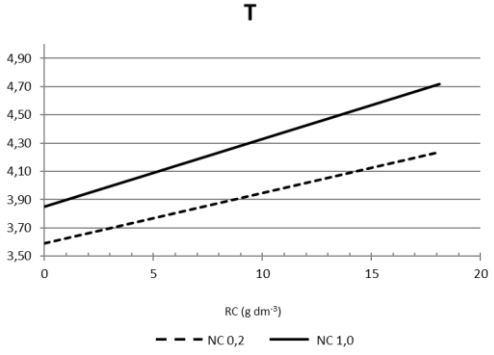


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 0,7712^{*}+0,1052^{**}RC$	0,93
1,0 NC	$\hat{y} = 1,5604^{**}+0,08959^{**}RC$	0,95

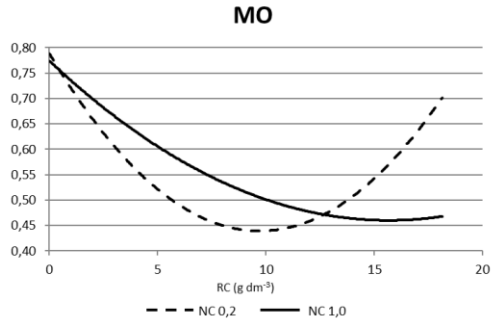
Figura 1. Estimativa de valores de pH, H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$), saturação por bases (V, %) e soma de bases (SB, $cmol_c\ dm^{-3}$) no solo, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y}$ =1,5379**+0,06383**RC	0,99
1,0 NC	$\hat{y}$ = 1,8209**+0,07345**RC	0,92

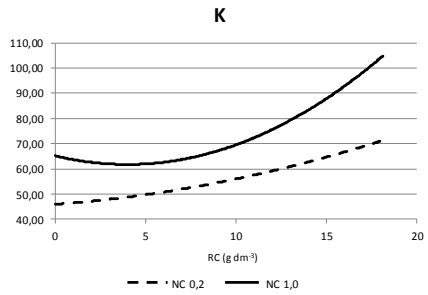


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y}$ =3,5884**+0,03581*RC	0,81
1,0 NC	$\hat{y}$ = 3,8480**+0,04811*RC	0,71

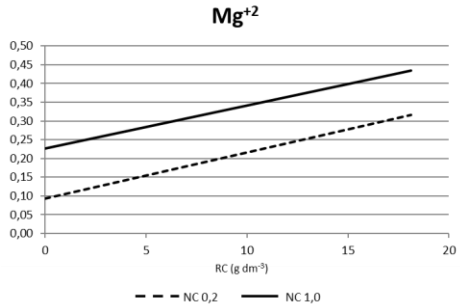


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y}$ = 0,7885**-0,0719°RC+0,0037°RC²	0,99
1,0 NC	$\hat{y}$ =0,7742**-0,04010°RC+0,001280$^{°}$RC²	-

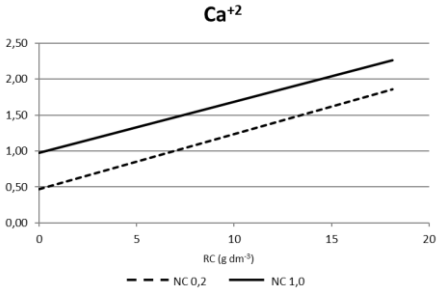
Figura 2. Estimativa de valores de CTC efetiva (t, $cmol_c$ dm^{-3}), CTC a pH 7,0 (T, $cmol_c$ dm^{-3}) e matéria orgânica (dag kg^{-1}), decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 45{,}9482^{**}+0{,}5150^{**}RC+0{,}04885^{**}RC^2$	0,99
1,0 NC	$\hat{y} = 65{,}1898^{*}-1{,}7185RC+0{,}2153RC^2$	0,90

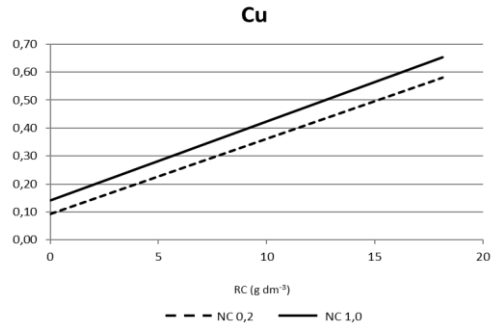


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 0{,}093^{\circ}+0{,}0123^{*}RC$	0,85
1,0 NC	$\hat{y} = 0{,}2271^{**}+0{,}01144^{*}RC$	0,86

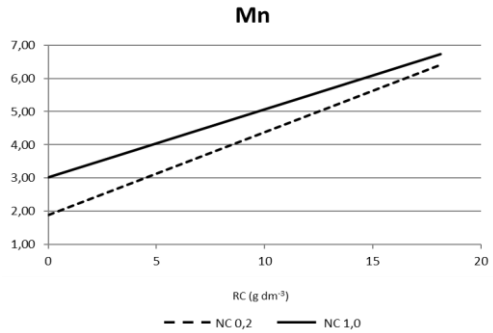


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 0{,}4681^{**}-0{,}07644RC$	0,85
1,0 NC	$\hat{y} = 0{,}9727^{**}+0{,}07131^{**}RC$	0,99

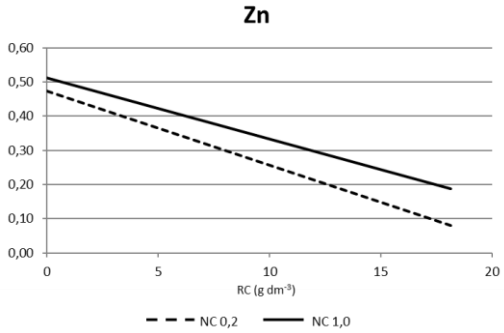
Figura 3. Estimativa de valores de K (mg dm^{-3}), Mg^{2+} ($cmol_c$ dm^{-3}) e Ca^{2+} ($cmol_c$ dm^{-3}), decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y}$ =0,09222°+0,02694**RC	0,95
1,0 NC	$\hat{y}$ = 0,1411*+0,02822**RC	0,95



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y}$ = 1,8991*+0,02491**RC	0,94
1,0 NC	$\hat{y}$ = 3,0232*+0,2041°RC	0,70



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y}$ =0,4739**-0,02168RC	0,93
1,0 NC	$\hat{y}$ = 0,5119**-0,01785RC	0,99

Figura 4. Estimativa de valores de Cu, Mn e Zn (mg dm^{-3}), decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.

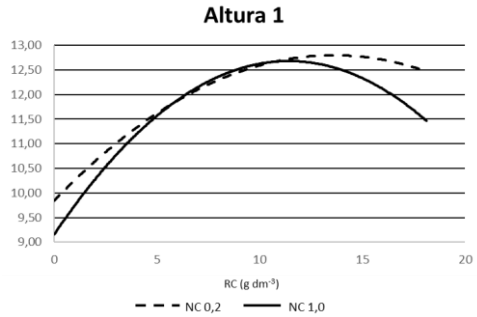
3.2 Análises de macro e micronutrientes de parte aérea

Não houve diferenças significativas entre os teores de macro e micro nutrientes da parte aérea em relação às aplicações de doses crescentes de resíduo de café e duas doses de calagem.

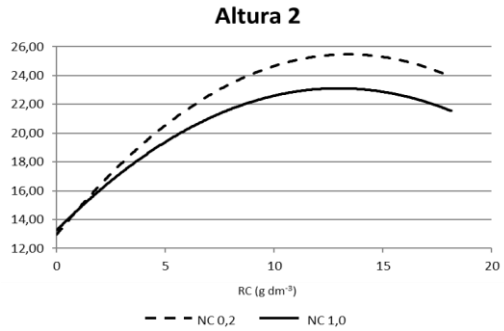
3.3 Análises de crescimento

O efeito das doses crescentes de resíduo de café foi quadrático para todas as variáveis de crescimento. A aplicação de doses crescentes de resíduo de café proporcionou o incremento da altura das plantas (altura) aos 7, 28 e 39 dias de experimento, após o desbaste das plantas (Figuras 5), respectivamente até as doses 13,60 g dm^{-3} (NC 0,2) e 11,42 g dm^{-3} (NC 1,0), 14,56 g dm^{-3} (NC 0,2) e 13,82 g dm^{-3} (NC 1,0), e 13,24 g dm^{-3} (NC 0,2) e 11,48 g

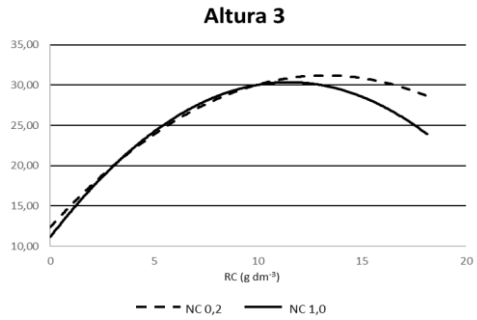
dm^{-3} (NC 1,0), conforme pontos de máximo das equações das regressões, logo após essas medidas começaram a decrescer. A aplicação de doses crescentes de resíduo de café também causou o incremento do diâmetro do colmo (DC) aos 7, 28 e 39 dias de experimento, após o desbaste das plantas (Figuras 6), respectivamente até as doses 15,23 g dm^{-3} (NC 0,2) e 14,05 g dm^{-3} (NC 1,0), 26,18 g dm^{-3} (NC 0,2) e 15,37 g dm^{-3} (NC 1,0), e 32,06 g dm^{-3} (NC 0,2) e 12,62 g dm^{-3} (NC 1,0), segundo pontos de máximo das equações das regressões, logo após essas medidas começaram a decrescer. O resíduo de café propiciou o acréscimo da massa de matéria seca de parte aérea (MSPA), da massa de matéria seca radicular (MSR) e do comprimento da folha maior (COMPF) (Figura 7) respectivamente até as doses 15,62 g dm^{-3} (NC 0,2) e 12,71 g dm^{-3} (NC 1,0), 16,09 g dm^{-3} (NC 0,2) e 11,47 g dm^{-3} (NC 1,0), e 18,47 g dm^{-3} (NC 0,2) e 13,48 g dm^{-3} (NC 1,0), conforme pontos de máximo das equações das regressões, logo após essas medidas começaram a decrescer.



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 9{,}8438^{**}+0{,}4345RC^{*}-0{,}01597^{*}RC^2$	0,98
1,0 NC	$\hat{y} = 9{,}159^{**}+0{,}6167^{**}RC-0{,}027^{**}RC^2$	0,99

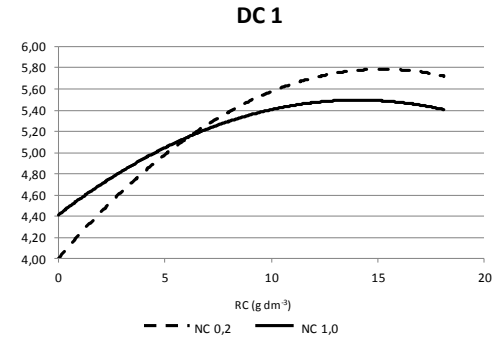


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 12{,}9714^{*}+1{,}8643RC-0{,}06954RC^2$	0,88
1,0 NC	$\hat{y} = 13{,}2611^{*}+1{,}5197^{\circ}RC-0{,}05861RC^2$	0,93

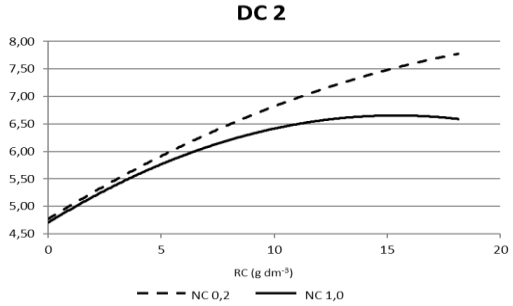


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 12{,}3523^{\circ}+2{,}8491RC-0{,}1076^{\circ}RC^2$	0,87
1,0 NC	$\hat{y} = 11{,}1385^{\circ}+3{,}3509^{\circ}RC-0{,}14599^{\circ}RC^2$	0,92

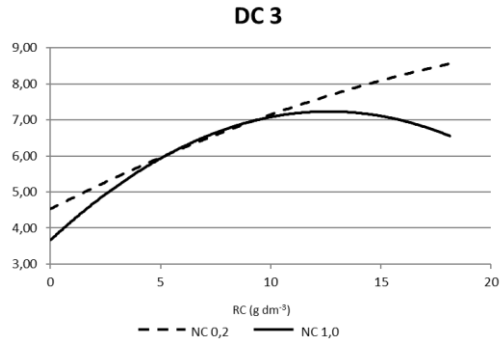
Figura 5. Estimativa de valores de altura de planta (altura, cm) aos 7 (altura 1), 28 (altura 2) e 39 (altura 3) dias de experimento, após o desbaste das plantas, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 4{,}0053^{**}+0{,}2338^{**}RC-0{,}007675^{*}RC^2$	0,99
1,0 NC	$\hat{y} = 4{,}4150+0{,}1537RC-0{,}005468^{\circ}RC^2$	0,94

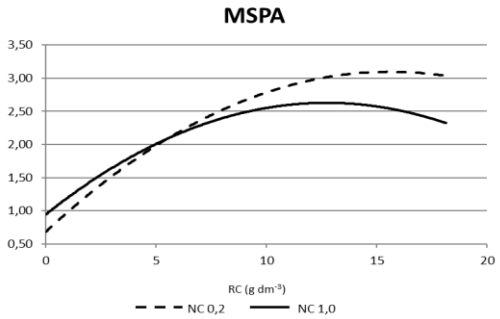


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 4{,}7709^{**}+0{,}2533RC-0{,}004837RC^2$	0,96
1,0 NC	$\hat{y} = 4{,}7043^{**}+0{,}2536RC-0{,}008251RC^2$	0,86

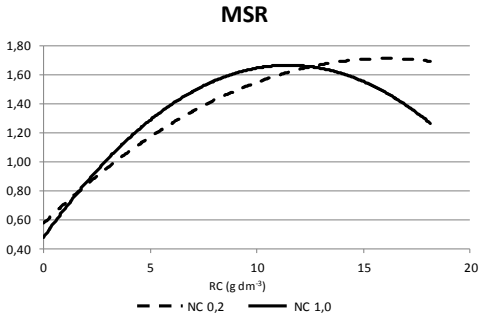


Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y} = 4{,}5316^{**}+0{,}3099RC-0{,}004833RC^2$	0,96
1,0 NC	$\hat{y} = 3{,}6684^{**}+0{,}5651^{\circ}RC-0{,}02239^{\circ}RC^2$	0,93

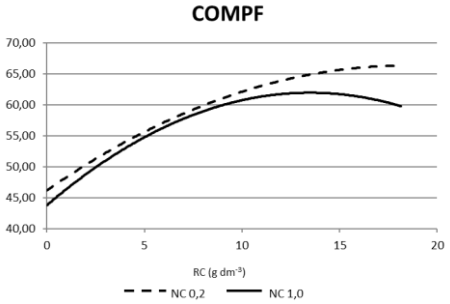
Figura 6. Estimativa de valores de diâmetro do colmo (DC, mm) aos 7 (DC 1), 28 (DC 2) e 39 (DC 3) dias de experimento, após o desbaste das plantas, decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y}$ = 0,6828+0,30919RC-0,00990RC^2	0,86
1,0 NC	$\hat{y}$ =0,9449*+0,2647*RC-0,01041*RC^2	0,98



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y}$ = 0,5747+0,1414RC-0,0043936RC^2	0,83
1,0 NC	$\hat{y}$ =0,4773+0,2075°RC-0,009049RC^2	0,88



Nível de Calagem	Equação	R^2
0,2 NC	$\hat{y}$ = 46,2015**+2,1870**RC-0,05928*RC^2	0,99
1,0 NC	$\hat{y}$ = 43,8027**+2,6960**RC-0,100**RC^2	0,99

Figura 7. Estimativa de valores de massa de matéria seca de parte aérea (MSPA, g), massa de matéria seca de raiz (MSR, g) e comprimento da folha maior (COMPF, cm), decorrentes da aplicação de doses de resíduo de café (RC), em dois níveis de calagem. **, * e ° são significativos aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.

4. DISCUSSÃO

A aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do café elevou os valores de pH, de saturação de bases (V), de soma de bases (SB), da capacidade de troca catiônica efetiva (t) e da capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T) nos dois níveis de calagem. Por outro lado, o valor da acidez potencial (H + Al) diminuiu de maneira consistente nos dois níveis de calagem (Figura 1).

Esses resultados revelam que os níveis de calagem a que foi submetido o solo foram fator determinante em relação ao efeito do resíduo de café. O aumento do nível de calagem de 0,2 x NC para 1,0 x NC elevou o valor de pH do solo em 1,4% sob a maior dose de resíduo de café (pH = 6,26 sob a menor dose de calcário para pH = 6,34 sob a maior dose de calcário). Essa observação é confirmada por Caires et al. (2008), que também observaram aumento no pH ao aplicarem doses mais elevadas de calcário. No entanto, o valor estimado alcançado no nível de calagem mais baixo sofreu também maior influência do resíduo de café, que elevou o pH do solo de 4,50 para 6,26 (Figura 1), o que já era de se esperar, uma vez que o efeito de qualquer material passível de reduzir a acidez dos solos é maior em condições nas quais o pH do solo é mais baixo (Figura 1) (CAIRES et al., 2002).

Vale ressaltar que o pH e a V iniciais do solo eram de 5,1 e 12,1 %, respectivamente (Tabela 1), e a calagem foi realmente efetiva em elevar tanto o pH quanto a V a níveis adequados (Figura 1). Ao final do experimento, o solo apresentou V estimado = 64%, para o menor nível de calagem e V = 68% para o maior nível de calagem. Para Embrapa (2010), solos que apresentam porcentagem de saturação de bases igual ou acima de 50% são considerados férteis, ou seja, eutróficos. Assim, pode-se afirmar, segundo esses critérios, que a calagem foi capaz de transformar um solo pobre em um solo fértil.

De qualquer maneira, com a aplicação de doses crescentes do resíduo de café, os valores de pH aumentaram consistentemente (Figura 1). Isso porque o resíduo de café, tanto o lodo como a cinza, possuem compostos orgânicos (JORDAN et al., 2002), que elevam o pH (Tabela 3): as substâncias húmicas, principal componente da matéria orgânica do solo, têm função tamponante em amplos intervalos de pH, pois têm a capacidade de doar e receber íons H^+, ajudando a manter o equilíbrio da solução do solo (ROCHA e ROSA, 2003). Isso reduz a necessidade da adição de doses elevadas de calcário para correção da acidez dos solos agrícolas. Assim, passando a aplicação de resíduo de 0 para 18,13 g dm^{-3} (36 t ha^{-1}), ocorre um aumento no pH do solo de 1,75 e 1,06, aproximadamente, para os níveis de 0,2 e 1,0 vezes a necessidade de calagem, nessa ordem. Exatamente por isso, a redução no valor de H + Al do

solo se fez presente nos dois níveis de calagem, porém, em maior grau no menor nível, uma vez que a redução da acidez a partir do resíduo foi um pouco mais efetiva neste nível (Figura 1).

O aumento da V e da soma de bases (SB) (Figura 1) está diretamente ligado ao acréscimo de cálcio, magnésio e potássio no solo via resíduo de café. Tanto os teores de Ca^{2+} quanto de Mg^{2+} e de potássio (K^{+}) aumentaram com aplicação de doses crescentes de resíduo de café, nos dois níveis de calagem, sobretudo no maior nível (1,0 x NC). Esse resultado não era esperado, pois, em tese, haveria menor dissolução do resíduo quando os valores de pH do solo fossem mais elevados. Entretanto, o resíduo continuou se solubilizando adequadamente mesmo em pH 6,3, fato corroborado pelos incrementos quadráticos de SB, V, Mg^{2+}, Ca^{2+}e K^{+}, no nível de calagem mais elevado (1,0 x NC) (Figura 1 e 3). Além da solubilização ser aparentemente contínua até pH 6,3, a disponibilidade de Mg^{2+} e Ca^{2+} se eleva quanto maior for o pH do solo, até o ponto ideal próximo a 6,5, que possibilita a maior disponibilidade desses elementos (PRADO, 2008).

O incremento nos teores de Ca^{2+}, Mg^{2+}e K^{+}, e consequente elevação da SB e da V, em relação às doses crescentes de resíduo, pode ser explicado, novamente, pela constituição básica do resíduo de café em forma de cinza, que possui altas concentrações de Ca^{2+}, de Mg^{2+} e de K^{+} (Tabela 6). Esses resultados corroboram os obtidos por Caldeira et al. (2013) e Faria et al. (2013), que encontraram concentrações altas e iguais a 29,1; 4,2 e 0,8 g kg^{-1} de Ca, Mg e K, respectivamente, em resíduo de café do tipo palha *in natura*. No atual estudo, as concentrações encontradas na cinza foram ainda maiores: 170,16; 15,6 e 28,6 g kg^{-1} de Ca, Mg e K_2O, nessa ordem. No lodo seco do café os teores foram de 13,7; 1,6 e 2,4 g kg^{-1}de Ca, Mg e K_2O, respectivamente. Esses dados indicam uma maior riqueza nutricional da cinza do café em relação a esses nutrientes.

Quanto aos micronutrientes avaliados, somente manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), sofreram influência de doses crescentes do resíduo (Figura 4). Enquanto Mn e Cu apresentaram acréscimo no solo a partir de doses crescentes de resíduo de café, o Zn apresentou comportamento inverso, sendo seus teores reduzidos a partir da aplicação de resíduo, em ambos os níveis de calagem, mas de maneira mais acentuada sob a menor dose. A sua disponibilidade é muito influenciada por diversos fatores e o mais importante é o valor de pH do solo, sendo que quanto mais alto, menor será a disponibilidade desse elemento na solução do solo.

O maior crescimento das plantas à medida que se elevou a concentração de resíduo de café no solo, demonstrados pelos valores de: altura de plantas (altura) (Figura 5), diâmetro do

colmo (DC) (Figura 6), massa de matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz (MSR) e comprimento da folha maior (COMPF) (Figura 7) pode ser explicado pela maior disponibilidade de nutrientes (K, Ca, Mg e Mn) (Figura 3 e 4) como supracitado, que são necessários ao crescimento de plantas, além da melhoria das condições do solo com aumento do pH. Esses resultados estão de acordo com os dados obtidos por Ferreira (2011), que avaliou o potencial da borra de café como adubo e constatou a sua influência positiva sobre altura e biomassa de *Lactuca sativa* L. Santos et al. (2002) determinou a influência de diferentes concentrações do extrato aquoso de cascas de café sobre o *Amaranthus viridis L.*, que apresentou maior crescimento inicial e massa da matérias seca de acordo com o aumento das concentrações do extrato. Além disso, Caldeira et al. (2013), verificaram em seu trabalho, MSPA e MSR maiores nos tratamentos com componentes orgânicos, como por exemplo a palha de café *in natura*. Dessa maneira, pode-se afirmar que a adição de uma fonte orgânica de nutriente, como os resíduos de café, pode proporcionar maior disponibilidade de nutrientes e, consequentemente, maior crescimento das plantas.

Ainda, a queda, em geral, das medidas das variáveis de crescimento (Figuras 5, 6 e 7) a partir das concentrações de resíduo de café conforme pontos de máximo das equações das regressões supracitadas pode ser explicada, possivelmente por alguns efeitos inibitórios da borra do café, que dá origem ao lodo do café, e que pode conter cafeína, taninos e polifenóis (FAN; SOCCOL, 2005). A cafeína é um metabólito secundário natural com função biológica em algumas plantas, como o cafeeiro, e serve como mecanismo de defesa química. Entretanto, quando outras plantas são expostas a essa substância, efeitos adversos podem ocorrer. Mohanpuria e Yadav (2009) observaram atraso mitótico e dano cromossômico nas células vegetais em proliferação, bem como atraso no crescimento de mudas e indução da senescência inicial das plantas.

5. CONCLUSÕES

1. A adição de calcário elevou o pH do solo e reduziu a acidez potencial (H+Al) .
2. A aplicação de doses crescentes do resíduo de beneficiamento do café elevou o pH do solo e reduziu a acidez potencial (H+Al), em grande magnitude.
3. resíduo de beneficiamento do café aumentou os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K, Mn, Cu e os valores de soma de bases.
4. resíduo de beneficiamento do café proporcionou crescimento adequado das plantas até os pontos de máximo apresentados, logo após as medidas começaram a decrescer.
5. O resíduo de beneficiamento do café pode ser utilizado especialmente como fonte de macro e micronutriente, não devendo ser ultrapassada a dose aproximada de 29 t ha^{-1} conforme doses entre 12,71 g dm^{-3} (NC 1,0) e 15,62 g dm^{-3} (NC 0,2), que maximizam a massa de matéria seca de parte aérea, variável mais relevante que deve ser considerada para recomendação da dose de resíduo a ser utilizada.

6. REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Brasília.Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 9 fev. 2018.

CAIRES, E.F. et al. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1011-1022, 2002.

CAIRES, E. F. et al. Soil acidity, liming and soybean performance under no-till. **Scientia Agricola**, v.65, n.5, p.532-540, 2008.

CALDEIRA, M.V.W. et al. Substratos alternativos na produção de mudas de *Chamaecrista desvauxii*. **Revista Árvore**, v.37, n.1, 2013.

CLAUDE, B. Étude bibliographique: utilisation dês sous-produits du café. **Café, Cacao, Thé**, v.23, n.2, p.146-152, 1979.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café,** v. 4, Safra 2017, n.4, Quarto levantamento, Brasília: Conab, p.1-84, dez. 2017.

DIAS, D.R. et al. Management and utilization of wastes from coffee processing. In: SCHWAN, R. F.; FLEET, G. H. (Eds.). **Cocoa and coffee fermentations**. Boca Raton: CRC Taylor e Francis, 2014, p. 545-588.

DULTRA, E.J.V. **Adição de subprodutos da cinza da casca de café**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

DURÁN, C.A.A. et al. Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida. **Revista Virtual de Química. Rio de Janeiro**, v.9, n.1, p.107-134, 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária . **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**: Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010.

FAN, L.; SOCCOL, C. Shiitake Bag Cultivation. Parte I Shiitake. **Coffee Residues**. Mushroom Grower´s Handbook. Mushworld All, 2005.

FAN, L. at al. Use of various coffee industry residues for the cultivation of Pleurotusostreatus in solid state fermentation. **Engineering in Life Sciences**, v.20, n.1, p.41-52, 2000.

FAOSTAT. **Countries by commodity 2016** - Coffee, green. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: 11 fev. 2018.

FARIA, J.C.T. et al. Uso de resíduos orgânicos no crescimento de mudas de *Mimosa setosa*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.33, n.76, p.409-418, 2013.

FERREIRA, A.D. **Influência da borra de café no crescimento e nas propriedades químicas e biológicas de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.)**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestre em Qualidade e Segurança Alimentar) - Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior Agrária, 2011.

FRANCA A.S.; OLIVEIRA L. S.; FERREIRA M. E. Kinetics and equilibrium studies of methylene blue adsorption by spent coffee grounds. **Desalination**, v.249, n.1, p.267-272, 2009.

KASONGO, R.K. et al. Coffee waste as an alternative fertilizer with soil improving properties for sandy soils in humid tropical environments. **Soil use and Management**, v.27, n.1, p.94-102, 2011.

KONDAMUDI, N.; MOHAPATRA, S.K.; MISRA, M. Spent coffee grounds as a versatile source of green energy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.56, n.24, p.11757-11760, 2008.

LEITE, S.T. et al. A compostagem como alternativa para aproveitamento da borra de café.**Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, v.7, n.13, p.1068, 2011.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilidade e corretivos**. Brasília: Mapa, 2014.

MENEGHELLI, C.M. et al. Resíduo da secagem dos grãos de café como substrato alternativo em mudas de café Conilon. **Coffee Science**, v.11, n.3, p.330 - 335, 2016.

MOHANPURIA, P.; YADAV,S.K. Retardation in seeding growth and induction of early senescence in plants upon caffeine exposure is related to its negative effect on Rubisco. **Photosynthetica**, v.47, n.2, p.293-297, 2009.

PIMENTA, C.J. et al. Aproveitamento do resíduo do café na alimentação de tilápia do Nilo. **Archivos de zootecnia**, v.60, n.231, p.583-593, 2011.

PRADO, R. **Nutrição de Plantas**. São Paulo: Unesp, 2008.

ROCHA, J.C. e ROSA, A.H. **Substâncias húmicas aquáticas: Interações com espécies metálicas**. São Paulo, Universidade Estadual de São Paulo, 2003. p.120.

SANTOS, J.C.F. et al. Efeito de extratos de cascas de café e de arroz na emergência e no crescimento do caruru-de-mancha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.6, p.783-790, 2002.

SILVA F.C da et al. **Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**: métodos usados na Embrapa Solos. Campinas: Embrapa, 1998.

SOARES, L. de S.S. et al. Use of Waste Coffee Grounds and Sawdust in Briquettes Molding and Evaluation of Properties. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v.20, n.2, p.550-560, 2015.

VIOTTO, L.A., **Projeto e avaliação econômica de sistemas de secagem de borra de café**. 1991. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

CAPÍTULO 3 – Efeitos dos resíduos de beneficiamento do café e do granito sobre as características químicas de fertilidade do solo e sobre a morfoanatomia e a fisiologia de plantas de *Zea mays* L.

RESUMO

No estado do Espírito Santo, os setores de beneficiamento de rochas ornamentais e de café são relevantes para a economia. Contudo, essas atividades industriais geram toneladas de resíduos diariamente e o reaproveitamento evidencia-se por sua grande colaboração na sustentabilidade dos processos produtivos. O aproveitamento desses resíduos como fontes alternativas de nutrientes para plantas é um processo que exige estudos para identificar suas influências no crescimento vegetal e nos teores de nutrientes do solo. No atual estudo foram utilizados resíduos de beneficiamento do granito, obtido em tear multifio, e de beneficiamento do café proveniente da industrialização do café instantâneo (cinza e lodo seco). Os tratamentos originaram-se de um fatorial (1+1+1) x 2, sendo: uma dose de resíduo de granito (5 g dm^{-3} equivalente a 10 t ha^{-1}), uma dose de mistura de resíduo de café na proporção cinza : lodo seco (1:1) (14,5 g dm^{-3} equivalente a 29 t ha^{-1}), mais o controle (0 g dm^{-3}) x com e sem calagem, totalizando seis tratamentos. As plantas de milho foram cultivadas, em vasos, por 40 dias. O solo e a parte aérea foram analisados quimicamente e o crescimento, a anatomia foliar e radicular, os pigmentos fotossintéticos, a fluorescência da clorofila *a*, as trocas gasosas e os carboidratos solúveis foram determinados. A partir dos resultados pôde-se concluir que: os tratamentos com resíduo de granito mais superfosfato simples (SS) elevaram a concentração de fósforo no solo em relação aos demais tratamentos, ao passo que os tratamentos com resíduo de café aumentaram os teores de potássio, cálcio e manganês em relação aos demais tratamentos. A adição de calcário tendeu a elevar os valores de soma de bases, capacidade de troca catiônica a pH 7, capacidade de troca catiônica efetiva e saturação de bases, bem como de alguns nutrientes, em relação a não adição de calcário. Além disso, a calagem tendeu a elevar o pH e a reduzir a acidez potencial, mas em pequena magnitude. O uso de resíduo de granito mais SS proporcionou, em via de regra, maiores conteúdo de nutrientes por massa de matéria seca da parte aérea por vaso e crescimento quando comparado ao uso de resíduo de café, que por sua vez, propiciou maiores valores dessas variáveis em relação a não aplicação de resíduos. Em geral, a aplicação de ambos os resíduos propiciaram o incremento das variáveis anatômicas, de teor de clorofila *a*, da fluorescência transiente e modulada da clorofila *a*, de trocas gasosas e de carboidratos solúveis totais quando comparada a não

aplicação de resíduos. Os resultados obtidos permitem sugerir que o resíduo de beneficiamento do granito via fio diamantado mais SS pode ser utilizado na dose de 10 t ha^{-1} e o resíduo de beneficiamento do café pode ser usado na dose de 29 t ha^{-1}, favorecendo o crescimento inicial adequado das plantas.

Palavras-chave: Crescimento, cinza de café, fertilizante alternativo, fio diamantado, lodo seco.

1. INTRODUÇÃO

Os setores de rochas ornamentais e de café se destacam na economia brasileira e capixaba, entretanto, geram toneladas de resíduos diariamente. O reaproveitamento desses resíduos se apresenta como uma ação importante, pois contribui com a sustentabilidade dos processos produtivos além de aumentar o lucro por produção.

O Brasil é o quarto maior produtor de rochas ornamentais do mundo (MONTANI, 2017) e a atividade do beneficiamento de rochas gerou cerca de 3,1 milhões de toneladas de resíduos no ano de 2016, segundo Abirochas apud Montani, 2017.

Em relação ao café, o Brasil é o maior produtor mundial (ICO, 2017) e toneladas de resíduos são geradas anualmente devido aos processos de beneficiamento e produção da bebida. Pode-se destacar que na fabricação do café solúvel, uma tonelada de café em coco gera cerca de 650 kg de borra (CLAUDE, 1979). Além disso, são geradas toneladas de cinzas pelo reaproveitamento por meio da queima de cascas de café e de borra de café que produz energia para alimentar os processos de beneficiamento industrial (DULTRA, 2013). Ademais, é gerado também o lodo do café, após tratamento em estações do resíduo líquido proveniente da secagem da borra, que a torna propicia ao uso como combustível na caldeira.

Regularmente, os resíduos de granito e de café são descartados de maneira inadequada e podem alcançar os recursos hídricos, o que provoca problemas de assoreamento e também contaminação da água e do solo (MATOS et al., 2007; MATOS; LO MONACO, 2003).

Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei n° 12.305/2010 (BRASIL, 2010), institui a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável, além da destinação ambientalmente adequada dos resíduos e dos rejeitos. Desse modo, com o manejo apropriado por meio do reuso ou da reciclagem, os resíduos podem adquirir valor comercial sendo utilizados como novas matérias-primas. Isso contribui para reduzir o volume de resíduos, promover preservação ambiental e gerar renda.

Há pesquisas que apontam o uso do resíduo de beneficiamento do granito na agricultura como corretivo de acidez de solo (COSTA et al., 2010) e adubo (THEODORO; LEONARDOS, 2006), bem como a utilização de resíduo de café proveniente do beneficiamento do fruto como fertilizante orgânico, por oferecer às plantas riqueza nutricional e permitir ainda melhoria nas qualidades químicas, físicas e biológicas do solo (LEITE et al., 2011). Contudo, o aproveitamento de resíduos como fontes alternativas de nutrientes para

plantas é um processo que exige ainda muitos estudos que identifiquem sua influência no crescimento das culturas e nos teores de nutrientes do solo.

Dessa maneira, o objetivo do presente estudo foi determinar os teores de nutrientes do solo, bem como a concentração de nutrientes da parte aérea, o crescimento, a anatomia foliar e radicular, a fluorescência da clorofila, a fotossíntese, os teores foliares de clorofilas e carotenoides totais e os conteúdos foliares de carboidratos solúveis de plantas de milho (*Zea mays* L.), decorrentes da aplicação do lodo seco e da cinza provenientes do beneficiamento de café e da lama granítica advinda do beneficiamento de granito, na presença e na ausência de calcário.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e instalação do experimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação e em laboratório do Setor de Botânica (20º16’29.4”S 40º18’17.0”W), Departamento de Ciências Biológicas, localizados no campus de Goiabeiras da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), Vitória, ES. Utilizou-se resíduo de beneficiamento de granito (pó de rocha), obtido em tear multifio de uma beneficiadora de Jacaraípe/ES, e resíduo de café de uma beneficiadora de Viana/ES. Os tratamentos foram originados de um fatorial (1+1+1) x 2, conforme Tabela 1, sendo: uma dose de resíduo de granito (5 g dm^{-3}equivalente a 10 t ha^{-1}), uma dose de mistura de resíduo de café na proporção cinza : lodo seco (1:1) (14,5 g dm^{-3} equivalente a 29 t ha^{-1}), mais o controle (0 g dm^{-3}) x sem e com calcário dolomítico PRNT 96% (1,0 vezes a necessidade de calagem, calculada pelo método da Saturação por Bases, utilizando-se Ve = 60%), gerando seis tratamentos. A cinza e o lodo seco são obtidos do seguinte modo: na produção do café solúvel, os grãos torrados e moídos passam pela etapa de extração de substâncias solúveis com água quente, o que resulta na borra como resíduo. Então, ela é prensada a fim de diminuir sua umidade e posteriormente é utilizada, junto com cavaco de eucalipto, na proporção 70% de borra e 30% de cavaco, como combustível na caldeira, o que gera a cinza como resíduo. O caldo resultante da prensa da borra vai para a estação de tratamento de efluentes (ETE), onde é processado para retirar a umidade, resultando no lodo seco. O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, com cinco repetições, perfazendo um total de 30 unidades experimentais, cada uma composta por um vaso contendo três plantas de milho, variedade ‘Capixaba Incaper 203’.

O lodo e a lama granítica foram postos espaçadamente à sombra para que fosse reduzida a umidade. O solo e os resíduos foram peneirados em malha de 6 mm e de 2 mm, respectivamente. Foram realizadas análises físico-químicas do solo utilizado no experimento - camada mais profunda, eliminando-se o horizonte a e b -, segundo Embrapa (SILVA et al., 1998) (Tabelas 2 e 3) e análises químicas dos resíduos de beneficiamento do granito (Tabela 4) e do café (Tabela 5) (MAPA, 2014). Os tratamentos foram aplicados do seguinte modo: misturou-se, de forma homogênea, resíduo de granito, superfosfato simples (200 mg dm^{-3}) e solo; resíduo de granito, superfosfato simples (200 mg dm^{-3}), calcário dolomítico e solo; resíduo de café e solo; resíduo de café, calcário dolomítico e solo (4,5 $dm^{3,}$); além dos tratamentos originados pela mistura somente de solo e calcário e o tratamento controle

absoluto composto de apenas solo. A quantidade de solo utilizada foi a mesma para todos os vasos e igual a 4,5 dm^3. As misturas foram acondicionadas em vasos com capacidade de 5 L por 30 dias com aplicação de água destilada, mantendo-se a umidade das amostras de solo próxima à capacidade de campo (100% da água disponível no solo). Seis sementes de milho foram plantadas em cada vaso, a 1 cm de profundidade. Sete dias após a germinação, foi realizado o desbaste, deixando-se três plantas por vaso. Estas foram cultivadas por 40 dias, mantendo-se a irrigação. Duas aplicações de 111 mg dm^{-3} de uréia foram feitas como fator constante para todos os indivíduos.

Tabela 1. Descrição das misturas utilizadas no experimento e sigla de seus respectivos tratamentos.

Tratamentos	Descrição das misturas
T1	controle absoluto
T2	calcário
T3	resíduo de granito + superfosfato simples
T4	resíduo de granito + superfosfato simples + calcário
T5	resíduo de café
T6	resíduo de café + calcário

Tabela 2. Resultados analíticos da amostra de solo utilizada no experimento antes da aplicação dos tratamentos.

pH[1/]	P Mehlich[2/]	K[2/]	$Ca^{2+3/}$	$Mg^{2+3/}$	$Al^{3+3/}$	MO[4/]	P-rem[5/]	t	T	V	m
	--- mg dm^{-3} ---		------ $cmol_c$ dm^{-3} ------			dag kg^{-1}	mg L^{-1}	$cmol_c$ dm^{-3}		------ % ------	
5,1	5,6	19	0,5	0,1	0,4	0,9	8	1,1	3,3	21	38

Metodologia conforme Silva et al. (1998): [1/]pH em água (1:2,5); [2/]HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,025 mol L^{-1}; [3/]KCl, 1 mol L^{-1}, [4/]Oxidação: $Na_2Cr_2O_7$ 2 H_2O + 4 mol L^{-1} H_2SO_4 10 mol L^{-1}; [5/]P em solução de equilíbrio, obtido com $CaCl_2$ 10mm L^{-1}. Onde: MO=matéria orgânica; t=capacidade de troca catiônica efetiva; T=capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V=saturação de bases e m=saturação por alumínio.

Tabela 3. Características físicas do solo utilizado como substrato no experimento antes da aplicação dos tratamentos.

Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila[1/]	Classificação textual[2/]
---------- g kg^{-1} ----------				
242	124	194	440	Argila

Metodologia conforme Silva et al. (1998) e Iac – Boletim Técnico 106 (2009):[1/]Argila: Método do densímetro;[2/]Classificação textural de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Tabela 4. Caracterização do resíduo de beneficiamento do granito (RG) utilizado no experimento.

Material	N[1/]	K_2O[2/]	P_2O_5[2/]	Ca[2/]	Mg[2/]	S[2/]	Zn[2/]	Fe[2/]	Mn[2/]	Cu[2/]	Cd[2/]	Cr[2/]	Pb[2/]	Ni[2/]
								%						
RG	0,48	0,025	0,014	0,128	0,038	0,017	0,0004	0,119	0,029	0,022	0,0002	0,001	0,0003	0,036

Metodologia preconizada pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2014): [1/]Digestão sulfúrica; [2/]Digestão nitro-perclórica.

Tabela 5. Caracterização dos resíduos de café, cinza e lodo seco, utilizados no experimento.

Material	Umidade a 60-65°C	N[2/]	K_2O[3/]	P_2O_5[3/]	C[1/]	Ca[3/]	Mg[3/]	MOt	MOc	Na[3/]	S[3/]	Fe[3/]	Zn[3/]	Mn[3/]
	----------	----------	----------	----------	%	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----- ppm	-----
Cinza	38,83	0,86	2,86	1,81	15	17,2	1,56	51,3	27	0,18	0,96	0,6	127	2827
Lodo seco	15,34	4,66	0,24	0,71	40	1,37	0,16	86,8	72	2,55	0,53	0,24	55,6	169

Metodologia preconizada pelo Ministério da Agricultura (MAPA, 2014): [1/]Oxidação com bicromato de potássio; [2/]Digestão sulfúrica; [3/]Digestão nitro-perclórica. C = carbono orgânico; MOt = matéria orgânica total; MOc = matéria orgânica compostável.

2.2 Análise química do solo

Ao final do experimento, cinco amostras do solo por tratamento (uma amostra por unidade experimental), totalizando 30 amostras, foram coletadas, secas à sombra e peneiradas em malha de 2 mm para a caracterização química, conforme metodologia da Embrapa (SILVA et al., 1998): ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na) foram extraídos com extrator Mehlich 1, enquanto cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1}. A acidez potencial (H+Al) foi obtida com extrator SMP. O potencial de hidrogênio (pH) em água determinado na relação 1:2,5, enquanto o teor de matéria orgânica foi extraído com oxidação de $Na_2Cr_2O_7$ 4 mol L^{-1} + L^{-1}+H_2SO_4 10 molL^{-1}. O enxofre (S) foi extraído com fosfato monocálcico em ácido acético, o boro (B) em $BaCI_2$ $2H_2O$ 0,125% e o cloro (Cl) em H_2O 1:5.

2.3 Análise de macro e micronutrientes da parte aérea

Ao fim do experimento, cinco amostras de parte aérea por tratamento (uma amostra por unidade experimental), totalizando 30 amostras, foram acondicionadas em estufa a 60 ºC, até a obtenção de massa constante. As amostras foram enviadas ao laboratório para a caracterização de macro e micronutrientes, conforme métodos da Embrapa (SILVA et al., 1998): N por digestão ácida a quente; P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn e Na por digestão nitro-perclórica; B e Al por digestão seca; e Cl por digestão aquosa.

2.4 Conteúdo absoluto de macro e micronutrientes na massa de matéria seca da parte aérea por vaso

Foi calculado, ao final do experimento, o conteúdo total de macro e micronutrientes, dado em gramas, na massa de matéria seca da parte aérea por vaso. Para isso multiplicou-se o conteúdo de cada nutriente da parte aérea pela massa de matéria seca total de cada vaso.

2.5 Análise de crescimento vegetal

Aos 15 dias após germinação e 40 dias, foram medidos altura das plantas, diâmetro do colmo, massas de matéria seca da raiz e da parte aérea, bem como a área foliar. Para a obtenção da massa de matéria seca, o material vegetal foi acondicionado em estufa a 60ºC até a obtenção de massa constante, que ocorreu aos cinco dias. A área foliar foi mensurada com scanner de geração de imagens (Area Meter, LI-COR 3100, Nebraska, EUA).

A partir dos dados obtidos foram calculados a massa foliar específica (MFE = massa seca foliar total/área foliar total), área foliar total (AFT), taxa assimilatória líquida [TAL = (lnA2 – lnA1 / A2–A1) x (M2–M1/T2–T1)], taxa de crescimento relativo [TCR = (lnM2-lnM1)/(T2-T1)], razão de área foliar (RAF = AF/MST), razão raiz:parte aérea (R:PA), razão de massa foliar (RMF = MF/MST), razão de massa do colmo (RMC = MC/MST), razão de massa radicular (RMR = MR/MST) e teor de água foliar (massa fresca foliar – massa seca foliar), segundo Hunt (1982), em que, A1 = área foliar total inicial; A2 = área foliar total final; M1 = massa inicial; M2 = massa final; T1 = tempo inicial; T2 = tempo final; Ln = Log natural; MF = massa foliar, MC = massa caulinar, MR = massa radicular, AF = área foliar, TAF = teor de água foliar e MST = massa seca total.

O Índice de Qualidade de Dickson (IQD) foi obtido pela equação de Dickson et al. (1960):

$$IQD = \frac{MST_{(g)}}{Altura_{(cm)}/DC_{(mm)} + MSPA_{(g)}/MSR_{(g)}}$$

Em que: MST(g) = massa seca total; DC(mm) = diâmetro do colmo; MSPA(g) = massa de matéria seca da parte aérea; MSR(g) = massa de matéria seca da raiz.

2.6 Anatomia vegetal

Amostras de folhas jovens totalmente expandidas, com bom estado fitossanitário, foram conservadas em etanol 70%. Para as análises foliares foram utilizados segmentos da porção mediana da lamina foliar e os cortes realizados com auxílio de um micrótomo de mesa. A análise anatômica quantitativa foi realizada por meio de medições das espessuras do limbo, da nervura mediana e da epiderme das faces adaxial e abaxial, sendo 30 medições para cada variável analisada.

A densidade estomática (nº de estômato mm^{-2}) bem como o número de estômatos por folha foram determinados a partir da impressão epidérmica das faces adaxial e abaxial da folha, em lâminas de vidro com uso de adesivo instantâneo universal éster de cianoacrilato (Super-Bonder, EUA). Seis campos ópticos aleatórios foram analisados por indivíduo, totalizando 30 campos ópticos por tratamento.

Amostras de raízes foram conservadas em etanol 70%. Para as análises radiculares foram utilizados segmentos a 3 cm de distância do colmo e os cortes realizados com auxílio de um micrótomo de mesa. A análise anatômica quantitativa foi realizada por meio de medições das espessuras da raiz, da epiderme e do córtex, do diâmetro do cilindro vascular e do metaxilema, sendo 15 medições para cada variável analisada. Todas as observações foram realizadas em fotomicroscópio Nikon Eclipse 50i (Japão) e as análises quantitativas foram feitas por meio de software – Tsview v.6.1.3.2 (TucsenImaging Technology Co. Limited).

2.7 Extração e determinação de clorofilas e carotenoides totais

Os extratos para as determinações dos pigmentos fotossintéticos clorofilas e carotenoides totais foram obtidos a partir de 0,04 g de massa fresca foliar em homogeneização com etanol 95%. O homogeneizado foi incubado durante 24 h, a 4ºC, no escuro.

Determinaram-se os valores de clorofilas e carotenoides totais em leitura espectrofotométrica (Genesys 10S UV-Vis, Thermo Fisher Scientific, Waltham, EUA). Os comprimentos de onda foram obtidos segundo as equações de Lichtenthaler e Buschmann (2001): Clorofila *a* = (13,36.A664) – (5,19.A648); Clorofila *b* = (27,43.A648) – (8,12 . A664); ClorofilaTotal = Clorofila *a* + Clorofila *b*; Carotenoides = (1000.A470) – (2,13.clorofila*a*) – (97,64.clorofila *b*)/209. Em que A470 = absorbância a 470nm; A664 =

absorbância a 664nm; A648 = absorbância a 648nm. Os resultados foram apresentados em miligramas por grama de massa fresca.

2.8 Fluorescência da clorofila a

A emissão da fluorescência transiente OJIP foi medida com um fluorômetro portátil (Handy Pea, Hansatech Instruments Ltd., UK), no período entre 7 e 9h em folhas jovens totalmente expandidas adaptadas ao escuro por 30 minutos. Induziu-se a fluorescência nas folhas por pulso saturante de luz vermelha de 3.500 μmol fótons m^{-2} s^{-1}. As definições e equações do teste JIP utilizadas seguiram a proposta de Strasser et al. (2004), sendo escolhidas as seguintes variáveis:

– $\delta R_0 = RE_0/ET_0$: Eficiência que elétrons se movem dos receptores do intersistema até os receptores finais do fotossistema I (FSI).

– $\varphi P_0 = Fv/F_M$: Rendimento quântico máximo do fotossistema II (FSII).

– $\psi E_0 = ET_0/TR_0$: Eficiência com que a energia move o elétron na cadeia de transporte de elétrons após a quinona A (Q_A).

– RC/ABS: Densidade de centros de reação fotossinteticamente ativos do FSII (redução da Q_A por centro de reação do FSII).

– DI_0/RC: Fluxo de dissipação de energia por centro de reação em tempo zero (t = 0).

– PI_{ABS}: Conservação de energia de fótons absorvidos pelo FSII para a redução dos receptores de elétrons do intersistema (índice de desempenho potencial do FSII), resultado da multiplicação: $(RC/ABS).[\varphi P_0/(1- \varphi P_0)].[\psi E_0/(1-\psi E_0)]$.

– PI_{TOTAL}: Conservação de energia dos fótons absorvidos pelo FSII para a redução dos receptores finais do FSI (índice de desempenho fotoquímico total), sendo resultado da multiplicação: $PI_{ABS}.[\delta R_0/(1- \delta R_0)]$.

As variáveis coeficiente de extinção fotoquímica (q_p) e transporte de elétrons (ETR) da fluorescência modulada foram dadas pelo fluorômetro modulado acoplado ao analisador de gás infravermelho (LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA).

2.9 Trocas gasosas

As medições de trocas gasosas foram feitas nas mesmas folhas utilizadas para a análise da fluorescência, entre 7 e 11h, utilizando-se um analisador de gás infravermelho (LI-

6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA). O sistema foi mantido constante sob irradiância de 1500 µmol de fótons m^{-2} s^{-1}, 400 µmol CO_2 mol^{-1} ar e temperatura de 27 ºC, sendo obtidos os dados de assimilação líquida de CO_2 (*A*), transpiração (*E*), condutância estomática (g_s), concentração subestomática de CO_2 (C_i), eficiência do uso da água (*A/E*), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) e eficiência intrínseca do uso de água (A/g_s).

2.10 Extração de carboidratos solúveis

Amostras de folhas secas foram moídas em moinho de bola e 150 mg de amostras foram pesadas e pulverizadas em tubos plásticos de 15 mL, com adição de 5 mL de etanol 80% para extração dos carboidratos solúveis: glicose, frutose e sacarose, conforme adaptação do protocolo de Pollock (1986). Após esses procedimentos, os tubos foram levados ao banho-maria a 80 °C durante 20 minutos. Depois, levou-se os tubos para a centrífuga a 10.000 rpm por 6 minutos e reservou-se o sobrenadante em tubos plásticos. A operação repetiu-se por mais duas vezes. Em seguida, os sobrenadantes foram secos em concentrador de amostras e, subsequentemente, os açúcares foram ressuspendidos com 1 mL de solução saturada (1 mg L^{-1} de frutose, glicose e sacarose). Filtrou-se o sobrenadante em tubos plásticos de 2 mL e a solução foi congelada e aplicada em HPLC (Shimadzu com detector de refração e coluna CLC-NH_2) para determinação da concentração dos carboidratos.

2.11 Análises estatísticas

Os dados relativos a todas as avaliações realizadas acima foram submetidos à análise de variância (Anova) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade ($P < 0,05$). As análises foram executadas pelo programa estatístico Saeg (2013), UAEG-CTRN-UFCG, Campina Grande – PB.

3. RESULTADOS

3.1 Análises químicas do solo

Os resultados sobre os teores de nutrientes do solo estão na Tabela 6. O resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) propiciou o maior teor de fósforo (P) no solo, seguido do resíduo de café com calcário (T6) e do resíduo de café sem calcário (T5), que por sua vez, possibilitou maior teor de P no solo que os tratamentos sem resíduos (T1 e T2). A calagem somente influenciou o teor de P no solo nos tratamentos com resíduo de café, sendo o valor maior com a aplicação de calcário (T6). Acerca do potássio (K), o resíduo de café mais calcário (T6) proporcionou valores maiores no solo, seguido do resíduo de café sem calcário (T5), em relação aos demais tratamentos, que não apresentaram diferenças significativas entre si. O resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) ocasionou concentração maior de enxofre (S) no solo quando comparado aos demais tratamentos, que não influenciaram o teor desse nutriente no solo. A aplicação de resíduo de café com calcário (T6) conferiu teor maior de cálcio (Ca) no solo seguida decrescentemente pela aplicação de resíduo de café sem calcário (T5), resíduo de granito mais SS com calcário (T4), resíduo de granito mais SS sem calcário (T3) / aplicação de somente calcário (T2) e controle absoluto (T1). Desse modo, pode-se afirmar que os valores de Ca foram maiores quando na presença de calcário em relação à ausência de calcário, em todas as situações. Quanto ao conteúdo de magnésio (Mg) no solo, esse variou em decorrência da aplicação de calcário nos tratamentos sem resíduos e nos tratamentos com resíduo de granito, sendo os valores maiores quando na presença de calagem relativamente à ausência de calagem. Os valores maiores desse nutriente ocorreram no tratamento com somente calcário (T2) e no tratamento com resíduo de café com calcário (T6), que por sua vez não proporcionou diferença estatística em relação ao tratamento com resíduo de café sem calcário (T5) para essa variável. A presença de calcário proporcionou maior disponibilidade de Mg em relação a não aplicação de calcário nos tratamentos sem resíduos (T1 e T2) e nos tratamentos com resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente). O resíduo de granito mais SS (T3) causou teor maior de alumínio (Al) no solo quando comparado aos demais tratamentos, exceto pelo controle absoluto (T1), do qual não diferiu. Pode-se dizer que os valores de acidez potencial (H+Al) foram maiores quando na presença de calcário em relação à ausência de calcário, em todas as situações. Além disso, a H+Al foi maior para o tratamento com granito mais SS (T3) seguido decrescentemente do controle absoluto (T1),

que não diferiu estatisticamente do tratamento com resíduo de granito mais SS com calcário (T4), que por sua vez não diferiu significativamente da aplicação de somente calcário (T2) e do tratamento com resíduo de café sem calcário (T5). O resíduo de café com calcário (T6) foi o que permitiu menor valor de H+Al no solo. O resíduo de café com calcário (T6) proporcionou maior pH que o resíduo de café sem calcário (T5), que por sua vez propiciou maior pH que os tratamentos com somente calcário (T2), resíduo de granito mais SS com calcário (T4) e controle absoluto (T1). O pH não diferiu significativamente entre os tratamentos controle absoluto (T1) e com resíduo de granito mais SS sem calcário (T3). Ademais, a aplicação de calcário causou valores menores de pH dentro dos tratamentos com resíduo de granito mais SS e de café. O resíduo de granito mais SS sem calcário (T3) possibilitou teor menor de matéria orgânica (MO) no solo em comparação aos tratamentos com resíduo de café (T5 e T6) e ao tratamento controle absoluto (T1). Os tratamentos com resíduo de café (T5 e T6) e com resíduo de granito mais SS com calcário (T4) favoreceram teores maiores de zinco (Zn) no solo que os demais tratamentos, à exceção de T6 que não causou diferença estatística em relação ao T3 quanto a essa variável. Os tratamentos com resíduo de granito mais SS (T3 e T4) elevaram o teor de cobre (Cu) no solo em relação aos tratamentos com resíduo de café (T5 e T6), que por suas vezes elevaram o teor de Cu no solo quando comparados aos tratamentos sem resíduos (T1 e T2). Quanto ao teor de manganês (Mn) no solo, os tratamentos com resíduo de café (T5 e T6) viabilizaram teores maiores que os demais tratamentos, que não causaram diferenças significativas no teor desse nutriente. O granito mais SS (T3) causou maior teor de boro (B) no solo que a aplicação de somente calcário (T2). Já o conteúdo de sódio (Na) no solo foi maior nos tratamentos com resíduo de café (T5 e T6), seguido dos tratamentos sem resíduos (T1 e T2) e logo após dos tratamentos com resíduo de granito (T3 e T4). O tratamento com resíduo de café mais calcário (T6) proporcionou valores maiores de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica efetiva (t) e saturação de bases (V) quando comparado à aplicação desse resíduo na ausência de calcário (T5). A capacidade de troca catiônica total (T) não diferiu em decorrência dos tratamentos com resíduo de café (T5 e T6). Além disso, a aplicação de resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente) propiciou valores maiores de SB, t, T e V em relação à aplicação de resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente). Por suas vezes, os tratamentos com resíduo de granito melhoraram as propriedades químicas do solo, como SB, t, T e V em comparação ao controle absoluto (T1) (Tabela 6). A aplicação de calcário tendeu a valores maiores de SB, t, T e V quando comparada a não aplicação de calcário.

Tabela 6. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre os teores de nutrientes do solo após o experimento.

Variáveis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Fósforo Mehlich (mg dm^{-3})	5,60 d	5,80 d	17,40 a	17,40 a	8,80 c	11,40 b
Potássio(mg dm^{-3})	10,4 c	10,4 c	10,8 c	10,2 c	28,8 b	34,6 a
Enxofre (mg dm^{-3})	48,0 b	50,0 b	84,0 a	74,4 a	47,6 b	44,2 b
Cálcio ($cmol_c$ dm^{-3})	0,38 e	0,92 d	1,02 d	1,38 c	1,98 b	2,42 a
Magnésio ($cmol_c$ dm^{-3})	0,20 cd	0,54 a	0,10 d	0,22 c	0,42 b	0,46 ab
Alumínio ($cmol_c$ dm^{-3})	0,020 ab	0,000 b	0,060 a	0,000 b	0,000 b	0,000 b
H+Al ($cmol_c$ dm^{-3})	2,08 b	1,86 c	2,36 a	2,00 bc	1,80 c	1,50 d
pH em H_20	5,9 cd	6,0 c	5,7 d	6,0 c	6,5 b	6,8 a
Matéria orgânica (dag dm^{-3})	0,46 a	0,40 ab	0,36 b	0,40 ab	0,45 a	0,46 a
Ferro (mg dm^{-3})	42,6 ns	49,2	39,0	44,6	48,2	46,6
Zinco (mg dm^{-3})	0,60 c	0,58 c	0,66 bc	0,94 a	0,88 a	0,82 ab
Cobre (mg dm^{-3})	0,28 c	0,30 c	1,18 a	1,16 a	0,78 b	0,86 b
Manganês (mg dm^{-3})	2,00 b	2,00 b	3,20 b	3,20 b	6,40 a	8,80 a
Boro (mg dm^{-3})	0,34 ab	0,26 b	0,44 a	0,38 ab	0,42 ab	0,34 ab
Sódio (mg dm^{-3})	12,4 b	10,8 b	7,4 c	7,6 c	29,3 a	34,0 a
Soma de bases (SB) ($cmol_c$ dm^{-3})	0,66 e	1,53 cd	1,18 d	1,72 c	2,60 b	3,11 a
CTC efetiva (t) ($cmol_c$ dm^{-3})	0,68 e	1,53 cd	1,24 d	1,72 c	2,60 b	3,11 a
CTC a pH 7,0 (T) ($cmol_c$ dm^{-3})	2,82 c	3,39 b	3,54 b	3,72 b	4,40 a	4,61 a
Saturação de bases (V) (%)	23,6 e	45,1 c	33,4 d	46,1 c	59,1 b	67,4 a

Letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os valores são médias ($n = 5$).

3.2 Análises de macro e micronutrientes da parte aérea

Os teores de macro e micronutrientes da parte aérea encontram-se na Tabela 7. O controle absoluto (T1) proporcionou maior teor de enxofre em relação ao resíduo de granito mais SS (T3) e ao resíduo de café (T5). O resíduo de café (T5) propiciou maior teor de potássio que os outros tratamentos. Para os demais elementos não houve diferença estatística entre os tratamentos.

Tabela 7. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre os teores de macro e micronutrientes da parte aérea de plantas de milho.

Variáveis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Macronutrientes (dag kg^{-1})						
Nitrogênio	2,80 ns	3,02	2,65	2,97	2,71	3,00
Fósforo	0,168 ns	0,158	0,176	0,177	0,163	0,171
Potássio	1,68 b	1,25 b	1,13 b	1,25 b	2,50 a	1,60 b
Cálcio	1,49 ns	1,48	1,53	1,24	1,42	1,25
Magnésio	0,542 ns	0,573	0,376	0,575	0,469	0,470
Enxofre	0,203 a	0,182 ab	0,147 b	0,190 ab	0,153 b	0,168 ab
Micronutrientes (mg kg^{-1})						
Ferro	200 ns	151	123	126	114	153
Zinco	12,2 ns	11,2	14,0	10,8	17,0	14,0
Cobre	8,40 ns	7,00	7,80	8,00	7,60	8,20
Manganês	98,2 ns	84,6	114,4	82,8	106,6	113,4
Boro	22,8 ns	33,2	19,8	21,4	35,6	30,8

Letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os valores são médias ($n = 5$).

3.3 Conteúdo de macro e de micronutrientes totais na massa de matéria seca de parte aérea total por vaso

O conteúdo em termos absolutos de nutrientes, dado em grama, na massa de matéria seca da parte aérea por vaso encontra-se na Tabela 8. Os tratamentos com resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) provocaram maiores acúmulos de todos os nutrientes por vaso quando comparados aos tratamentos sem resíduos (T1 e T2). Os tratamentos com resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente) proporcionaram, de maneira geral, também maiores concentrações absolutas de nutrientes por vaso quando comparados aos tratamentos sem resíduos (T1 e T2). Entre os tratamentos com resíduos, os resultados revelam que o resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) propiciou maiores conteúdos absolutos de fósforo, cálcio, cobre e manganês por vaso em relação ao resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente). Por outro lado, a calagem juntamente ao resíduo de granito mais SS (T4) causou valores maiores de nitrogênio, magnésio e enxofre em comparação aos tratamentos com resíduo de café (T5 e T6), porém, a não calagem junto ao resíduo de granito mais SS (T3) tendeu a valores não significativamente distintos dos valores para esses nutrientes em relação aos tratamentos com resíduo de café (T5 e T6). O conteúdo absoluto de potássio,

ferro, zinco e boro não diferiram estatisticamente em decorrência da aplicação dos tratamentos com resíduos. A calagem ocasionou valores absolutos maiores de nitrogênio, magnésio e enxofre por vaso nos tratamentos com resíduo de granito mais SS com calcário (T4) em comparação a não calagem (T3).

Tabela 8. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre o conteúdo absoluto de macro e micronutrientes na massa de matéria seca da parte aérea por vaso.

Variáveis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Macronutrientes (g/vaso)						
Nitrogênio	0,027 d	0,032 d	0,160 b	0,237 a	0,110 bc	0,104 c
Fósforo	0,002 c	0,002 c	0,011 a	0,014 a	0,007 b	0,006 b
Potássio	0,016 b	0,013 b	0,070 a	0,102 a	0,107 a	0,054 ab
Cálcio	0,014 c	0,016 c	0,092 a	0,093 a	0,057 b	0,043 b
Magnésio	0,005 d	0,006 cd	0,020 b	0,045 a	0,019 b	0,016 bc
Enxofre	0,002 c	0,002 c	0,009 b	0,015 a	0,006 b	0,006 b
Micronutrientes (g/vaso)						
Ferro	0,000183 b	0,000164 b	0,000750 a	0,000850 a	0,000544 a	0,000582 a
Zinco	0,000012 b	0,000012 b	0,000083 a	0,000086 a	0,000068 a	0,000048 ab
Cobre	0,000008 c	0,000008 c	0,000047 a	0,000064 a	0,000031 b	0,000028 b
Manganês	0,000093 c	0,000091 c	0,000685 a	0,000666 a	0,000415 b	0,000395 b
Boro	0,000021 b	0,000028 b	0,000119 a	0,000170 a	0,000140 a	0,000104 a

Letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os valores são médias ($n = 5$).

3.4 Análises de crescimento

Observaram-se diferenças expressivas entre as plantas com relação ao crescimento em resposta aos tratamentos (Tabela 9).

Os tratamentos com resíduo de granito (RG) - resíduo de granito mais superfosfato simples (SS) na ausência e na presença de calcário (T3 e T4, respectivamente) -, bem como os tratamentos com resíduo de café (RC) - resíduo de café na ausência e na presença de calcário (T5 e T6, nessa ordem) - conferiram maiores altura das plantas e diâmetro do colmo (DC), praticamente o dobro, que os tratamentos sem resíduo (SR) - controle absoluto (T1) e presença de somente calcário (T2). T4 proporcionou maior altura que T6 e maior DC que ambos os tratamentos com RC.

Quanto ao número de folhas (NF), T4 e T5 permitiram maior número em relação aos tratamentos SR.

A aplicação de resíduos de granito mais SS e de café, os dois com e sem calcário, conferiram maior AFT quando comparada a não aplicação de resíduos, com e sem calcário, sendo T4 o que proporcionou valor maior dessa variável, seguido por T3 e após, pelos tratamentos com RC. Semelhantemente, a área foliar unitária (AFU) seguiu ordem decrescente em decorrência dos tratamentos: RG (T3 e T4) > RC (T5 e T6) > SR (T1 e T2).

O emprego de resíduos de granito mais SS e de café, ambos na presença e na ausência de calcário, ocasionou, em geral, menor área foliar específica (AFE) quando comparado a não aplicação de resíduos com e sem calcário. A exceção é T6 e T1, que não causaram diferenças significativas quanto a essa variável.

Os tratamentos com resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) conferiram maior biomassa quando comparados aos tratamentos com resíduo de café (T5 e T6), que por suas vezes, em via de regra, proporcionaram maior biomassa que os tratamentos sem resíduos (T1 e T2). Entende-se por biomassa as variáveis: massa de matéria seca foliar total (MSF total), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), massa de matéria seca radicular (MSR), massa de matéria seca do colmo (MSC) e massa de matéria seca total (MST). A massa foliar específica (MFE), a razão de massa foliar (RMF) e a razão de massa do colmo (RMC) seguiram padrão semelhante às variáveis de biomassa.

A aplicação de resíduo de café sem calcário (T5) proporcionou maior razão de área foliar (RAF) do que a simples aplicação de calcário (T2), não diferindo dos demais tratamentos.

Em contrapartida, os tratamentos sem resíduos viabilizaram maiores razão de massa radicular (RMR) e razão raiz/parte aérea (R:PA) quando comparados aos demais tratamentos com o uso de resíduos.

Os tratamentos com resíduo de granito mais SS (T3 e T4) tenderam a maiores taxa de assimilação líquida de carbono (TAL), taxa de crescimento relativo (TCR), teor de água foliar (TAF) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) quando comparados aos tratamentos com resíduo de café (T5 e T6), que por suas vezes, propiciaram valores maiores dessas variáveis que os tratamentos sem uso de resíduos (T1 e T2).

Em suma, de modo geral, a utilização de ambos os resíduos com e sem calagem (T3, T4, T5 e T6) proporcionou o incremento no crescimento das plantas em comparação a não utilização de resíduos com e sem calagem (T1 e T2). Além disso, dentre os tratamentos com aplicação de resíduos, em grande parte, o de granito mais SS (T3 e T4) propiciou valores maiores das variáveis relativamente ao de café (T5 e T6). A calagem não influenciou significativamente as variáveis de crescimento das plantas que receberam os tratamentos sem

resíduos e os tratamentos com resíduo de café. Entretanto, o calcário causou incremento das variáveis: AFT, MSF total, MSC, TAL e TAF nos indivíduos submetidos aos tratamentos com resíduo de granito mais SS.

Tabela 9. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre altura, diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), área foliar total (AFT), área foliar unitária (AFU), área foliar específica (AFE), massa de matéria seca foliar total (MSF total), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), massa de matéria seca radicular (MSR), massa de matéria seca do colmo (MSC), massa de matéria seca total (MST), massa foliar específica (MFE), razão de área foliar (RAF), razão raiz/parte aérea (R:PA), razão de massa foliar (RMF), razão de massa do colmo (RMC), razão de massa radicular (RMR), taxa de assimilação líquida de carbono (TAL), taxa de crescimento relativo (TCR) e teor de água foliar (TAF) de plantas de milho, além do Índice de Qualidade de Dickson (IQD).

Variáveis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Altura (cm)	8,19 c	9,14 c	16,75 ab	18,19 a	15,83 ab	15,19 b
DC (mm)	4,52 c	4,63 c	8,34 ab	9,35 a	7,37 b	6,92 b
NF	4 b	4 b	5 ab	6 a	5 a	5 ab
AFT (cm^2)	103 d	113 d	445 b	580 a	332 c	288 c
AFU (cm^2)	26,5 c	30,4 c	93,5 a	103,7 a	63,6 b	61,3 b
AFE	429 ab	437 a	321 c	316 c	358 c	368 bc
MSF total (g)	0,24 d	0,26 d	1,39 b	1,84 a	0,93 c	0,79 c
MSPA (g)	0,32 c	0,36 c	2,01 a	2,67 a	1,34 b	1,16 b
MSR (g)	0,78 c	0,97 c	2,44 a	2,76 a	1,55 bc	1,65 b
MSC (g)	0,080 d	0,100 d	0,627 b	0,833 a	0,413 c	0,369 c
MST (g)	1,10 c	1,33 c	4,45 a	5,43 a	2,89 b	2,80 b
MFE ($g\ cm^{-2}$)	0,0023 c	0,0023 c	0,0032 a	0,0032 a	0,0027 b	0,0026 b
RAF ($cm^2\ g^{-1}$)	94,0 ab	87,0 b	99,7 ab	107,4 ab	115,3 a	104,1 ab
R:PA ($g\ g^{-1}$)	2,53 a	2,70 a	1,22 b	1,03 b	1,16 b	1,42 b
RMF ($g\ g^{-1}$)	0,22 c	0,20 c	0,31 ab	0,34 a	0,32 ab	0,28 b
RMC ($g\ g^{-1}$)	0,072 b	0,077 b	0,140 a	0,155 a	0,143 a	0,132 a
RMR ($g\ g^{-1}$)	0,71 a	0,72 a	0,55 bc	0,51 c	0,54 bc	0,59 b
TAL ($mg\ cm^{-2}\ dia^{-1}$)	0,051 d	0,097 d	0,886 b	1,176 a	0,481 c	0,448 c
TCR ($mg\ g^{-1}\ dia^{-1}$)	0,011 c	0,018 c	0,068 a	0,075 a	0,049 b	0,049 b
TAF ($g\ g^{-1}$)	1,53 d	1,68 d	6,89 b	9,08 a	5,58 bc	4,78 c
IQD	0,50 c	0,57 c	1,57 a	1,73 a	0,96 b	0,96 b

Letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os valores são médias ($n = 5$).

3.5 Anatomia vegetal

Os resultados sobre a anatomia vegetal encontram-se na Tabela 10, na qual se verifica que os tratamentos com resíduo de granito mais SS (T3 e T4) permitiram espessura do limbo maior quando relacionados aos tratamentos sem resíduo (T1 e T2). Por outro lado, a aplicação de resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente) não proporcionou incremento dessa variável quando relacionada aos outros tratamentos.

Além disso, a aplicação de resíduos de granito mais SS e de café, com e sem calcário, conferiram maior espessura da epiderme abaxial do limbo (EPAB) e maior espessura da epiderme adaxial do limbo (EEPD), além de maior espessura da nervura mediana (ENC), quando comparada a não aplicação de resíduos (T1 e T2). Dentro dos tratamentos com ambos os resíduos, não ocorreu diferenças estatísticas quanto a EPAD e a ENC, mas o resíduo de café mais calcário (T6) causou maior EPAB que o resíduo de granito mais SS (T3).

A densidade estomática da face abaxial seguiu ordem decrescente em decorrência dos tratamentos: SR (T1 e T2) > RG (T3 e T4) > RC (T5 e T6). Com relação ao número de estômatos da face abaxial por folha, o mesmo seguiu ordem decrescente segundo os tratamentos: RG (T3 e T4) > RC (T5 e T6) > SR (T1 e T2). Sobre a densidade estomática da face adaxial, o resíduo de granito mais SS (T3) propiciou maior densidade que o resíduo de café mais calcário (T6). Quanto ao número de estômatos da face adaxial por folha, o resíduo de granito mais SS com e sem calcário (T3 e T4) proporcionou maior valor em relação aos demais tratamentos. Por sua vez, os tratamentos com resíduo de café elevaram o valor dessa variável em comparação a não aplicação de resíduos (T1 e T2), exceto pelo uso de resíduo de café mais calcário (T6) que não causou diferença estatística em relação à aplicação de somente calcário (T2) quanto a essa variável. A aplicação de calcário não influenciou a frequência de estômatos nem o número de estômatos por folha dentro de cada tratamento.

A aplicação dos resíduos de granito mais SS e de café, ambos com e sem calcário, viabilizou maiores diâmetro radicular, diâmetro do cilindro vascular e diâmetro dos elementos de metaxilema quando comparada a não aplicação de resíduos (T1 e T2).

Tabela 10. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a anatomia foliar e radicular de plantas de milho.

Variáveis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Folha						
Limbo (µm)	114 b	116 b	137 a	144 a	126 ab	132 ab
Epiderme face abaxial (µm)	21,8 c	20,5 c	24,2 b	25,7 ab	24,9 ab	26,6 a
Epiderme face adaxial (µm)	21,9 b	22,6 b	25,9 a	27,5 a	26,5 a	28,0 a
Nervura mediana (µm)	549 b	514 b	774 a	755 a	733 a	770 a
Densidade estomática abaxial (nºmm^{-2})	109 a	105 a	95 b	94 b	85 c	85 c
Densidade estomática adaxial (nºmm^{-2})	54 ab	57 ab	63 a	53 ab	49 ab	46 b
N° de estômatos por folha - face abaxial	287373 c	318454 c	884741 a	973796 a	537490 b	519396 b
N° de estômatos por folha - face adaxial	142311 d	164569 cd	590368 a	509482 a	316581 b	269447 bc
Raiz						
Diâmetro da raiz (µm)	881 b	903 b	1032 a	1043 a	1111 a	1035 a
Epiderme (µm)	21,4 ns	20,3	21,0	21,6	21,7	21,2
Cortex (µm)	228 ns	234	258	221	271	240
Diâmetro do cilindro vascular (µm)	411 b	407 b	513 a	572 a	551 a	502 a
Diâmetro do metaxilema (µm)	71,4 c	74,1 c	90,8 b	103,8 a	93,2 ab	89,8 b

Letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os valores são médias ($n = 5$).

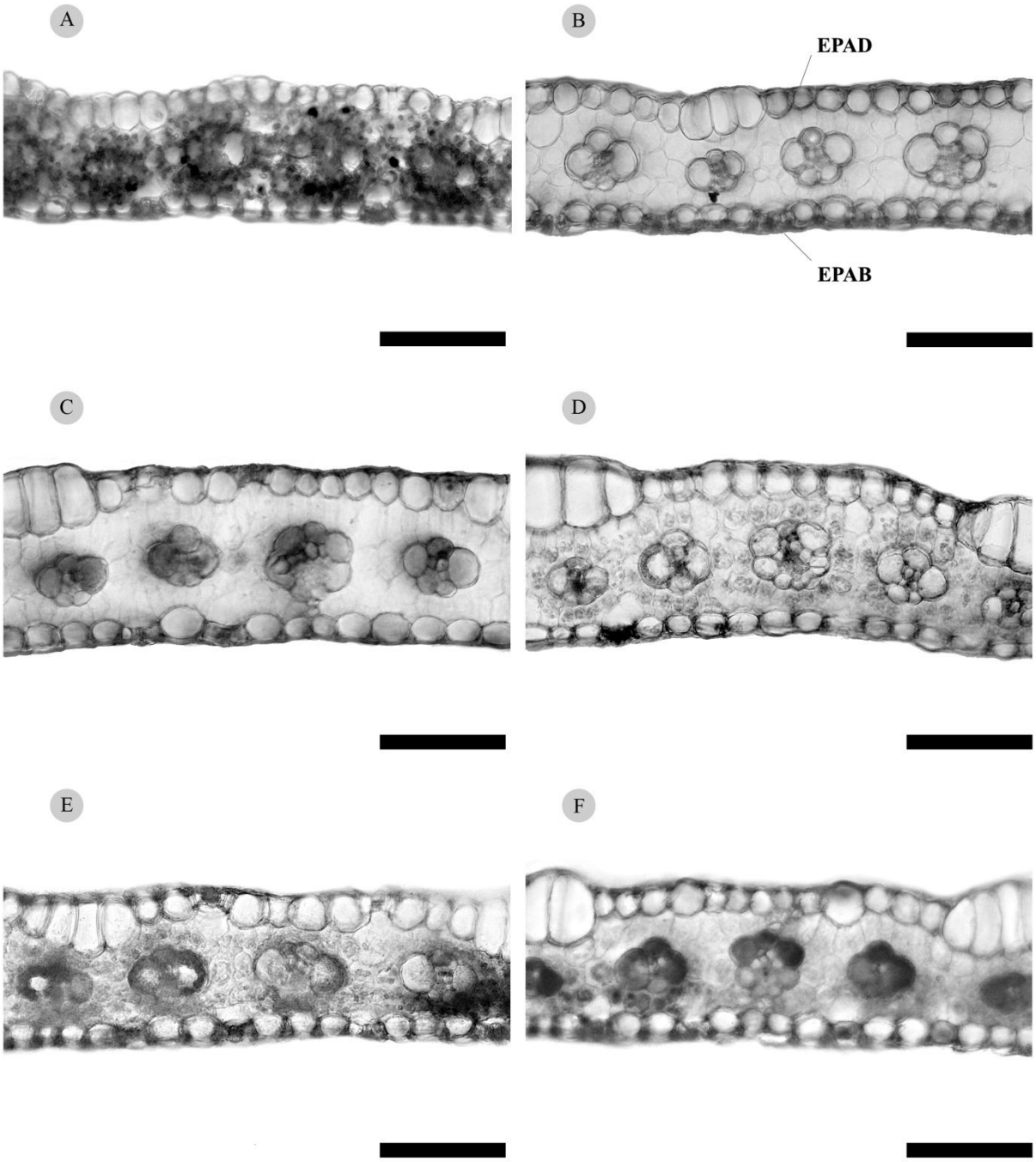


Figura 1. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a anatomia foliar de plantas de milho. (A-F) Secções transversais. (A-B) Tratamentos controle absoluto (T1) e somente calcário (T2), respectivamente. (C-D) Tratamentos resíduo de granito + superfosfato simples (T3) e resíduo de granito + superfosfato simples + calcário (T4), respectivamente. (E-F) Tratamentos resíduo de café (T5) e resíduo de café + calcário (T6), respectivamente. As barras são iguais a 100 µm. Epiderme adaxial = EPAD; epiderme abaxial = EPAB.

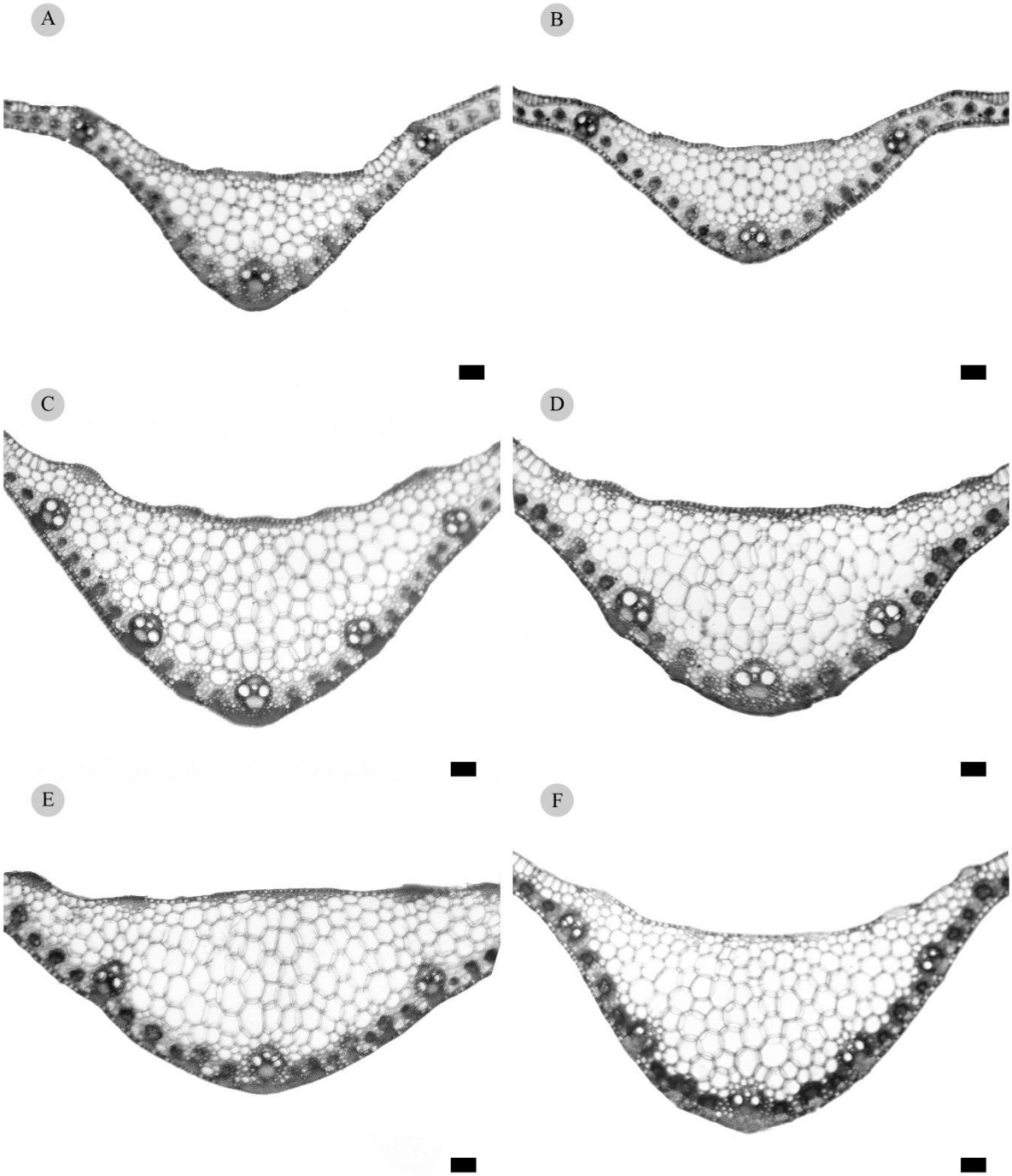


Figura 2. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a nervura mediana foliar de plantas de milho. (A-F) Secções transversais. (A-B) Tratamentos controle absoluto (T1) e somente calcário (T2), respectivamente. (C-D) Tratamentos resíduo de granito + superfosfato simples (T3) e resíduo de granito + superfosfato simples + calcário (T4), respectivamente. (E-F) Tratamentos resíduo de café (T5) e resíduo de café + calcário (T6), respectivamente. As barras são iguais a 100 µm.

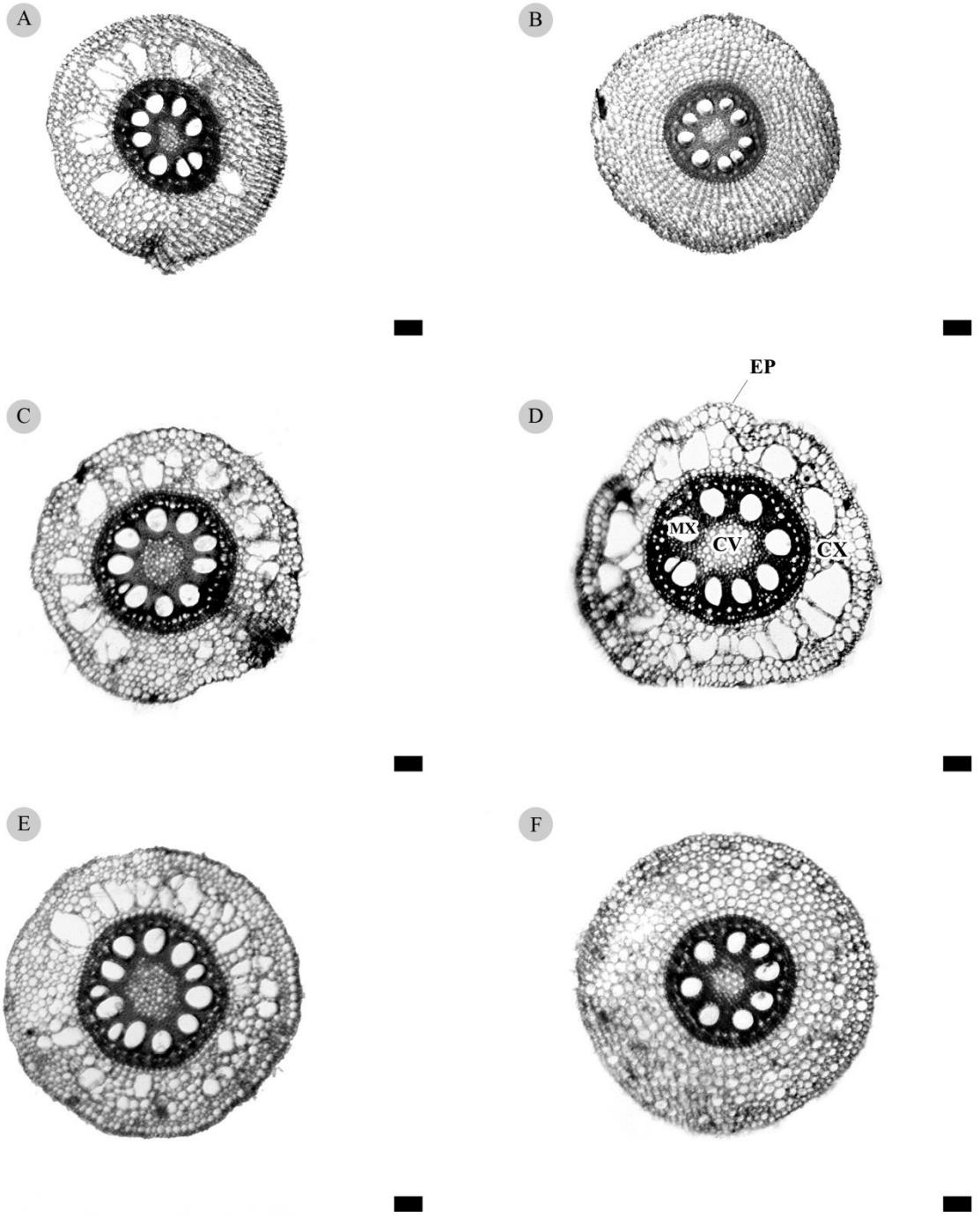


Figura 3. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a anatomia radicular de plantas de milho. (A-F) Secções transversais. (A-B) Tratamentos controle absoluto (T1) e somente calcário (T2), respectivamente. (C-D) Tratamentos resíduo de granito + superfosfato simples (T3) e resíduo de granito + superfosfato simples + calcário (T4), respectivamente. (E-F) Tratamentos resíduo de café (T5) e resíduo de café + calcário (T6), respectivamente. As barras são iguais a 100 µm. EP = epiderme; córtex = CX; metaxilema = MX; cilindro vascular = CV.

3.6 Extração e determinação de clorofilas e de carotenoides totais

O resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) proporcionou concentração foliar de clorofila *a* (clor *a*) maior que os tratamentos sem resíduos (T1 e T2) e que o tratamento com resíduo de café na ausência de calcário (T5). Por sua vez, o resíduo de café na ausência e na presença de calcário (T5 e T6, respectivamente) possibilitou teor maior de clor *a* que o controle absoluto (T1). Contudo, o teor desse pigmento não diferiu estatisticamente quanto aos tratamentos T5 e T2 e o menor conteúdo de clor *a* foi determinado pelo controle absoluto (T1). A respeito da clorofila *b* (clor *b*), o resíduo de granito mais SS com calcário (T4) propiciou maior conteúdo foliar que o controle absoluto (T1). Porém, as folhas expostas ao T1 e ao T4 não diferiram em conteúdo de clor *b* das folhas dos demais tratamentos. Acerca do teor de clorofila total (clor total), o resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) corroborou em teores maiores que o controle absoluto (T1). E, o resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente) não levou a diferenças estatísticas de clor total em comparação aos outros tratamentos. Os tratamentos com resíduo de granito mais SS (T3 e T4) permitiu maior razão clorofila total e carotenoides quando relacionados aos tratamentos sem resíduo (T1 e T2) ao passo que, a aplicação de resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente) não proporcionou incremento dessa variável quando relacionada aos outros tratamentos. As variáveis: teor de carotenoides e razão entre clorofilas *a* e *b* não diferiram entre os tratamentos (Tabela 11).

Tabela 11. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre as concentrações de clorofilas e de carotenoides em folhas de plantas de milho.

Variáveis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Clorofila *a* (mg g^{-1} MF)	0,95 d	1,20 c	1,71 a	1,63 a	1,28 bc	1,52 ab
Clorofila *b* (mg g^{-1} MF)	0,32 b	0,38 ab	0,49 ab	0,51 a	0,33 ab	0,42 ab
Clorofila total (mg g^{-1} MF)	1,26 b	1,59 ab	2,20 a	2,14 a	1,62 ab	1,94 ab
Carotenóides (mg g^{-1} MF)	0,26 ns	0,30	0,32	0,31	0,26	0,30
Clorofila *a* /*b*	3,26 ns	3,19	3,48	3,37	3,97	3,71
Clorofila total/carotenóides	4,99 b	5,18 b	6,84 a	7,03 a	6,46 ab	6,47 ab

Letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os valores são médias ($n = 5$).

3.7 Fluorescência da clorofila a

Os resultados sobre as variáveis relativas ao processo fotoquímico da fotossíntese estão na Tabela 12 e nas Figuras 4 e 5.

O resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) propiciou maior eficiência com que a energia move o elétron na cadeia de transporte de elétrons após a Q_A ($\psi E_0 = ET_0/TR_0$) em relação ao controle absoluto (T1). A aplicação de resíduo de granito na presença de calcário (T4) possibilitou maior valor dessa variável em comparação à aplicação de somente calcário (T2). O resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente) não causou diferenças estatísticas quanto a essa variável quando relacionado aos demais tratamentos.

O controle absoluto provocou maior fluxo de dissipação de energia por centro de reação (DI_0/RC) que a aplicação de resíduo de granito mais SS com calcário (T4).

Ademais, os resíduos de granito mais SS e de café, ambos com e sem calcário, proporcionaram maiores densidade de centros de reação fotossinteticamente ativos do FSII (RC/ABS), índice de desempenho potencial do FSII (PI_{ABS}), índice de desempenho fotoquímico total (PI_{TOTAL}) e rendimento quântico máximo do FSII ($\varphi P_0 = Fv/F_M$) quando relacionados aos tratamentos sem resíduos (T1 e T2), exceto pelos indivíduos expostos ao café com calcário (T6), que não diferiram significativamente quanto ao PI_{TOTAL} dos indivíduos dos tratamentos sem resíduos (T1 e T2).

A aplicação de resíduos de granito mais SS e de café, ambos com e sem calcário, permitiu maior coeficiente de extinção fotoquímica (q_p) em relação aos tratamentos sem resíduos (T1 e T2), sendo que o resíduo de café mais calcário (T6) causou maior q_p que o resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) e o resíduo de café (T5) acarretou maior q_p que o resíduo de granito mais SS (T3).

Além disso, a aplicação de resíduos de granito mais SS e de café, ambos com e sem calcário, favoreceram o transporte de elétrons (ETR) quando comparada à ausência de resíduos (T1 e T2).

Na Figura 5, a cinética da fluorescência da clorofila *a* apresentou uma típica curva OJIP para cada tratamento, o que demonstra que todas as plantas estavam fotossinteticamente ativas. A normalização das curvas evidenciou diferenças cinéticas em folhas expostas aos tratamentos ($\Delta WOP = WOP_{tratamento} - WOP_{controle}$), sendo os valores entre os passos O a I mais negativos para as plantas submetidas ao tratamento com resíduo de granito mais SS seguido decrescentemente pelos tratamentos com resíduo de granito mais SS sem calcário, com

resíduo de café mais calcário e com resíduo de café sem calcário em relação aos tratamentos controle absoluto e somente calcário.

Tabela 12. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre as variáveis de fluorescência da clorofila *a* de plantas de milho.

Variáveis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Fluorescência transiente						
$\delta R_0 = RE_0/ET_0$	0,45 ns	0,45	0,42	0,42	0,44	0,42
$\varphi P_0 = Fv/Fm$	0,70 b	0,72 b	0,77 a	0,77 a	0,76 a	0,75 a
$\psi E_0 = ET_0/TR_0$	0,49 c	0,5 bc	0,56 ab	0,57 a	0,54 abc	0,53 abc
RC/ABS	0,29 b	0,30 b	0,35 a	0,36 a	0,36 a	0,36 a
DI_0/RC	0,44 a	0,38 ab	0,34 ab	0,26 b	0,42 ab	0,34 ab
PI_{ABS}	0,74 b	0,82 b	1,51 a	1,67 a	1,36 a	1,30 a
PI_{TOTAL}	0,61 b	0,67 b	1,11 a	1,24 a	1,07 a	0,91 ab
Fluorescência modulada						
q_p	0,21 d	0,24 d	0,41 c	0,43 bc	0,47 ab	0,51 a
ETR	37,1 b	46,1 b	122,6 a	127,5 a	121,6 a	119,1 a

Letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os valores são médias (n = 5).

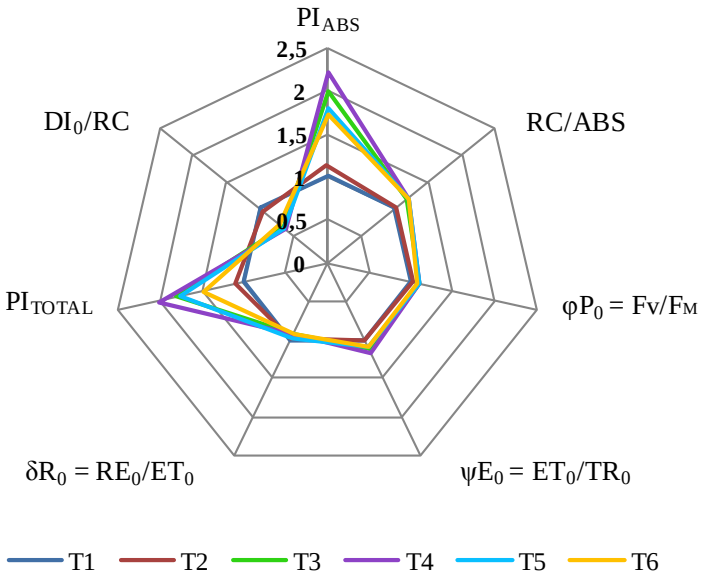


Figura 4. Variáveis da fluorescência da clorofila *a* obtidos a partir do Teste JIP em folhas expostas ao resíduo de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e ao resíduo de beneficiamento do café, na ausência e na presença de calcário. Os valores foram normalizados utilizando o controle absoluto (=1) como referência e igual à unidade (n=5).

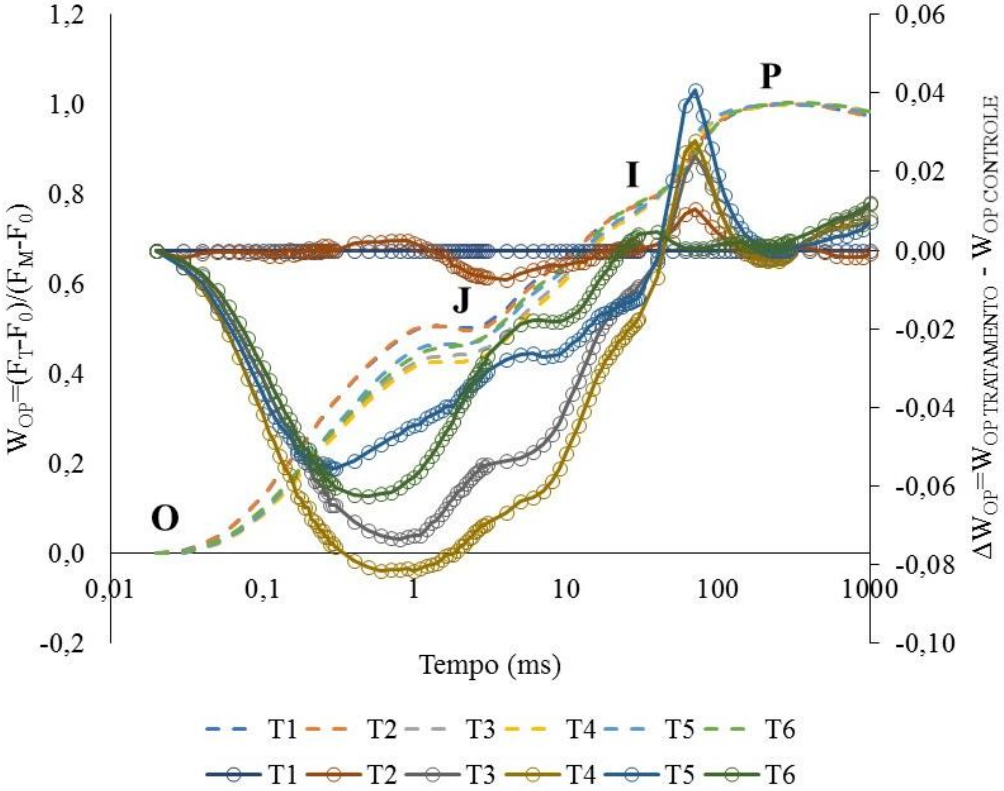


Figura 5. Curvas da indução rápida da fluorescência variável relativa da clorofila a (WOP = $(F_t-F_0)/(FM-F_0)$) e as diferenças cinéticas normalizadas observadas em folhas expostas ao resíduo de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e ao resíduo de beneficiamento do café, na ausência e na presença de calcário ($\Delta WOP = WOP_{tratamento} - WOP_{controle}$). O tempo está representado em escala logarítmica (ms) (n=5).

3.8 Trocas gasosas

As variáveis de trocas gasosas encontram-se na Tabela 13. Quanto a essas variáveis, os tratamentos com resíduo de granito mais SS e de café, ambos com e sem calcário, proporcionaram maiores taxa de fotossíntese (*A*), condutância estomática (g_s), transpiração (*E*) e eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) que os tratamentos sem resíduos (T1 e T2). Não houve diferença entre os tratamentos com resíduo de granito mais SS e de café, ambos com e sem calcário, para as variáveis *A*, g_s e A/C_i. No entanto, o resíduo de café mais calcário (T6) elevou a *E* e diminuiu a eficiência do uso da água (*A/E*) em relação ao resíduo de granito mais SS (T3).

Os tratamentos sem resíduos (T1 e T2) propiciaram maior concentração interna de CO_2 (C_i) que os demais tratamentos.

A utilização de granito mais SS com calcário (T4) e os tratamentos com resíduo de café (T5 e T6) acarretaram maior eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) que o controle absoluto (T1).

Tabela 13. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre a assimilação líquida de CO_2 (*A*), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO_2 (*Ci*), transpiração (*E*), eficiência do uso da água (*A*/*E*), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) e eficiência intrínseca de uso da água (A/g_s) de plantas de milho.

Variáveis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
A (µmol CO_2 m^{-2} s^{-1})	6,57 b	8,04 b	21,11 a	21,91 a	21,54 a	21,68 a
g_s (mol H_2O m^{-2} s^{-1})	0,060 b	0,062 b	0,158 a	0,155 a	0,148 a	0,146 a
C_i (µmol CO_2 mol^{-1} ar)	215 a	183 b	153 c	142 c	139 c	133 c
E (mmol H_2O m^{-2} s^{-1})	0,74 c	0,88 c	2,05 b	2,37 ab	2,49 ab	2,90 a
A/E (µmol CO_2 mmol H_2O^{-1})	9,34 ab	9,13 ab	10,36 a	9,30 ab	8,68 ab	7,46 b
A/C_i (mol ar m^{-2} s^{-1})	0,031 b	0,044 b	0,138 a	0,156 a	0,156 a	0,164 a
A/g_s (µmol CO_2 mol H_2O^{-1})	112 b	129 ab	134 ab	142 a	146 a	149 a

Letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os valores são médias ($n = 5$).

3.9 Quantificação de carboidratos solúveis: glicose, frutose e sacarose

Os resultados da quantificação de carboidratos solúveis (glicose, frutose e sacarose) encontram-se na Tabela 14. O resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente) proporcionou maior concentração de frutose que o resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) e os tratamentos sem resíduos (T1 e T2). O resíduo de granito mais SS com calcário (T4) proporcionou maior concentração de frutose que a não aplicação de resíduos (T1 e T2). O resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente) favoreceu o incremento de glicose quando comparado ao resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente), que por sua vez propiciou incremento de glicose quando comparado a não aplicação de resíduos (T1 e T2). Quanto à sacarose, o resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente) elevou sua concentração em relação aos outros tratamentos, que não diferiram significativamente entre si. A quantificação total dos carboidratos solúveis seguiu ordem crescente de acordo com os tratamentos: RG (T3 e T4) > RC (T5 e T6) > SR (T1 e T2).

Tabela 14. Efeitos dos resíduos de beneficiamento do granito mais superfosfato simples e do beneficiamento do café, ambos na ausência e na presença de calcário, sobre as concentrações de carboidratos solúveis de folhas de plantas de milho.

Variáveis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Frutose (mg g^{-1} MS)	0,14 d	0,73 d	1,05 cd	2,02 c	8,28 a	6,46 b
Glicose (mg g^{-1} MS)	1,33 c	2,05 c	4,16 b	3,81 b	6,86 a	8,01 a
Sacarose (mg g^{-1} MS)	13,4 b	10,1 b	28,0 a	29,3 a	11,6 b	10,9 b
Totais (mg g^{-1} MS)	14,9 c	12,9 c	33,2 a	35,1 a	26,7 b	24,1 b

Letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os valores são médias ($n = 5$).

4. DISCUSSÃO

Segundo Malavolta (2006), as condições do solo e a nutrição de plantas estão correlacionadas com os fatores de crescimento, estruturais e fisiológicos dos vegetais.

No caso das plantas de milho submetidas aos tratamentos com resíduos de granito mais superfosfato simples (SS) e com resíduo de café, ambos sem e com calcário, em relação às dos tratamentos sem resíduos, os dois sem e com calcário, observou-se crescimento favorável tanto em altura, diâmetro do colmo, área foliar total (AFT), área foliar unitária (AFU), massa foliar específica (MFE) quanto em biomassa total após 40 dias de exposição. Atribui-se essa expressiva diferença morfológica às maiores taxas de crescimento (TCR) e de assimilação de carbono (TAL) dos indivíduos expostos aos tratamentos com resíduo de granito mais SS, seguidos dos indivíduos submetidos aos tratamentos com resíduo de café, em comparação às plantas dos tratamentos sem resíduos (Tabela 9).

Isso indica que o resíduo de granito mais SS sem e com calcário - seguido decrescentemente pelo resíduo de café sem e com calcário e pelos tratamentos sem resíduos na ausência e na presença de calcário - proporcionou maior taxa de fotossíntese líquida, em termos de massa seca produzida por área foliar, por unidade de tempo (MAGALHÃES, 1979), bem como maior quantidade de material vegetal produzido por determinada quantidade de material existente, durante um intervalo de tempo prefixado (OLIVEIRA; GOMIDE, 1986 apud GUIMARÃES, 1994).

O crescimento maior, em geral, das plantas expostas aos tratamentos com resíduo de granito mais SS quando relacionado ao crescimento das plantas dos demais tratamentos, deve-se principalmente à aplicação de fósforo (P) por meio da adubação mineral com SS. A utilização de SS refletiu em maior conteúdo de P no solo quando comparada ao não uso de SS (Tabela 6). O P é um macronutriente, que participa de inúmeros processos metabólicos em plantas, como a transferência de energia, síntese de ácidos nucléicos, respiração, síntese e estabilidade de membrana, ativação e desativação de enzimas, reações redox, metabolismo de carboidratos e fixação de nitrogênio (VANCE et al., 2003). O crescimento estimulado pelo P nos tratamentos com resíduo de granito mais SS parece ter provocado o maior acúmulo por massa de matéria seca da parte aérea por vaso de cálcio (Ca), cobre (Cu), manganês (Mn), além do próprio P, e uma tendência a maiores conteúdos de nitrogênio (N), magnésio (Mg) e enxofre (S), principalmente na presença de calcário, em comparação aos tratamentos com resíduo de café (Tabela 8). Além disso, o conteúdo por massa de matéria seca da parte aérea por vaso de todos os macronutrientes e micronutrientes quantificados foram maiores nos

tratamentos com resíduo de granito mais SS quando relacionado ao conteúdo de nutrientes por massa de matéria seca da parte aérea por vaso dos tratamentos sem resíduos (Tabela 8). Ainda, sobretudo o maior crescimento das plantas em AFT, massa de matéria seca foliar total (MSF total), massa seca do colmo (MSC) e TAL, expostas aos tratamentos com resíduo de granito mais SS, ocorreu na presença de calcário (Tabela 6). Possivelmente isso aconteceu porque a calagem proporcionou maior conteúdo por massa de matéria seca da parte aérea por vaso de N pela mineralização da matéria orgânica contida no solo e de Mg por incremento direto (Tabela 8), além de maiores teores de Ca, Mg e Zn no solo, em comparação a não calagem (Tabela 6). A aplicação de calcário elevou o pH do solo e forneceu Ca e Mg, aumentando diretamente a disponibilidade desses dois nutrientes. Efeito positivo da calagem no desenvolvimento da parte aérea também foi observado em plantas de algodão (LIBARDONI et al., 2007). Importante salientar também que o resíduo de granito utilizado no presente estudo possui quantidade apreciável de N igual a 0,48% (Tabela 4).

Os nutrientes desempenham inúmeras funções importantes nas plantas, por exemplo: o N compõe proteínas, ácidos nucléicos e outros constituintes celulares, sendo um dos elementos minerais mais requeridos pelos vegetais e o que mais limita o seu crescimento (SOUZA e FERNANDES, 2006), apesar de as plantas do grupo C4 serem mais eficientes no uso de N, pois necessitam de menor quantidade de rubisco agindo no metabolismo (TAIZ et al., 2017); o Ca compõe as paredes celulares, é demandado como co-fator por algumas enzimas envolvidas na hidrólise de ATP e de fosfolipídeos e atua também como mensageiro secundário na regulação metabólica (VITTI et al., 2006); o Mg integra moléculas de clorofila e é exigido por muitas enzimas relacionadas à transferência de fosfatos (VITTI et al., 2006). Assim, a maior disponibilidade de nutrientes está intimamente ligada ao crescimento das plantas.

A cinza constituinte da mistura de resíduos de café utilizada no experimento contém quantidade alta de P (KIEHL, 1985) igual a 1,8% (Tabela 5), contudo, por se tratar de um resíduo orgânico, o P-orgânico só se torna disponível por meio da mineralização da matéria orgânica em formas simples, ação realizada pelos microrganismos (BARBER, 1984). Além do P, a cinza possui frações consideradas altas, segundo Kiehl (1985), de outros nutrientes, como S, Mg, Ca, potássio (K) e Mn (Tabela 5); o mesmo resíduo conferiu ainda proporcionalmente teores maiores de P, Ca, K e Mn no solo (Tabela 6) principalmente na presença de calcário - o que indica o efeito positivo da calagem, que proporcionou maior disponibilidade de nutrientes - em relação aos demais tratamentos, exceto pelo P que ocorreu em concentração maior nos tratamentos com resíduo de granito mais SS. Isso possivelmente

possibilitou o maior crescimento das plantas expostas aos tratamentos com resíduo de café em relação ao crescimento das plantas submetidas aos tratamentos sem resíduo.

O resíduo de café como composto orgânico, age na melhoria das condições de aeração e de umidade do solo (TORRENTÓ; PUJOL, 2008 apud CASCO; HERRERO, 2008), favorecendo a absorção de nutrientes. Nos tratamentos sem resíduos, não havia um condicionador de solo como, por exemplo, o resíduo de café. Supostamente, isso contribuiu também para a diferença no crescimento (Tabela 9) entre os indivíduos expostos aos tratamentos com resíduo de café e aos tratamentos sem resíduos.

É válido ressaltar que a aplicação de resíduo de café disponibilizou mais nutriente, que proporcionou maior crescimento, o que por sua vez pode ter elevado o conteúdo de nutrientes por massa de matéria seca da parte aérea por vaso, em geral, das plantas em relação a não aplicação de resíduos (Tabela 8). Contudo, não houve diferenças significativas nos conteúdos de nutrientes por massa de matéria seca da parte aérea por vaso, bem como no crescimento, entre os indivíduos do tratamento com resíduo de café e com resíduo de café mais calcário, e também entre as plantas do tratamento controle absoluto e somente calcário (Tabela 8). Ou seja, a aplicação de calagem não influenciou essas variáveis. Provavelmente isso está ligado aos efeitos da calagem sobre o pH do solo: a aplicação de calcário não viabilizou diferença estatística entre os valores de pH do solo nos tratamentos sem resíduos, e ocasionou aumento de apenas 3 décimos entre o valor médio de pH do tratamento com resíduo de café sem calcário e o tratamentos com resíduo de café mais calcário (Tabela 6). Assim, a variação no pH provavelmente não foi suficiente para acarretar diferenças nos conteúdos de nutrientes por massa de matéria seca da parte aérea por vaso.

O crescimento menor em via de regra das plantas sujeitas aos tratamentos com resíduo de café quando comparado ao crescimento maior dos indivíduos expostos aos tratamentos com resíduo de granito mais SS (Tabela 9) pode ser explicado, provavelmente, porque o resíduo de café é orgânico e necessita passar pelo processo de decomposição em compostos orgânicos, que são capazes de sofrer mineralização, como já citado, e induzir mudanças benéficas no solo sob o ponto de vista agrícola (RAVIV, 1997). Em contrapartida, é importante ressaltar que, tanto o resíduo de granito quanto o SS são inorgânicos, ou seja, já oferecem às plantas os nutrientes na forma disponível para a absorção. Assim, pode-se supor que, principalmente o P, prontamente disponível para a aquisição pela planta, proporcionou o crescimento substancial das mesmas nos tratamentos com resíduo de granito mais SS. Além do mais, o resíduo de café pode conter cafeína, taninos e polifenóis (FAN; SOCCOL, 2005). A cafeína é um metabólito secundário natural com função biológica em algumas plantas,

como o cafeeiro, e serve como mecanismo de defesa química. Entretanto, quando outras plantas são expostas a essa substância, efeitos adversos de toxicidade podem ocorrer. Rosa et al. (2006) observaram atraso mitótico e dano cromossômico nas células vegetais em proliferação, bem como atraso no crescimento de mudas e indução da senescência inicial das plantas.

Ambos os resíduos utilizados no presente experimento proporcionaram maior riqueza mineral no solo que os tratamentos sem resíduos (Tabela 6): os solos do resíduo de café apresentaram maior concentração além de P, K, Ca e Mn, como supracitado, e também de Zn e Cu em relação aos tratamentos sem resíduos; semelhantemente, o solo dos tratamentos com resíduo de granito apresentou maior teor de P, S, Cu e em geral de Ca e de Zn quando comparado aos tratamentos sem resíduos.

Nesse contexto, apesar de os resíduos aplicados terem propiciado maior concentração de nutrientes no solo e também maior absorção de nutrientes pelas plantas, demonstrada pelo maior conteúdo absoluto de nutrientes na massa de matéria seca total por vaso (Tabela 8), mais evidente nos tratamentos com resíduo de granito que nos tratamentos com resíduo de café, em relação aos tratamentos sem resíduos, os teores de macronutrientes da parte aérea, que são dados em dag kg^{-1}, e de micronutrientes, dados em mg kg^{-1}, de modo geral, não diferiram em resposta aos tratamentos (Tabela 7). Pode-se dizer, portanto, que presumivelmente houve efeito de diluição nas plantas expostas aos resíduos.

Assim, as plantas dos tratamentos com resíduos cresceram mais e foram capazes de absorver maior quantidade de nutrientes do solo (Tabela 8), que estavam mais disponíveis em comparação aos tratamentos sem resíduos (Tabela 6). Entretanto, o milho é uma planta de crescimento rápido (USDA, 2018) e o maior crescimento dos indivíduos expostos aos resíduos fez com que os nutrientes da parte aérea ficassem diluídos, pois a tomada de minerais não conseguiu acompanhar a formação de matéria orgânica (efeito de diluição) (ZIAEYANA; RAJAIEA, 2009; COSTA, 2014). Por outro lado, as plantas dos tratamentos sem resíduos cresceram menos e absorveram menor quantidade de nutrientes do solo (Tabela 8), que apresentou restrição na concentração de elementos minerais quando relacionado aos solos dos tratamentos com resíduos.

É válido ressaltar que a concentração de um nutriente nos tecidos vegetais depende do balanço entre a absorção e a diluição da quantidade do nutriente através do desenvolvimento (TAIZ et al., 2017). Nas plantas dos tratamentos sem resíduos, em geral, uma mesma concentração de minerais na parte aérea que as plantas expostas aos resíduos foi obtida para uma menor formação de matéria orgânica, o que indica efeito de acumulação (LARCHER,

2001). Isso provavelmente pode ser entendido como uma resposta adaptativa às condições de menor disponibilidade nutricional no solo: a planta apresenta pequena taxa de crescimento, pois um crescimento lento induz menor demanda e menor exaustão dos recursos do ambiente e, dessa maneira, ocorre menor incorporação de nutrientes, permitindo a formação de reservas (GRIME; HUNT, 1975). Por outro lado, os indivíduos expostos aos resíduos provavelmente foram capazes de assimilar mais nutrientes ativamente em seus metabolismos e, por isso, apresentaram maior crescimento (Tabela 9) (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Como o que é importante para o metabolismo vegetal é a concentração de nutrientes e não a quantidade em termos absolutos, é frequente aparecerem sintomas de deficiência nutricional em plantas com crescimento rápido, como o milho. O efeito de diluição explica também o porquê de as plantas expostas aos resíduos apresentarem sintomas visuais de deficiência de P, com algumas folhas exibindo coloração azul-esverdeada (EPSTEIN; BLOOM, 2006). É importante destacar que mesmo quando aplicado por meio de fertilizante, o P em sua maior parte fica adsorvido nos colóides do solo, tornando-se pouco disponível ao longo do tempo. Portanto, o P é o elemento mineral menos disponível prontamente na rizosfera (ARAÚJO; MACHADO, 2006).

Kozuka et al. (2005) afirmam que a expansão celular necessita de um elevado teor hídrico nas folhas para proporcionar turgescência celular. Essa ligação entre turgescência e expansão celular, citado do mesmo modo por Taiz (2017), condiz com os resultados encontrados no presente trabalho para o teor de água nas folhas (TAF) e a área foliar: os tratamentos com resíduo de granito tenderam a maior TAF e proporcionalmente maiores área foliar total (AFT) e área foliar unitária (AFU) em relação aos tratamentos com resíduo de café, que por suas vezes, proporcionaram valor maior dessa variável que os tratamentos sem resíduos (Tabela 9). A captação de energia luminosa e a produção de fitomassa dependem da área foliar adequada, além da eficiência desta de produzir fotoassimilados (EVANS, 1972). Brito (2013) verificou que doses crescentes de borra de café *in natura* aplicada em cafeeiro aumentaram o índice de área foliar (IAF), dependente da área foliar, revelando maior produtividade. A maior área foliar dos indivíduos expostos aos tratamentos com resíduo de granito indica os efeitos do P no crescimento das plantas. Por outro lado, o baixo suprimento de P e de outros nutrientes provavelmente diminuiu a área foliar dos indivíduos expostos aos tratamentos sem resíduos, devido também à limitação à expansão da folha (RODRÍGUEZ et al., 1998).

Os resultados quanto à repartição da biomassa seca encontrados neste trabalho revelaram aspectos interessantes quanto ao comportamento das plantas em relação aos

tratamentos. Os dados mostraram que os tratamentos com resíduo de granito mais SS sem e com calcário conferiram maior biomassa - MSF, massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), massa de matéria seca radicular (MSR), massa de matéria seca caulinar (MSC) e massa de matéria seca total (MST) - quando comparados aos tratamentos com resíduo de café, que por suas vezes, em via de regra, proporcionaram maior biomassa que os tratamentos sem resíduos (Tabela 9). Quanto ao resíduo de café, os dados corroboram os resultados de outros autores: o emprego da borra de café influenciou positivamente as características de crescimento de plantas de alface, tanto em altura como em produção de biomassa (FERREIRA, 2011) por disponibilizar nutrientes como P, Ca e K (MUSSATTO et al., 2011) no substrato assim como no presente trabalho (Tabela 6). Além disso, o resíduo de café também promoveu teores maiores no solo de Zn, Cu e Mn em comparação a não aplicação de resíduos, como supracitado, sendo de fato, o resíduo que proporcionou diversidade mineral às plantas na atual pesquisa. Em relação à lama granítica, há indícios de que ela elevou a produtividade de culturas vegetais (SILVA et al., 2001a; 2001b) o que concorda com os resultados da atual pesquisa, supostamente porque os tratamentos com resíduo de granito mais SS (T3 e T4) proporcionaram teores maiores de alguns nutrientes no solo que a não aplicação de resíduos como referido.

As atividades da parte aérea (dependente de água e de nutrientes absorvidos pela raiz) e das raízes (dependentes de fotoassimilados) são fundamentais para determinar a massa de ambas. O balanço entre a parte aérea e as raízes é dinâmico e passível de mudanças (ZONTA et al, 2006). Os tratamentos com resíduos proporcionaram menores razão raiz/parte aérea (R:PA) e razão de massa radicular (RMR) que os tratamentos sem resíduos (Tabela 9). Isso possivelmente porque as plantas, quando expostas a sítios com maior disponibilidade de nutrientes, tendem a alocar menos carbono no sistema radicular do que quando submetidas a sítios com menor disponibilidade de nutrientes. Por outro lado, os valores menores dessas variáveis nos indivíduos submetidos aos tratamentos sem resíduos demonstram mais uma vez as múltiplas respostas das plantas à deficiência de nutrientes. Os dados encontrados no presente estudo estão de acordo com os obtidos por Neto et al. (2003), que relataram ter ocorrido produção de raiz substancialmente maior em um sítio classificado como de pior qualidade, em razão do menor conteúdo de nutrientes, comparado a um sítio de melhor qualidade. O efeito de estresse nutricional sobre a alocação de carbono proporciona, normalmente, o aumento do sistema radicular, ou seja, da capacidade de absorção (ZONTA et al, 2006). Este comportamento pode ser considerado como uma estratégia da espécie na busca de nutrientes. Em parte, a eficiência na captação de recursos pelas plantas está ligada à

capacidade de explorar o meio, e, geralmente, quanto mais escassos forem os recursos no meio, maior o investimento em raiz (ZONTA et al, 2006). Segundo Taiz e Zeiger (2004), a habilidade dos vegetais em obter nutrientes minerais e água está relacionada à sua eficiência em desenvolver um extenso sistema radicular. Desse modo, as plantas submetidas à menor disponibilidade nutricional têm um mecanismo de adaptação, tendo maior translocação de carboidratos para a raiz, o que diminui os prejuízos ao sistema radicular.

Segundo Daniel et al. (1997), a altura e o diâmetro de colmo das mudas apresentam forte correlação com a capacidade de sobrevivência das mudas no campo. Essas duas variáveis, bem como a MST, a MSPA e a MSR são utilizados para calcular o Índice de Qualidade de Dickson, que indica a qualidade das plantas. Esse índice sofreu influencia maior com a aplicação dos resíduos, na ordem decrescente: RG > RC > SR, resultado de valores maiores das variáveis usadas para o cálculo do índice nas plantas expostas aos resíduos (Tabela 9).

Sobre as variáveis soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC a pH 7,0 (T) e saturação de bases (V) (Tabela 6) pode-se dizer que a aplicação de resíduo de café sem e com calcário (T5 e T6, respectivamente) propiciou valores maiores dessas variáveis em relação à aplicação de resíduo de granito mais SS sem e com calcário (T3 e T4, respectivamente). Por suas vezes, os tratamentos com resíduo de granito mais SS proporcionaram valores maiores dessas variáveis em comparação ao controle absoluto (T1) (Tabela 6). Ademais, a aplicação de calcário elevou os valores no solo de P, K e Ca nos tratamentos com resíduo de café, de Ca, Mg e Zn nos tratamentos com resíduo de granito, e de Ca e Mg nos tratamentos sem resíduos. Portanto, a calagem tendeu também a elevar os valores SB, t, T e V dentro dos tratamentos com resíduo de granito, resíduo de café e sem resíduo, além de diminuir a acidez potencial (H+Al) (Tabela 6). Isso porque as variáveis SB, t, T, v e H+Al estão diretamente ligadas ao acréscimo de bases trocáveis no solo (PREZOTTI et al., 2007). Esses resultados revelam que a calagem foi fator que influenciou a disponibilidade de nutrientes e consequentemente causou melhoria nas propriedades do solo.

A aplicação de calagem elevou o valor do pH do solo de 5,7 para 6,0 (aumento aproximado de 5,26%) e de 6,5 para 6,8 (aumento aproximado 4,62%) nos tratamentos com resíduo de granito e de café, respectivamente (Tabela 6). Essa observação é confirmada por Caires et al. (2008), que também observaram aumento no pH ao aplicarem doses mais elevadas de calcário. Contudo, pode-se dizer que a calagem causou um aumento no pH em média de apenas 3 décimos (Tabela 6), apresentando baixa eficiência na correção do solo. Em contrapartida, a aplicação de resíduos apresentou eficiência na correção do solo. Os resíduos

de granito e de café sozinhos foram capazes de aumentar o valor inicial de pH do solo igual a 5,1 (Tabela 2) para 5,7 e 6,5, respectivamente, ou seja, houve uma elevação de 11,8% e 27%, nessa ordem, o que representa evidência da eficiência desses tipos de resíduos na correção do solo. Isso porque o resíduo de granito é proveniente de rocha magmática, composta também por mica e feldspato (MENEZES et al., 2002), que pode elevar o pH, que segundo Abreu Júnior et al. (2003), tem correlação positiva com valores de Ca^{2+}, Mg^{2+}, V e SB no solo. Além disso, o resíduo de café é rico em matéria orgânica, que eleva o pH (Tabela 6): as substâncias húmicas, principal componente da matéria orgânica do solo, têm função tamponante em amplos intervalos de pH, pois têm a capacidade de doar e receber íons H^+, ajudando a manter o equilíbrio da solução do solo (ROCHA; ROSA, 2003). Para Abreu Júnior et al. (2005), dentre as vantagens oferecidas pelo uso de resíduos orgânicos no solo, pode-se citar a redução da necessidade de se aplicar corretivos e fertilizantes minerais. Diversos trabalhos demonstram que a adição de resíduo de café e adubos orgânicos ao solo exerce efeitos significativos sobre a respiração microbiana e a qualidade do solo, pois apresentam taxa de mineralização elevada quando aplicados ao solo, com potencial liberação de nutrientes. A adição de adubo orgânico ao solo melhorou os indicadores da T e t (SÁ et al., 2010). A ciclagem da palha de café à lavoura cafeeira sob irrigação por gotejamento, calagem e adubação química contribuiu para a elevação no conteúdo de nutrientes do solo, aumentando o teor da T do solo, além de colaborar de forma expressiva para o aumento da produtividade (EFFGEN et al., 2008). De outro lado, o resíduo de granito pode elevar a produtividade vegetal por melhorar as propriedades químicas do solo com aumento nas concentrações de Mg e de Ca e no valor percentual de V no solo, como constatado por Silva et al. (2001a) quando cultivaram sorgo granífero em lama de granito.

Para Embrapa (2010), solos que apresentam porcentagem de saturação de bases (V) igual ou acima de 50% são considerados férteis, ou seja, eutróficos. Assim, pode-se inferir, segundo esses critérios, que a aplicação de resíduos, ambos na ausência de calcário, foi capaz de transformar um solo pobre em um solo fértil, elevando a V inicial do solo igual a 21% (Tabela 2) a valores mais adequados iguais a 33,4 no caso do uso de resíduo de granito e de modo mais pronunciado a 59,1 com o uso de resíduo de café (Tabela 6). Já a calagem desempenhou papel importante também sobre os valores de V, mas de modo mais pronunciado nos tratamentos sem resíduos, seguido dos tratamentos com resíduo de granito e dos com resíduo de café. Assim, a calagem aumentou o valor de V do solo de 23,6 para 45,1 (aumento de 91%) nos tratamentos sem resíduos, de 33,4 para 46,1 (aumento de 38%) nos tratamentos com resíduo de granito, e de 59,1 para 67,4 (aumento de 14%) nos tratamentos

com resíduo de café. O resíduo de café juntamente com calcário (T6) proporcionou o maior valor de V (67,4) e o resíduo de café sozinho (T5) propiciou a segunda maior V (59,1) indicando o potencial individual mais evidente desse resíduo transformar um solo pobre (V=21%) em um solo fértil (V>50%) em comparação ao resíduo de granito. Em contrapartida, o maior aumento da V, igual a 91%, em decorrência da aplicação de somente calcário (T2) em relação a não aplicação de calcário do controle absoluto (T1) pode ser explicada pelo fato de esses tratamentos não terem recebido material com potencial fertilizante passível de elevar a V como ocorreram nos demais tratamentos.

A anatomia vegetal varia em conformidade com a radiação solar, a temperatura, a quantidade de água e os nutrientes disponíveis no solo (CONTIN, 2009), refletindo em alterações na densidade estomática e nas espessuras dos tecidos, o que confere características adaptativas às plantas, para que tenham um crescimento adequado (SILVA et al., 2005). A nutrição mineral contribui, nesse contexto, com a composição da estrutural da planta, isto é, o quanto a planta recebe de nutrientes evidencia-se em alterações na sua estrutura.

Quanto à espessura da nervura mediana e das epidermes das faces abaxial e adaxial, essas foram maiores nos tratamentos com resíduos de granito mais SS e de café em comparação aos tratamentos sem resíduos (Tabela 10). Além disso, no presente estudo, a aplicação de resíduos de granito mais SS proporcionou folhas mais espessas em relação aos tratamentos sem resíduos (Tabela 10) e o resíduo de café propiciou folhas com espessuras do limbo intermediárias aos demais tratamentos. Esses resultados podem ser atribuídos, possivelmente, ao maior teor de água nas folhas (TAF) expostas aos tratamentos com resíduo de granito mais SS, seguido das folhas submetidas aos tratamentos com resíduo de café, em relação aos tratamentos sem resíduos (Tabela 9), que resultou em folhas com células mais túrgidas. O aumento da turgescência está associado ao aumento do processo de crescimento em extensão da planta (KOZUKA et al, 2005; TAIZ et al., 2017), o que foi observado na presente pesquisa também pelo maior crescimento das plantas submetidas aos resíduos (Tabela 9). Além do mais, o aumento da espessura do limbo (Tabela 10) dos indivíduos submetidos aos tratamentos com resíduo de granito mais SS e a espessura intermediária do limbo das plantas expostas aos tratamentos com resíduo de café acarretaram na diminuição da área foliar específica (AFE) (Tabela 9) desses mesmos indivíduos (GOMES et al., 2008), conferindo maior capacidade fotossintética por unidade de área foliar (Tabela 13) que os indivíduos expostos aos tratamentos sem resíduos.

Nas espécies vegetais, os estômatos nas folhas variam em forma, tamanho e quantidade, em função de fatores abióticos, o que acarreta variações nas condições

fotossintéticas (ESAU, 1974). No presente estudo, observou-se que a densidade estomática da face abaxial foi maior nos indivíduos dos tratamentos sem resíduos, quando comparada aos demais tratamentos (Tabela 10), onde havia maiores disponibilidades de nutrientes. Esse aumento da densidade estomática deve-se possivelmente à menor velocidade de expansão das células epidérmicas, o que tornou os estômatos mais próximos entre si. Esses resultados concordam com os da pesquisa desenvolvida por Jurik e colaboradores (1982), na qual verificaram menor área foliar e maior densidade estomática em folhas de *Fragaria virginiana*e submetidas a baixo suprimento nutricional.

Por outro lado, nas plantas expostas aos resíduos, o número de estômatos por folha da face abaxial e, em geral, da face adaxial, foi maior em relação às expostas aos tratamentos sem resíduos (Tabela 10), apontando que a maior disponibilidade de nutrientes pode ter elevado a capacidade de diferenciação das células epidérmicas em novos estômatos (PEGORARO, 2010), assim como observado por Jurik et al. (1982) em *Fragaria virginiana*e. Esse aumento do número de estômatos com a adubação favorece a fotossíntese por facilitar a difusão de CO_2 (MELO et al., 2007), fato corroborado no presente estudo pela maior taxa fotossintética apresentada pelos indivíduos expostos aos resíduos (Tabela 13).

A aplicação de resíduos também influenciou positivamente a espessura do cilindro vascular das raízes e, consequentemente, ocasionou aumento do diâmetro radicular, além de proporcionar o aumento do diâmetro dos elementos do metaxilema em relação aos tratamentos sem resíduos (Tabela 10). Certamente, esses resultados têm correlação com o maior crescimento das plantas expostas aos resíduos, que proporcionam maior crescimento vegetativo (Tabela 9). Além disso, os resultados das variáveis anatômicos radiculares, corroborado por Gama et al. (2017), que constatou aumento do diâmetro dos vasos do xilema com o aumento da adubação com N, P e K. Por outro lado, o menor diâmetro do metaxilema sugere uma adaptação possível às plantas expostas a piores condições nutricionais, por favorecer a condutância hidráulica, o que diminui a cavitação e torna a absorção de água e de nutrientes mais eficientes (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2014). Contudo, apesar dessa adaptação de diminuição no diâmetro dos vasos xilemáticos, isso levou ao menor crescimento das plantas dos tratamentos sem resíduos, pois o xilema é o responsável pelo transporte de água e de sais minerais na planta (TAIZ et al. 2017). Ademais, raízes com menor diâmetro podem explorar um maior volume de solo por unidade de massa radicular. Portanto, como foram expostas a menor disponibilidade de nutrientes no solo, as raízes dos tratamentos sem resíduos se apresentam mais finas e, possivelmente, mais eficientes para a absorção de minerais do solo, observação relatada por Araújo e Machado (2006).

No que diz respeito ao resíduo de granito, a aplicação de calcário conferiu maior diâmetro do metaxilema. Em contrapartida, a calagem não influenciou as variáveis anatômicas nos tratamentos com resíduos, o que representa um ponto positivo, pois indica economia com calagem.

Em relação ao teor de pigmentos fotossintéticos nas folhas (Tabela 11), pode-se dizer que os tratamentos com resíduo de granito mais SS, principalmente na presença de calcário, influenciou as concentrações de clorofila *a*, *b* e total nas folhas de milho em relação ao controle absoluto (T1), e que o resíduo de café na presença de calcário (T6) possibilitou teor maior de clorofila *a* que os tratamentos sem resíduos (T1 e T2).

De maneira geral, a maior oferta de nutrientes, como ocorreu nos tratamentos com resíduos, está relacionada ao aumento da concentração de clorofila (IIVONEN et al. 2001, KAAKINEN et al. 2004, CONTIN, 2009; VALE; PRADO 2009; GODOY et al., 2008). Vários autores citam a ligação da fertilização, especialmente a nitrogenada, com a concentração de clorofila nas folhas (KITAJIMA; HOGAN, 2003; SORATTO et al., 2004). Além do N, outros nutrientes como o Mg (MENGUTAY et al., 2013), P e K (MARSCHNER, 2012) também têm sido associados com variações do teor de clorofila.

Os dados do presente estudo corroboram os de Ferreira (2011), que observou maiores teores de clorofila *a* nas folhas de *Lactuca sativa* L. submetidas à borra de café face ao controle. Esse mesmo autor não registrou diferenças significativas entre os diferentes tratamentos relativamente aos teores de carotenoides, o que corrobora os dados do presente estudo. Cruz et al. (2012) demonstraram que as características nutricionais das plantas, em relação aos seus compostos bioactivos (clorofila e carotenoides), pode ser melhorada pela presença de borra de café fresca no meio de cultura. Além do mais, conforme Silva et al. (2010) o maior teor de clorofila ocorreu em plantas que receberam o dobro da dose recomendada de P.

Por outro lado, a deficiência de nutrientes minerais pode estar associada a aumentos na geração de espécies reativas de oxigênio (ERO's) ligados aos danos de cloroplastos (MENGUTAY et al., 2013). Ou seja, as clorofilas podem sofrer danos devido à limitação a conversão de CO_2 provocada pelo déficit de nutrientes.

Os teores de clorofilas estão fortemente correlacionados com a taxa fotossintética da planta (FONTES; SILVA, 2006) e produtividade das plantas, uma vez que permite a transformação da energia luminosa em compostos orgânicos (STREIT et al., 2005). Nesse contexto, os maiores teores de pigmentos nas folhas dos tratamentos com resíduos em relação às plantas dos tratamentos sem resíduos parece ter proporcionado o incremento da

fotossíntese à medida que a redução nos teores de pigmentos fotossintéticos nas plantas dos tratamentos sem resíduos, sobretudo do controle absoluto (T1) (Tabela 11), pode estar associada à menor captação de luz pelo FSII, com consequente redução de ETR (LAWLOR; CORNIC, 2002) (Tabela 12). Além disso, Pias et al., (2013) relatam a correlação positiva entre o índice de clorofila com as variáveis altura e diâmetro do colo das mudas e Stancheva e Dinev (1995) mencionam que o máximo de pigmentos fotossintéticos foram observados nas plantas que apresentaram o maior crescimento vegetativo. Resultados semelhantes foram obtidos no presente estudo para os indivíduos expostos aos resíduos utilizados (Tabela 9 e 11).

Os tratamentos com resíduo de granito mais SS e resíduo de café tenderam também ao melhor desempenho da etapa fotoquímica da fotossíntese pelos maiores valores de PI_{ABS}, PI_{TOTAL} e F_V/F_M (Tabela 12 e Figura 4) em relação aos tratamentos sem resíduos, o que indica menor dissipação de energia luminosa, ou seja, menor fluorescência da clorofila *a*. Esses dados estão de acordo com as diferenças encontradas na cinética da fluorescência da clorofila *a*, que demonstrou valores negativos para os tratamentos com resíduos em relação aos tratamentos sem resíduos (Figura 5). Tais valores negativos indicam maior eficiência na captura e transporte de elétrons, ou seja, nessas plantas o processo de extinção de energia por meio da fluorescência ocorreu de maneira menos intensa. Quanto mais negativos esses valores, menor a fluorescência e maior o aproveitamento da energia nos processos fotossintéticos. Os indivíduos expostos aos tratamentos com resíduos foram afetados positivamente pela maior disponibilidade de nutrientes no solo, que aumentou significativamente a eficiência quântica máxima do FSII (F_V/F_M) (Tabela 12) pelo maior aproveitamento da energia nas reações do FSII (SILVA et al., 2010) ao passo que as plantas expostas aos tratamentos sem resíduos apresentaram menor F_V/F_M que os demais tratamentos. Todavia, valores de F_V/F_M menores que 0,7 podem indicar que a planta sofre algum tipo de estresse (CONTIN, 2009). No presente estudo, as médias dessa variável foram todas iguais ou acima de 0,7, o que possivelmente indica não fotoinibição. PI_{ABS} é considerado um indicador da vitalidade da planta permitindo uma análise mais ampla do FSII, quando comparado ao F_V/F_M, relacionando a eficiência de absorção de fótons, a captura de energia de excitação, a densidade de centros de reação ativos e a probabilidade da energia de excitação movimentar um elétron para além de Q_A (GONÇALVES et al., 2001). Já o PI_{TOTAL}, segundo Hermans et al. (2003), é uma variável importante para distinguir o comportamento fotossintético de plantas. De maneira geral, a maior oferta de nutrientes está relacionada ao aumento da

concentração de clorofila, da F_V/F_M e de fotoassimilados (IIVONEN et al., 2001, KAAKINEN et al., 2004).

Maior condutância estomática (g_s), maior taxa de fotossíntese (A) e menor concentração interna de gás carbônico (C_i) nas plantas expostas aos resíduos em relação às plantas dos tratamentos sem resíduos (Tabela 13) provavelmente indicam maior consumo de ATP e NADPH na etapa bioquímica da fotossíntese, o que pode estimular a atividade fotoquímica (SHUBHRA et al., 2004). Os tratamentos com resíduos determinaram maior densidade de centros de reação fotossinteticamente ativos do FSII (RC/ABS) e maior transporte de elétrons (ETR), ou maior consumo de elétrons pelos processos assimilatórios como a fotossíntese, com aumento de cerca de três vezes mais no valor de ETR em relação aos tratamentos sem resíduos (Tabela 12).

Em relação ao coeficiente de extinção fotoquímica (q_p) (Tabela 12), os valores maiores foram observados também nas plantas submetidas aos resíduos, o que demonstra maior extinção da fluorescência por processos relacionados ao transporte de elétrons nos cloroplastos e consequente geração de ATP e NADPH. Isso favorece a maior atividade fotossintética nos tratamentos com o maior aporte de nutrientes (SILVA et al., 2010).

Existem vários métodos de se avaliar a transformação de energia luminosa em energia química, como por exemplo, quantificando-se a massa seca produzida pelas plantas. MONTEITH (1972) reforça que a taxa de crescimento de uma espécie pode ser demonstrada em conformidade com a quantidade de energia luminosa incidente e da interceptação e conversão dessa energia em massa de matéria seca. Entretanto, o modo mais preciso de se medir a fotossíntese é com a quantificação do gás carbônico absorvido (RODRIGUES et al., 1998).

Vários autores citam a relação da fertilização com a atividade fotossintética (COSTE et al., 2005; SILVA et al., 2010), e no presente estudo, o resíduo de granito mais SS e o resíduo de café, ambos sem e com calcário, que possibilitaram maior disponibilidade de nutrientes às plantas, proporcionaram também maior g_s, A, transpiração (E) e eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i), além de em geral maior eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) que os tratamentos sem resíduos (Tabela 13). Por outro lado, a aplicação dos tratamentos com resíduos permitiu menor C_i quando comparado aos tratamentos sem resíduos, principalmente ao controle absoluto (Tabela 13).

No presente estudo, a maior g_s nas plantas expostas aos tratamentos com resíduo de granito e com resíduo de café, ambos sem e com calcário, quando comparadas aos indivíduos dos tratamentos sem resíduos, levou a maiores taxas fotossintéticas, menores valores de C_i e,

consequentemente, maiores A/C_i nesses tratamentos. Em contrapartida, a menor disponibilidade de nutrientes minerais como ocorre nos tratamentos sem resíduos provocou menor g_s, o que ocasionou a diminuição da capacidade fotossintética das folhas e o aumento da C_i, refletindo em menor A/C_i, (CONTIN, 2009) o que levou a diminuição da transpiração (SILVA et al., 2010) e da A/g_s (Tabela 13). Os dados do presente estudo também concordam com os resultados apresentados por Erthal et al. (2010) ao afirmarem que as crescentes taxas de aplicação da água residuária de bovinocultura utilizadas na forma de fertirrigação aumentaram a taxa fotossintética do capim-Tifton 85 e da aveia-preta. Viana et al. (2013) também constatou que o biofertilizante misto foi mais eficiente quanto à g_s em plantas de melão.

Os nutrientes minerais influenciam direta e indiretamente o desenvolvimento vegetal, porque desempenham, de modo geral, funções estruturais, além de constituírem enzimas e pigmentos fotossintéticos ou mesmo serem ativadores enzimáticos diretos do processo fotossintético. Assim, os nutrientes afetam diversos processos fisiológicos importantes como a fotossíntese, em sua fase fotoquímica e bioquímica, e a respiração, que influenciam diretamente o crescimento e a produção das culturas (ARAÚJO; MACHADO, 2006). O P, por exemplo, é componente de moléculas como o ATP, importante nos processos de biossíntese da planta (ARAÚJO; MACHADO, 2006). Um papel importante do Mg é ser co-fator de quase todas as enzimas fosforilativas. Sua falta inibe a fixação de CO_2, pois esse nutriente é exigido em reações de fosforilação que limitam fotossíntese (VITTI et al., 2006). O nitrogênio, além de outras funções, participa da constituição da molécula de clorofila, e seus teores estão ligados à taxa fotossintética da planta (FONTES; SILVA, 2006).

Relativamente à quantificação de carboidratos solúveis das folhas, pode-se dizer que a aplicação de resíduos tendeu a maiores teores em relação ao controle absoluto (T1) e à aplicação de somente calcário (T2) (Tabela 14). Do mesmo modo, a aplicação de resíduos propiciou maiores A e A/C_i em comparação aos tratamentos sem resíduos (Tabela 13). Esses resultados corroboram a informação de que as concentrações de carboidratos solúveis estão ligadas às taxas fotossintéticas e podem refletir o estado nutricional da planta (STREIT et al., 2005; TAIZ et al., 2017). Além disso, os tratamentos com resíduo de granito mais SS proporcionaram maior área foliar, seguido dos tratamentos com resíduo de café e dos tratamentos sem resíduo (Tabela 9). Resguardando as devidas particularidades, a quantidade de fotoassimilados na planta é, geralmente, proporcional à área foliar (ZONTA et al., 2006).

Em específico, os tratamentos com resíduo de granito (T3 e T4) com maior suprimento de P às plantas, favoreceu o incremento no teor de carboidratos solúveis totais, reflexo da

maior concentração de sacarose, quando comparado aos demais tratamentos (Tabela 14). Esse resultados corroboram os obtidos por Silva et al. (2010), que registraram o incremento de sacarose significativo nas folhas de *Coffea arabica* submetidas a alta disponibilidade de P no solo. O P além de atuar como regulador da fotossíntese age também como regulador do metabolismo de carboidratos. Como a ciclagem de P celular é determinada pela síntese de sacarose no citossol (HENDRICKSON et al., 2004), pode-se considerar que o incremento de sacarose nesses indivíduos indicou maior ciclagem de P.

Por outro lado, o menor suprimento de nutrientes nas plantas dos tratamentos sem resíduos (Tabela 8) pode ter causado a maior translocação de carboidratos e alocação de biomassa para as raízes, minimizando prejuízos ao sistema radicular e favorecendo o máximo alcance de nutrientes. Isso foi evidenciado pelos valores maiores de R:PA nessas plantas em relação aos demais tratamentos (Tabela 9).

5. CONCLUSÕES

1. Os tratamentos com resíduo de granito mais SS elevaram a concentração de P no solo em relação aos demais tratamentos. Além disso, proporcionaram, em via de regra, maior crescimento das plantas, bem como maior conteúdo de nutrientes por massa de matéria seca da parte aérea por vaso quando comparados aos outros tratamentos.
2. Os tratamentos com resíduo de café aumentaram os teores de K, Ca e Mn, e elevaram os valores de SB, t, T e V no solo, em relação aos demais tratamentos. Ademais, propiciaram de modo geral maior conteúdo de nutrientes por massa de matéria seca da parte aérea por vaso quando relacionados aos tratamentos sem resíduos.
3. Os tratamentos sem resíduos e os tratamentos com resíduo de café causaram menor crescimento das plantas possivelmente devido ao P em concentração reduzida no solo, em relação aos tratamentos com resíduo de granito mais SS. No entanto, os tratamentos com resíduo de café proporcionaram maior crescimento do que os tratamentos sem resíduos (T1 e T2), pois o resíduo de café continha P e outros nutrientes a mais do que T1 e T2.
4. A adição de calcário tendeu a elevar os valores de SB, t, T e V em relação a não adição de calcário. Além disso, a calagem tendeu a elevar o pH e a reduzir a H+Al, mas em pequena magnitude.
5. Em geral, a aplicação de ambos os resíduos propiciaram o incremento das variáveis anatômicas quando comparada a não aplicação de resíduos.
6. A aplicação de resíduos elevou as variáveis de trocas gasosas como a *A*, porém, diminuiu a C_i em relação aos tratamentos sem resíduos.
7. O uso de resíduos ocasionou valores maiores das variáveis analisadas da fluorescência transiente e modulada da clorofila *a* que os tratamentos sem resíduos.
8. Os tratamentos com resíduo de granito mais SS e de café elevaram, em geral, o conteúdo de clorofila *a* em comparação aos tratamentos sem resíduos.
9. O resíduo de granito mais SS proporcionou maior conteúdo de carboidratos solúveis totais, seguido do resíduo de café e dos tratamentos sem resíduos.
10. O resíduo de beneficiamento do granito via fio diamantado mais SS pode ser utilizado na dose de 10 t ha^{-1} e o resíduo de beneficiamento do café pode ser usado na dose de 29 t ha^{-1}, favorecendo o crescimento adequado das plantas, porém, em maior evidência no caso do uso do resíduo de granito mais SS.

6. REFERÊNCIAS

ABREU JÚNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A.F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, v.60, n.2, p.337-343, 2003.

ARAUJO, A.P; MACHADO, C.T de T. Fósforo. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.253-280.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability:** a mechanistic approach. New York, Wiley-Interscience, 1984. p.398.

BRASIL. Lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Brasília.Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 9 fev. 2018.

BRITO, A.D de. **Características químicas de resíduo de café (borra) e seu efeito em cafeeiro orgânico adensado e em plântulas de cafeeiro e tomateiro**. 2013. 122 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CAIRES, E.F. et al. Soil acidity, liming and soybean performance under no-till. **Scientia Agricola**, v.65, n.5, p.532-540, 2008.

CLAUDE, B. Étude bibliographique: utilisation dês sous-produits du café. **Café, Cacao, Thé**, Paris, v.23, n.2, p.146-152, 1979.

CONTIN, D.R. **Alterações anatômicas e fisiológicas em plantas de *Mikania glomerata* Sprengel e *Mikanialaevigata* Schultz Bip. ex Baker, sob diferentes condições luminosas e nutricionais**. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado emBiologia Comparada) – Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

COSTA, A.S.V. da et al. Uso do resíduo de granito oriundo da serraria e polimento como corretivo e fertilizante de solos agrícolas. **Geonomos**, v.18, n.1, 2010.

COSTA, A.R. **Nutrição Mineral em Plantas Vasculares**. Évora: Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora, 2014.

CRUZ, R. et al. Carotenoids of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown on soil enriched with spent coffee grounds. **Molecules**, v.17, n.2, p.1535-1547, 2012.

DANIEL, O. et al. Aplicação de fósforo em mudas de *Acácia mangium* Willd. **Revista Árvore**, v.21, n.2, p.163-168, 1997.

DICKSON, A.; LEAF, A.L.; HOSNER, J.F. Quality appraisal of while spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry Chronicle**, v.36, p.11-13, 1960.

DULTRA, E.J.V. **Adição de subprodutos da cinza da casca de café**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

EFFGEN, T. A. M. et al. Atributos químicos do solo e produtividade de lavouras de cafeeiro conilonsubmetidas a diferentes tratos culturais no sul do estado do Espírito Santo. **Bioscience Journal**, v.24, n.2, p.7- 18, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária . **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**: Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas**: princípios e perspectivas. Londrina: Editora Planta, 2006.

ERTHAL, V.J.T. et al. Características fisiológicas, nutricionais e rendimento de forrageiras fertirrigadas com água residuária de bovinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.5, p.458-466, 2010.

ESAU, K. **Anatomia das Plantas com Sementes**. São Paulo: Edgard Blucher. 1974.

EVANS, G.C. **The quantitative analysis of plant growth**. Londres: Blackwell Science Public, 1972. p.734.

FAN, L.; SOCCOL, C. Shiitake Bag Cultivation. Parte I Shiitake. **Coffee Residues**. Mushroom Grower´s Handbook. Mush world All, 2005.

FERREIRA, A.D. **Influência da borra de café no crescimento e nas propriedades químicas e biológicas de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.)**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestre em Qualidade e Segurança Alimentar) - Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior Agrária, 2011.

FONTES, P.C.R.; SILVA, M.C. de C. Proposição de uma tabela de cor (UFV 80-Monalisa) para a avaliação do estado de nitrogênio da batateira. **Batata Show**, v.6, n.16, p.6-16, 2006.

GAMA, T.C.P. da et al. Anatomia foliar, fisiologia e produtividade de cafeeiros em diferentes níveis de adubação. **Coffee Science**, v.12, n.1, p.42-48, 2017.

GODOY, L.J.G. de et al. Índice relativo de clorofila e o estado nutricional em nitrogênio durante o ciclo do cafeeiro fertirrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.1, 2008.

GOMES, I.A.C. et al. Alterações morfofisiológicas em folhas de *Coffea arabica* L. cv. "Oeiras" sob influência do sombreamento por *Acacia mangium* Willd. **Ciência Rural**, v.38, n.1, p.109-115, 2008.

GONÇALVES, J.F.C., MARENCO, R.A., VIEIRA, G. Concentration of photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence of mahogany and tonka bean under two light environments. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, n.2, p.149-157, 2001.

GRIME, J.P.; HUNT, R. Relative growth-rate: its range and adaptive significance in a local flora. **The Journal of Ecology**, v.63, n.2, p. 393-422, 1975.

HENDRICKSON, L.; CHOW, W.S.; FURBANK, R.T. Low temperature effects on grapevine photosynthesis: the role of inorganic phosphate. **Functional Plant Biology**, v.31, p.789-801, 2004.

HERMANS, C. et al. Quality assessment of urban trees: A comparative study of physiological characterization, airborne imaging and on site fluorescence monitoring by the OJIP-test. **Journal of Plant Physiology**, v.160, n.1, p.81-90, 2003.

IIVONEN, S.; RIKALA, R.; VAPAAVUORI, F**.** Seasonal root growth of Scots pine seedlings in relation to shoot phenology, carbohydrate status and nutrient supply. Canadian **Journal of Forest Research**, v.31, n.9, p.1569-1578, 2001.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. Disponível em: <www.ioc.org/trade_statistics.asp>. Acesso em: 9 jan. 2018.

JURIK, T.W., CHABOT, J.F.; CHABOT, B.F.. Effects of light and nutrients on leaf size, CO2 exchange, and anatomy in wild strawberry (*Fragaria virginiana*). **Plant Physiology**, v.70, n.4, p.1044-1048, 1982.

KAAKINEN, S. et al. Growth, allocation and tissue chemistry of *Piceaabies*seedlings affected by nutrient supply during the second growing season. **Tree Physiology**, v.24, n.6, p.707-719, 2004.

KITAJIMA, K.; HOGAN, K.P. Increases of chlorophyll a/b ratios during acclimation of tropical woody seedlings to nitrogen limitation and high light. **Plant, Cell e Environment**, v.26, n.6, p.857-865, 2003.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 492 p.,1985.

KOZUKA T. et al. The different growth responses of the Arabidopsis thaliana leaf blade and the petiole during shade avoidance are regulated by photoreceptors and sugar. **Plant and Cell Physiology**, v.46, n.1, p.213-223, 2005.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2001.

LAWLOR, D.W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, Cell and Environment**, v.25, p.275-294, 2002.

LEITE, S.T. et al. A compostagem como alternativa para aproveitamento da borra de café.**Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, v.7, n.13, p.1068, 2011.

LIBARDONI J.B.; ADAMSKI, J.M; COELHO, G.C.C. Efeitos da calagem e fertilizante (NPK) sobre o crescimento e anatomia radicial de grandiúva, *Trema micrantha* (L.) Blume. **Revista Brasileira de Biociências**, v.5, n. S2, p. 408-410, 2007.

MAGALHÃES, A.C.N. Análise quantitativa do crescimento. In: FERRI, M.G. **Fisiologia Vegetal**. São Paulo: EPU/EDUSP, v.1, 1979. p. 331-350.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. Orlando: Academic Press, p. 649. 2012.

MATOS, A.T. de et al. Tratamento de água para reuso no descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro. **Engenharia na Agricultura**, v.15, n.2, p.173-178, 2007.

MATOS, A.T. de; LO MONACO, P. A. Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos e líquidos da lavagem e despolpa dos frutos do cafeeiro. Viçosa-MG: UFV. **Boletim Técnico**, v.68, p.7, 2003.

MELO, H.C. de et al. Alterações anatômicas e fisiológicas em *Setaria anceps* StapfexMassey e *Paspalum paniculatum* L. sob condições de déficit hídrico. **Hoehnea**, v.34, n.2, p.145-153, 2007.

MENEZES, R.R.; FERREIRA, H. S.; NEVES G. de A. The use of granite wastes as ceramic raw materials. **Cerâmica**, v.48, n.306, p.92-101, 2002.

MENGUTAY, M. et al. Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. **Plant and soil**, v.368, n.1-2, p.57-72, 2013.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (Mapa). **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilidade e corretivos**. Brasília: Mapa, 2014.

MONTANI, C..**XXVIII RapportoMarmo e Pietrenel Mondo 2017 (XXVIII World Marble and Stones Report 2017)**. Carrara: Aldus, 2017.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v.9, p.747-766, 1972.

MUSSATTO, S.I. et al. Production, composition and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, v.4, n.5, p.661-672, 2011.

NETO, S.N. de O. et al. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, v.27, n.1, p.15-23, 2003.

OLIEVEIRA, L.E.M de; GOMIDE, M.B. Fisiologia Gegetal. Lavras, ESAL, 72p, 1986.
GUIMARÃES, R.J. **Análise do crescimento e da quantificação de nutrientes em mudas de cafeeiro, (*Coffea arabica* L.), durante seus estádios de desenvolvimento em substrato padrão**. 1994. 113 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1994.

PEGORARO, R.L. et al. Produção de óleos essenciais em plantas de *Mentha xpiperita* L. var. *piperita* (Lamiaceae) submetidas a diferentes níveis de luz e nutrição do substrato. **Revista Brasileira de Botânica**, v.33, n.4, p.631-637, 2010.

PIAS, O.H de C. et al. Doses de fertilizante de liberação controlada no índice de clorofila e na produção de mudas de grápia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.33, n.73, p.19-25, 2013.

PREZOTTI, L.C. et al. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo**: 5ª aproximação. Vitória: SEEA/Incaper/Cedagro, 2007. p.305.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B. et al. Caracterização da anatomia foliar de cafeeiros arábica em diferentes períodos sazonais. **Revista Biotemas**, Florianópolis, v.27, n.4, p. 1-10, dez. 2014.

RAVIV, M.. Horticultural uses of composted material. In: **International symposium on composting e use of composted material in horticulture**, 1997. p. 225-234.

ROCHA, J.C. e ROSA, A.H. **Substâncias húmicas aquáticas: Interações com espécies metálicas**. São Paulo, Universidade Estadual de São Paulo, 2003. p. 120.

RODRIGUES, T.J.D., LEITE, I.C., SANTOS, D.M.M. **Roteiro Para Aulas Práticas De Fisiologia Vegetal**. Jaboticabal: FUNEP, 1998. p.79.

RODRÍGUEZ, D.; KELTJENS, W. G. e GOUDRIANN, J. Plant leaf area expansion and assimilate production in wheat (*Triticumaestivum* L.) growing under low phosphorus conditions. **Plant and Soil**, v.200, n.2, p.227-240, 1998.

ROSA, S.D.V.F da et al. Inibição do desenvolvimento in vitro de embriões de *Coffea* por cafeína exógena. **Revista Brasileira de Sementes**, v.28, n.3, p.177-184, 2006.

SÁ, J. R. et al. Interação da adubação organo-mineral nos atributos químicos do solo na cultura do melão em Mossoró. **Revista Verde**, v.5, n.3, p.89-100, 2010.

SHUBHRA et al. Influence of phosphorus application on water relations, biochemical parameters and gum content in cluster bean under water deficit. **Biologia Plantarum**, v.48, p.445-448, 2004.

SILVA F.C da et al. **Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**: métodos usados na Embrapa Solos. Campinas: Embrapa, 1998.

SILVA, F.C.P. et al. Lama de granito como fonte de nutrientes em sorgo granífero. In CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Resumos.** Londrina: SBCS, 2001a.

SILVA, F.C.P. et al. Efeitos da lama de granito em cenoura (*Daucuscarota* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001. **Resumos.** Londrina: SBCS, 2001b.

SILVA, L. da et al. Fotossíntese, relações hídricas e crescimento de cafeeiros jovens em relação à disponibilidade de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.9, p.965-972, 2010.

SILVA, L.M.; ALQUINI, Y.; CAVALLET, V.J. Inter-relações entre anatomia vegetal e produção vegetal. **Acta Botânica Brasílica**, Porto Alegre, v.19, n.1, p.183-194, 2005.

SORATTO, R.P; CARVALHO, M.A.C. de; ARF, O. Teor de clorofila e produtividade do feijoeiro em razão da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.9, p.895-901, 2004.

SOUZA, S.R; FERNANDES, M.S. Nitrogênio. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.215-252.

STANCHEVA, I.; DIVEV, N. Response of wheat and maize to different nitrogen sources: II. Nitrate reductase and glutamine synthetase enzyme activities, and plastid pigment content. **Journal of Plant Nutrition**, v.18, p.1281-1290, 1995.

STREIT, N.M. et al. The chlorophylls. **Ciência Rural**, v.35, n.3, p.748-755, 2005.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegra: Artmed, 2017.

TAIZ, L. e ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. p.719.

THEODORO, S.; LEONARDOS, O.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.78, n.4, p.721-730, 2006.

TORRENTÓ, M.S., PUJOL, O. Antecedentes y fundamentos del proceso de compostaje. In: CASCO, J.M.; HERRERO, R.M. **Compostaje**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2008. p. 76-90.

USDA - United States Department o ;f Agriculture. Natural Resources Conservation Service (NRCS). Disponível em: <https://www.usda.gov/ >. Acesso em: 11 jan. 2018.

VALE, D.W do; PRADO R de M. Adubação com NPK e o estado nutricional de ‘citrumelo’ por medida indireta de clorofila. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, n.2, p.266-271, 2009.

VANCE, C.P. et al. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New phytologist**, v.157, n.3, p.423-447, 2003.

VIANA, T.V. de A. et al. Trocas gasosas e teores foliares de NPK em meloeiro adubado com biofertilizantes. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, n.4, 2013.

VITTI, G.C; LIMA, E; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M.S(Ed.). **Nutrição mineral de plantas**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.299-324.

ZIAEYANA, A.H.; RAJAIEA, M. Combined effect of Zinc and Boron on yield and nutrientsaccumulation in corn. **International Journal of Plant Production**, v.3, n.3, p.35-44, 2009.

ZONTA, E. et al. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.7-52.