**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Crescimento, nutrição e fitossanidade de povoamentos de eucalipto
fertilizados com boro, cobre e zinco na presença e ausência de resíduos
florestais**

Liamara Santos Masullo

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2018**

Liamara Santos Masullo
Engenheira Florestal

**Crescimento, nutrição e fitossanidade de povoamentos de eucalipto fertilizados
com boro, cobre e zinco na presença e ausência de resíduos florestais**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Masullo, Liamara Santos

Crescimento, nutrição e fitossanidade de povoamentos de eucalipto fertilizados com boro, cobre e zinco na presença e ausência de resíduos florestais / Liamara Santos Masullo. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

96 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Micronutrientes 2. Cultivo mínimo 3. Nutrição florestal 4. Ferrugem do eucalipto I. Título

DEDICATÓRIA

Ao meu pai **Mario** (*in memoriam*) por ser o meu maior exemplo de amor e de dedicação, aos meus pais **Linda e Dena** por todo o carinho e apoio e aos meus irmãos **João Vitor, Rosa e Ronaldo** por toda a força.

Ao meu amor, **Henrique Maxir**, por cada palavra de carinho, pelo amor e pela paciência durante este período.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me proporcionar mais esta conquista;

Ao Professor Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves pela oportunidade, paciência e ensinamentos;

À banca examinadora, aos professores Dr. Luís Reynaldo Ferracciú Alleoni, Dr. Robson Schaff Corrêa e Dr. Antonio Natal Gonçalves pelas contribuições para a melhoria deste trabalho;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), à Universidade de São Paulo (USP) e ao Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais pela estrutura e formação profissional;

Ao Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF), por meio do Programa Cooperativo sobre Silvicultura e Manejo (PTSM), pela ajuda logística e financeira e ao Alexandre de Vicente Ferraz pelo apoio científico e técnico;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de mestrado;

Aos companheiros de trabalho e amigos da “Equipe Marreta”, Andressa Ávila, José Renato Drago e Oscar Esteves, por toda a ajuda e por serem verdadeiros amigos. Sem vocês o mestrado teria sido muito mais difícil;

Aos amigos do “Projeto herbicidas”, Carla Papai e Gabriel Valdo, pela amizade e aprendizado, vocês tornaram o meu começo em Piracicaba gratificante e divertido;

À toda equipe de trabalho do PTSM, José Henrique Rocha, Fábio Toledo, Yessid Mariño, Estela Foltran, Andréa Wenzel, Robson Corrêa, Antônio Florentino, Amanda Segtowich, Ivanka Rosada, José de Deus, Eric Victor Ferreira, Carolina Brandini, José Carlos Arthur Junior e tantas outras pessoas com quem pude aprender durante este período no PTSM;

Aos estagiários do PTSM, Vitória, Douglas, Pedro Henrique, Karine, Éder, Lucas, Pedro Nalesso, Joana, Nazir, Daniel e Enrico, pela ajuda nas atividades do projeto micronutrientes;

À equipe da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, especialmente ao Rildo, ao Lorival e à Elaine, pelas conversas e pelo apoio na implantação e em todas as atividades de campo;

Às equipes dos Laboratórios de Fertilidade do Solo e de Análises Totais (ESALQ/USP), Luis Silva e Marina Colzato, pelo apoio nas análises químicas de solo;

Ao Professor Dr. Luis Eduardo Aranha Camargo pelas discussões sobre o trabalho;

À equipe do Viveiro de Mudas (ESALQ/USP), em especial ao Sabino e ao Natanael, pela ajuda e amizade;

Aos amigos “Cabeças de baleia” minha segunda família em Piracicaba, afinal “*não estou em casa, mas com vocês estou em família*”.

Muito Obrigada

EPIGRAFE

“The ultimate measure of a man is not where he stands in moments of comfort and convenience, but where he stands at times of challenge and controversy”.

Martin Luther King Jr.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	13
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	15
REFERÊNCIAS	20
2. CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE PLANTAÇÃO DE EUCALIPTO FERTILIZADA COM BORO, COBRE E ZINCO E COM MANEJO DE RESÍDUOS FLORESTAIS	23
RESUMO	23
ABSTRACT.....	23
2.1. INTRODUÇÃO.....	24
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	26
2.2.1. Caracterização da área experimental.....	26
2.2.2. Delineamento experimental e tratamentos	28
2.2.3. Caracterização dos resíduos florestais.....	30
2.2.4. Instalação e condução da área experimental	30
2.2.5. Avaliações	31
2.2.6. Análises estatísticas	39
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
2.3.1. Atributos químicos do solo.....	39
2.3.2. Extração sequencial de Cu e Zn no solo.....	42
2.3.3. Fracionamento do B no solo.....	46
2.3.4. Teor e distribuição de nutrientes nas folhas.....	48
2.3.5. Crescimento das árvores.....	56
2.3.6. Biomassa e acúmulo de nutrientes.....	60
2.4. CONCLUSÕES.....	68

3. REFLEXO DA NUTRIÇÃO SOBRE A INCIDÊNCIA E A SEVERIDADE DA FERRUGEM DO EUCALIPTO	74
RESUMO.....	74
ABSTRACT	74
3.1. INTRODUÇÃO	75
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	77
3.2.1. Caracterização da área experimental, tratamentos e delineamento experimental	77
3.2.2. Avaliações.....	77
3.2.3. Análise estatística.....	80
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
3.3.1. Índice de Infecção por ferrugem	80
3.3.2. Avaliação de incidência e severidade da doença.....	82
3.3.3. Análise epidemiológica.....	83
3.3.4. Quantificação de dano do ataque.....	84
3.3.5. Análise nutricional	88
3.3.6. Maturação foliar	90
3.4. CONCLUSÕES	93

RESUMO

Crescimento, nutrição e fitossanidade de povoamentos de eucalipto fertilizados com boro, cobre e zinco na presença e ausência de resíduos florestais

O aumento da demanda por produtos florestais impulsionou o crescimento das áreas plantadas mundiais, passando de 167 milhões de hectares em 1990 para 280 milhões em 2015. No setor brasileiro de florestas plantadas, as espécies de *Eucalyptus* possuem grande representatividade, sendo responsáveis pelo suprimento de 90 % da madeira produzida no país. As áreas em que os novos povoamentos de eucalipto estão sendo estabelecidos são caracterizadas por condições climáticas pouco favoráveis e pela baixa fertilidade química do solo. O suprimento nutricional apresenta forte influência sobre a produtividade e contribui para prevenção contra estresses bióticos e abióticos. A deficiência de micronutrientes é uma realidade emergente, sendo o B, o Cu e o Zn os nutrientes mais problemáticos para a cultura em solos do Cerrado. Estes nutrientes estão associados às cadeias metabólicas de produção de lignina, de fenóis e de fitoalexinas como cofatores e ativadores enzimáticos. Estas moléculas, além de participarem da integridade funcional e estrutural de membranas e de outros componentes celulares das plantas, cumprem a função de aumentar a resistência das plantas ao ataque de patógenos. Assim, foram estudados os efeitos da omissão e da aplicação de micronutrientes B, Cu e Zn associado à manutenção ou à remoção de resíduos florestais. Foram avaliados os aspectos nutricionais das árvores e suas relações com o volume de madeira produzido e com a suscetibilidade ao ataque da ferrugem do eucalipto (*Puccinia psidii*). A remoção dos resíduos florestais da colheita apresentou pouca influência sobre os teores disponíveis de B, Cu e Zn no solo. A omissão de B e de Zn influenciou os teores disponíveis destes nutrientes no solo, contudo apenas os baixos teores de B se refletiram na nutrição das árvores. No crescimento das árvores, o diâmetro à altura do peito teve redução aos 12 e aos 15 meses pós-plantio. Esta diferença foi encontrada entre os tratamentos com aplicação completa de nutrientes e com omissão de Zn. O tratamento com omissão de Zn apresentou o maior crescimento e, em geral, a maior concentração de macronutrientes e de micronutrientes foliares. O tratamento com omissão de Zn apresentou também a menor infestação e severidade do ataque por ferrugem, mostrando a importância da nutrição balanceada das árvores para o crescimento e para a proteção dos povoamentos florestais.

Palavras-chave: Micronutrientes; Omissão de nutrientes; Nutrição florestal; Silvicultura; Ferrugem do eucalipto

ABSTRACT

Growth, nutrition and phytosanity of eucalyptus stands fertilized with boron, copper and zinc in the presence and absence of forest residues

The increasing demand for forest products has promoted the growth of planted areas worldwide, from 167 million hectares in 1990 to 280 million in 2015. In the Brazilian planted forest sector, *Eucalyptus* species supply 90 % of the produced wood in the country. In general, eucalyptus stands are established in areas with unfavorable climatic conditions and low soil fertility. Mineral nutrition has an important influence on productivity and prevention against biotic and abiotic stresses. Micronutrient deficiency is an emerging reality, and B, Cu and Zn are the most problematic nutrients for eucalypt cultivation in soils of the Brazilian Cerrado. These nutrients are related to lignin, phenol and phytoalexin production pathways as cofactors and enzymatic activators. These molecules present relations with the resistance and the susceptibility of the plants to the pathogens attack, besides participating in the functional and structural integrity of membranes and other cellular constituents of plants. Thus, the omission effects were studied and application of B, Cu and Zn associated with the forest residues management. Trees nutrition and their relation with volume and susceptibility to eucalyptus rust (*Puccinia psidii*) were evaluated. The removal of forest residues from the harvest had little influence on the available levels of B, Cu and Zn in the soil. The omission of B and Zn influenced the availability of these nutrients in the soil; however, only low levels of B were reflected in trees nutrition. The diameter at breast height had a growth reduction at 12 and 15 months after planting. This difference was found between treatments with complete application of nutrients and with Zn omission. The treatment with Zn omission had the highest growth and, in general, the highest leaf concentration of macronutrients and micronutrients. The treatment with Zn omission also showed the lowest infestation and severity of eucalyptus rust. Thus, balanced mineral nutrition of trees favored growth and health of the forest stand.

Keywords: Micronutrients; Nutrient omission; Forest nutrition; Silviculture; Eucalyptus rust

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Precipitação pluvial (mm) e temperatura média (°C) decendial registrada na EECFI durante a condução do experimento.....	27
Figura 2 Excedente e déficit hídrico decendial sequencial da EECFI, segundo Thornthwaite e Mather (1955), durante a condução do experimento	27
Figura 3 Distribuição dos tratamentos na área experimental destinada ao manejo de resíduos florestais	29
Figura 4 Distribuição de pontos de coleta anual de solo. A amostragem foi realizada na parcela útil (a) em 9 pontos da linha de plantio (b) para a composição de amostras compostas das profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm	32
Figura 5 Representação esquemática para a coleta de amostras de folhas na fase juvenil do plantio (adaptado de Lamb (1976)).....	34
Figura 6 Distribuição observada e estimada do volume com casca (a), dos compartimentos da biomassa aérea (lenho (b), casca (c), folha (d), galho (e)) e do índice de área foliar (f)	37
Figura 7 Distribuição relativa do Cu (a) e do Zn (b) nas frações do solo (Extração: Cu/Zn-tro (Fração trocável) - CaCl_2 0,1 mol L ⁻¹ ; Cu/Zn-MO (Fração ligada à MO) – NaOCl 5 % (pH 8,5); Cu/Zn-Ox (fração ligada aos óxidos) - ácido oxálico 0,2 mol L ⁻¹ + oxalato de amônio 0,2 mol L ⁻¹ + ácido ascórbico 0,1 mol L ⁻¹ (pH 3); Res (fração residual) - HNO_3 + HCl)	45
Figura 8 Distribuição relativa de B nas frações do solo (Extração: B-Sol - água ultrapura; B-Ad - CaCl_2 0,02 mol L ⁻¹ ; B-MO - manitol 0,01 mol L ⁻¹ + CaCl_2 0,02 mol L ⁻¹ ; B-OxFeA/C - oxalato de amônio 0,175 mol L ⁻¹ (pH 3,25); B-Res (HNO_3 + HCl)	48
Figura 9 Teores de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) em folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos 6 meses de idade, de acordo com o estágio fenológico e posição de amostragem na copa. O tratamento utilizado foi COMP. *Barras na vertical indicam diferença mínima significativa a 5 %	51
Figura 10 Teores de B (a), Mn (b), Cu (c), Fe (d) e Zn (e) em folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos 6 meses de idade, de acordo com o estágio fenológico e posição de amostragem na copa. O tratamento utilizado foi COMP. *Barras na vertical indicam diferença mínima significativa a 5 %	52
Figura 11 Crescimento do diâmetro (a) e do índice de copa (b) de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais, aos 6 meses de idade. *As barras indicam o desvio padrão amostral dos dados em relação à média.....	56
Figura 12 Teores de <i>Clorofila a</i> e <i>b</i> , mensuradas por meio de clorofilômetro Falker, em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais, aos 6 meses de idade. A tabela indica os valores de F dos contrastes de interesse. O símbolo (*) indica diferença a 5 %	57

Figura 13 Altura (a) e DAP (diâmetro à altura do peito) (b) das árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais, aos 6, 9, 12 e 15 meses de idade. *As barras na vertical indicam o desvio padrão amostral dos dados em relação à média.....58

Figura 14 Volume de madeira com casca produzido por uma floresta de eucalipto influenciada pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita, aos 12 (a) e 15 (b) meses de idade. *As barras na vertical indicam o desvio padrão amostral dos dados em relação à média.....59

Figura 15 Índice de área foliar de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita, aos 12 meses de idade60

Figura 16 Biomassa aérea (a) e partição dos compartimentos aéreos (b) de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita, aos 12 meses de idade61

Figura 17 Estoque de micronutrientes na biomassa aérea de um povoamento de eucalipto, considerando todos os tratamentos, aos 12 meses de idade62

Figura 18 Estoque e distribuição de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita aos 12 meses de idade66

Figura 19 Estoque e distribuição de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita aos 12 meses de idade67

Figura 20 Escala diagramática para a avaliação de severidade de ferrugem do eucalipto de acordo com Zamprognio et al. (2008) (Imagem: Alvares et al., 2017)78

Figura 21 Temperatura máxima média, período de molhamento foliar e índice esperado de infestação por ferrugem do eucalipto na área experimental, desde o plantio até o período final da infestação. *Barras na vertical indicam o desvio padrão da média.....81

Figura 22 Curva de infestação (a) e de severidade (b) da ferrugem em plantação seminal de *Eucalyptus grandis* influenciada pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais83

Figura 23 Área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) da ferrugem em povoamento de *Eucalyptus grandis* influenciado pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais aos 12 meses de idade. O valor da tabela indica o F dos contrastes de interesse; (*) significativo a 5 %84

Figura 24 Média de diâmetro (a), altura (b) e volume (c e d) de árvores de *Eucalyptus grandis* em diferentes classes de severidade de ataque por ferrugem, aos 6, 9, 12 e 15 meses. Classes: 0 – plantas livres da infestação; 1 – presença de poucas pústulas, 2 – presença de pústulas espalhadas pelo limbo e predominantes em tecidos jovens; e 3 – abundante presença de pústulas e necrose das regiões atingidas. *Barras na vertical indicam a diferença mínima significativa entre as classes de ataque da ferrugem ($p < 0,05$)87

Figura 25 Índice de área foliar médio (IAF) das árvores de *Eucalyptus grandis* em diferentes classes de severidade causada por ferrugem do eucalipto, aos 12 meses de idade. Classes: 0 – plantas livres da infestação; 1 – presença de poucas pústulas, 2 – presença de pústulas espalhadas pelo limbo e predominantes em tecidos jovens; 3 – abundante presença de pústulas e necrose das regiões atingidas. *Barra na vertical indica a diferença mínima significativa entre as classes de ataque da ferrugem ($p < 0,05$)..... 88

Figura 26 Comprimento e largura foliar de árvores de *Eucalyptus grandis*, aos 6 meses de idade, em função da aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) de resíduos florestais da colheita 90

Figura 27 Estádios foliares de árvores de *Eucalyptus grandis* aos 6 meses de idade em função da aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) de resíduos florestais da colheita. A proporção CI/CF é dada pela razão entre a mensuração inicial (CI), e a mensuração final (CF), 30 dias após a marcação das folhas 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características físicas e químicas do solo da área experimental	28
Tabela 2 Descrição dos tratamentos utilizados no estudo	30
Tabela 3 Acúmulo de nutrientes nos resíduos florestais antes da implantação do experimento	30
Tabela 4 Doses de fertilizantes minerais, manejo de resíduos e calagem dos tratamentos	31
Tabela 5 Equações para a estimativa do volume e da biomassa aérea aos 12 meses de idade e seus coeficientes de determinação ajustados ($R^2_{aj.}$).....	36
Tabela 6. Contrastes de interesse dos tratamentos avaliados	39
Tabela 7 Atributos químicos do solo da área experimental antes da instalação do experimento	40
Tabela 8 Atributos químicos do solo na linha de plantio em povoamento de eucalipto influenciado pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade, aos 6 meses pós-plantio, e valores de F dos contrastes de interesse .	42
Tabela 9 Teores de Zn e Cu extraídos de diferentes frações do solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade, aos 6 meses pós-plantio. * A letra R indica o manejo de resíduo florestal empregado. +R indica a manutenção (-Cu+R) e -R a remoção de resíduo florestal (-Cu-R). O símbolo ^(**) indica diferença a 5 %; ^(ns) não significativo	43
Tabela 10 Teores de B extraídos de diferentes frações do solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade, aos 6 meses pós-plantio. * A letra R indica o manejo de resíduo florestal empregado. +R indica a manutenção (-Cu+R) e -R a remoção de resíduo florestal (-Cu-R). O símbolo ^(**) indica diferença a 5 %; ^(ns) não significativo	46
Tabela 11 Teor de nutrientes em folhas de eucalipto, aos 6 meses de idade, em função do estágio fenológico foliar, em plantas que receberam fertilização completa (COMP)	48
Tabela 12 Análise nutricional de macronutrientes em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita, aos 6 e 12 meses de idade, e valores de F dos contrastes de interesse	54
Tabela 13 Análise nutricional de micronutrientes em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita, aos 6 e 12 meses de idade, e valores de F dos contrastes de interesse	55

Tabela 14 Valores de F dos contrastes de interesse para as variáveis de D_c (diâmetro de copa), ICOP (índice de copa), H (altura), DAP (diâmetro à altura do peito) e volume de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais aos 6, 9, 12 e 15 meses de idade..... 56

Tabela 15 Valores de F dos contrastes de interesse para as variáveis biomassa de folha, de galho, de lenho e de casca e biomassa total de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita aos 12 meses de idade..... 60

Tabela 16 Teores de macronutrientes e de micronutrientes nos compartimentos de lenho, de galho, de casca e de folha em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita, aos 12 meses de idade..... 63

Tabela 17. Valores de F dos contrastes de interesse para os estoques de macronutrientes e de micronutrientes de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita aos 12 meses de idade 65

Tabela 18 Índice de infestação e de severidade da ferrugem (*Puccinia psidii*) em povoamento de eucalipto influenciado pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita..... 82

Tabela 19 Crescimento em altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP) e volume de madeira com casca (Volume), e índice de área foliar (IAF) em povoamento de eucalipto influenciado pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais aos 6, 9, 12 e 15 meses de idade. (*) significativo a 5 %; (^{ns}) não significativo 85

Tabela 20 Teores de macronutrientes e micronutrientes de árvores de *Eucalyptus grandis* influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais colheita aos 6 meses de idade 88

Tabela 21 Correlação de Pearson (r) entre teores foliares de macronutrientes e micronutrientes e variáveis de avaliação do ataque da ferrugem do eucalipto 90

1. INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por produtos florestais resultou no aumento de 65 % da área mundial de florestas plantadas nas últimas décadas, passando de 167 milhões de hectares em 1990 para quase 280 milhões de hectares em 2015. Apesar do aumento das áreas plantadas, as taxas de crescimento anual de reflorestamentos são insuficientes para o atendimento das futuras demandas do setor (PAYN et al., 2015).

Em 2012, as florestas plantadas foram responsáveis pelo suprimento de 46 % da madeira destinada aos processos industriais no mundo (PAYN et al., 2015). No mesmo ano, o Brasil produziu 132 milhões de metros cúbicos de madeira, dos quais 90 % foram oriundos de plantações florestais e apenas 10 % de florestas naturais, posicionando o país mundialmente como o terceiro maior produtor de madeira (JÜRGENSEN et al., 2014). Em 2016, a área de florestas plantadas no Brasil foi de 7,84 milhões de hectares, a qual é constituída principalmente por espécies dos gêneros *Eucalyptus* (72 %) e *Pinus* (20 %) (IBA, 2017).

As espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais plantadas no Brasil, recobrando 5,7 milhões de hectares (IBA, 2017). A concentração regional dos reflorestamentos está relacionada à proximidade de indústrias do setor florestal (GONÇALVES et al., 2013). Essas plantações podem ser encontradas principalmente na porção sudeste do país, nos estados de Minas Gerais (24 %) e de São Paulo (17 %). Contudo, outras grandes áreas plantadas também podem ser encontradas nos estados do Mato Grosso do Sul (15 %), da Bahia (11 %), do Rio Grande do Sul (6 %) e do Paraná (5 %) (IBA, 2017). Com o elevado preço da terra nestas regiões, as florestas plantadas brasileiras têm avançado para regiões conhecidas como “novas fronteiras florestais” em estados como Maranhão, Piauí e Tocantins (GONÇALVES et al., 2016).

A maioria das plantações florestais no Brasil são manejadas em ciclos curtos de cultivo (6-8 anos) e estão estabelecidas em regiões onde existem fatores limitantes ao crescimento (GONÇALVES et al., 2016). Desde a década de 1960, o aprimoramento de técnicas silviculturais tem sido um grande impulsionador para o aumento da produtividade de povoamentos de eucalipto. A utilização de mudas de alta qualidade, o uso do cultivo mínimo do solo, o manejo de pragas, de doenças e de plantas daninhas, e o estabelecimento de recomendações de fertilização foram importantes para o alcance das altas produtividades correntes do país, que passou de menos de 20 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ na década de 1960 para aproximadamente 36 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em 2016 (GONÇALVES et al., 2013; IBA, 2017).

As regiões brasileiras nas quais as plantações de eucalipto estão estabelecidas são caracterizadas por condições climáticas pouco favoráveis, sujeitas aos estresses hídrico e térmico, e solos de baixa fertilidade química natural (GONÇALVES et al., 2016). Os povoamentos florestais estão localizados principalmente em Latossolos (47,9 %) e em Argissolos (25,5 %) (GONÇALVES et al., 2013). Estes solos apresentam avançado grau de intemperização, intenso processo de lixiviação e predomínio de argilas com baixa atividade (FAGERIA; STONE, 2008; GONÇALVES et al., 2013).

A adequada nutrição mineral para a cultura do eucalipto é um dos principais fatores que influencia a produtividade e a prevenção contra estresses bióticos e abióticos (FURTINI NETO et al., 2014). A fertilização promove ganhos na produção de madeira que variam entre 5 e 90 %, dependendo do nutriente, da idade do plantio e das demais condições edáficas. As maiores respostas do eucalipto à fertilização são atribuídas à aplicação de P, K e B. Assim, a fertilização em plantações de eucalipto faz-se necessária para o alcance de altos níveis de produtividade (MELO et al., 2015).

As deficiências com micronutrientes é uma realidade emergente no Brasil, sendo B, Cu e Zn os nutrientes mais problemáticos, principalmente em áreas do Cerrado (GONÇALVES et al., 2013; SEQUEIRA et al., 2011; WHITE; ZASOSKI, 1999). No entanto, os programas brasileiros de fertilização florestal atentam-se, sobretudo, ao suprimento de macronutrientes e B, enquanto a aplicação de Cu e de Zn costuma ser negligenciada (SEQUEIRA et al., 2011). Normalmente, são aplicados em plantações conduzidas em rotações médias de sete anos, e dependendo da deficiência hídrica, até 2 t ha⁻¹ de calcário, de 60 a 80 kg ha⁻¹ de N e de P₂O₅, de 140 a 160 kg ha⁻¹ de K₂O, de 1 a 5 kg ha⁻¹ de B, e 1 kg ha⁻¹ de Cu e de Zn (GONÇALVES, 2011).

As formas predominantes de B, Cu e Zn no solo são H₃BO₃, H₂BO₃, Cu²⁺, Cu(OH)⁺, Zn²⁺, Zn(OH)⁺, respectivamente. A concentração destes nutrientes no solo é afetada por inúmeros fatores, incluindo o material de origem, o pH, a matéria orgânica (MO), a textura e a mineralogia do solo. A concentração de micronutrientes também tende a diminuir com a profundidade, sendo encontrados maiores teores nos horizontes superficiais (FAGERIA; STONE, 2008).

Os micronutrientes são elementos pouco móveis nas plantas e a manifestação de sintomas de deficiência e/ou toxidez se dá em compartimentos jovens, como ramos e folhas apicais (FAGERIA; STONE, 2008). Esses nutrientes estão diretamente relacionados com diversas enzimas e outras moléculas fisiologicamente ativas. São elementos importantes para a expressão genética, a biossíntese de proteínas, ácidos nucleicos, substâncias de crescimento,

clorofila, metabólitos secundários, o metabolismo de carboidratos, a tolerância ao estresse, e envolvidos em funções relacionadas à integridade funcional e estrutural de membranas, dentre outros componentes celulares (MARSCHNER, 2012).

A ocorrência e a intensidade dos sintomas de deficiência variam com o tipo de solo, a época do ano e o material genético, e tendem a ser minimizados com o avanço da idade das plantações (RODRIGUES et al., 2010). Para a cultura do eucalipto, existem registros de desbalanços nutricionais de B em diversos países, como Austrália, Brasil, Chile, China, Indonésia, Nova Zelândia, Portugal, Tailândia e Zâmbia. Deficiências de Cu e Zn são relatadas com menor frequência, porém existem registros de deficiência de Cu na África do Sul, no Chile, na Austrália e na Indonésia, e de Zn na Austrália, no Brasil, na China, na Indonésia, nas Filipinas e na África do Sul (DELL et al., 2001).

O B é o micronutriente mais limitante para a cultura do eucalipto no Brasil. A ocorrência de sua deficiência, manifestada pela seca-do-ponteiro, se intensificou com a introdução de espécies mais produtivas (ex. *Corymbia citriodora* e *E. camaldulensis*) em condições de baixa disponibilidade hídrica e fertilidade do solo reduzida (GONÇALVES; VALERI, 2001). Trabalhos mostram que a falta de B em eucalipto leva a perdas de produção em altura, em matéria seca e/ou em diâmetro (BARRETTO et al., 2007; RAMOS et al., 2009; SILVA et al., 2015). Assim, sua aplicação bem como a manutenção de resíduos florestais - principal fonte de B em solos tropicais - tornam-se indispensáveis para o desenvolvimento e produtividade do eucalipto.

Respostas à fertilização com micronutrientes metálicos são raras, uma vez que eles possuem boa disponibilidade em solos oxídicos e ácidos, os quais são tipicamente usados para o estabelecimento de povoamentos florestais no Brasil. Entretanto, as respostas tendem a ser frequentes após várias rotações de cultivo e em áreas nunca fertilizadas (GONÇALVES et al., 2016). Os problemas com Cu se associam aos danos mecânicos às plantações, pois as plantas deficientes apresentam problemas de lignificação, produzindo galhos longos e finos, os quais são facilmente quebrados (DELL; BYWATERS, 1989; DELL et al., 2001). A falta do Zn produz plantas raquíticas, internódios curtos (em roseta) e folhas novas reduzidas, resultando em menor crescimento e expansão foliar (BLAKE et al., 1995; DELL et al., 2001). Assim, mesmo sem a certeza de resposta, recomenda-se a aplicação preventiva de Cu e de Zn para evitar problemas e repor as remoções geradas pela colheita florestal (GONÇALVES; VALERI, 2001; GONÇALVES et al., 2016).

Além da produtividade, os micronutrientes apresentam importância para a defesa das plantas contra o ataque de patógenos. O B e o Cu são os micronutrientes que mais atuam no

processo de defesa das plantas, pois estão diretamente ligados às vias de produção de lignina (SILVEIRA; HIGASHI, 2003; ELMER; DATNOFF, 2014). Devido às suas funções essenciais no metabolismo, o desbalanço de micronutrientes pode gerar alterações morfológicas e bioquímicas, tornando as plantas mais suscetíveis às infecções por patógenos (DELL et al., 2008). A resistência ao ataque de doenças envolve barreiras físicas intrínsecas à planta, como cutículas e estômatos, que atuam como impedimentos à invasão do patógeno e mecanismos para o isolamento da infestação, como a lignificação dos tecidos e a produção de substâncias tóxicas aos patógenos (DORDAS, 2008).

Uma das principais doenças em plantações de eucalipto é a ferrugem (*Puccinia psidii* Winter). A ferrugem se manifesta nos primórdios foliares, órgãos em estado inicial de desenvolvimento. Estes tecidos apresentam paredes delgadas e tecidos tenros, facilitando a entrada do patógeno e propiciando condições ideais de colonização (MASSON et al., 2013). As relações entre a nutrição mineral e a incidência de doenças para espécies florestais ainda são pouco exploradas, sendo comumente relacionadas aos teores de N, P e K na planta (ZARPELON, 2011). Por exemplo, em plantações de *E. grandis* com 12 meses de idade em Itatinga, SP, a incidência da ferrugem nos tratamentos sem K foi, em média, 24 % maior do que aqueles com K (ALMEIDA, 2009). Em trabalhos com P, nas mesmas condições, a incidência da ferrugem em tratamentos sem P foi 23 % maior do que os tratamentos com P (BAZANI, 2014), ressaltando a importância da nutrição mineral sobre a incidência e a severidade desta doença.

Apesar da existência de pesquisas que relacionam a nutrição mineral e a ocorrência de fitopatologias em eucaliptos, são poucos os trabalhos que o fazem especificamente com micronutrientes. Alguns exemplos de estudos que abordam a relação entre os micronutrientes e a proteção fitopatológica são apresentados por Silveira et al. (1998) e Silveira e Higashi (2003). Silveira et al. (1998) estudaram os efeitos de doses de B sobre a intensidade e a cicatrização do ataque do cancro em *Corymbia citriodora*. Os autores observaram que o fornecimento adequado de B é capaz de reduzir os níveis de infestação e de acelerar a cicatrização dos danos do ataque. Silveira e Higashi (2003) afirmaram que a deficiência de B pode aumentar a severidade do ataque da ferrugem, e a deficiência de Zn pode favorecer a incidência de *Phytophthora*.

Diferentes estratégias têm sido adotadas no Brasil para a aplicação de micronutrientes em plantações de eucalipto. A fertilização é feita de maneira preventiva, incluindo todos ou quase todos os micronutrientes. Na prática, as recomendações são feitas por meio da extrapolação de resultados de pesquisas e/ou observações de campo e não levam em

consideração os teores foliares, tampouco a disponibilidade destes nutrientes no solo (GONÇALVES; VALERI, 2001).

A aplicação de micronutrientes pode ser realizada via mistura com fertilizantes NPK, na forma de FTE (*"Fried Traced Elements"*) e por meio de fontes de moderada a baixa solubilidade de B, como ulexita e colemanita. A aplicação de fontes com menor solubilidade tem menor potencial de perda por lixiviação, risco de fitotoxicidez e mantêm níveis satisfatórios de disponibilidade para as plantas por um período maior. As doses solúveis aplicadas de B variam entre 0,5 e 4,5 g planta⁻¹, e as de Zn e Cu entre 1,0 e 2,0 g planta⁻¹ (GONÇALVES; VALERI, 2001; GONÇALVES et al., 2011).

Além da fertilização, o manejo de resíduos florestais representa uma importante fonte de nutrientes e exerce ação protetora sobre aspectos físicos e térmicos do solo (GONÇALVES et al., 2016). Até a década de 1980, a manutenção de resíduos florestais era considerada problemática para as operações florestais, contudo, o conceito de cultivo mínimo do solo foi difundido, e atualmente é largamente aplicado no setor (GONÇALVES et al., 2013). Sabe-se que a MO do solo influencia a dinâmica de nutrientes. Dessa forma, a manutenção de resíduos florestais (serapilheira, folhas, galhos e casca) é essencial para a conservação e melhoria da fertilidade e da sustentabilidade de solos florestais, refletindo positivamente sobre a produtividade da floresta (ROCHA et al., 2016).

Quantificando a contribuição dos resíduos florestais para a manutenção de nutrientes após a colheita de eucalipto, Viera et al. (2016) verificaram que a intensidade de colheita no sítio florestal tem grande influência sobre a exportação de micronutrientes. Considerando o sistema de colheita de madeira mais casca, na qual a madeira é utilizada como matéria-prima e a casca queimada para a geração de energia, a remoção de micronutrientes acumulados na biomassa seria de 67 % de B, 63 % de Cu e de 79 % de Zn. Entretanto, se a remoção feita se restringisse apenas à madeira, a remoção seria inferior a 50 %, deixando no campo uma parcela significativa dos nutrientes absorvidos durante a rotação de cultivo.

Neste trabalho, foram estudados a nutrição, o crescimento e a incidência da ferrugem do eucalipto em uma plantação seminal de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação e à omissão da fertilização com micronutrientes (B, Cu e Zn), associado à manutenção e à remoção dos resíduos florestais. Especificamente, buscou-se: (i) avaliar a contribuição dos resíduos florestais sobre os teores disponíveis de B, de Cu e de Zn no solo, (ii) avaliar a resposta em crescimento das árvores à fertilização com B, Cu e Zn, e (iii) identificar interações entre a nutrição com micronutrientes e a infestação por ferrugem do eucalipto.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. C. R. de. **Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio.** Tese (Doutorado) - ESALQ/USP, 2009. 112 p.
- BARRETTO, V. C. de M.; VALERI, S. V.; SILVEIRA, R. L. V. de A.; TAKAHASHI, E. N. Eficiência de uso de boro no crescimento de clones de eucalipto em vasos. **Scientia Forestalis**, n. 76, p. 21–33, 2007.
- BAZANI, J. H. **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto.** Dissertação (Mestrado) - ESALQ/USP. 2014. 129f.
- BLAKE, S. T.; DELL, B.; XU, D. Diagnosis of zinc deficiency in seedlings of a tropical eucalypt (*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake). **Plant and Soil**, v. 176, p. 329–332, 1995.
- DELL, B.; MALAJCZUK, N.; XU, D.; GROVE, T S. **Nutrient Disorders in Plantation Eucalypts.** Australian centre for international agricultural research. 2001. 188 p.
- DELL, B.; BYWATERS, T. Copper deficiency in young *Eucalyptus maculata* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 19, n. 4, p. 427–431, 1989.
- DELL, B.; HARDY, G.; BURGESS, T. Health and nutrition of plantation eucalypts in Asia. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 70, n. 2, p. 131–138, 2008.
- DORDAS, C. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture : A Review Role. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 28, n. 1, p. 33–46, 2008.
- ELMER, W. H.; DATNOFF, L. E. Mineral nutrition and suppression of plant disease. In: ALFEN, N. VAN (Ed.). **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**. 4. ed. San Diego: Elsevier, 2014. v. 4p. 231–244.
- FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Micronutrient deficiency problems in south america. In: **Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. p. 245–266.
- FURTINI NETO, A. E.; MORETTI, B. S.; BATISTA, R. O.; RESENDE, M. L. V. Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras. In: PRADO, R. de M.; WADT, P. G. S. (Eds.). **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**. Jaboticabal: FCAV/CAPES, 2014.
- GONÇALVES, J. L. M. **Fertilização de plantação de eucalipto.** (GONÇALVES, J. L. de M.; PULITO, A. P.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; SILVA, L. D., Eds.). Campinas: Anais do Encontro Brasileiro de Silvicultura, 2011.

- GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013.
- GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; SOUZA, A. H. B. N.; ARTHUR JUNIOR, J.C. Caracterização edafoclimática e manejo de solos das áreas com plantações de eucalipto. In: SCHUMACHER, M. V.; VIEIRA, M. (Eds.). **Silvicultura do eucalipto no Brasil**. Ed. da UFMS, 2016. p. 306.
- GONÇALVES, J. L. M.; VALERI, S. V. Eucaliptos e Pinus. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. da; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. de (Eds.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. 3. CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p. 600.
- IBA. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBA 2017**. 2017. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 2 set. 2017.
- JÜRGENSEN, C.; KOLLERT, W.; LEBEDYS, A. **Assessment of industrial roundwood production from planted forests**. Rome: FAO Planted Forests and Trees Working Paper, n. 48. 2014. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/planted-forests/67508@170537/en/>>.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. Amsterdam Boston: Academic Press, 2012.
- MASSON, M. V.; MORAES, W. B.; FURTADO, E. L. Chemical control of *Eucalyptus* rust: Brazilian experiences. In: **Fungicides - Showcases of Integrated Plant Disease Management from Around the World**. InTech, 2013.
- MELO, E. A. S. C. de; GONÇALVES, J. L. de M.; ROCHA, J. H. T.; HAKAMADA, R.; BAZANI, J. H.; WENZEL, A. V. A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; BORGES, J. S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C. C. Z. de; FERREIRA, E. V. de O.; FERRAZ, A. de V. F. Responses of Clonal Eucalypt Plantations to N, P and K Fertilizer Application in Different Edaphoclimatic Conditions. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 2, 2015.
- PAYN, T.; CARNUS, J. M.; FREER-SMITH, P.; KIMBERLEY, M.; KOLLERT, W.; LIU, S.; ORAZIO, C.; RODRIGUEZ, L.; SILVA, L. N.; WINGFIELD, M. J. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 57–67, 2015.
- RAMOS, S. J.; FAQUIN, V.; FERREIRA, R. M. A.; ARAÚJO, J. L.; CARVALHO, J. de C. Crescimento e teores de boro em plantas de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) cultivadas em dois latossolos sob influência de doses de boro e disponibilidade de água. **Revista Árvore**, v. 33, n. 1, p. 57–65, 2009.

- ROCHA, J. H. T.; GONÇALVES, J. L. de M.; GAVA, J. L.; GODINHO, T. de O.; MELO, E. A. S. C.; BAZANI, J. H.; HUBNER, A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; WICHERT, M. P. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a *Eucalyptus* plantation over two short rotations. **Forest Ecology and Management**, v. 379, p. 1–10, 2016.
- RODRIGUES, F. A. V.; BARROS, N. F. de; NEVES, J. C. L.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Disponibilidade de cobre para mudas de eucalipto em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 1923–1932, 2010.
- SEQUEIRA, C. H.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; ALLEY, M. Micronutrient Soil-Test Levels and *Eucalyptus* Foliar Contents. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, n. 4, p. 475–488, 2011.
- SILVA, P. H. M.; CAMPOE, O. C.; VIEIRA, I. G.; PAULA, R. C. de. Aplicação foliar de boro em eucalipto sob estresse hídrico. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 106, p. 395–405, 2015.
- SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N. Aspectos nutricionais envolvidos na ocorrência de doenças com ênfase para o eucalipto. **Circular técnica IPEF**, v. 200, p. 1–13, 2003.
- SILVEIRA, R. L. V. DE ARRUDA; GONÇALVES, A. N.; KRÜGNER, T. L. Estado nutricional de *Eucalyptus citriodora* Hook cultivado sob diferentes doses de boro e sua relação com a agressividade de *Botryosphaeria ribis*. **Scientia Forestalis**, v. 53, p. 57–70, 1998.
- VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Biomassa e exportação de nutrientes pela colheita do eucalipto. In: SCHUMACHER, M. V.; VIEIRA, M. (Eds.). . **Silvicultura do eucalipto no Brasil**. Ed. da UFMS, 2016. p. 306.
- WHITE, J. G.; ZASOSKI, R. J. Mapping soil micronutrients. **Field Crops Research**, v. 60, n. 1–2, p. 11–26, 1999.
- ZARPELON, T. G. **Mapeamento genético da resistência e a influência da nutrição mineral na intensidade da mancha-de-pteridis em eucalipto**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, 2011. 58 p.

2. CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE PLANTAÇÃO DE EUCALIPTO FERTILIZADA COM BORO, COBRE E ZINCO E COM MANEJO DE RESÍDUOS FLORESTAIS

RESUMO

A aplicação de fertilizantes concentrados, o uso de materiais genéticos com alta produtividade, a expansão da produção em áreas com baixa fertilidade química do solo e a incorporação de solos agrícolas com elevado pH têm aumentado as deficiências com B, Cu e Zn em plantações de eucalipto. A manutenção dos resíduos florestais é uma das práticas utilizadas no cultivo mínimo para reduzir a exportação de nutrientes. Esta prática, pode assegurar o retorno de até 30 % dos micronutrientes absorvidos em uma rotação de cultivo ao solo. Neste contexto, foi estudado o efeito da aplicação e da omissão de B, Cu e Zn, associado à manutenção e à remoção dos resíduos florestais, sobre a nutrição e o crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis*. Foram realizadas análises químicas de fertilidade e de extração sequencial de B, Cu e Zn no solo, análises nutricionais dos compartimentos aéreos das árvores (folha, galho, casca e lenho) e o acompanhamento do crescimento da floresta até os 15 meses de idade. Os resíduos apresentaram pouca influência sobre a análise química de fertilidade do solo. Na extração sequencial, a manutenção de resíduos florestais desempenhou importante função na redução da complexação de Cu na MO e no aumento da forma solúvel de B no solo. A omissão de Cu e de Zn não influenciou os teores destes nutrientes nas folhas, mas, a omissão de B reduziu os teores foliares de B aos 6 e aos 12 meses de idade. O diâmetro à altura do peito das árvores foi a única variável de crescimento a apresentar diferenças entre tratamentos. Os tratamentos com omissão de Zn e de B foram os que resultaram em maior crescimento. A biomassa de lenho diferiu entre os tratamentos completo e com omissão de Zn. A concentração de nutrientes em todos os compartimentos não diferiu entre os tratamentos aos 12 meses de idade. Ao contrário, os estoques de nutrientes foram diferentes entre os tratamentos. Os resíduos florestais da colheita não influenciaram a nutrição e crescimento das árvores. A omissão de nutrientes apresentou influência sobre os teores disponíveis de B e de Zn no solo, que se refletiram sobre a nutrição e o crescimento das árvores.

Palavras-chave: Cultivo mínimo; Micronutrientes; Omissão de nutrientes; Silvicultura

ABSTRACT

The application of concentrated fertilizers, the use of genetic materials with high productivity, the expansion of productive areas in soil with low fertility and the incorporation of agricultural soils with high pH have aggravated problems with

B, Cu and Zn in eucalyptus plantations. Maintenance of forest residue is one of practices used in the minimum cultivation to reduce nutrient exports. This practice can ensure the return of 30 % of micronutrients absorbed by the soil in a eucalyptus rotation. Thus, the application and omission effects of the B, Cu and Zn were studied, associated with the maintenance and removal of forest residues, on the nutrition and growth of a *Eucalyptus grandis* stand. Chemical analyses of soil fertility, sequential extraction of B, Cu and Zn in the soil and nutritional analyses of the tree aerial compartments (leaf, branches, bark and wood) were performed. Forest growth was monitored until 15 months of age. Residues presented little influence on the chemical analysis of soil fertility. The maintenance of forest residues reduced complexation of Cu in organic matter and increased the soluble form of B in the soil. Omission of Cu and Zn did not influence the content of these nutrients in the leaves; however, omission of B reduced B concentration in the leaves at 6 and 12 months of age. The diameter at breast height was the only growth variable that differed between treatments, and treatments with Zn and B omission had greater growth. Wood biomass differed between the complete and Zn omission treatments. Nutrients concentration in all compartments did not differ between treatments at 12 months of age. In contrast, nutrient stocks differed between treatments. Forest residues did not influence nutritional and growth responses. The nutrients omission influenced the levels of B and Zn available in the soil that reflected on trees nutrition and growth.

Keywords: Minimal cultivation; Micronutrients; Nutrient omission; Silviculture

2.1. Introdução

Fatores ambientais como disponibilidade hídrica e nutricional são importantes determinantes da produção florestal no Brasil (MATTIELLO et al., 2009a; FURTINI NETO et al., 2014). O aumento da produtividade gerada pela aplicação de macronutrientes, muitas vezes, pode induzir o aparecimento de deficiências de micronutrientes (DELL et al. 2008). O problema com micronutrientes se deve ao aumento da demanda nutricional dos plantios, em contraste com a baixa capacidade de fornecimento do solo (GONÇALVES; VALERI, 2001). Assim, em solos com teores limitantes, a aplicação de micronutrientes pode trazer benefícios à produtividade (BELL; DELL, 2008) e, principalmente, à forma do fuste e qualidade da madeira (DELL et al., 2001a; WANG et al., 2015).

O B é o micronutriente mais limitante ao crescimento e à produtividade de plantações florestais no Brasil. O teor ideal de B na massa seca foliar de eucalipto varia entre 20 e 40 mg kg⁻¹, e no solo teores inferiores a 0,2 mg dm⁻³ são considerados baixos (GONÇALVES, 2011). As ocorrências de deficiências se intensificaram com a expansão dos florestamentos, principalmente, nas regiões dos Cerrados, pois houve a ampliação do uso de espécies mais produtivas em áreas com deficiência hídrica e baixa fertilidade química de solo (GONÇALVES

et al., 2013). A ocorrência de seca-do-ponteiro é verificada em plantios florestais jovens, quando as plantas possuem sistema radicular pouco desenvolvido. Com o crescimento das plantas, estes sintomas reduzem em virtude do maior volume de solo explorado pelo sistema radicular, e pela intensificação da ciclagem biogeoquímica dos nutrientes após o fechamento de copas (GONÇALVES; VALERI, 2001).

No Cerrado, o baixo teor de matéria orgânica no solo (MO) e o prolongamento de períodos secos são os principais fatores que influenciam as deficiências de B em plantios de eucalipto (GONÇALVES; VALERI, 2001). A MO é considerada a principal fonte de B no solo (SALEEM et al., 2011), contudo, os solos do Cerrado, em geral, apresentam baixos níveis, devido às altas temperaturas que favorecem a ação de microrganismos (ZECH et al., 1997). Os baixos níveis de MO são responsáveis pela limitação da fitodisponibilidade de B no solo, aumentando as chances de deficiências. Além disto, o mecanismo predominante de transporte de B é o fluxo de massa (MATTIELLO, 2009b), e o prolongado período de déficit hídrico em regiões do Cerrado leva a diminuição da taxa de transporte de B no solo, induzindo também deficiências.

Até recentemente, poucos relatos de deficiências de Cu e Zn foram feitos em plantações florestais no Brasil. Entretanto, o aumento da produtividade sob solos marginais tem tornado frequentes os problemas com micronutrientes metálicos (SEQUEIRA et al., 2011). A deficiência de Cu em plantações de eucalipto ocasiona sérios problemas de crescimento e regularidade na forma do fuste. Portanto, árvores afetadas pela falta de Cu apresentam problemas de lignificação, produzindo galhos longos e finos que são facilmente quebrados, diminuindo a área foliar e a taxa fotossintética (DELL; BYWATERS, 1989; DELL et al., 2001b; RODRIGUES et al., 2010). Os teores foliares de Cu considerados ideais para o cultivo do eucalipto variam entre 4 e 7 mg kg⁻¹ e os teores no solo devem ser superiores a 0,2 mg dm⁻³ para que haja crescimento adequado (GONÇALVES, 2011).

Deficiências de Zn são observadas frequentemente durante épocas secas, pois o Zn chega às raízes por difusão, e por isto depende da umidade do solo. Após o início do período chuvoso, as plantas se recuperam e há o retorno de suprimento nutricional (GONÇALVES; VALERI, 2001). A falta de Zn ocasiona plantas atrofiadas, com internódios curtos, em roseta, e folhas jovens reduzidas (DELL; XU, 1995; DELL et al., 2001b). Para que haja crescimento adequado de espécies de eucalipto, o solo deve conter em média teores de Zn superiores a 0,5 mg dm⁻³, e os tecidos vegetais conter entre 15 e 35 mg kg⁻¹ de Zn na massa seca (GONÇALVES, 2011).

Apesar da pequena demanda de plantações florestais por micronutrientes, a sua deficiência pode influenciar de modo expressivo na efetividade do uso de macronutrientes (BELL; DELL et al., 2008). Isto evidencia a importância de pesquisas acerca do requerimento de micronutrientes em plantações com finalidade produtiva. A quantidade de micronutrientes exportada por um povoamento de *E. grandis* de sete anos na madeira é de, aproximadamente, 1,4 kg ha⁻¹ de B, 1,4 kg ha⁻¹ de Zn e de 0,6 kg ha⁻¹ de Cu, o que representa, em média, 75 % de todo conteúdo destes nutrientes na planta (GONÇALVES; VALERI, 2001).

A manutenção de resíduos florestais é uma das principais práticas adotadas para minimizar as exportações de nutrientes após uma rotação de cultivo. A permanência dos resíduos florestais sobre o solo é recomendada para qualquer sistema produtivo, por propiciar a conservação de parte significativa dos nutrientes extraídos durante o crescimento do povoamento (VIEIRA et al., 2016). Assim, o cultivo mínimo do solo, definido pelo preparo de solo restrito e sem queima ou remoção de resíduos culturais, é importante sobre a perspectiva de conservação dos estoques de micronutrientes, sobretudo, em solos de baixa fertilidade química natural nos quais o acúmulo de serapilheira é maior (GONÇALVES; VALERI, 2001).

Neste contexto, as seguintes hipóteses foram estabelecidas: (i) a manutenção dos resíduos florestais da colheita e a aplicação de nutrientes, via fertilização, aumentam os teores disponíveis de B, Cu e Zn no solo, (ii) os baixos teores disponíveis de B, Cu e Zn no solo diminuem os teores foliares destes nutrientes nas árvores, e (iii) a omissão de micronutrientes reduz a produção de biomassa da floresta, sendo esse efeito mais intenso em áreas em que os resíduos da colheita foram removidos.

Com este trabalho avaliou-se o efeito da manutenção e da remoção dos resíduos florestais da colheita de madeira, associados à aplicação e à omissão de B, Cu, e Zn, sobre a nutrição e o crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis*.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI), pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ/USP, no município de Itatinga (coordenadas geográficas: 23° 02' 42.03" S e 48° 37' 47.61" O e altitude de 820 m). O clima da região é classificado, segundo Köppen, como Cfa, subtropical úmido com verão quente e sem estação seca definida (ALVARES et al., 2013). A precipitação média

anual é 1400 mm, com concentração de 48 % no verão, 23 % na primavera, 21 % no outono e 8 % no inverno (GONÇALVES et al., 2012). A temperatura média anual é 21 °C, com as médias de temperaturas mínimas variando entre 14 e 17 °C e as máximas entre 26 e 29 °C (ALVARES et al., 2013). Durante a fase de estudo, entre julho de 2016 e outubro de 2017, a temperatura média foi de 19,8 °C e a precipitação acumulada foi de 2337 mm. O ano de 2016 foi responsável por 40 % da precipitação e o ano de 2017 pelos 60 % restantes (Figuras 1 e 2).

Figura 1 Precipitação pluvial e temperatura média decenal registrada na EECFI durante a condução do experimento

Figura 2 Excedente e déficit hídrico decenal sequencial da EECFI, segundo Thornthwaite e Mather (1955), durante a condução do experimento

A área possui relevo suave ondulado e solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média (GONÇALVES et al., 2012). Para a caracterização dos atributos químicos e físicos do solo, a área foi dividida em quatro blocos amostrais, nos quais foram tomadas 20 subamostras nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. As 20 subamostras foram unidas e integraram uma amostra composta por bloco (Tabela 1).

Tabela 1 Características físicas e químicas do solo da área experimental

Prof.	Argila ⁽¹⁾	Silte	Areia	pH ⁽²⁾	C ⁽³⁾	P ⁽⁴⁾	Prof.	FedCB ^{*(5)}	FeOA ^{*(6)}	D _s [*]
cm		g kg ⁻¹			g dm ⁻³	mg dm ⁻³	cm		g kg ⁻¹	g cm ⁻³
0-5	190	27	783	3,7	22,4	9,6	0-5	27	1,2	1,12
5-10	187	33	780	3,8	14,3	8,2	5-15	26	1,1	1,38
10-20	190	33	777	3,8	10,2	7,3	15-30	26	1,0	1,38
20-40	200	43	757	3,7	5,8	6,8	30-50	30	0,9	1,35
40-60	193	37	770	3,8	6,1	7,6	50-100	36	0,8	1,37
60-80	233	23	740	3,8	5,7	6,0				
80-100	230	47	723	3,9	6,3	6,5				

Cátions Trocáveis									Micronutrientes				
Prof.	K ⁽⁴⁾	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁴⁾	Al ⁽⁷⁾	H+Al	SB	CTC	V	B ⁽⁸⁾	Cu ⁽⁹⁾	Fe ⁽⁹⁾	Mn ⁽⁹⁾	Zn ⁽⁹⁾
cm				mmol _e dm ⁻³				%			mg dm ⁻³		
0-5	0,4	3,3	3,2	18,1	102,5	6,9	109,4	6	0,4	1,0	169,5	2,2	0,6
5-10	0,2	0,7	1,1	17,2	85,6	2,0	87,6	2	0,3	1,1	71,2	1,3	0,5
10-20	0,1	1,4	1,0	12,8	54,5	2,5	57,0	4	0,3	1,2	45,2	0,7	0,3
20-40	0,0	0,4	0,5	11,0	58,1	0,9	59,0	2	0,3	1,2	27,6	0,5	0,3
40-60	0,1	0,3	0,7	10,7	49,3	1,1	50,4	2	0,3	1,1	16,4	0,5	0,2
60-80	0,0	0,8	0,7	10,1	41,1	1,6	42,7	4	0,3	1,2	10,4	0,6	0,2
80-100	0,0	0,5	0,5	8,5	35,7	1,0	36,7	3	0,3	1,1	9,5	0,6	0,2

Nota: ⁽¹⁾ Método da pipeta (EMBRAPA, 1997); ⁽²⁾ CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; ⁽³⁾ oxidação via úmida; ⁽⁴⁾ resina de troca iônica; ⁽⁵⁾ ditionitocitrato-bicarbonato de sódio; ⁽⁶⁾ oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ (pH 3); ⁽⁷⁾ KCl 1,0 mol L⁻¹; ⁽⁸⁾ água quente; ⁽⁹⁾ DTPA; * MARQUERE (2008).

A vegetação natural da região é o Cerrado *stricto sensu*, porém desde a década de 1940 a área é cultivada com plantações de eucalipto. As primeiras plantações de *Eucalyptus saligna* foram estabelecidas pela Ferrovia Paulista S.A. (FEPASA) para a produção de lenha e dormentes. Enquanto administrada pela FEPASA, a área foi conduzida em sistema de talhadia com rotações entre sete e dez anos. Não havia manejo das cepas, o que ocasionava um grande número de falhas e baixa produtividade de madeira. Em 1988, a área foi incorporada ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP e, desde 1992, passou a ser cultivada com *Eucalyptus grandis* em sistema de cultivo mínimo.

2.2.2. Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi delineado em blocos casualizados, com sete tratamentos e quatro repetições, totalizando 28 parcelas experimentais. Cada parcela foi composta por 81 plantas

distribuídas em nove linhas de nove plantas, implantadas em arranjo $3\text{ m} \times 2\text{ m}$, totalizando 1,3 hectare de área total. Para evitar interferências externas aos tratamentos, uma bordadura dupla entre as parcelas foi considerada, sendo a área útil de cinco linhas de cinco plantas, totalizando 25 plantas (Figura 3).

Figura 3 Distribuição dos tratamentos na área experimental destinada ao manejo de resíduos florestais

Os tratamentos foram constituídos por contrastes entre a omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) e o manejo dos resíduos florestais (Tabela 2). Os resíduos florestais considerados incluíram todo o material vegetal remanescente sobre o solo após a colheita de madeira de um plantio de *Eucalyptus grandis* com 12 anos de idade, ou seja, folhas, galhos, ponteiros ($< 3\text{ cm}$ de diâmetro) e serapilheira. Dois manejos foram aplicados aos resíduos da colheita: retirada (-R) ou manutenção (+R) em área total dos resíduos florestais da superfície do solo. A retirada dos resíduos florestais das parcelas foi realizada manualmente ou com o auxílio de um rastelo. Nas parcelas onde foram mantidos, os resíduos florestais foram distribuídos uniformemente, evitando acúmulo de material vegetal sobre a superfície do solo.

Tabela 2 Descrição dos tratamentos utilizados no estudo

Tratamento	Descrição
1. COMP	Aplicação completa de micronutrientes com manutenção de resíduos florestais
2. -Zn+R	Omissão de Zn e manutenção de resíduos florestais
3. -Zn-R	Omissão de Zn e retirada de resíduos florestais
4. -Cu+R	Omissão de Cu e manutenção de resíduos florestais
5. -Cu-R	Omissão de Cu e retirada de resíduos florestais
6. -B+R	Omissão de B e manutenção de resíduos florestais
7. -B-R	Omissão de B e retirada de resíduos florestais

2.2.3. Caracterização dos resíduos florestais

Antes da implantação do experimento, a área possuía 20,4 t ha⁻¹ de resíduos florestais, sendo constituídos por 14,2 t ha⁻¹ de serapilheira e 6,2 t ha⁻¹ das copas das árvores da rotação anterior (Tabela 3). Com a remoção destes resíduos foram retirados por hectare cerca de 297 kg ha⁻¹ de macronutrientes (164,2 kg de N, 9,4 kg de P, 8,9 kg de K, 75,8 kg de Ca, 26,6 kg de Mg e 12,6 kg de S) e 53 kg ha⁻¹ de micronutrientes (0,17 kg de B, 0,19 kg de Cu, 49 kg de Fe, 3,6 kg de Mn e 0,22 kg de Zn).

Tabela 3 Acúmulo de nutrientes nos resíduos florestais antes da implantação do experimento

Componente	Biomassa	N ⁽¹⁾	P ⁽³⁾	K ⁽⁴⁾	Ca ⁽⁶⁾	Mg ⁽⁶⁾	S ⁽⁵⁾	B ⁽²⁾	Cu ⁽⁶⁾	Fe ⁽⁶⁾	Mn ⁽⁶⁾	Zn ⁽⁶⁾
	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹										
Copa	6,2	63,77	4,38	3,22	25,07	9,26	3,34	0,06	0,05	9,15	1,19	0,09
Folhas	3,0	12,71	0,97	1,31	9,03	3,32	0,73	0,02	0,02	1,45	0,46	0,02
Galho	3,2	51,05	3,41	1,90	16,04	5,93	2,61	0,03	0,03	7,70	0,73	0,06
Serapilheira	14,2	100,43	5,07	5,69	50,69	17,30	9,25	0,12	0,14	39,89	2,40	0,14
Total	20,4	164,19	9,45	8,91	75,76	26,56	12,59	0,17	0,19	49,04	3,58	0,22

Nota: Extração e determinação: ⁽¹⁾ digestão sulfúrica e destilação micro-Kjeldahl; ⁽²⁾ digestão via seca (incineração) e colorimetria; ⁽³⁾ digestão nitroperclórica e colorimetria; ⁽⁴⁾ digestão nitroperclórica e espectrometria de chama; ⁽⁵⁾ digestão nitroperclórica e turbidimetria; ⁽⁶⁾ digestão nitroperclórica e espectrometria de absorção atômica.

2.2.4. Instalação e condução da área experimental

A rotação de cultivo anterior foi colhida em fevereiro de 2016. Os resíduos florestais foram removidos em maio de 2016. Para o plantio, o solo foi preparado com subsolador florestal a 40 cm de profundidade em junho de 2016. Foram utilizadas mudas seminais de uma monoprogênie de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden (procedência de Coff's Harbour), de alta produtividade, comumente utilizada na região.

A fertilização foi parcelada em três aplicações, considerando as fases de crescimento da floresta (Tabela 4). Na fertilização do plantio, foram aplicados 10 kg ha⁻¹ de N, 10 kg ha⁻¹ de K₂O, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 0,5 kg ha⁻¹ de Cu e 1,5 kg ha⁻¹ de Zn em covetas laterais às mudas (cerca de 15 cm de distância e 10 cm de profundidade). Para o suprimento de Ca e Mg foram aplicadas 1,6 t ha⁻¹ de calcário dolomítico distribuído a lanço e sem incorporação. As duas fertilizações de cobertura foram realizadas manualmente a lanço em meia-lua na projeção da copa das mudas. A primeira fertilização de cobertura foi realizada em novembro de 2016, aos 4 meses pós-plantio. Foram aplicados 20 kg ha⁻¹ de N, 50 kg ha⁻¹ de K₂O e 5 kg ha⁻¹ de B. A segunda fertilização de cobertura foi realizada em fevereiro de 2017, aos 7 meses pós-plantio. Foram aplicados 30 kg ha⁻¹ de N e 80 kg ha⁻¹ de K₂O.

O controle de plantas daninhas, de brotações da rotação de cultivo anterior e de formigas cortadeiras foi realizado durante todo o período de condução do estudo. O controle de plantas daninhas e de brotações foi realizado de forma seletiva com aplicação manual de herbicida. O controle de formigas foi realizado de maneira sistemática na implantação e, quando necessário, aplicou-se isca formicida próximo aos formigueiros identificados.

Tabela 4 Doses de fertilizantes minerais, manejo de resíduos e calagem dos tratamentos

Trat.	Resíduo	Calcário	Fertilização									
			Plantio					1ª cobertura			2ª cobertura	
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Zn	Cu	N	K ₂ O	B	N	K ₂ O
			t ha ⁻¹					kg ha ⁻¹				
COMP	M	1,6	10	60	10	1,5	0,5	20	50	5	30	80
–Zn+R	M	1,6	10	60	10	0,0	0,5	20	50	5	30	80
–Zn–R	R	1,6	10	60	10	0,0	0,5	20	50	5	30	80
–Cu+R	M	1,6	10	60	10	1,5	0,0	20	50	5	30	80
–Cu–R	R	1,6	10	60	10	1,5	0,0	20	50	5	30	80
–B+R	M	1,6	10	60	10	1,5	0,5	20	50	0	30	80
–B–R	R	1,6	10	60	10	1,5	0,5	20	50	0	30	80

Fontes: sulfato de amônio (21 % de N); superfosfato triplo (46 % de P₂O₅); cloreto de potássio (60 % de K₂O); bórax (11 % de B); sulfato de Cu (25% de Cu); sulfato de Zn (21 % de Zn); calcário dolomítico (PRNT 85 %; 40 % CaO; 10 % MgO).

2.2.5. Avaliações

2.2.5.1. Atributos químicos do solo

A avaliação dos atributos químicos do solo foi realizada antes da instalação do experimento (abril de 2016) e ao final do período de chuvas, aos 6 meses pós-plantio (janeiro de 2017). A amostragem de solo foi realizada com um trado holandês nas linhas de plantio das parcelas úteis. Em cada parcela, nove subamostras foram coletadas próximas às covas de plantio, nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade (Figura 4).

As amostras de terra foram secas em estufa de circulação forçada ($\pm 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) até atingirem massa constante. Em seguida, foram homogeneizadas, destorroadas e peneiradas a 2 mm. Foram analisados o pH (solução de $\text{CaCl}_2\ 0,01\text{mol L}^{-1}$), o carbono orgânico do solo (CO) (oxidação via úmida), os íons trocáveis Al (extraído por $\text{KCl}\ 1,0\text{ mol L}^{-1}$), Ca, Mg e K (extraídos por resina trocadora de íons), o B (extraído com água quente) e Cu, Fe, Mn e Zn (extraídos por DTPA). Os métodos de análise química usados foram os mesmos descritos por Raij et al. (2001).

Figura 4 Distribuição de pontos de coleta anual de solo. A amostragem foi realizada na parcela útil (a) em 9 pontos da linha de plantio (b) para a composição de amostras compostas das profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm

2.2.5.2. Extração sequencial de Cu e Zn no solo

A metodologia adotada para a extração sequencial de Cu e Zn no solo foi proposta por Silveira et al. (2006) para solos tropicais muito intemperizados, com adaptações. A fração trocável (E-Tro) foi obtida após duas horas de agitação em temperatura ambiente com 15 mL de $\text{CaCl}_2\ 0,1\text{ mol L}^{-1}$. A fração ligada à MO (E-MO) foi obtida utilizando-se 5 mL $\text{NaOCl}\ 5\%$ (pH 8,5) sob aquecimento de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 30 minutos em quatro repetições consecutivas. A fração associada aos óxidos de Fe, Al e Mn (E-Ox) foi obtida com uso de 40 mL de ácido oxálico $0,2\text{ mol L}^{-1}$ + oxalato de amônio $0,2\text{ mol L}^{-1}$ + ácido ascórbico $0,1\text{ mol L}^{-1}$ (pH 3) por 30 minutos sob aquecimento e penumbra. As frações Residual (Res) e Total foram obtidas após digestão semi-total com $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ por 30 minutos em micro-ondas - EPA 3051A (USA, 2007).

Para a otimização do número de amostras, na extração sequencial foram padronizadas amostras de solo dos tratamentos –Cu+R e –Cu–R. O tratamento –Cu+R representou o grupo de tratamentos com manutenção e o –Cu–R com remoção dos resíduos florestais. Para isto, amostras de 1 g de solo foram maceradas, peneiradas a 150 μm e adicionadas a tubos de centrífuga de policarbonato. Ao final de cada etapa, a solução extratora e a fase sólida residual das suspensões foram separadas por meio da centrifugação das amostras a 1225 g por 20 minutos. A cada extração, os resíduos sólidos foram lavados com 5 mL de NaCl 0,1 mol L⁻¹, agitados manualmente e centrifugados, para o deslocamento da solução utilizada na etapa anterior, evitando a dispersão da amostra e limitando a readsorção dos metais. Uma gota de HNO₃ 1 % foi adicionada aos extratos para sua preservação. Os teores de Cu e Zn foram determinados por espectrometria de absorção atômica. O controle dos resultados foi feito a partir do índice de recobrimento, com limite máximo de recuperação tolerável igual a $\pm 30\%$. O índice de recobrimento foi obtido pela razão entre o somatório das frações (trocável, MO, óxidos e residual) e o teor total do mesmo elemento, determinado com HNO₃ + HCl, multiplicado por 100.

2.2.5.3. Fracionamento do B no solo

O fracionamento sequencial do B foi realizado de acordo com a metodologia proposta por Jin-Yun et al. (1987), com adaptações. As frações solúvel (B-Sol), adsorvida (B-Ad) e ligada à MO (B-MO) foram extraídas em agitação por 24 horas e temperatura ambiente. O B-Sol foi extraído com 20 mL de água ultrapura, o B-Ad com 20 mL de CaCl₂ 0,02 mol L⁻¹ e B-MO com 20 mL de manitol 0,01 mol L⁻¹ + CaCl₂ 0,02 mol L⁻¹. A fração ligada aos óxidos de Al, Fe e Mn amorfos (B-OxFeA) foi extraída com 30 mL de oxalato de amônio 0,175 mol L⁻¹ (pH 3,25) por 4 horas de agitação em temperatura ambiente e escuro. A fração ligada aos óxidos de Al, Fe e Mn cristalinos (B-OxFeC) também foi extraída com 30 mL de oxalato de amônio 0,175 mol L⁻¹ (pH 3,25). As condições ambientais de temperatura e tempo foram de 90 °C e 30 minutos no escuro. A fração residual (B-Res) e total foram obtidas pela digestão semi-total em HNO₃ + HCl por 30 minutos em micro-ondas - EPA 3051A (USA, 2007).

No fracionamento de B foram utilizadas as mesmas amostras da extração sequencial de Zn e Cu. Para isto, amostras de 10 g de solo foram peneiradas (abertura de 2 mm) e adicionadas a tubos de centrífuga de policarbonato. Ao final de cada etapa, o extrato foi centrifugado a 1225 g por 20 min para a separação da solução extratora e da fase sólida da suspensão. Quando as frações eram de difícil separação, foi usada a filtração por meio de filtro

equivalente ao Whatman 42. O B foi determinado pelo método colorimétrico de azometina-H (WOLF, 1974).

2.2.5.4. Teor e distribuição de nutrientes nas folhas

Para a determinação do estado nutricional das plantas foram realizadas coletas de folhas recém-maduras consideradas fisiologicamente desenvolvidas. A coleta foliar foi realizada aos 6 e 12 meses pós-plantio, correspondentes ao verão/2017 e inverno/2017. Para cada período, foram colhidas amostras do 3º e 4º pares de folhas dos ramos, nos terços superior, médio e inferior da copa, e nos quatro pontos cardeais. Em cada parcela, foram colhidas quatro folhas por ponto cardinal, nos três terços da copa e em cinco árvores, totalizando 240 folhas por parcela. Adicionalmente, o tratamento COMP teve folhas colhidas em diferentes posições da copa (terço superior, médio e inferior) e em diferentes estádios fenológicos, sendo: 1 – folhas recém lançadas, consideradas novas; 2 – folhas maduras, consideradas fisiologicamente desenvolvidas; e 3 – folhas velhas, lançadas a mais tempo e localizadas próximo à base dos ramos (Figura 5).

Figura 5 Representação esquemática para a coleta de amostras de folhas na fase juvenil do plantio (adaptado de Lamb (1976))

As folhas colhidas foram acondicionadas em sacos plásticos e secas em estufa a 65 °C até atingirem massa constante. Após a secagem, as folhas foram processadas em moinho tipo Wiley e encaminhadas ao Laboratório de Ecologia Aplicada (LEA-ESALQ/USP) para a determinação de macronutrientes e micronutrientes. No laboratório, o procedimento usado foi aquele descrito por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). O teor de N foi determinado por destilação micro-Kjeldahl após digestão sulfúrica. O B foi determinado por colorimetria após digestão via seca (incineração). Para a determinação dos demais nutrientes o extrato passou por uma digestão nitroperclórica. O P foi determinado por colorimetria, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn por espectrometria de absorção atômica, o K por espectrometria de chama e o S por turbidimetria.

Para a verificação da existência de relações entre a nutrição e o teor de clorofila das plantas, os índices de clorofila *a* e *b* foram indiretamente quantificados (método não-destrutivo) por meio do uso de um clorofilômetro (ClorofiLOG® CFL 1030; FALKER (2008)). A mensuração foi realizada no 3º e 4º pares de folhas, localizadas no terço médio-superior da copa, nos quatro quadrantes (norte, sul, leste e oeste) e em três posições da folha (ápice, mediana e basal). As medições foram realizadas em cinco árvores médias por parcela, e em duas folhas por quadrante, totalizando 120 medições por parcela amostral.

2.2.5.5. Crescimento das árvores

O crescimento das árvores foi avaliado aos 6, 9, 12 e 15 meses, por meio da mensuração de altura total (h_{total}) e diâmetro à altura do peito (DAP) das 25 plantas úteis, em todos os tratamentos e blocos. Adicionalmente, aos 6 meses de idade, foi mensurado o diâmetro (dc) das copas, o que possibilitou o cálculo do índice de copa ($ICOP$) (POGGIANI, STAPE, 2003) para a avaliação do desenvolvimento da área fotossintética (Equação 1).

$$ICOP = \frac{dc}{2} \cdot \sqrt{h_t^2 + \frac{dc^2}{4}} \quad \text{Equação 1}$$

Em que: $ICOP$ = índice de copa ($m^2 \text{ planta}^{-1}$); h_t = altura total das árvores (m); e dc = diâmetro médio da copa (cm).

Para a realização da cubagem das árvores, os DAP's das árvores mensurados aos 12 meses de idade foram distribuídos em classes de frequência. Foram selecionadas três árvores por tratamento: 1 árvore de DAP_{médio}; 1 árvore de DAP ± 1 desvio padrão. Nestas árvores foi realizada a cubagem e quantificação da biomassa aérea (folhas, galhos, casca e lenho). Após o abate das árvores, os compartimentos das árvores foram separados e pesados no campo para determinação da massa fresca total. O volume de madeira foi obtido por meio da cubagem rigorosa, na qual os fustes das árvores abatidas foram segmentados em toretes de 0,5 m de comprimento e tiveram seus diâmetros mensurados. O cálculo de volume foi realizado por meio da fórmula de Smalian (SCOLFORO; THIERSCH, 2004). Para a estimativa da biomassa seca total de cada compartimento, foi necessário estimar a umidade da massa fresca total. A umidade foi calculada a partir da razão entre a massa de amostra fresca (± 200 g) e massa após serem secas a 65 °C até massa constante.

Para os ajustes das equações volumétricas e de biomassa dos compartimentos, foram utilizados os modelos de Spurr e Shumacher-Hall (GOMES; GARCIA, 1993), tomando como variáveis independentes o DAP e a altura das árvores (Tabela 5). A seleção dos modelos baseou-se em sua significância, no coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}) e na soma e distribuição dos resíduos (Figura 6).

Tabela 5 Equações para a estimativa do volume e da biomassa aérea aos 12 meses de idade e seus coeficientes de determinação ajustados ($R^2_{aj.}$)

Equações ⁽¹⁾	$R^2_{aj.}$
Volume de madeira com casca (Vol_{cc}) – Shumacher-Hall $Vol_{cc} = 0,00005877 \cdot DAP^{1,743} \cdot H^{0,934}$	0,976**
Lenho (L) – Shumacher-Hall $L = 0,0687845 \cdot DAP^{2,1187701} \cdot H^{0,0008676}$	0,944**
Casca (C) – Spurr $C = 0,101914 + 0,002007 \cdot DAP^2 H$	0,811**
Folha (F) – Spurr $F = 0,376085 + 0,007294 \cdot DAP^2 H$	0,693**
Galho (G) – Spurr $G = 1,275117 + 0,005344 \cdot DAP^2 H$	0,575**

⁽¹⁾Diâmetro à altura do peito (DAP) expresso em centímetro e altura (H) em metros; ** significância do modelo $p < 0,01$.

Figura 6 Distribuição observada e estimada do volume com casca (a), dos compartimentos da biomassa aérea (lenho (b), casca (c), folha (d), galho (e)) e do índice de área foliar (f)

2.2.5.6. Índice de área foliar (IAF)

A área foliar produzida em cada tratamento foi avaliada aos 12 meses pelo método direto, baseado no cálculo do índice de área foliar (IAF). Com o corte das árvores para a cubagem foram colhidas 40 folhas inteiras nos terços inferior, médio e superior. As amostras foram acondicionadas em isopor com gelo e mantidas em ambiente refrigerado para a manutenção de sua integridade até o processamento. Em laboratório, as folhas foram limpas, digitalizadas e processadas com o auxílio do software *Image J*. Após a digitalização, as amostras foram secas em estufa de circulação de ar a 65 °C, até massa constante, e pesadas para a determinação de sua massa seca. A área foliar específica (AFE) de cada tratamento foi calculada por meio da razão entre a área foliar e a massa seca foliar média do tratamento. A área foliar total de cada árvore foi calculada a partir da multiplicação entre a massa seca produzida pelas folhas e a AFE do tratamento. O IAF foi obtido pela razão entre a área foliar e a área total da parcela, expresso em m² de folha por m² de solo. Os dados de IAF, encontrados pelo método destrutivo, foram utilizados no cálculo de uma equação para extrapolação e estimativa do IAF das demais plantas úteis (Equação 2).

$$IAF (m^2 m^{-2}) = 1,59654 + 0,01696 \cdot DAP^2 H (R^2_{aj} = 0,866) \quad \text{Equação 2}$$

Em que: IAF = índice de área foliar (m² m⁻²); DAP = diâmetro à altura do peito (cm); H = altura total (m).

2.2.5.7. Acúmulo de nutrientes

As amostras dos compartimentos aéreos (folhas, galhos, casca e tronco) foram submetidas a análise química vegetal para a determinação dos teores de macronutrientes e micronutrientes, metodologia segundo Malavolta et al. (1997). Com os resultados das análises vegetais foi determinado o estoque de nutrientes nos tratamentos em cada compartimento (Equação 3).

$$E_{ij} = [i] \cdot m_j \quad \text{Equação 3}$$

Em que: E_{ij} = estoques do nutriente i no compartimento j , em g ha⁻¹; $[i]$ = concentração do nutriente i ; em g kg⁻¹; m_j = massa do compartimento j , em kg ha⁻¹.

2.2.6. Análises estatísticas

Os resultados foram aferidos para verificação da existência de “outliers”, de normalidade (Shapiro-Wilk, $p=0,05$) e de homogeneidade de variâncias. Quando necessário, transformações dos dados foram realizadas segundo o método de potência ótima de Box-Cox. Os dados foram submetidos a análises descritivas e de variância (ANOVA), e as médias dos tratamentos foram comparadas por meio de contrastes de interesse ($p=0,05$) (Tabela 6). Os dados foram separados por profundidade para a análise dos atributos químicos de solo e as análises nutricionais foram avaliadas por terço da copa. Os dados foram analisados pelo programa estatístico SAS (9.3) (SAS INSTITUTE, 2011).

Tabela 6. Contrastes de interesse dos tratamentos avaliados

Contrastes de Interesse		Efeito avaliado
COMP	× -B+R	Omissão de B
COMP	× -Cu+R	Omissão de Cu
COMP	× -Zn+R	Omissão de Zn
-B+R	× -B-R	Resíduo na disponibilidade de B
-Cu+R	× -Cu-R	Resíduo na disponibilidade de Cu
-Zn+R	× -Zn-R	Resíduos na disponibilidade de Zn

2.3. Resultados e Discussão

2.3.1. Atributos químicos do solo

O solo apresentou baixos teores disponíveis de K, Ca e Mg, médios teores de B, Zn e Mn e altos teores de P, Fe e Cu, segundo as classes de interpretação de fertilidade de solo para plantação de eucalipto, proposta por Gonçalves (2011) (Tabela 7). Na camada superficial (0-20 cm), o solo apresentou média de $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$ de B, $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn e $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu. Segundo Gonçalves (2011), os maiores potenciais de resposta à fertilização são vistos em solos com muito baixo e baixos teores de nutrientes. Em solos com teor médio de nutrientes, o eucalipto apresenta baixo a moderado potencial de resposta à fertilização, e em solos com teores altos, as respostas são inexistentes ou pequenas. Assim, o maior potencial de resposta do eucalipto à fertilização nesta área foi para os macronutrientes K, Ca e Mg, e para os micronutrientes B e Zn.

Tabela 7 Atributos químicos do solo da área experimental antes da instalação do experimento

Prof.	pH ⁽¹⁾	CO ⁽²⁾	P ⁽³⁾	Cátion Trocável ⁽³⁾				Micronutriente				
				K	Ca	Mg	Al	B ⁽⁴⁾	Fe ⁽⁵⁾	Mn ⁽⁵⁾	Zn ⁽⁵⁾	Cu ⁽⁵⁾
cm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³					mg dm ⁻³		
0-5	3,7	22,4	9,6	0,4	3,3	3,2	18,1	0,4	169,5	2,2	0,6	1,0
5-10	3,8	14,3	8,2	0,2	0,7	1,1	17,2	0,3	71,2	1,3	0,5	1,1
10-20	3,8	10,2	7,3	0,1	1,4	1	12,8	0,3	45,2	0,7	0,3	1,2

Métodos: ⁽¹⁾ CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; ⁽²⁾ oxidação via úmida; ⁽³⁾ resina de troca iônica; ⁽⁴⁾ água quente; ⁽⁵⁾ DTPA.

Seis meses pós-plantio, todos os tratamentos apresentaram aumento nos teores disponíveis de K, Ca e Mg do solo devido à aplicação de fertilizantes minerais. Os teores encontrados neste período foram considerados médios a altos para a cultura do eucalipto, suprimindo a demanda nutricional necessária para o crescimento do povoamento (Tabela 8).

Os tratamentos com omissão de B mantiveram o teor considerado baixo a médio, de 0,3 mg dm⁻³, enquanto os demais tratamentos apresentaram elevação destes teores, aos 6 meses pós-plantio. No tratamento -B (+R e -R), o teor de B encontrado nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm foi de 0,3 mg dm⁻³, não apresentando variações ao longo do perfil. Nos tratamentos fertilizados, os teores de B variaram entre 0,4 e 0,9 mg dm⁻³ nas camadas 0-5 e 5-10 cm e entre 0,5 e 1,0 mg dm⁻³ na camada 10-20 cm. A boa distribuição do B ao longo do perfil deve-se a alta mobilidade da espécie neutra H₃BO₃ na solução do solo. Esta forma indissociada neutra predomina em solos tropicais devido a sua alta constante de equilíbrio (pK_a = 9,2) (SOARES et al., 2008). Em áreas com pH próximos a 4, a forma neutra predomina, podendo o B ser facilmente lixiviado do solo. Além disto, a textura arenosa do solo favorece a mobilidade do B, pois a sua adsorção é acrescida com aumento do conteúdo de argila. A adsorção aos óxidos de Fe e Al, aos minerais de argila, à MO, aos hidróxidos de Mg e aos carbonatos de Ca é o que determina a disponibilidade do B na solução do solo (YAMADA, 2000; AHMAD et al., 2012).

O teor de Zn nos tratamentos com omissão variou entre 0,5 e 0,7 mg dm⁻³. Os tratamentos fertilizados apresentaram aumento nos teores disponíveis de Zn no solo, variando entre 1,0 e 2,3 mg dm⁻³. Não houve grande variação entre os teores de Zn ao longo das camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade. Os teores de Zn na camada de 0-5 cm variaram entre 0,7 e 2,1 mg dm⁻³, na camada 5-10 entre 0,6 e 2,3 mg dm⁻³ e na camada 10-20 entre 0,5 e 2,0 mg dm⁻³. Rodrigues et al. (2012) também observaram o aumento dos teores de Zn no solo com a aplicação de fertilizantes minerais. Em seis solos da região de Cerrado de Minas Gerais, os autores verificaram que o aumento das doses de Zn aplicadas ao solo elevou os teores de Zn extraídos por DTPA, sendo estes teores altamente correlacionados com o pH do solo. Os teores de Zn no tratamento controle variaram entre 0,3 e 2,9 mg dm⁻³ e no tratamento de maior dose

(20 mg dm⁻³) estes teores variaram entre 10,9 e 14,7 mg dm⁻³, apresentando um aumento de quatro vezes nos teores extraídos pelo método DTPA.

Os solos de todos os tratamentos foram classificados como de alta disponibilidade de Cu (1,1 - 2,3 mg dm⁻³). Não foram observadas alterações nos teores de Cu no solo nos tratamentos com aplicação e com omissão deste nutriente. Os teores de Cu variaram entre 1,1 e 1,8 mg dm⁻³ na camada 0-5 cm, entre 1,3 e 2,3 mg dm⁻³ na camada 5-10 cm e entre 1,5 e 2,2 mg dm⁻³ na camada 10-20 cm de profundidade. Ao longo do perfil, os menores teores de Cu foram encontrados na camada superficial do solo (0-5 cm). Os teores de Cu na superfície podem estar associados aos maiores teores de MO presente na superfície, que formam complexos insolúveis e reduzem a disponibilidade de Cu às plantas. Em solos do Cerrado, Rodrigues et al. (2010) não observaram o mesmo comportamento. Os autores verificaram que a fertilização mineral com Cu no solo aumentou os teores de Cu presentes no solo e na planta. No solo, os teores determinados pelo método DTPA passaram de menos de 1 mg dm⁻³, no tratamento controle, a quase 10 mg dm⁻³, no tratamento de maior dose de Cu (16 mg dm⁻³). O aumento dos teores no solo se refletiram sobre a nutrição das plantas. Os teores de Cu no tratamento controle variaram entre 1,78 e 6,06 mg kg⁻¹, enquanto no tratamento de maior dose os teores variaram entre 6,96 e 11,16 mg kg⁻¹.

A remoção dos resíduos florestais da colheita de madeira não influenciou os teores de B, Cu e Zn do solo, aos 6 meses pós-plantio. Os contrastes (-B+R e -B-R; -Cu+R e -Cu-R; e -Zn+R e -Zn-R) não diferiram entre si. Rocha et al. (2016) estudaram os efeitos da remoção dos resíduos da colheita de eucalipto sobre os atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Os autores não observaram diferenças quanto à fertilidade química do solo. Segundo estes autores, em diferentes locais, os efeitos do manejo sobre as propriedades do solo são pequenos e inconsistentes. Contudo, os autores ressaltam que a retirada dos resíduos diminui o substrato para a atividade microbiológica do solo, o que pode impactar a ciclagem de nutrientes.

Tabela 8 Atributos químicos do solo na linha de plantio em povoamento de eucalipto influenciado pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade, aos 6 meses pós-plantio, e valores de F dos contrastes de interesse

Efeitos dos contrastes de interesse											
Tratamentos	pH ⁽¹⁾	CO ⁽²⁾	Cátion Trocável ⁽³⁾				Micronutriente				
			K	Ca	Mg	Al	B ⁽⁴⁾	Fe ⁽⁵⁾	Mn ⁽⁵⁾	Zn ⁽⁵⁾	Cu ⁽⁵⁾
			g dm ⁻³	mmolc dm ⁻³			mg dm ⁻³				
0-5 cm											
COMP	4,5	28,8	0,5	12,3	8,7	7	0,9	109	2,0	2,1	1,3
-B+R	4,2	24,6	0,4	10,6	12,4	8	0,3	87	2,5	0,7	1,6
-B-R	4,3	30,4	0,6	23,7	11,6	6	0,3	121	3,1	1,1	1,5
-Cu+R	4,3	24,1	0,5	16,0	10,4	6	0,5	106	1,7	1,3	1,6
-Cu-R	4,5	27,1	0,4	20,8	9,3	5	0,5	101	2,0	2,1	1,4
-Zn+R	4,2	23,0	0,6	12,9	7,7	8	0,9	125	1,7	0,7	1,8
-Zn-R	4,7	28,7	0,5	23,5	14,9	4	0,4	71	1,4	0,6	1,1
F-Contraste											
COMP × -B+R	0,99 ^{ns}	2,83 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,25 ^{ns}	3,21 ^{ns}	0,17 ^{ns}	36,30*	0,47 ^{ns}	0,40 ^{ns}	20,74*	1,00 ^{ns}
COMP × -Cu+R	0,25 ^{ns}	3,49 ^{ns}	0,14 ^{ns}	1,21 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,11 ^{ns}	14,70*	0,01 ^{ns}	0,40 ^{ns}	4,10*	1,49 ^{ns}
COMP × -Zn+R	0,99 ^{ns}	5,31*	2,29 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,40 ^{ns}	25,61*	3,15 ^{ns}
-B+R × -B-R	0,14 ^{ns}	5,31*	2,29 ^{ns}	14,97*	0,13 ^{ns}	0,58 ^{ns}	1,20 ^{ns}	1,16 ^{ns}	0,40 ^{ns}	4,10*	0,01 ^{ns}
-Cu+R × -Cu-R	0,55 ^{ns}	1,39 ^{ns}	2,29 ^{ns}	1,97 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,40 ^{ns}	4,10*	0,60 ^{ns}
-Zn+R × -Zn-R	3,46 ^{ns}	5,13 ^{ns}	2,29 ^{ns}	9,78*	11,72*	3,20 ^{ns}	19,20*	3,01 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,26 ^{ns}	5,42*
5-10 cm											
COMP	4,3	21,5	0,4	16,0	8,0	9	0,9	96	1,8	2,3	1,6
-B+R	4,0	19,3	0,2	17,0	4,2	11	0,3	85	1,3	0,7	1,5
-B-R	3,9	20,5	0,4	15,8	4,2	12	0,3	162	1,4	0,9	2,3
-Cu+R	4,4	20,1	0,5	20,8	3,0	8	0,6	99	2,1	1,5	1,5
-Cu-R	4,3	21,1	0,4	18,3	4,8	8	0,5	104	1,4	1,3	1,5
-Zn+R	4,2	22,9	0,5	14,3	5,6	8	0,6	119	1,4	0,6	1,3
-Zn-R	4,4	19,5	0,4	18,5	5,6	8	0,4	80	1,3	0,6	1,6
F-Contraste											
COMP × -B+R	1,35 ^{ns}	1,25 ^{ns}	4,50 ^{ns}	3,46 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,57 ^{ns}	45,85*	0,15 ^{ns}	0,91 ^{ns}	14,95*	0,43 ^{ns}
COMP × -Cu+R	0,05 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,50 ^{ns}	1,61 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,16 ^{ns}	6,65*	0,01 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1,35 ^{ns}	0,28 ^{ns}
COMP × -Zn+R	0,12 ^{ns}	0,53 ^{ns}	1,12 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,23 ^{ns}	6,65*	0,55 ^{ns}	0,41 ^{ns}	18,09*	1,40 ^{ns}
-B+R × -B-R	0,12 ^{ns}	0,41 ^{ns}	4,50 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,42 ^{ns}	6,51*	0,10 ^{ns}	1,83 ^{ns}	10,78*
-Cu+R × -Cu-R	0,22 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,50 ^{ns}	3,46 ^{ns}	10,18*	0,01 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,02 ^{ns}
-Zn+R × -Zn-R	0,34 ^{ns}	3,15 ^{ns}	1,12 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,01 ^{ns}	2,60 ^{ns}	1,64 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,04 ^{ns}	1,10 ^{ns}
10-20 cm											
COMP	4,2	19,8	0,4	15,2	4,6	9	1,0	116	1,2	2,0	1,6
-B+R	4,0	19,1	0,3	17,8	3,9	9	0,3	106	2,0	0,9	2,2
-B-R	4,1	17,2	0,4	19,8	4,9	7	0,3	111	2,2	0,5	1,5
-Cu+R	4,1	16,8	0,5	18,1	4,7	8	0,5	84	1,9	1,1	1,5
-Cu-R	4,4	15,8	0,3	21,1	5,3	7	0,6	75	1,9	1,0	1,7
-Zn+R	3,9	16,9	0,4	17,8	4,0	8	0,8	121	1,6	0,5	2,2
-Zn-R	4,3	15,6	0,5	14,4	6,5	5	0,5	74	1,2	0,5	1,7
F-Contraste											
COMP × -B+R	0,47 ^{ns}	2,98 ^{ns}	1,87 ^{ns}	1,16 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,72 ^{ns}	21,92*	0,02 ^{ns}	1,94 ^{ns}	191,53*	0,12 ^{ns}
COMP × -Cu+R	0,12 ^{ns}	3,96 ^{ns}	1,05 ^{ns}	1,90 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,19 ^{ns}	9,64*	1,05 ^{ns}	0,16 ^{ns}	76,12*	0,08 ^{ns}
COMP × -Zn+R	1,89 ^{ns}	3,70 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,58 ^{ns}	191,53*	1,42 ^{ns}
-B+R × -B-R	0,27 ^{ns}	1,53 ^{ns}	1,87 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,16 ^{ns}	10,95*	2,38 ^{ns}
-Cu+R × -Cu-R	1,45 ^{ns}	0,47 ^{ns}	2,92 ^{ns}	7,70*	0,27 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,12 ^{ns}
-Zn+R × -Zn-R	2,96 ^{ns}	0,74 ^{ns}	1,05 ^{ns}	0,56 ^{ns}	4,69*	1,67 ^{ns}	7,41*	2,28 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,97 ^{ns}

O símbolo (*) indica diferença a 5 %; (ns) não significativo. Métodos: ⁽¹⁾ CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; ⁽²⁾ oxidação via úmida; ⁽³⁾ resina de troca iônica; ⁽⁴⁾ água quente; ⁽⁵⁾ DTPA.

2.3.2. Extração sequencial de Cu e Zn no solo

Os teores totais médios de Zn extraídos das amostras foram de 7,7 mg kg⁻¹ nas parcelas que tiveram os resíduos florestais removidos e, de 8,1 mg kg⁻¹, quando os resíduos florestais foram mantidos (Tabela 9). Não houve diferença atribuída ao manejo de resíduo florestal entre as formas de Zn no solo. O teor de Zn trocável e de Zn ligado à MO representaram 10 % e 15

% do Zn total. As formas de Zn ligado aos óxidos e Zn residual foram predominantes, juntas representando mais de 70 % do Zn presente no solo.

O Cu apresentou teor total de 5,9 mg kg⁻¹ em ambos os tipos de manejo de solo (Tabela 9). As frações de Cu trocável e de Cu residual não apresentaram variações entre os tratamentos. Entretanto, as frações de Cu ligada à MO e de Cu ligada aos óxidos tiveram comportamento antagônico. Com a remoção dos resíduos florestais, a fração de Cu ligada à MO foi acrescida em 45 % e, a ligada aos óxidos, decrescida em 10 %, comparativamente ao tratamento em que se manteve os resíduos florestais.

Tabela 9 Teores de Zn e Cu extraídos de diferentes frações do solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade, aos 6 meses pós-plantio. *A letra R indica o manejo de resíduo florestal empregado. +R indica a manutenção (-Cu+R) e -R a remoção de resíduo florestal (-Cu-R). O símbolo (**) indica diferença a 5 %; (ns) não significativo

Fração	Profundidade (cm)					
	0-10		10-20		0-20	
	-R*	+R	-R	+R	-R	+R
	mg kg ⁻¹					
Zn-Tro	0,8 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,6	0,7
Zn-MO	1,4 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,4 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,4	1,0
Zn-Ox	2,3 ^{ns}	1,8 ^{ns}	2,0 ^{ns}	1,5 ^{ns}	2,2	1,7
Zn-Res	4,4 ^{ns}	4,2 ^{ns}	4,0 ^{ns}	4,7 ^{ns}	4,2	4,5
Soma	8,8 ^{ns}	7,8 ^{ns}	7,8 ^{ns}	7,9 ^{ns}	8,3	7,9
Total	8,9 ^{ns}	7,8 ^{ns}	6,5 ^{ns}	8,4 ^{ns}	7,7	8,1
Índice de Recuperação	0,8	1,1	0,8	0,9	0,8	1,0
Cu-Tro	0,12 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,12	0,14
Cu-MO	1,6 ^{**}	1,1 ^{**}	1,2 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,4	0,8
Cu-Ox	1,8 ^{**}	2,0 ^{**}	1,9 ^{ns}	2,0 ^{ns}	1,9	2,0
Cu-Res	3,5 ^{ns}	2,6 ^{ns}	3,1 ^{ns}	3,5 ^{ns}	3,3	3,1
Soma	7,0 ^{ns}	5,5 ^{ns}	6,3 ^{ns}	6,5 ^{ns}	6,6	6,0
Total	6,0	5,8	5,6 ^{ns}	6,1 ^{ns}	5,9	5,9
Índice de Recuperação	1,2	0,9	1,1	1,1	1,1	1,0

Extração: Cu/Zn-tro (Fração trocável) - CaCl₂ 0,1 mol L⁻¹; Cu/Zn-MO (Fração ligada à MO) - NaOCl 5 % (pH 8,5); Cu/Zn-Ox (fração ligada aos óxidos) - ácido oxálico 0,2 mol L⁻¹ + oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ + ácido ascórbico 0,1 mol L⁻¹ (pH 3); Res (fração residual) - HNO₃ + HCl.

O teor total de micronutrientes no solo é derivado do material de origem e das entradas antropogênicas destes nutrientes no solo (ALLOWAY, 2013). Os micronutrientes podem se apresentar no solo nas formas solúveis em água, trocáveis, ligados aos óxidos, ligados aos carbonatos, ligados à MO e residual (HE et al., 2005; ALLOWAY, 2013). A forma solúvel em água e a trocável são consideradas biodisponíveis, as frações ligadas aos óxidos, aos carbonatos e à MO são potencialmente biodisponíveis, mas a fração residual é indisponível para plantas e microrganismos (HE et al., 2005). O movimento destes metais de uma fração indisponível à

uma fração disponível é controlado por reações químicas e pelo tempo (RIEUWERTS et al., 1998). As frações consideradas de menor acesso às plantas precisam de anos para serem disponibilizadas na solução do solo, enquanto as formas lábeis, como adsorvidas e complexadas, de meses ou dias (RIEUWERTS et al., 1998).

Os teores totais de Cu e Zn deste trabalho se aproximam daqueles encontrados por Silveira et al. (2006) que, em Latossolo Vermelho-Amarelo, encontraram teores totais variando entre 2 e 5 mg kg⁻¹ de Cu e de 6,6 e 9,3 mg kg⁻¹ de Zn. Nos trabalhos de Nachtigall et al. (2007), Nachtigall et al. (2009) e Silveira et al. (2006), o Cu e o Zn apresentaram-se predominantemente associados às frações ligadas aos óxidos e ao resíduo, e as formas trocáveis apresentaram pequena participação. Nachtigall et al. (2007) e Nachtigall et al. (2009) trabalharam com a extração sequencial de Cu e Zn em um Neossolo Litólico distrófico típico e em um Cambissolo Húmico alumínico da região da Serra do Rio Grande do Sul. Esses solos possuem menor grau de intemperização, quando comparados ao solo estudado, contudo apresentaram o mesmo comportamento, mostrando que a fração residual representa uma importante reserva de Cu e Zn em diferentes classes de solo. Segundo Silveira et al. (2006), a fração residual representa mais de 50 % do Zn total do solo. Os elementos presentes na fração residual estão ligados aos silicatos, aos óxidos de Fe cristalinos e a outros minerais mais resistentes à extração, sendo consideradas fontes de baixo acesso pelas plantas em curto prazo (SILVA; VITTI, 2008). As formas trocáveis encontradas por Silveira et al. (2006) foram inferiores a 1% para o Cu e 15 % para o Zn, teores da mesma magnitude dos encontrados neste estudo: 2 % de Cu e 10 % de Zn trocáveis.

A remoção de resíduos da colheita alterou a proporção entre as frações de Cu no solo (Figura 7). Com a remoção dos resíduos florestais, maiores teores de Cu ficaram ligados à MO e, menores teores aos óxidos de Fe e Al. Rocha (2014) estudou o comportamento do carbono orgânico oxidável do solo com a retirada de resíduos florestais e observou que há redução de formas facilmente oxidáveis e aumento de formas mais recalcitrantes. As formas facilmente oxidáveis se relacionam com a disponibilidade de nutrientes, e as frações recalcitrantes são caracterizadas pela maior estabilidade e massa molecular (ROSSET et al., 2016). O Cu retido na MO pode se associar a grupos funcionais COOH e OH-fenólicos formando complexos altamente estáveis (SILVA; VITTI, 2008). Assim, o aumento de frações recalcitrantes da MO no tratamento em que houve remoção de resíduos florestais deve ter aumentado a quelatização do Cu presente no solo, contribuindo com a formação de fortes complexos entre Cu e MO.

A adsorção do Zn no solo é controlada principalmente pelos minerais de argila e pela MO do solo. O comportamento visto para o Cu não se repetiu para o Zn. Isto porque, o

mecanismo de adsorção e de retenção de metais no solo é controlado pela competitividade. Elementos com maior afinidade com a MO, como o Cu, podem deslocar o Zn dos sítios de adsorção, aumentando a proporção de Zn ligado aos óxidos de Fe e Al (NASCIMENTO; FONTES, 2004; SILVA; VITTI, 2008).

Figura 7 Distribuição relativa do Cu (a) e do Zn (b) nas frações do solo (Extração: Cu/Zn-tro (Fração trocável) - CaCl_2 0,1 mol L^{-1} ; Cu/Zn-MO (Fração ligada à MO) - NaOCl 5 % (pH 8,5); Cu/Zn-Ox (fração ligada aos óxidos) - ácido oxálico 0,2 mol L^{-1} + oxalato de amônio 0,2 mol L^{-1} + ácido ascórbico 0,1 mol L^{-1} (pH 3); Res (fração residual) - HNO_3 + HCl)

2.3.3. Fracionamento do B no solo

O teor total médio de B no solo variou entre 9,0 e 10,0 mg kg⁻¹ (Tabela 10). Os teores de B solúvel variaram entre 0,4 e 0,9 mg kg⁻¹, os teores adsorvidos entre 0,2 e 0,4 mg kg⁻¹ e o teor ligado à MO foi de 0,3 mg kg⁻¹. Juntas estas três frações corresponderam a 10-15 % do teor total de B no solo. As formas predominantes do B são aquelas ligadas aos óxidos e a residual, correspondendo a mais de 80 % do B total do solo.

Na camada superficial do solo (0-20 cm), os teores de B solúvel e de B ligado aos óxidos apresentaram diferenças entre os tratamentos. Estes teores foram maiores nos tratamentos em que os resíduos florestais da colheita de madeira foram mantidos sobre a superfície do solo. A disponibilidade de B pode ser influenciada pela manutenção de resíduos florestais, por intensificar a mineralização do material orgânico e a ciclagem de nutrientes na superfície do solo (SILVEIRA; CUNHA, 2002).

Tabela 10 Teores de B extraídos de diferentes frações do solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade, aos 6 meses pós-plantio. * A letra R indica o manejo de resíduo florestal empregado. +R indica a manutenção (-Cu+R) e -R a remoção de resíduo florestal (-Cu-R). O símbolo ^(*) indica diferença a 5 %; ^(ns) não significativo

Fração	Profundidade					
	0-10		10-20		0-20	
	-R	+R	-R	+R	-R	+R
	mg kg ⁻¹					
B-Sol ⁽¹⁾	0,4**	0,9**	0,3**	0,4**	0,4	0,7
B-Ad ⁽²⁾	0,2 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,2	0,3
B-MO ⁽³⁾	0,2 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,2	0,3
B-OxFeA ⁽⁴⁾	0,6**	0,7**	0,5 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,5	0,5
B-OxFeC ⁽⁴⁾	4,1 ^{ns}	4,3 ^{ns}	2,9**	3,9**	3,5	4,1
B-Res ⁽⁵⁾	3,6 ^{ns}	4,1 ^{ns}	4,9 ^{ns}	4,3 ^{ns}	4,3	4,2
Soma	9,0 ^{ns}	10,5 ^{ns}	9,2 ^{ns}	10,2 ^{ns}	9,1	10,5
Total	9,6 ^{ns}	9,9 ^{ns}	9,8 ^{ns}	8,0 ^{ns}	9,7	9,0
Índice de Recuperação	0,9	1,1	0,9	1,3	0,9	1,2

Extração ⁽¹⁾ B-Sol (B solúvel) - água ultrapura; ⁽²⁾ B-Ad (B adsorvido não especificamente) - CaCl₂ 0,02 mol L⁻¹; ⁽³⁾ B-MO (B adsorvido à MO) - manitol 0,01 mol L⁻¹ + CaCl₂ 0,02 mol L⁻¹; ⁽⁴⁾ B-OxFeA e B-OxFeC (B ligado aos óxidos de ferro amorfo ou cristalinos) - oxalato de amônio 0,175 mol L⁻¹ (pH 3,25); ⁽⁵⁾ B-Res (B residual) HNO₃ + HCl.

Ferreira e Silva (1999) avaliaram as frações de B em 29 amostras superficiais (0-20 cm) em seis classes de solo do estado do Ceará, dentre elas amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVd). Eles encontraram as seguintes amplitudes nos teores por fração: solúvel, entre 0,10 e 0,62 mg kg⁻¹, adsorvido, entre 0,05 e 0,74 mg kg⁻¹, ligado à MO, entre 0,05 e 0,79 mg kg⁻¹, ligado aos óxidos de Fe amorfo, entre 0,52 e 0,9 mg kg⁻¹, ligado aos óxidos de Fe cristalinos, entre 2,2 e 6,7 mg kg⁻¹ e residual, entre 2,3 e 15,5 mg kg⁻¹. Os

resultados encontrados pelos autores mostraram que as frações ligadas aos óxidos de Fe cristalino e a residual representam a maior reserva de B encontrado em diferentes classes de solo.

A fração de B solúvel foi maior que a fração adsorvida e a fração ligada à MO. Isto ocorre devido a predominância de H_3BO_3 sobre a forma $\text{B}(\text{OH})_4^-$ em condições ácidas. O ácido bórico é uma espécie neutra que predomina na solução do solo (SALEEM et al., 2011), e o ânion, presente em menor proporção, é a forma de B ligado às bordas dos cristais de argila e à MO do solo (FERREYRA; SILVA, 1999). Segundo Ferreyra e Silva (1999), as formas de maior acessibilidade pelas plantas são as formas de B solúvel, adsorvida e ligada à MO. Os autores encontraram correlação positiva de 0,71 entre o somatório destas três frações e teores extraídos pelo método da água quente.

As formas predominantes e consideradas de menor acesso às plantas são aquelas associadas aos óxidos de Fe e Al e ao resíduo da extração. A forma residual representa o B associado às argilas silicatadas, que ocorre em uma ordem predominante de adsorção: caulinita < montmorilonita < ilita. O mecanismo de adsorção se dá por meio de troca de ligantes boratados com grupos hidroxílicos das bordas da superfície das partículas de argila. O alto teor de B associado aos óxidos se justifica pelo fato do H_3BO_3 ser adsorvidos não especificamente, por simples troca com grupos hidroxilas superficiais, e especificamente, formando ligações metal-B-O (GOLDBERG, 1997; FERREYRA; SILVA, 1999).

A remoção dos resíduos florestais da colheita causou diminuição significativa do B solúvel no solo (Figura 8). Em termos relativos, o B solúvel teve uma redução de 40 %, diminuindo de 7 % para 5% do B total do solo. Em condições como na área em estudo, os maiores fluxos de entrada de B estão dentro dos ecossistemas florestais. Em condições de baixa disponibilidade de B no solo, a sua absorção, a sua retranslocação, a sua liberação da serapilheira, por meio da decomposição dos resíduos florestais, e a sua retenção no solo (quimicamente na matéria orgânica e imobilizada na microbiota do solo) são os processos que determinam se o B escasso será utilizado de forma eficiente pela floresta ou se manter-se-á indisponível (LEHTO et al., 2010). Assim, a manutenção dos resíduos da colheita é uma importante fonte de entrada de B prontamente disponível e aproveitável pelas plantas em ecossistemas florestais, sendo considerada a principal fonte de B solúvel para solos altamente intemperizados.

Figura 8 Distribuição relativa de B nas frações do solo (Extração: B-Sol - água ultrapura; B-Ad - CaCl_2 0,02 mol L^{-1} ; B-MO - manitol 0,01 mol L^{-1} + CaCl_2 0,02 mol L^{-1} ; B-OxFeA/C - oxalato de amônio 0,175 mol L^{-1} (pH 3,25); B-Res (HNO_3 + HCl))

2.3.4. Teor e distribuição de nutrientes nas folhas

O teor de macronutrientes e micronutrientes em folhas recém-maduras de eucalipto foi influenciado pelo estágio fenológico foliar e pela posição em que as folhas foram coletadas aos 6 meses de idade. O teor foliar de todos os nutrientes, com exceção do S, diferiu entre as folhas de estádios fenológicos distintos (Tabela 11). Entre os terços da copa, apenas P, Ca e Mn apresentaram diferenças (Figura 9).

Tabela 11 Teor de nutrientes médio dos três terços da copa em folhas de eucalipto, aos 6 meses de idade, em função do estágio fenológico foliar, em plantas que receberam fertilização completa (COMP)

Idade da folha	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
Velha	21,5 b	1,1 c	5,3 b	6,7 a	2,6 a	0,8	88,6 a	8,7 a	71,8 a	447,2 a	18,8 b
Madura	23,6 ab	1,5 b	5,3 b	4,8 b	2,2 b	0,8	38,4 b	7,2 b	55,4 c	327,7 b	20,4 b
Nova	26,6 a	2,1 a	6,0 a	4,7 b	2,3 b	0,8	27,3 c	6,6 b	61,1 b	299,3 c	24,7 a
F-estatístico	8.82*	83.06*	5.68*	48.13*	16.59*	0.22 ^{ns}	169.87*	12.34*	24.00*	140.21*	13.85*

Os macronutrientes N, P e K estiveram mais concentrados em folhas novas. Diferente do P que se concentrou no terço superior da copa, o N e o K se concentraram nos terços médio e inferior. As folhas senescentes, localizadas no terço inferior, apresentaram os maiores teores de Ca e Mg. O teor de Ca nas folhas velhas foi 30 % maior do que nas folhas maduras e novas.

O S se apresentou bem distribuído, não havendo diferenças entre estádios fenológicos ou entre terços da copa.

O teor de micronutrientes foi influenciado principalmente pelos estádios fenológicos foliares (Tabela 11). Os terços da copa não influenciaram o teor de micronutrientes na planta, com exceção do Mn (Figura 10). Dentre os micronutrientes, o B apresentou as maiores variações de teor. Os teores de B em folhas maduras ($38,4 \text{ mg kg}^{-1}$) e jovens ($27,3 \text{ mg kg}^{-1}$) corresponderam a menos de 50 % do teor verificado em folhas próximas à senescência ($88,6 \text{ mg kg}^{-1}$), mostrando a baixa mobilidade deste nutriente no eucalipto.

Os teores de Cu, Fe e Zn foram também influenciados significativamente pelo estágio fenológico das folhas. O Cu apresentou baixa mobilidade, ficando mais concentrado em folhas velhas ($8,7 \text{ mg kg}^{-1}$), não apresentando diferenças entre folhas maduras ($7,2 \text{ mg kg}^{-1}$) e novas ($6,6 \text{ mg kg}^{-1}$). O Fe, assim como o Cu, apresentou baixa mobilidade, ficando concentrado principalmente em folhas velhas ($71,8 \text{ mg kg}^{-1}$). Verificaram-se diferenças entre os teores de Fe em folhas maduras (55 mg kg^{-1}) e novas ($61,1 \text{ mg kg}^{-1}$). O Zn apresentou comportamento oposto daquele apresentado pelos demais micronutrientes. O teor de Zn em folhas jovens ($24,7 \text{ mg kg}^{-1}$) diferiu de folhas maduras ($20,4 \text{ mg kg}^{-1}$) e de folhas velhas ($18,8 \text{ mg kg}^{-1}$). Em média, as folhas jovens apresentaram 20 % a mais Zn do que as folhas maduras e velhas, sugerindo maior mobilidade do Zn em eucalipto.

O Mn foi o único micronutriente cujo teor foi influenciado pelo estágio fenológico foliar e pela posição de coleta das folhas. As folhas velhas ($447,2 \text{ mg kg}^{-1}$) e localizadas no terço inferior da copa ($387,1 \text{ mg kg}^{-1}$) apresentaram alto teor de Mn. Estas folhas mostraram, em média, 30 % a mais de Mn do que as folhas novas e maduras. No terço inferior, o teor de Mn foi 10 % maior do que o encontrado nos terços médio e superior.

O padrão de distribuição de nutrientes observado neste trabalho se assemelha a outros resultados disponíveis na literatura para espécies de eucalipto (LAMB, 1976; MAGALHÃES; BLUM, 1999; BELLOTE; SILVA, 2000). De acordo com Magalhães e Blum (1999), as diferenças encontradas no teor de nutrientes em relação as posições da copa são explicadas pelo efeito da luminosidade, do teor de hormônios e pela distância entre os compartimentos analisados e as regiões em crescimento. a variação nutricional ao longo da copa está relacionada com a capacidade fotossintética das folhas (BELLOTE; SILVA, 2000).

Quanto aos estádios fenológicos foliares, Magalhães e Blum (1999) afirmam que elementos com maior mobilidade tendem a diminuir de concentração com a maturidade das folhas e, de forma oposta, os nutrientes menos móveis tendem a se concentrar em tecidos senescentes. A mobilidade de nutrientes nas plantas é relatada na literatura por inúmeros

autores. Esta capacidade depende do nutriente, da planta, da disponibilidade do nutriente no solo, dentre outros fatores (LIMA et al., 2011; MARSCHNER, 2012).

No floema, N, P e K são nutrientes com alta mobilidade, por isto, se espera que seus teores sejam menores em folhas senescentes, pois podem ser redistribuídos antes da queda das folhas. O Ca possui baixa mobilidade nas plantas, razão pela qual se acumula sem ser redistribuído para outras partes antes da queda da folha. O Mg, diferente dos resultados obtidos, é considerado um nutriente móvel. Verificou-se que este elemento se acumula em folhas senescentes, se comportando como o Ca. O S é considerado um elemento de baixa mobilidade, mas, neste estudo, ele se distribuiu homogeneamente na copa do eucalipto. O B, como o Ca, é considerado um elemento pouco móvel ou imóvel. Este comportamento foi demonstrado, pois os tecidos senescentes apresentaram alto teor de B. Os micronutrientes Fe, Mn, Cu e Zn são considerados pouco móveis. Entre eles, o Zn demonstrou maior mobilidade, sendo encontrado em maiores concentrações em folhas jovens.

Aos 6 meses de idade, houve grande variação nos teores de macronutrientes (Tabela 12) e de micronutrientes (Tabela 13) foliares, sendo o tratamento COMP o que apresentou os menores teores. As diferenças nutricionais entre tratamentos ocorreram, principalmente, no terço superior da copa, em que os nutrientes K, Ca, Mg e B diferiram entre os contrastes com omissão ou aplicação de micronutrientes, e com manutenção ou remoção de resíduos florestais. Nos terços médio e inferior da copa, o único nutriente a apresentar diferença foi o K, com menor concentração no tratamento COMP.

Apesar das diferenças encontradas aos 6 meses de idade, os teores de todos os nutrientes do terço médio ficaram dentro da faixa considerada adequada para a cultura do eucalipto. Segundo Gonçalves (2011), as faixas ideais de variação dos teores de nutrientes são: N entre 21 e 30 g kg⁻¹, P entre 1,0 e 1,3 g kg⁻¹, K entre 5,5 e 6,0 g kg⁻¹, Ca entre 3,5 e 6,0 g kg⁻¹, Mg entre 2,0 e 3,0 g kg⁻¹, S entre 0,5 e 1,5 g kg⁻¹, B entre 30 e 60 mg kg⁻¹, Zn entre 10 e 18 mg kg⁻¹, Fe entre 70 e 200 mg kg⁻¹, Mn entre 100 e 800 mg kg⁻¹ e Cu entre 7,0 e 10,0 mg kg⁻¹. O único nutriente com teores abaixo do limite adequado foi o B nos tratamentos -B+R e -B-R com 18 mg kg⁻¹.

Figura 9 Teores de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) em folhas de *Eucalyptus grandis*, aos 6 meses de idade, de acordo com o estágio fenológico e posição de amostragem na copa. O tratamento utilizado foi COMP. *Barras na vertical indicam diferença mínima significativa a 5 %

Figura 10 Teores de B (a), Mn (b), Cu (c), Fe (d) e Zn (e) em folhas de *Eucalyptus grandis*, aos 6 meses de idade, de acordo com o estágio fenológico e posição de amostragem na copa. O tratamento utilizado foi COMP. *Barras na vertical indicam diferença mínima significativa a 5 %

Aos 12 meses de idade, não houve diferença entre os tratamentos quanto aos teores de macronutrientes, com exceção do N (Tabela 12). O tratamento COMP não diferiu dos demais tratamentos quanto aos teores de P, K, Ca, Mg e S. O teor de N diferiu entre os contrastes COMP e $-Cu+R$ ($F = 6,04$; $p < 0,05$) e COMP e $-Zn+R$ ($F = 5,24$; $p < 0,05$) no terço superior da copa. O tratamento COMP apresentou teor médio de N de $26,6 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto no $-Cu+R$ foi encontrado $22,2 \text{ g kg}^{-1}$ e, no $-Zn+R$, $22,5 \text{ g kg}^{-1}$. Não houve diferença entre os teores de macronutrientes atribuída à remoção ou à manutenção de resíduos florestais.

Não houve diferença entre os contrastes nos teores de Cu, Fe e Zn foliares (Tabela 13). O teor de B diferiu no contraste COMP e $-B+R$, nas posições média ($F = 4,81$; $p < 0,05$) e inferior ($F = 11,74$; $p < 0,01$) da copa. No terço médio da copa, o teor de B no tratamento COMP foi de $19,2 \text{ mg kg}^{-1}$ e no $-B+R$ de $14,6 \text{ mg kg}^{-1}$. O teor de B no terço inferior da copa foi de $24,7 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento COMP e de $17,0 \text{ mg kg}^{-1}$ no $-B+R$. Assim, a aplicação de B no solo influenciou a nutrição das árvores aos 12 meses pós-plantio.

O teor de Mn foi influenciado pelo manejo de resíduos aos 12 meses de idade, evidenciado nos contrastes de $-B+R$ e $-B-R$ ($F = 4,33$; $p < 0,05$), de $-Cu+R$ e $-Cu-R$ ($F = 7,80$; $p < 0,05$) e de $-Zn+R$ e $-Zn-R$ ($F = 9,31$; $p < 0,05$). A média dos teores de Mn, no terço médio da copa, nos tratamentos com a manutenção de resíduos florestais foi de 189 mg kg^{-1} , enquanto com a remoção foi de 137 mg kg^{-1} . O Zn também foi influenciado pela remoção dos resíduos florestais da colheita ($-Zn+R$ e $-Zn-R$: $F = 4,89$; $p < 0,05$), sendo que o $-Zn-R$ apresentou os maiores teores foliares de Zn ($16,1 \text{ mg kg}^{-1}$) do que o $-Zn+R$ ($11,8 \text{ mg kg}^{-1}$).

Considerando as faixas adequadas de nutrientes para a cultura do eucalipto, verificou-se que todos os nutrientes ficaram dentro dos limites ideais, exceto o B. Os teores de B ficaram abaixo do adequado ($< 30 \text{ mg kg}^{-1}$), mesmo nos tratamentos em que houve a aplicação do fertilizante boratado, sendo a média dos teores de B no terço médio da copa de $16,8 \text{ mg kg}^{-1}$. O suprimento do B é influenciado pela ocorrência de déficit hídrico, devido à baixa mobilidade do elemento na planta. Em períodos secos, a assimilação de B é prejudicada, podendo não atingir a quantidade exigida pelo eucalipto (LEHTO et al., 2010; MATTIELLO et al., 2009b). A boa distribuição de chuvas favoreceu a assimilação de B, até os 6 meses pós-plantio. Nos meses de junho e julho de 2017, houve menor pluviosidade, o que pode ter causado a redução nos teores foliares de B em todos os tratamentos.

Tabela 12 Análise nutricional de macronutrientes em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita, aos 6 e 12 meses de idade, e valores de F dos contrastes de interesse

Terço	6 meses						12 meses					
	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
g kg ⁻¹												
Superior												
COMP	20,9	1,7	4,9	4,3	2,1	0,8	26,6	2,0	6,6	5,7	2,5	1,3
–B+R	26,8	2,0	5,6	5,3	2,5	1,0	23,4	1,7	6,1	6,5	2,5	1,1
–B–R	23,1	2,0	5,5	4,5	2,2	1,0	25,0	2,1	7,1	5,7	2,6	1,1
–Cu+R	22,1	1,8	5,8	4,8	2,2	1,0	22,2	1,8	5,7	4,5	2,2	1,1
–Cu–R	26,4	2,5	6,0	5,4	2,4	1,3	21,8	2,1	6,8	5,2	2,3	1,2
–Zn+R	23,4	2,0	6,3	5,0	2,3	1,2	22,5	1,7	6,5	5,0	2,3	1,0
–Zn–R	24,6	2,1	6,1	4,5	2,2	1,1	23,3	1,9	6,3	5,1	2,6	1,2
F-contraste												
COMP × –B+R	7,13*	2,19 ^{ns}	3,69 ^{ns}	53,36*	12,50*	1,07 ^{ns}	3,19 ^{ns}	1,62 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,99 ^{ns}
COMP × –Cu+R	0,28 ^{ns}	0,18 ^{ns}	6,23*	11,72*	0,78 ^{ns}	1,54 ^{ns}	6,04*	1,28 ^{ns}	1,75 ^{ns}	2,22 ^{ns}	1,47 ^{ns}	0,88 ^{ns}
COMP × –Zn+R	1,26 ^{ns}	1,35 ^{ns}	16,27*	22,98*	5,55*	5,16*	5,24*	1,62 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,75 ^{ns}	0,72 ^{ns}	3,54 ^{ns}
–B+R × –B–R	2,87 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,08 ^{ns}	43,82*	7,03*	5,17 ^{ns}	0,83 ^{ns}	2,42 ^{ns}	2,02 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,00 ^{ns}
–Cu+R × –Cu–R	3,80 ^{ns}	4,03 ^{ns}	0,33 ^{ns}	15,06*	4,25 ^{ns}	5,18 ^{ns}	0,05 ^{ns}	2,00 ^{ns}	2,62 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,22 ^{ns}
–Zn+R × –Zn–R	0,28 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,33 ^{ns}	37,99*	3,12 ^{ns}	5,19 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,94 ^{ns}	2,97 ^{ns}
Médio												
COMP	23,8	1,5	5,4	5,7	2,4	0,8	26,3	1,7	7,5	5,1	2,1	1,0
–B+R	28,5	1,6	6,3	7,2	2,8	1,0	24,5	1,4	6,1	6,6	2,4	1,0
–B–R	28,8	1,6	7,3	6,2	2,6	0,9	23,7	1,4	6,3	6,2	2,6	0,8
–Cu+R	29,2	1,5	6,8	6,3	2,6	1,0	21,0	1,3	6,1	4,9	2,1	0,8
–Cu–R	30,3	1,6	7,2	7,2	2,6	1,5	22,9	1,6	7,9	4,9	2,1	0,8
–Zn+R	26,6	1,5	7,2	6,8	2,6	1,1	22,2	1,4	6,7	4,3	1,9	0,7
–Zn–R	28,9	1,5	7,2	6,1	2,4	1,1	26,3	1,8	6,7	4,4	2,1	0,8
F-contraste												
COMP × –B+R	0,11 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,28 ^{ns}	1,23 ^{ns}	2,07 ^{ns}	4,02 ^{ns}	2,23 ^{ns}	0,01 ^{ns}
COMP × –Cu+R	0,46 ^{ns}	2,02 ^{ns}	9,18*	1,31 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,25 ^{ns}	3,42 ^{ns}	3,32 ^{ns}	2,07 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,05 ^{ns}	1,09 ^{ns}
COMP × –Zn+R	0,00 ^{ns}	1,28 ^{ns}	16,06*	5,21*	1,06 ^{ns}	2,77 ^{ns}	1,74 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,62 ^{ns}	1,24 ^{ns}	2,23 ^{ns}	5,41*
–B+R × –B–R	2,25 ^{ns}	2,22 ^{ns}	12,38*	2,61 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,48 ^{ns}	1,35 ^{ns}
–Cu+R × –Cu–R	0,89 ^{ns}	1,20 ^{ns}	0,77 ^{ns}	1,74 ^{ns}	0,38 ^{ns}	3,93 ^{ns}	0,63 ^{ns}	2,25 ^{ns}	3,69 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,01 ^{ns}
–Zn+R × –Zn–R	0,88 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,09 ^{ns}	2,06 ^{ns}	3,12 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,74 ^{ns}	1,34 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,02 ^{ns}	2,23 ^{ns}	2,28 ^{ns}
Inferior												
COMP	23,8	1,5	5,4	5,6	2,4	0,8	23,2	1,4	6,8	8,4	2,6	0,9
–B+R	28,5	1,6	5,7	6,5	2,8	1,0	19,9	1,4	7,2	9,5	2,8	1,0
–B–R	28,8	1,6	7,3	6,2	2,6	0,9	20,3	1,1	6,6	8,1	2,8	0,8
–Cu+R	29,2	1,5	6,8	6,4	2,6	1,0	18,1	0,0	5,9	7,5	2,4	0,7
–Cu–R	30,3	1,6	7,2	6,7	2,6	1,5	20,3	1,4	6,7	6,8	2,3	0,9
–Zn+R	26,6	1,5	7,2	7,0	2,6	1,1	19,3	1,2	5,8	6,6	2,3	0,8
–Zn–R	28,9	1,5	7,2	6,1	2,4	1,1	21,9	1,3	6,1	6,9	2,4	0,9
F-contraste												
COMP × –B+R	7,17*	0,42 ^{ns}	0,14 ^{ns}	1,77 ^{ns}	7,97*	0,96 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,09 ^{ns}	1,65 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,75 ^{ns}
COMP × –Cu+R	9,37*	0,09 ^{ns}	4,67 ^{ns}	1,25 ^{ns}	2,74 ^{ns}	1,49 ^{ns}	2,90 ^{ns}	2,80 ^{ns}	0,72 ^{ns}	1,28 ^{ns}	0,46 ^{ns}	3,00 ^{ns}
COMP × –Zn+R	2,53 ^{ns}	0,05 ^{ns}	7,81*	3,91 ^{ns}	2,50 ^{ns}	2,13 ^{ns}	1,45 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,94 ^{ns}	4,42 ^{ns}	1,53 ^{ns}	0,33 ^{ns}
–B+R × –B–R	0,02 ^{ns}	0,06 ^{ns}	6,67*	0,22 ^{ns}	2,20 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,24 ^{ns}	2,80 ^{ns}	0,01 ^{ns}	2,08 ^{ns}
–Cu+R × –Cu–R	0,41 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,10 ^{ns}	4,03 ^{ns}	0,72 ^{ns}	3,34 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,20 ^{ns}	3,00 ^{ns}
–Zn+R × –Zn–R	1,75 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,48 ^{ns}	2,50 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,72 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,75 ^{ns}

Nota: O símbolo (*) indica diferença a 5 %; (^{ns}) não significativo.

Tabela 13 Análise nutricional de micronutrientes em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita, aos 6 e 12 meses de idade, e valores de F dos contrastes de interesse

Terço	6 meses					12 meses				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Fe	Mn	Zn
mg kg ⁻¹										
Superior										
COMP	34,2	7,0	54,7	298,1	20,7	17,4	9,0	200,5	198,5	17,6
-B+R	18,2	9,5	56,3	280,7	21,9	14,1	8,7	114,8	196,2	14,3
-B-R	17,6	8,9	61,6	323,0	20,1	10,4	8,0	108,6	190,9	15,8
-Cu+R	37,9	8,3	59,3	324,6	20,3	14,4	7,7	128,6	180,0	17,6
-Cu-R	33,1	8,0	70,0	290,9	23,5	16,1	8,6	154,0	169,3	16,7
-Zn+R	39,2	8,5	60,6	319,9	21,8	15,2	6,9	128,6	202,3	15,8
-Zn-R	42,1	9,0	62,7	276,5	21,4	17,0	9,5	83,9	188,7	20,0
F-contraste										
COMP × -B+R	24,00*	6,57*	0,16 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,26 ^{ns}	1,93 ^{ns}	0,06 ^{ns}	2,26 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,92 ^{ns}
COMP × -Cu+R	2,67 ^{ns}	1,73 ^{ns}	1,29 ^{ns}	1,01 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,59 ^{ns}	1,24 ^{ns}	1,37 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,00 ^{ns}
COMP × -Zn+R	2,67 ^{ns}	2,51 ^{ns}	2,10 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,89 ^{ns}	4,29 ^{ns}	1,37 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,48 ^{ns}
-B+R × -B-R	0,17 ^{ns}	0,37 ^{ns}	1,65 ^{ns}	2,59 ^{ns}	0,52 ^{ns}	2,57 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,48 ^{ns}
-Cu+R × -Cu-R	1,50 ^{ns}	0,07 ^{ns}	6,85*	1,64 ^{ns}	1,72 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,12 ^{ns}
-Zn+R × -Zn-R	0,67 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,27 ^{ns}	2,72 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,62 ^{ns}	5,72*	1,78 ^{ns}	0,09 ^{ns}	1,92 ^{ns}
Médio										
COMP	46,8	8,0	56,2	369,3	19,6	19,2	8,7	131,5	181,3	14,5
-B+R	18,7	8,1	48,3	329,1	20,8	14,6	9,8	131,5	209,9	13,4
-B-R	18,2	8,2	52,3	394,1	20,5	11,9	7,8	123,6	168,6	13,4
-Cu+R	54,2	8,1	53,7	410,9	21,0	17,6	6,6	131,5	185,5	13,5
-Cu-R	43,6	7,2	58,5	344,4	21,6	16,4	7,6	140,7	130,1	13,9
-Zn+R	46,8	7,8	52,8	395,6	20,0	19,2	6,3	131,5	174,2	11,8
-Zn-R	43,6	8,3	56,3	316,3	20,4	18,7	9,5	91,0	113,6	16,1
F-contraste										
COMP × -B+R	53,14*	1,19 ^{ns}	2,54 ^{ns}	0,92 ^{ns}	3,32 ^{ns}	4,81*	0,64 ^{ns}	0,00 ^{ns}	2,08 ^{ns}	0,27 ^{ns}
COMP × -Cu+R	0,34 ^{ns}	1,58 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,57 ^{ns}	2,81 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,21 ^{ns}
COMP × -Zn+R	0,34 ^{ns}	1,81 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,00 ^{ns}	3,55 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,13 ^{ns}	2,48 ^{ns}
-B+R × -B-R	1,36 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,64 ^{ns}	2,15 ^{ns}	0,21 ^{ns}	1,64 ^{ns}	2,24 ^{ns}	0,06 ^{ns}	4,33*	0,00 ^{ns}
-Cu+R × -Cu-R	0,34 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,94 ^{ns}	1,04 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,06 ^{ns}	7,80*	0,05 ^{ns}
-Zn+R × -Zn-R	0,34 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,90 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,05 ^{ns}	6,13*	2,84 ^{ns}	9,31*	4,89*
Inferior										
COMP	47,7	8,0	55,3	369,3	19,6	24,7	8,4	115,8	261,0	14,9
-B+R	19,3	8,1	75,5	329,1	20,8	17,0	8,6	138,7	281,3	14,9
-B-R	18,0	8,2	140,8	394,1	20,5	15,3	6,8	125,1	241,7	13,4
-Cu+R	54,5	8,1	93,1	410,9	21,0	21,7	7,0	155,3	251,0	12,6
-Cu-R	43,9	8,8	116,4	344,4	21,6	22,0	7,0	141,8	204,0	14,4
-Zn+R	45,7	7,8	89,1	395,6	20,0	26,3	6,6	159,0	261,3	11,8
-Zn-R	44,0	8,3	85,4	316,3	20,4	25,3	8,5	122,7	219,3	12,8
F-contraste										
COMP × -B+R	55,44*	0,01 ^{ns}	1,56 ^{ns}	1,31 ^{ns}	0,26 ^{ns}	11,74*	0,04 ^{ns}	1,16 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,00 ^{ns}
COMP × -Cu+R	3,21 ^{ns}	0,01 ^{ns}	4,12 ^{ns}	1,41 ^{ns}	0,33 ^{ns}	1,80 ^{ns}	1,13 ^{ns}	2,81 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,63 ^{ns}
COMP × -Zn+R	0,29 ^{ns}	0,05 ^{ns}	3,51 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,55 ^{ns}	1,86 ^{ns}	3,22 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,42 ^{ns}
-B+R × -B-R	0,10 ^{ns}	0,01 ^{ns}	4,77*	3,44 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,55 ^{ns}	1,86 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,21 ^{ns}
-Cu+R × -Cu-R	7,74*	0,32 ^{ns}	0,61 ^{ns}	3,59 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,23 ^{ns}	1,26 ^{ns}	0,44 ^{ns}
-Zn+R × -Zn-R	0,19 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,02 ^{ns}	5,11*	0,03 ^{ns}	0,20 ^{ns}	2,08 ^{ns}	2,06 ^{ns}	1,01 ^{ns}	0,21 ^{ns}

Nota: O símbolo (*) indica diferença a 5 %; (^{ns}) não significativo.

2.3.5. Crescimento das árvores

Dentre as variáveis dendrométricas, houve diferença entre os tratamentos apenas para a variável DAP aos 12 e 15 meses pós-plantio (Tabela 14).

Tabela 14 Valores de F dos contrastes de interesse para as variáveis de D_c (diâmetro de copa), ICOP (índice de copa), H (altura), DAP (diâmetro à altura do peito) e volume de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais aos 6, 9, 12 e 15 meses de idade

Contrastes			D _c		ICOP		H				DAP			Volume	
			6		6		6	9	12	15	9	12	15	12	15
COMP	×	-B+R	4,02 ^{ns}		1,55 ^{ns}		0,15 ^{ns}	1,79 ^{ns}	3,08 ^{ns}	0,43 ^{ns}	2,23 ^{ns}	5,16*	5,27*	2,73 ^{ns}	2,58 ^{ns}
COMP	×	-Cu+R	0,41 ^{ns}		0,16 ^{ns}		0,02 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,60 ^{ns}	1,85 ^{ns}	1,72 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,21 ^{ns}
COMP	×	-Zn+R	0,02 ^{ns}		0,00 ^{ns}		0,00 ^{ns}	1,75 ^{ns}	1,58 ^{ns}	0,61 ^{ns}	1,01 ^{ns}	7,40*	4,55*	2,73 ^{ns}	2,80 ^{ns}
-B+R	×	-B-R	0,46 ^{ns}		0,00 ^{ns}		0,33 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,09 ^{ns}
-Cu+R	×	-Cu-R	0,28 ^{ns}		0,47 ^{ns}		0,40 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,09 ^{ns}
-Zn+R	×	-Zn-R	0,00 ^{ns}		0,02 ^{ns}		0,01 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,27 ^{ns}	1,09 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,47 ^{ns}

Nota: (*) significativo a 5 %; (ns) não significativo.

O crescimento inicial das plantas, observado pela mensuração do diâmetro médio da copa e pelo cálculo do ICOP, não apresentou diferenças entre os tratamentos (Tabela 14). O tratamento COMP e o -Zn (+R e -R) foram os tratamentos com os menores crescimentos (Figura 11). Os tratamentos com o maior crescimento foram -B+R e -B-R, mas com pequena expressividade (<5 %). O manejo de resíduos florestais não influenciou o crescimento das plantas até o sexto mês pós-plantio.

Figura 11 Crescimento do diâmetro (a) e do índice de copa (b) de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais, aos 6 meses de idade. *As barras indicam o desvio padrão amostral dos dados em relação à média

A avaliação do índice de clorofila, realizada aos 6 meses pós-plantio, mostrou que a média do índice de *clorofila a* (Índice Falker = 36) não diferiu entre os tratamentos. Contudo, a avaliação evidenciou diferença nos níveis de *clorofila b* entre os tratamentos COMP e -B+R ($F = 4,96$; $p < 0,05$), os quais apresentaram índices Falker médios de 20 e 16, respectivamente (Figura 12). Os tratamentos -B+R e -B-R apresentaram baixos teores foliares de B, sendo que os teores encontrados puderam ser classificados como baixos para a cultura do eucalipto.

As clorofilas são pigmentos responsáveis por converter a radiação luminosa em energia nas formas de ATP e NADPH e, por isto, se relacionam com a eficiência fotossintética das plantas (NEVES et al., 2005). Ahmed et al. (2014) estudaram os efeitos da aplicação do B sobre o conteúdo de clorofila em plantas de algodão e verificaram efeitos positivos, mas não significativos, em resposta ao aumento das doses aplicadas. Os autores explicaram que as plantas deficientes em B apresentam acúmulo de amido nas folhas, o que pode deteriorar a estrutura dos cloroplastos, resultando na diminuição da assimilação de CO_2 e do conteúdo de clorofila.

A falta de B também é capaz de afetar a membrana dos cloroplastos, interrompendo o transporte de elétrons e resultando na fotoinibição (FÁVARO et al., 2011). Silva et al. (2014), ao avaliarem os efeitos da omissão de nutrientes em clones do híbrido *E. urophylla* × *E. grandis*, mostraram que a omissão de B causou perda de 15 % no teor total de clorofila relativamente ao tratamento completo. Essa perda, segundo os autores, apesar de não significativa, trouxe o segundo maior decréscimo em clorofila, ficando atrás apenas das respostas devido à omissão de N.

Figura 12 Teores de *Clorofila a* e *b*, mensuradas por meio de clorofilômetro Falker, em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais, aos 6 meses de idade. A tabela indica os valores de F dos contrastes de interesse. O símbolo (*) indica diferença a 5 %

A altura das plantas não apresentou diferença aos 6, 9, 12 e 15 meses de idade (Tabela 14). O DAP médio dos tratamentos diferiu aos 12 e 15 meses (Tabela 14). Os contrastes COMP e -B+R ($F=5,16$; $p<0,05$) e COMP e -Zn+R ($F = 7,40$; $p<0,05$) diferiram entre si, sendo os tratamentos com omissão de nutrientes os que apresentaram os maiores crescimentos. Aos 12 meses, o DAP médio do tratamento COMP foi de 4,0 cm e dos tratamentos -B+R e -Zn+R foi de 4,4 cm, havendo um incremento de crescimento de 10 % (Figura 13). Aos 15 meses de idade, estas diferenças foram pequenas ($< 5 \%$), com o DAP médio de 5,6 cm do tratamento COMP e de 5,9 cm dos tratamentos -B+R e -Zn+R.

Figura 13 Altura (a) e DAP (diâmetro à altura do peito) (b) das árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais, aos 6, 9, 12 e 15 meses de idade. *As barras na vertical indicam o desvio padrão amostral dos dados em relação à média

O volume de madeira com casca não diferiu entre os tratamentos aos 12 e aos 15 meses de idade (Tabela 14). Os tratamentos -B (+R e -R) e -Zn (+R e -R) foram os que apresentaram os maiores incrementos, com média de volume de $6,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aos 12 meses e de $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aos 15 meses de idade (Figura 14). Os tratamentos COMP e -Cu (+R e -R) apresentaram os menores volumes, com médias de $5,6$ e $6,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aos 12 meses e de $12,9$ e $13,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aos 15 meses de idade, respectivamente. A diminuição no volume, apesar de não significativa, ocasionou redução de 17 % do volume do tratamento COMP e de 12 % no tratamento -Cu (+R e -R). Do mesmo modo que a omissão de nutrientes, a remoção dos resíduos florestais não influenciou o crescimento volumétrico até os 15 meses de idade.

Existem poucos trabalhos na literatura explorando os efeitos da omissão de micronutrientes na cultura do eucalipto. Smith (2007) testou o efeito da omissão de

macronutrientes e de micronutrientes em *Eucalyptus nitens* sob um Latossolo na Austrália. O autor verificou que os crescimentos em altura, diâmetro e volume foram influenciados apenas pela omissão de N, P e B. A omissão de B causou reduções de 10 % na altura, de 12 % no diâmetro e de 31 % no volume das árvores. A omissão de Ca, K, Zn e Cu não apresentou efeitos sobre o crescimento das árvores. Este autor enfatizou a importância do B para a qualidade do fuste da árvore, pois a omissão de B, além de reduzir a produtividade, causou perda de dominância apical. O teor de B foliar se correlacionou positivamente com a perda da dominância ($r = 0,73$, $p < 0,01$). Neste estudo, apesar da baixa disponibilidade de B no solo que se refletiu no teor foliar das árvores aos 6 meses de idade, não houve diferença de crescimento atribuída ao B.

Figura 14 Volume de madeira com casca produzido por uma floresta de eucalipto influenciada pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita, aos 12 (a) e 15 (b) meses de idade. *As barras na vertical indicam o desvio padrão amostral dos dados em relação à média

O IAF não apresentou diferença aos 12 meses de idade, sendo a média dos tratamentos igual a $3,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Figura 15). Os tratamentos com os maiores IAF foram -Zn (+R e -R) e -B (+R e -R), apresentando IAF médio de $3,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. O IAF dos tratamentos COMP foi de $3,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e, de -Cu (+R e -R), de $3,3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, o que representa queda de 10 e 8 %, respectivamente, em relação aos tratamentos de maior IAF. Bazani (2014) estudou o IAF de um povoamento de eucalipto fertilizado com diferentes fontes de P, e verificou diferença na quantidade de folhas de 70 % aos 14 meses e de 30 % aos 24 meses de idade. Segundo o autor, a diferença na quantidade de folhas das árvores foi atribuída à interação entre as sazonalidades climáticas,

principalmente a diminuição da precipitação pluvial, e a fertilização. Assim, como na época de avaliação as árvores não passaram por um período de seca, isto pode ter atenuado os efeitos reais dos tratamentos.

Figura 15 Índice de área foliar de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita, aos 12 meses de idade

2.3.6. Biomassa e acúmulo de nutrientes

A produção de biomassa de folhas, de galhos, de casca e total não foi influenciada pela omissão de micronutrientes, nem pela remoção de resíduos florestais (Tabela 15). Apenas a produção de lenho diferiu entre os tratamentos COMP e -Zn+R ($F=5,09$; $p < 0,05$) aos 12 meses de idade. O tratamento -Zn+R ($2,9 \text{ t ha}^{-1}$) apresentou produção de lenho 20 % maior do que o tratamento COMP ($2,4 \text{ t ha}^{-1}$).

Tabela 15 Valores de F dos contrastes de interesse para as variáveis biomassa de folha, de galho, de lenho e de casca e biomassa total de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita aos 12 meses de idade

Contrastes	Folha	Galho	Lenho	Casca	Total
COMP × -B+R	2,30 ^{ns}	2,32 ^{ns}	3,41 ^{ns}	2,36 ^{ns}	2,87 ^{ns}
COMP × -Cu+R	0,21 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,45 ^{ns}
COMP × -Zn+R	2,40 ^{ns}	2,46 ^{ns}	5,09*	2,17 ^{ns}	3,48 ^{ns}
-B+R × -B-R	0,06 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,06 ^{ns}
-Cu+R × -Cu-R	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}
-Zn+R × -Zn-R	0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,01 ^{ns}

Nota: (*) significativo a 5 %; (ns) não significativo.

A produção média foi de 2,0 t ha⁻¹ de folha, 3,1 t ha⁻¹ de galho, 2,7 t ha⁻¹ de lenho e 0,5 t ha⁻¹ de casca, totalizando 8,3 t ha⁻¹ de biomassa aérea aos 12 meses de idade (Figura 16). O tratamento COMP apresentou pequena redução na produção de biomassa aérea, correspondendo a 12 % em relação ao tratamento de maior crescimento (-Zn+R). A produção de lenho e de biomassa de folha foram as variáveis que mais diminuíram neste tratamento. A partição da biomassa não foi influenciada pelos tratamentos. Em média, as folhas corresponderam a 23 %, os galhos a 37 %, as cascas a 6 % e o lenho a 33 % da biomassa total de todos os tratamentos.

Figura 16 Biomassa aérea (a) e partição dos compartimentos aéreos (b) de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita, aos 12 meses de idade

Os teores de macronutrientes não apresentaram diferenças entre os tratamentos (Tabela 16). As folhas apresentaram altos teores de macronutrientes, principalmente, de N, P, K e S. A casca apresentou elevados teores de Ca e de Mg.

Nos compartimentos aéreos foram identificadas quatro ordens de concentração de micronutrientes. Para o B e o Mn, a ordem foi casca > folha > galho > lenho; para o Cu, folha > galho > lenho > casca; para o Fe, casca > folha > lenho > galho; e para o Zn, folha > casca > galho > lenho. Assim, verificou-se que o Zn e o Cu se concentraram principalmente nas folhas e, o Fe, o B e o Mn, na casca das árvores. Os micronutrientes se apresentaram pouco concentrados no lenho e no galho das árvores até os 12 meses de idade.

O teor de B apresentou decréscimo nas folhas das árvores (COMP e -B+R: F = 8,75; p<0,05). A média do teor de B neste compartimento foi de 20,5 mg kg⁻¹ no COMP e, no -B+R,

de $15,2 \text{ mg kg}^{-1}$. O teor de Cu foi alterado na casca (COMP e $-\text{Cu}+\text{R}$: $F = 35,09$; $p < 0,01$). O COMP apresentou teor médio de Cu neste compartimento de $3,0 \text{ mg kg}^{-1}$ e, no $-\text{Cu}+\text{R}$ de $2,0 \text{ mg kg}^{-1}$. O Zn teve alteração em seus teores no galho das árvores (COMP e $-\text{Zn}+\text{R}$: $F = 5,12$; $p < 0,05$), com teor de $5,4 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento COMP e, de $2,9 \text{ mg kg}^{-1}$, no $-\text{Zn}+\text{R}$.

O maior estoque de micronutrientes foi encontrado nas folhas, concentrando mais de 30 % do B, do Cu, do Fe, do Mn e do Zn presente na parte aérea das árvores aos 12 meses de idade (Figura 17). O galho estocou mais de 40 % do Cu presente na parte aérea, sendo a principal fonte de Cu entre os compartimentos analisados. A casca apresentou-se como uma importante fonte de Fe, estocando cerca de 25 % do total encontrado na parte aérea. No lenho, o acúmulo médio de B, Cu, Fe e Zn foi de 19 %. Apenas o Mn apresentou menos de 10 % de seu estoque total contido neste compartimento aos 12 meses de idade.

Figura 17 Estoque de micronutrientes na biomassa aérea de um povoamento de eucalipto, considerando todos os tratamentos, aos 12 meses de idade

Tabela 16 Teores de macronutrientes e de micronutrientes nos compartimentos de lenho, de galho, de casca e de folha em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita, aos 12 meses de idade

Tratamento	Macronutriente						Micronutriente				
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
Lenho											
COMP	1,7	0,7	1,8	0,8	0,2	0,7	7,3	2,8	36,8	16,3	3,7
–B+R	1,7	0,7	1,6	0,8	0,3	0,4	7,7	2,6	33,0	15,7	4,0
–B–R	1,6	0,6	1,7	0,8	0,2	0,4	7,3	2,8	31,7	14,7	4,7
–Cu+R	1,8	0,8	1,9	0,8	0,4	0,4	7,0	2,8	32,8	18,3	5,3
–Cu–R	1,7	0,9	1,8	1,0	0,3	0,5	7,3	3,6	29,3	18,7	4,7
–Zn+R	1,9	0,8	1,8	0,8	0,3	0,4	7,7	2,8	25,0	20,3	3,3
–Zn–R	2,2	1,2	1,8	0,9	0,3	0,6	7,0	2,8	35,5	19,3	3,7
F-contraste											
COMP × –B+R	0,00 ^{ns}	0,35 ^{ns}	1,06 ^{ns}	0,18 ^{ns}	1,87 ^{ns}	3,83 ^{ns}	1,31 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,13 ^{ns}
COMP × –Cu+R	0,14 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,04 ^{ns}	7,47*	3,83 ^{ns}	1,31 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,61 ^{ns}	3,26 ^{ns}
COMP × –Zn+R	0,56 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,47 ^{ns}	6,32*	1,31 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,92 ^{ns}	2,43 ^{ns}	2,09 ^{ns}
–B+R × –B–R	0,14 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,04 ^{ns}	4,20 ^{ns}	0,31 ^{ns}	1,31 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,52 ^{ns}
–Cu+R × –Cu–R	0,14 ^{ns}	1,40 ^{ns}	0,12 ^{ns}	1,12 ^{ns}	4,20 ^{ns}	0,31 ^{ns}	1,31 ^{ns}	1,25 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,52 ^{ns}
–Zn+R × –Zn–R	0,56 ^{ns}	8,75*	0,03 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,47 ^{ns}	2,81 ^{ns}	5,25*	0,00 ^{ns}	1,51 ^{ns}	0,15 ^{ns}	2,09 ^{ns}
Galho											
COMP	3,4	0,2	1,9	5,3	0,8	0,5	9,7	8,3	24,4	103,7	5,4
–B+R	2,8	0,2	1,6	4,5	0,8	0,5	8,8	6,7	21,9	77,3	4,4
–B–R	2,8	0,2	2,0	4,2	0,6	0,4	8,9	6,1	18,1	62,7	3,8
–Cu+R	2,5	0,2	1,6	4,5	0,7	0,4	9,4	6,7	22,1	89,0	3,6
–Cu–R	3,1	0,2	1,6	4,3	0,8	0,4	9,3	6,6	20,1	74,0	4,3
–Zn+R	2,8	0,2	1,5	3,9	0,6	0,4	9,2	5,5	26,8	90,3	2,9
–Zn–R	2,8	0,2	1,8	4,3	0,7	0,4	9,4	7,3	20,5	79,3	4,2
F-contraste											
COMP × –B+R	2,90 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,17 ^{ns}	2,40 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,20 ^{ns}	1,52 ^{ns}	0,48 ^{ns}
COMP × –Cu+R	6,52*	1,91 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,74 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,55 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,79 ^{ns}
COMP × –Zn+R	2,90 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,18 ^{ns}	2,12 ^{ns}	1,52 ^{ns}	1,55 ^{ns}	0,74 ^{ns}	2,02 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,39 ^{ns}	5,12*
–B+R × –B–R	0,00 ^{ns}	1,91 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,21 ^{ns}
–Cu+R × –Cu–R	2,90 ^{ns}	1,91 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,36 ^{ns}
–Zn+R × –Zn–R	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,78 ^{ns}	1,21 ^{ns}	0,27 ^{ns}	2,19 ^{ns}
Casca											
COMP	3,8	0,5	3,0	9,1	2,7	0,5	22,0	3,0	270,5	282,3	8,7
–B+R	3,6	0,4	3,1	9,1	2,6	0,5	19,0	2,4	170,7	279,3	6,3
–B–R	3,5	0,4	3,2	8,5	2,4	0,5	15,7	2,3	269,5	224,0	10,4
–Cu+R	3,4	0,4	2,8	9,5	2,7	0,4	22,3	2,2	362,4	291,0	7,9
–Cu–R	3,7	0,6	2,9	9,4	2,8	0,5	17,3	2,3	193,8	246,7	9,8
–Zn+R	3,7	0,4	3,2	9,0	2,3	0,4	17,3	2,0	242,8	253,3	7,7
–Zn–R	3,6	0,5	2,9	9,6	2,6	0,5	19,7	2,1	172,7	244,3	7,3
F-contraste											
COMP × –B+R	0,48 ^{ns}	1,66 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,00 ^{ns}	3,47 ^{ns}	20,27*	1,76 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,90 ^{ns}
COMP × –Cu+R	2,35 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,04 ^{ns}	35,09*	1,49 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,09 ^{ns}
COMP × –Zn+R	0,08 ^{ns}	2,59 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,00 ^{ns}	6,28*	0,14 ^{ns}	8,40*	50,53*	0,14 ^{ns}	1,30 ^{ns}	0,14 ^{ns}
–B+R × –B–R	0,08 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,55 ^{ns}	4,29 ^{ns}	0,90 ^{ns}	1,73 ^{ns}	4,73 ^{ns}	2,68 ^{ns}
–Cu+R × –Cu–R	1,24 ^{ns}	1,00 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,13 ^{ns}	1,23 ^{ns}	9,64*	0,51 ^{ns}	5,03*	3,03 ^{ns}	0,55 ^{ns}
–Zn+R × –Zn–R	0,31 ^{ns}	1,66 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,12 ^{ns}	2,60 ^{ns}	0,55 ^{ns}	2,10 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Folha											
COMP	25,1	1,7	7,0	6,4	2,5	1,1	20,5	8,8	114,0	213,6	16,0
–B+R	22,4	1,5	6,4	7,6	2,5	1,0	15,2	9,3	119,4	229,1	14,4
–B–R	23,0	1,5	7,6	6,7	3,1	0,9	12,6	7,6	98,7	200,4	14,6
–Cu+R	20,5	1,3	5,9	5,6	2,1	0,9	17,8	7,1	91,6	205,6	14,6
–Cu–R	22,0	1,7	7,2	5,6	2,3	1,0	18,1	8,0	103,4	167,9	15,3
–Zn+R	21,3	1,5	6,3	5,3	2,1	0,9	20,3	6,6	85,3	212,6	13,1
–Zn–R	24,2	1,7	6,3	5,5	2,3	1,1	20,2	9,4	121,2	142,2	16,7
F-contraste											
COMP × –B+R	0,84 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,34 ^{ns}	4,58 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,50 ^{ns}	8,75*	0,14 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,43 ^{ns}
COMP × –Cu+R	3,34 ^{ns}	2,36 ^{ns}	1,38 ^{ns}	2,47 ^{ns}	4,42 ^{ns}	4,50 ^{ns}	2,33 ^{ns}	2,15 ^{ns}	2,26 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,33 ^{ns}
COMP × –Zn+R	1,88 ^{ns}	0,85 ^{ns}	0,54 ^{ns}	4,58 ^{ns}	4,42 ^{ns}	4,50 ^{ns}	0,01 ^{ns}	3,70 ^{ns}	3,76 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,71 ^{ns}
–B+R × –B–R	0,07 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,74 ^{ns}	2,89 ^{ns}	4,42 ^{ns}	1,12 ^{ns}	2,11 ^{ns}	1,98 ^{ns}	1,92 ^{ns}	1,64 ^{ns}	0,01 ^{ns}
–Cu+R × –Cu–R	0,61 ^{ns}	2,36 ^{ns}	1,94 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,11 ^{ns}	2,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,63 ^{ns}	2,81 ^{ns}	0,11 ^{ns}
–Zn+R × –Zn–R	1,23 ^{ns}	0,85 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1,11 ^{ns}	4,50 ^{ns}	0,00 ^{ns}	5,82*	5,83*	9,81*	2,40 ^{ns}

Nota: (*) significativo a 5 %; (ns) não significativo.

O acúmulo de nutrientes total médio dos tratamentos da parte aérea foi 136 kg ha⁻¹. Entre os macronutrientes, o N (58 kg ha⁻¹), o Ca (32 kg ha⁻¹) e o K (24 kg ha⁻¹) foram os que tiveram os maiores estoques (Figura 18), enquanto o Mg (9 kg ha⁻¹) o P (6 kg ha⁻¹) e o S (4,5 kg ha⁻¹) foram os que apresentaram os menores. O acúmulo total de macronutrientes na parte aérea das árvores, mostrou-se pouco influenciado pelos contrastes aos 12 meses de idade. Entretanto, quando se analisou de forma detalhada os compartimentos aéreos verificou-se diferenças (Tabela 17).

O acúmulo de N e K variou em função da alteração na biomassa de folha, sendo homogênea a distribuição destes nutrientes nos demais compartimentos. O acúmulo de P aumentou nos tratamentos com omissão de Zn no lenho, passando de 2 kg ha⁻¹ para 3 kg ha⁻¹ no tratamento com remoção de resíduos florestais. O estoque de Ca no lenho foi diminuído nos tratamentos com a omissão de micronutrientes e com a remoção dos resíduos florestais da colheita. Com a remoção dos resíduos florestais, o Mg sofreu redução de seus estoques no lenho (-B+R e -B-R = 16,84; p<0,01 e -Cu+R e -Cu-R: F = 10,19; p<0,01). As diferenças nos teores totais de S foram encontradas nos compartimentos galho e lenho. O lenho foi a única variável da biomassa impactada pela fertilização (Tabela 15), assim, apesar da concentração não ter se alterado (Tabela 16), a biomassa dos compartimentos apresentou grande influência sobre as reservas de nutrientes aos 12 meses.

O estoque total de B na parte aérea das árvores não foi alterado aos 12 meses de idade (Tabela 17). O acúmulo médio de B nos tratamentos foi de 90 g ha⁻¹, variando entre 87 e 99 g ha⁻¹. Quando analisado de forma desagregada, o B estocado foi de 28 g ha⁻¹ no galho, de 40 g ha⁻¹ na folha, de 10 g ha⁻¹ na casca e de 19 g ha⁻¹ no lenho. O lenho apresentou diferença quanto ao estoque de B na planta (COMP e -B+R: F = 9,47; p<0,05), entretanto com a omissão do B houve aumento nos estoques. O tratamento COMP apresentou estoque de 16 g ha⁻¹ de B no lenho, enquanto o -B+R apresentou 21,8 g ha⁻¹.

O acúmulo de Cu foi de 44 g ha⁻¹ aos 12 meses de idade. A distribuição do Cu na planta foi: 17 % no lenho, 46 % no galho, 3 % na casca e 34 % na folha. Os estoques de Cu apresentaram diferenças nos compartimentos galho e casca (Figura 19). A omissão de Cu ocasionou redução de 20 % no Cu alocado nos galhos das árvores, passando de 24 g ha⁻¹ no COMP para 20 g ha⁻¹ no -Cu+R.

O Zn estocado na parte aérea das árvores foi de 55 g ha⁻¹, sendo que o tratamento COMP apresentou 54 g ha⁻¹ e, o -Zn+R, 45 g ha⁻¹. No entanto, o tratamento com a omissão de Zn associado a remoção de resíduos florestais da colheita apresentou aumento nos estoques de Zn, principalmente na folha. O estoque médio de Zn na folha dos tratamentos foi de 29 g ha⁻¹,

enquanto a média do tratamento $-Zn-R$ foi de 33,3 g ha⁻¹. O contraste entre $-Zn+R$ e $-Zn-R$ apresentou diferença nos compartimentos folha ($F=7,95$; $p<0,05$), galho ($F=113,31$; $p<0,01$) e lenho ($F=14,14$; $p<0,01$), apresentando maiores estoques no tratamento com remoção de resíduos florestais da colheita.

A maior quantidade de micronutrientes estocada pelas árvores, aos 12 meses de idade, foi de Mn e Fe. O estoque desses nutrientes foi de 830 g ha⁻¹ de Mn e de 470 g ha⁻¹ de Fe. A folha estocou, em média, 40 % do Fe e 50 % do Mn presente na parte aérea das plantas. Os estoques de Fe e de Mn nas árvores apresentaram maiores diferenças em resposta ao manejo de resíduos florestais da colheita, sendo menores os estoques destes nutrientes nos tratamentos em que se removeu os resíduos florestais. As diferenças no estoque de Mn foram evidenciadas no galho e na folha e o Fe na casca e no galho.

Tabela 17. Valores de F dos contrastes de interesse para os estoques de macronutrientes e de micronutrientes de árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes ($-B$, $-Cu$ e $-Zn$) associado a presença (+R) e ausência ($-R$) de resíduos florestais da colheita aos 12 meses de idade

F-contraste		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Lenho												
COMP	× $-B+R$	5,64*	2,52 ^{ns}	1,80 ^{ns}	11,18*	20,79*	3,83 ^{ns}	9,47*	2,18 ^{ns}	2,44 ^{ns}	3,94 ^{ns}	11,02*
COMP	× $-Cu+R$	3,38 ^{ns}	3,76 ^{ns}	2,74 ^{ns}	3,07 ^{ns}	29,94*	7,81*	0,81 ^{ns}	1,78 ^{ns}	0,07 ^{ns}	6,28 ^{ns}	30,86*
COMP	× $-Zn+R$	11,89*	7,95 ^{ns}	4,53 ^{ns}	4,29 ^{ns}	7,49*	15,30*	7,35*	4,70 ^{ns}	2,50 ^{ns}	22,26*	2,98 ^{ns}
$-B+R$	× $-B-R$	0,59 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,63 ^{ns}	16,84*	3,83 ^{ns}	0,77 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,96 ^{ns}	2,22 ^{ns}
$-Cu+R$	× $-Cu-R$	0,21 ^{ns}	3,76 ^{ns}	0,10 ^{ns}	4,29 ^{ns}	10,19*	1,95 ^{ns}	0,28 ^{ns}	8,06*	1,14 ^{ns}	0,07 ^{ns}	2,76 ^{ns}
$-Zn+R$	× $-Zn-R$	4,60 ^{ns}	35,91*	0,06 ^{ns}	2,05 ^{ns}	1,87 ^{ns}	25,29*	1,02 ^{ns}	0,00 ^{ns}	13,44*	0,41 ^{ns}	14,14*
Galho												
COMP	× $-B+R$	9,02*	3,46 ^{ns}	1,13 ^{ns}	2,83 ^{ns}	7,11*	1,58 ^{ns}	0,03 ^{ns}	7,99*	0,01 ^{ns}	23,62*	5,47*
COMP	× $-Cu+R$	39,35*	17,54*	5,91*	11,31*	11,11*	19,42*	0,06 ^{ns}	19,63*	1,71 ^{ns}	8,72*	66,86*
COMP	× $-Zn+R$	12,49*	3,46 ^{ns}	12,21*	32,95*	25,00*	14,26*	0,38 ^{ns}	60,13*	21,35*	2,60 ^{ns}	194,89*
$-B+R$	× $-B-R$	0,07 ^{ns}	10,61*	23,63*	4,36 ^{ns}	32,11*	19,42*	0,03 ^{ns}	8,43*	20,71*	22,68*	11,55*
$-Cu+R$	× $-Cu-R$	21,11*	31,18*	0,09 ^{ns}	0,66 ^{ns}	16,00*	0,40 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	3,48 ^{ns}	16,07*	19,66*
$-Zn+R$	× $-Zn-R$	0,01 ^{ns}	0,22 ^{ns}	28,27*	7,11*	18,78*	3,57 ^{ns}	0,57 ^{ns}	40,21*	44,80*	9,66*	113,31*
Casca												
COMP	× $-B+R$	4,12 ^{ns}	0,46 ^{ns}	5,99*	6,14*	3,52 ^{ns}	4,20 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,00 ^{ns}	5,73*	6,14*	0,61 ^{ns}
COMP	× $-Cu+R$	0,00 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,05 ^{ns}	2,03 ^{ns}	1,15 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,66 ^{ns}	5,73*	31,20*	1,84 ^{ns}	0,01 ^{ns}
COMP	× $-Zn+R$	2,76 ^{ns}	3,19 ^{ns}	5,99*	2,98 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,05 ^{ns}	0,40 ^{ns}	5,73*	0,73 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,61 ^{ns}
$-B+R$	× $-B-R$	0,55 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,05 ^{ns}	1,63 ^{ns}	1,80 ^{ns}	1,05 ^{ns}	5,98*	0,64 ^{ns}	23,49*	8,11*	29,92*
$-Cu+R$	× $-Cu-R$	0,85 ^{ns}	7,41*	0,45 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,07 ^{ns}	1,05 ^{ns}	6,11*	0,64 ^{ns}	60,98*	2,16 ^{ns}	7,24*
$-Zn+R$	× $-Zn-R$	0,14 ^{ns}	9,38*	0,79 ^{ns}	0,81 ^{ns}	1,80 ^{ns}	4,20 ^{ns}	2,30 ^{ns}	0,28 ^{ns}	12,41*	0,07 ^{ns}	0,19 ^{ns}
Folha												
COMP	× $-B+R$	1,56 ^{ns}	1,66 ^{ns}	2,52 ^{ns}	15,62*	6,66*	0,51 ^{ns}	0,50 ^{ns}	7,24*	7,62*	7,79*	1,78 ^{ns}
COMP	× $-Cu+R$	1,15 ^{ns}	1,37 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,32 ^{ns}	2,05 ^{ns}	0,24 ^{ns}	2,23 ^{ns}	2,51 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,00 ^{ns}
COMP	× $-Zn+R$	0,02 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,00 ^{ns}	3,94 ^{ns}	2,70 ^{ns}	2,51 ^{ns}	3,46 ^{ns}	0,04 ^{ns}
$-B+R$	× $-B-R$	0,01 ^{ns}	0,12 ^{ns}	2,70 ^{ns}	1,96 ^{ns}	5,47*	0,51 ^{ns}	4,19 ^{ns}	5,03*	4,53 ^{ns}	3,46 ^{ns}	0,08 ^{ns}
$-Cu+R$	× $-Cu-R$	0,98 ^{ns}	5,48*	5,02*	0,13 ^{ns}	0,94 ^{ns}	2,05 ^{ns}	0,23 ^{ns}	3,22 ^{ns}	3,28 ^{ns}	5,41*	0,66 ^{ns}
$-Zn+R$	× $-Zn-R$	2,45 ^{ns}	2,69 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,79 ^{ns}	2,05 ^{ns}	0,01 ^{ns}	16,29*	18,49*	17,54*	7,95*
Total												
COMP	× $-B+R$	1,13 ^{ns}	2,31 ^{ns}	1,75 ^{ns}	4,26 ^{ns}	6,67*	0,06 ^{ns}	0,39 ^{ns}	1,09 ^{ns}	1,39 ^{ns}	3,18 ^{ns}	1,17 ^{ns}
COMP	× $-Cu+R$	1,39 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,00 ^{ns}	7,20*	0,05 ^{ns}	2,30 ^{ns}	0,77 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,05 ^{ns}
COMP	× $-Zn+R$	0,04 ^{ns}	1,61 ^{ns}	0,51 ^{ns}	1,74 ^{ns}	0,36 ^{ns}	4,75 ^{ns}	2,59 ^{ns}	4,93 ^{ns}	0,07 ^{ns}	1,55 ^{ns}	3,47 ^{ns}
$-B+R$	× $-B-R$	0,04 ^{ns}	0,20 ^{ns}	2,33 ^{ns}	1,53 ^{ns}	0,00 ^{ns}	3,40 ^{ns}	2,23 ^{ns}	3,79 ^{ns}	0,25 ^{ns}	6,96*	0,04 ^{ns}
$-Cu+R$	× $-Cu-R$	1,28 ^{ns}	5,49*	1,79 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,99 ^{ns}	3,72 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,65 ^{ns}	2,98 ^{ns}	3,65 ^{ns}	0,65 ^{ns}
$-Zn+R$	× $-Zn-R$	2,11 ^{ns}	10,44*	0,37 ^{ns}	2,46 ^{ns}	4,78 ^{ns}	9,63*	0,01 ^{ns}	12,80*	1,37 ^{ns}	7,62*	11,34*

Nota: (*) significativo a 5 %; (ns) não significativo.

Figura 18 Estoque e distribuição de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita aos 12 meses de idade

Figura 19 Estoque e distribuição de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) em árvores de eucalipto influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais da colheita aos 12 meses de idade

2.4. Conclusões

Os teores de B e Zn no solo foram influenciados pela aplicação ou pela omissão de micronutrientes aos 6 meses pós-plantio. A manutenção de resíduos florestais da colheita não causou o aumento dos teores disponíveis de B, Cu e Zn no solo. Contudo, a remoção dos resíduos florestais aumentou a complexação de Cu na MO, assim como diminuiu as formas solúveis de B no solo.

A nutrição das árvores não foi influenciada pela remoção ou pela manutenção de resíduos florestais aos 6 meses de idade. Entretanto, a remoção dos resíduos reduziu os teores foliares de Mn aos 12 meses. A posição de coleta da folha na copa não influenciou a determinação dos teores de micronutrientes, com exceção para o Mn, que se concentrou no terço inferior da copa. Aos 12 meses, não houve diferença entre os tratamentos nos teores de macronutrientes e de micronutrientes no terço médio da copa, exceto para o B. A omissão do B reduziu os teores foliares deste micronutriente aos 6 meses pós-plantio. As diferenças entre os teores de B nos tratamentos com a aplicação e com a omissão diminuíram aos 12 meses, mas ainda com diferenças significativas.

O crescimento em DAP diferiu entre os contrastes aos 12 e aos 15 meses de idade. As demais variáveis de crescimento não diferiram até os 15 meses. Os tratamentos –Zn e –B apresentaram o maior crescimento, e os tratamentos –Cu e COMP, o menor. A biomassa de lenho foi a única fração da biomassa aérea a diferir entre os tratamentos, sendo o tratamento com omissão de Zn o que apresentou o maior valor.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, W.; ZIA, M. H.; MALHI, S. S.; NIAZ, A.; SAIFULLAH. Boron Deficiency in Soils and Crops: A Review. **Crop Plant**, p. 77–114, 2012. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/crop-plant/boron-deficiency-in-soils-and-crops-a-review>>.
- AHMED, N.; ABID, M. RASHID, A.; ABOU-SHANAB, R.; AHMAD, F. Influence of Boron Nutrition on Membrane Leakage, Chlorophyll Content and Gas Exchange Characteristics in Cotton (*Gossypium Hirsutum* L.). **Journal of Plant Nutrition**, v. 37, n. 14, p. 2302–2315, 2014.
- ALLOWAY, B. J. **Heavy Metals in Soils**. 3. ed. Glasgow: Springer, 2013.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

- BAZANI, J. H. **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. Dissertação (Mestrado) - ESALQ/USP, 2014.
- BELL, R. W.; DELL, B. **Micronutrients for Sustainable Food, Feed, Fibre and Bioenergy Production**. International Fertilizer Industry Association. 2008.
- BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. da. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONÇALVES, J. L. de M.; BENEDETTI, V. (Orgs.). **Nutrição e fertilização florestal**. 1. ed. Piracicaba: IPEF-Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000, p. 105–133.
- DELL, B.; XU, D. Diagnosis of zinc deficiency in seedlings of a tropical eucalypt (*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake). **Plant and Soil**, v. 176, p. 329–332, 1995.
- DELL, B.; BYWATERS, T. Copper deficiency in young *Eucalyptus maculata* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 19, n. 4, p. 427–431, 1989.
- DELL, B.; HARDY, G.; BURGESS, T. Health and nutrition of plantation eucalypts in Asia. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 70, n. 2, p. 131–138, 2008. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2s2.057149100202-&partnerID=tZOtx3y1>>.
- DELL, B., XU, D.; ROGERS, C; HUANG, L. Micronutrient disorders in eucalypt plantations: Causes, symptoms, identification, impact and management. In: WEI, R.; XU, D. (Orgs.). **Eucalyptus Plantations: Research, Management and Development**. London: World Scientific Publishing, 2001a, p. 241–252.
- DELL, B.; MALAJCZUK, N.; XU, D.; GROVE, T. S. **Nutrient Disorders in Plantation Eucalypts**. 2nd ed. Canberra, Australia: ACIAR, 2001b.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ed ver. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.
- FALKER. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030)**. Disponível em: <http://www.falker.com.br/produto_download.php?id=4>. Acesso em: 6 jun. 2017.
- FÁVARO, E. A. VITORINO, A. C. T.; DANIEL, O.; NOVELINO, J. O. Boro e Magnésio na produção de óleo essencial de *Corymbia citriodora* e teor de clorofila. **Floresta**, v. 41, n. 1, p. 39–46, 2011. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/floresta/article/-view/21178/13971>>. Acesso em: 4 out. 2017.
- FERREYRA, F. F. H.; SILVA, F. R. Frações de boro e índices de disponibilidade em solos do Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 227–236, 1999.

- FURTINI NETO, A. E.; MORETTI, B.S.; BATISTA, R.O.; RESENDE, M.L.V. Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras. In: PRADO, R. de M.; WADT, P. G. S. (Orgs.). **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**. Jaboticabal: Jaboticabal FCAV/CAPES, 2014.
- GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. **Plant and soil**, v. 193, p. 35–48, 1997. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1023/A:1004203723343>>.
- GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. A determinação de equações volumétricas na engenharia florestal. **IPEF Série Técnica**, v. 9, n. 26, p. 1–36, 1993.
- GONÇALVES, J. L. de M. Fertilização de plantação de eucalipto. In: GONÇALVES, J. L. de M.; PULITO, A. P.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; SILVA, L.D. (Orgs.). Campinas: **Anais do Encontro Brasileiro de Silvicultura**, 2011, p. 342.
- GONÇALVES, J. L. DE M.; ALVARES, C. A.; GONÇALVES, T. D.; MOREIRA, R. M.; MENDES, J. C. T.; GAVA, J. L. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 94, p. 187–201, 2012.
- GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>>.
- GONÇALVES, J. L. de M.; VALERI, S. V. Eucaliptos e Pinus. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. da; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. de (Orgs.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. 3. ed. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001, p. 600.
- HE, Z. L.; YANG, X. E.; STOFFELLA, P. J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 19, n. 2–3, p. 125–140, 2005.
- JIN-YUN, J.; MARTENS, D. C.; ZELAZNY, L. W. Distribution and Plant Availability of Soil Boron Fractions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 2–5, 1987.
- LAMB, D. Variations in the foliar concentrations of Macro and Micro elements in a fast-growing tropical eucalypt. **Plant and Soil**, v. 45, 1976.
- LEHTO, T.; RUUHOLA, T.; DELL, B. Boron in forest trees and forest ecosystems. **Forest Ecology and Management**, v. 260, n. 12, p. 2053–2069, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.028>>.
- LIMA, R. L. S. de; SEVERINO, L. S.; CAZETTA, J. O.; AZEVEDO, C. A. V. de; SOFIATTI, V.; ARRIEL, N. H. C. Redistribuição de nutrientes em folhas de pinhão-mansão entre estádios fenológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1175–1179, 2011.

- MAGALHÃES, L. M S.; BLUM, W. E. H. Concentração e distribuição de nutrientes nas folhas de espécies florestais, na Amazônia ocidental. **Floresta e Ambiente**, v. 6, n. 1, p. 127–137, 1999. Disponível em: <<http://www.geocities.ws/floramrural/p0127.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2017.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.
- MAQUERE, V. **Dynamics of mineral elements under a fast-growing eucalyptus plantation in Brazil. Implications for soil sustainability**. Silviculture, forestry. AgroParisTech, 2008.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. Amsterdam Boston: Academic Press, 2012.
- MATTIELLO, E M.; RUIZ, H. A.; SILVA, I. R. da; GUERRA, P. de C.; ANDRADE, V. M. de. Características fisiológicas e crescimento de clones de eucalipto em resposta ao boro. **Revista Árvore**, v. 33, n. 5, p. 821–830, 2009a. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v33n5/v33n5a05.pdf>>.
- MATTIELLO, E. M.; RUIZ, H. A.; SILVA, I. R. da; BARROS, N. F. de; NEVES, J. C. L.; BEHLING, M. Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1281–1290, 2009b.
- NACHTIGALL, G. R.; NOGUEIROL, R. C.; ALLEONI, L. R. F. Extração sequencial de Mn e Zn em solos em função do pH e adição de cama-de-frango. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 240–249, 2009.
- NACHTIGALL, G. R.; NOGUEIROL, R. C.; ALLEONI, L. R. F. Formas de cobre em solos de vinhedos em função do pH e da adição de cama-de-frango. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 3, p. 427–434, 2007.
- NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, T. L. F. Correlação entre características de Latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 965–971, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v28n6/22917.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2017.
- NEVES, O. S. C.; CARVALHO, J. G.; MARTINS, F. A. D.; PÁDUA, T. R. P. de; PINHO, P. J. de. Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, nitrogênio, enxofre, ferro e manganês do algodoeiro herbáceo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 5, p. 517–521, 2005.
- POGGIANI, F; STAPE, J L. Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais. p. 100, 2003.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.

- RIEUWERTS, J. S.; THORNTON, I.; FARAGO, M. E.; ASHMORE, M. R. Factors influencing metal bioavailability in soils: Preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. **Chemical Speciation and Bioavailability**, v. 10, n. 2, p. 61–75, 1998.
- ROCHA, J. H. T. **Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de *Eucalyptus grandis***. Dissertação (Mestrado) - ESALQ/USP, 2014.
- ROCHA, J. H. T.; GONÇALVES, J. L. de M.; GAVA, J. L.; GODINHO, T. de O.; MELO, E. A. S. C.; BAZANI, J. H.; HUBNER, A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; WICHERT, M. P. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a *Eucalyptus* plantation over two short rotations. **Forest Ecology and Management**, v. 379, p. 1–10, 2016.
- RODRIGUES, F. A. V.; BARROS, N. F. de; NEVES, J. C. L.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Disponibilidade de cobre para mudas de eucalipto em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 1923–1932, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v34n6/17.pdf>>.
- RODRIGUES, F. A. V.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; ALVAREZ, V. H. V. NOVAIS, R. F. Disponibilidade de zinco para mudas de eucalipto em solos de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1249–1257, 2012.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Frações químicas e oxidáveis da MO do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. **Revista agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1529–1538, 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v51n9/0100-204X-pab-51-091529.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2017.
- SALEEM, M.; KHANIF, Y.M.; FAUZIAH, I.; SAMSURI, A.W.; HAFEEZ, B. Importance of Boron for Agriculture Productivity: A Review. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, v. 1, n. 8, p. 293–300, 2011. Disponível em: <<http://www.interesjournals.org/IRJAS>>.
- SAS INSTITUTE. SAS user's guide: statistics. p. 528, 2011. Disponível em: <<https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/base/proctat93m1.pdf>>.
- SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. 1. ed. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.
- SEQUEIRA, C. H.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; ALLEY, M. Micronutrient Soil-Test Levels and *Eucalyptus* Foliar Contents. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, n. 4, p. 475–488, 2011. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103624.2011.-542227>>.
- SILVA, I.; FERREIRA, E.; PEREIRA, I.; GONÇALVES, J.; SILVA, E.; VELOSO, R.; LAIA, M. Growth, Chlorophyll Content and Photosynthetic Capacity of *Eucalyptus* Clones Under Nutrition Omission. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 8, n. July, p. 87–92, 2014.

- SILVA, M. L. de S.; VITTI, G. C. Fracionamento de metais pesados em solo contaminado antes e após cultivo de arroz. **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1385–1391, 2008.
- SILVEIRA, M. L.; ALLEONI, L. R. F.; O'CONNOR, G. A.; CHANG, A. C. Heavy metal sequential extraction methods-A modification for tropical soils. **Chemosphere**, v. 64, n. 11, p. 1929–1938, 2006.
- SILVEIRA, P. M. da; CUNHA, A. A. da. Variabilidade de micronutrientes, MO e argila de um Latossolo submetido a sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1325–1332, 2002.
- SMITH, T. E. Poor Tree Form in *Eucalyptus nitens* Linked to Boron Deficiency. In: XU, FANGSEN *et al* (Orgs.). **Advances in Plant and Animal Boron Nutrition**. Wuhan: Springer, 2007, p. 163–169.
- SOAREAS, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F. Adsorção de boro em solos ácidos em função da variação do pH. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, p. 111–120, 2008.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**, v. 8, p. 1–104, 1955.
- USA. Environmental Protection Agency. Method 3051A: **Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils**. p. 1–30, 2007.
- VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Biomassa e exportação de nutrientes pela colheita do eucalipto. In: VIEIRA, M. (Org.). **Silvicultura do eucalipto no Brasil**. 1. ed. Santa Maria: Ed. UFMS, 2016, p. 243–270.
- WANG, N.; YANG, C.; PAN, Z.; LIU, Y.; PENG, S. Boron deficiency in woody plants: various responses and tolerance mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. October, p. 1–14, 2015.
- WOLF, B. Improvements in the azomethine-H method for the determination of boron. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 5, n. 1, p. 39–44, 1974.
- YAMADA, T. Boro: será que estamos aplicando a dose suficiente para o adequado desenvolvimento das plantas? **Informações Agronômicas - POTAFOS**, n. 90, p. 20, 2000.
- ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v. 79, p. 117–161, 1997.

3. REFLEXO DA NUTRIÇÃO SOBRE A INCIDÊNCIA E A SEVERIDADE DA FERRUGEM DO EUCALIPTO

RESUMO

A perda média de crescimento volumétrico atribuída ao ataque da ferrugem no Brasil é de 20 %, gerando danos econômicos de cerca de US\$ 2,0 milhões por ano. O manejo nutricional é uma estratégia importante e pouco conhecida no âmbito fitopatológico. Os nutrientes podem afetar os mecanismos de defesa das plantas, pois exercem funções ligadas a produção de lignina, fenóis, fitoalexinas e outras moléculas de defesa. Os micronutrientes, neste contexto, são utilizados em diversas vias de produção destas moléculas na forma de cofatores e de ativadores enzimáticos. Assim, com este estudo foi acompanhado o comportamento epidemiológico da ferrugem do eucalipto em uma floresta, de 6 meses de idade, com omissão de micronutrientes na fertilização e remoção de resíduos florestais da colheita. Comparou-se a omissão de micronutrientes (B, Cu e Zn) associado a remoção ou manutenção de resíduos florestais. Foram avaliadas mensalmente, a infestação e a severidade do ataque da ferrugem do eucalipto, por meio de uma escala diagramática. Foram realizadas análises químicas foliares de macronutrientes e de micronutrientes, no início da infestação, para a diagnose nutricional das árvores. A ausência da fertilização aumentou a absorção de K que, junto com o Cu, se correlacionou de forma negativa com a severidade, com a infestação e com a área abaixo da curva de progresso da doença. As perdas devido ao ataque da ferrugem decresceram em 25 % o diâmetro à altura do peito, em 35 % a altura, em 35 % o índice de área foliar e em 60 % o volume das árvores. O tratamento com menor infestação e severidade do ataque da ferrugem foi aquele com omissão de Zn. Este tratamento diferiu dos demais nos teores de K e de Ca foliares. O tratamento com omissão de Zn foi o que apresentou maior velocidade de maturação foliar. Isto sugere um aumento na capacidade de escape ao ataque nos 15 primeiros dias pós-lançamento de folhas, período de maior suscetibilidade foliar à ferrugem. De modo geral, a nutrição se relacionou de forma significativa com a doença, destacando a importância do suprimento adequado do K e do Cu para a redução da suscetibilidade do *Eucalyptus grandis* ao ataque da ferrugem.

Palavras-chave: Nutrição florestal; Micronutrientes; *Puccinia psidii*; Estádio foliar

ABSTRACT

The loss of volumetric growth caused by the attack of eucalyptus rust is 20 % in Brazil, generating economic damages of approximately US\$ 2.0 million annually. Nutritional management is an important strategy in phytopathology; however, it is little known. Nutrients can affect defense mechanisms of plants, as in the production of lignin, phenols, phytoalexins and other defense molecules. Therefore, micronutrients are used in several producing pathways of these molecules as cofactors and enzymatic activators. The epidemiology of eucalyptus

rust was studied in a forest with micronutrients omission and forest residues removal from 6 to 12 months of age. Micronutrients omission (B, Cu and Zn) associated with the removal or maintenance of forest residues from the wood harvest was compared. Infestation and severity of the eucalyptus rust were monthly evaluated by a diagrammatic scale. Leaf chemical analysis of macronutrients and micronutrients at the beginning of the infestation was performed. The omission of fertilization increased the uptake of K, which as Cu correlated negatively with severity, infestation and area under disease progress curve. The losses due to rust attack decreased DBH by 25 %, plant height by 35 %, LAI by 35 % and volume by 60 %. The treatment with omission of Zn was the least infested by rust. This treatment differed from the others in terms of K and Ca contents in the leaves. The treatment with Zn omission also presented higher speed of leaf maturation. This suggests an increase of escape capacity in the first 15 days of leaf expansion, period of greater leaf susceptibility to eucalyptus rust. Thus, nutrition was related to the occurrence of the disease, emphasizing the importance of adequate supply of K and Cu to reduce susceptibility of *Eucalyptus grandis* to rust attack.

Keywords: Forest nutrition; Micronutrients; *Puccinia psidii*; Leaf stages

3.1. Introdução

A área mundial de floresta perturbada por pragas, doenças e severidades climáticas, entre 2000 e 2010, foi de 141,6 milhões de hectares. Este número representa 5 % da área total levantada de 2,81 bilhões de hectares. As doenças foram responsáveis pelo distúrbio de 12 milhões de hectares de florestas no mundo, contribuindo significativamente com as perdas em área foliar e taxa fotossintética (VAN LIEROP et al., 2015).

Existem diversas doenças foliares que afetam a produtividade de plantações de eucalipto. A ferrugem causada pelo fungo *Puccinia Psidii* Winter é um dos principais patógenos. Causador de pústulas amareladas localizadas na superfície foliar e no pecíolo, a ferrugem leva à necroses, deformações e morte de tecidos afetados, principalmente, em plantas jovens de até 1,5 ano de idade e com altura inferior aos 3-4 metros (ALFENAS et al., 2009).

As perdas de produtividade pelo ataque da ferrugem dependem da severidade do ataque, podendo prejudicar em mais de 50 % o crescimento anual das árvores (ALVARES et al., 2017; FURTADO et al., 2009). Masson et al. (2013) realizaram uma estimativa da perda econômica gerada pelo ataque da ferrugem nos principais estados plantadores de florestas do Brasil. Dos 3,3 milhões de hectares plantados por estes estados, cerca de 270 mil hectares estão sob risco de ataque. Considerando um dano médio de 20 % à estas florestas, com produtividade de 30 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, as perdas econômicas seriam maiores que US\$ 2,0 milhões por ano no Brasil.

As doenças são respostas da interação entre a planta, o patógeno e o meio. O controle de doenças só pode ser alcançado efetivamente quando a interação entre estes três fatores primários é determinada e compreendida. Os nutrientes são um dos fatores do meio que se relacionam com doenças, pois podem controlar a resistência ou a tolerância das plantas, assim como determinam a capacidade de sobrevivência dos patógenos. Portanto, embora pouco reconhecida, a nutrição é um fator ambiental de grande relevância para o controle de doenças (ELMER; DATNOFF, 2014; HUBER, 1996).

A resistência ao ataque de doenças é a habilidade que o hospedeiro possui em limitar a penetração, desenvolvimento e reprodução do agente patogênico. A tolerância é a capacidade do hospedeiro em manter seu crescimento apesar da infestação (DORDAS, 2008). A resistência depende do genótipo, da idade e de condições edáficas de ambos organismos. Embora a resistência de plantas seja controlada geneticamente, ela pode ser afetada por condições ambientais, principalmente por deficiências ou excessos nutricionais (GRAHAM, 1983; MARSHNER, 2012).

A diminuição dos ataques de doenças em plantas é um dos benefícios menos conhecidos do uso de micronutrientes. Com o aumento de deficiências de micronutrientes, se tornam cada vez mais comuns estudos relacionando o seu uso adequado ao controle biológico de infestações (GRAHAM, 1983; HUBER, 1996; BELL; DELL, 2008). O efeito dos micronutrientes sobre a severidade de doenças é atribuída ao seu envolvimento fisiológico e bioquímico nas plantas. Os micronutrientes podem afetar a resistência à doenças indiretamente. As plantas deficientes não só apresentam defesa prejudicada, mas podem se tornar mais atrativas, já que muitos metabólitos como açúcares e aminoácidos, se concentram nas células (DORDAS, 2008).

O Zn pode ter inúmeros efeitos sobre o aumento ou diminuição da severidade do ataque de patógenos. A aplicação de Zn, em geral, reduz a severidade de doenças devido ao seu efeito tóxico direto sobre o patógeno, ou por meio do seu efeito no metabolismo das plantas. A função do Zn na planta envolve a produção de proteínas e de amido. A baixa concentração de Zn leva ao acúmulo de aminoácidos e açúcares, o que aumenta a atratividade do hospedeiro. O Zn também atua como ativador da enzima Cu/Zn-SOD, a qual está envolvida na proteção da integridade das membranas contra oxidação. Membranas degradadas podem acumular compostos de baixo peso molecular, favorecendo a patogênese (GRAHAM; WEBB, 1991, DORDAS, 2008).

O B e o Cu se relacionam diretamente com a formação e estabilização da parede celular, com a permeabilidade da membrana e com o metabolismo de fenóis e lignina. O B

promove rigidez e estabilidade à parede celular, dando forma às células (MATOH; KOBAYASHI, 2002; MARSCHNER, 2012). O Cu atua diretamente na via de biossíntese de fenóis e lignina, sendo responsável pela formação da principal barreira mecânica contra a penetração nos tecidos (GRAHAM, 1983; GRAHAM; WEBB, 1991; MARSCHNER, 2012). Assim, a presença de ambos envolve inúmeros mecanismos de resistência física da planta e servem como impedimento à invasão do patógeno.

A severidade de muitas doenças pode ser reduzida por meio da melhora no manejo nutricional. Isto pode ser alcançado modificando a disponibilidade ou melhorando a eficiência de absorção de nutrientes pela planta. A disponibilidade de nutrientes pode ser modificada pela utilização de fertilizantes, mudando fatores ambientais (pH, umidade, etc.), densidade de plantas e por métodos de preparo de solo. Portanto, quando adotado de forma eficiente, o controle nutricional de doenças pode trazer melhorias à produtividade da cultura (HUBER, 1996; ELMER; DATNOFF, 2014).

Desta forma, a hipótese do trabalho é que a nutrição adequada com micronutrientes diminui a suscetibilidade das árvores ao ataque por ferrugem. Com este trabalho objetivou-se avaliar os reflexos da omissão e aplicação de B, Cu e Zn sobre a nutrição das árvores e a infestação do ataque de *Puccinia Psidii* Winter em um povoamento de *Eucalyptus grandis*.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Caracterização da área experimental, tratamentos e delineamento experimental

Estão descritos nas seções 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4 desta dissertação.

3.2.2. Avaliações

3.2.2.1. Índice de Infecção por ferrugem

Para a caracterização da área experimental, quanto ao Índice de Infecção esperado por ferrugem, foi empregado o modelo matemático proposto por Ruiz et al. (1989) (Equação 4). O Índice de Infecção por ferrugem foi calculado diariamente, com os dados climatológicos de temperatura máxima e tempo de molhamento foliar e depois compilado em valores médios mensais. O tempo de molhamento foliar foi estimado considerando-se as horas do dia com umidade relativa do ar maior ou igual a 90 %.

$$II = -32,263 + 3,699 \cdot T + 0,461 \cdot H - 0,0018 \cdot TH - 0,0903 \cdot T^2 - 0,0068 \cdot H^2$$

Equação 4

$$(R^2=0,77; p<0,0001)$$

Em que: II = Índice de infecção; T = temperatura máxima (°C); e H = período de molhamento foliar (h).

3.2.2.2. Avaliação de incidência e de severidade da doença

A incidência e a severidade da ferrugem do eucalipto foram avaliadas mensalmente entre janeiro e junho de 2017, período de alta incidência da doença. As avaliações de severidade foram realizadas utilizando como parâmetro a escala diagramática proposta por Takahashi (2002) e modificada por Zamprogno et al. (2008) (Figura 20). A escala classifica o ataque da ferrugem em quatro níveis de sintomas: 0 – Sem sintomas; 1 – Poucas pústulas; 2 – Muitas pústulas e esporulação intensa; e 3 – Muitas pústulas, esporulação intensa e perda da dominância apical. Os resultados mensais das avaliações de severidade foram utilizados no cálculo do índice de infestação da doença segundo a metodologia descrita por McKinney (1923).

Figura 20 Escala diagramática para a avaliação de severidade de ferrugem do eucalipto de acordo com Zamprogno et al. (2008) (Imagem: Alvares et al., 2017)

3.2.2.3. Análise epidemiológica

Para a análise epidemiológica da ferrugem do eucalipto foi determinada a proporção da severidade da doença (y) ao longo do tempo. Para a relação incidência *versus* tempo foram utilizados valores médios de incidência por tratamento e por avaliação. A partir dos dados de incidência da doença ao longo do tempo foram obtidos os valores totais da Área Abaixo da

Curva de Progresso da Doença (AACPD), considerando a epidemia total em cada tratamento (Equação 5).

$$AACPD = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i + y_{i+1}}{2} \right) \cdot (t_{i+1} - t_i) \quad \text{Equação 5}$$

Em que: y = proporção da severidade da doença; $t_{i+1} - t_i$ = intervalo entre duas avaliações; n = número total de observações.

3.2.2.4. Quantificação de dano do ataque

Os danos causados pela ferrugem do eucalipto foram quantificados a partir das variáveis de crescimento, altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP), volume de madeira com casca e índice de área foliar (IAF), mensurados aos 6, 9, 12 e 15 meses de idade. Aos 12 meses, foram realizadas amostragens destrutivas em todos os tratamentos, e ajustadas equações de crescimento volumétrico (Equação 6) e de IAF (Equação 7).

$$Vol_{cc} = 0,00005877 \cdot DAP^{1,743} \cdot H^{0,934} \quad (R^2_{aj.} = 0,976; p < 0,01) \quad \text{Equação 6}$$

$$IAF = 1,59654 + 0,01696 \cdot DAP^2 H \quad (R^2_{aj.} = 0,866; p < 0,01) \quad \text{Equação 7}$$

Em que: DAP (cm) = Diâmetro a altura do peito; H (m) = Altura total; Vol_{cc} (m³) = Volume de madeira com casca; IAF (m² m⁻²) = Índice de área foliar.

3.2.2.5. Análise nutricional

Para a determinação do estado nutricional das plantas no início da infestação, folhas consideradas fisiologicamente desenvolvidas foram coletadas aos 6 meses pós-plantio. Foram colhidas folhas do 3º e 4º pares dos ramos no terço médio-superior e nos quatro quadrantes cardiais. Em cada parcela, em cinco árvores de DAP médio, foram colhidas quatro folhas por quadrante e em cinco árvores, totalizando 80 folhas por parcela. As folhas colhidas foram acondicionadas em sacos plásticos e secas em estufa a 65 °C até atingirem massa constante. Após a secagem, as folhas foram processadas em moinho tipo Wiley e determinados macronutrientes e micronutrientes segundo o procedimento descrito por Malavolta et al. (1997).

3.2.2.6. Maturação foliar

Para acompanhamento do desenvolvimento e da maturação foliar, dez folhas por parcela foram escolhidas no terço médio-superior e nos quatro quadrantes da planta, totalizando 40 observações por tratamento. Os primórdios foliares da extremidade dos galhos foram marcados com uma fita, de forma a não prejudicar o crescimento das folhas e dos galhos. Para a padronização da escolha das folhas foram marcados primórdios com comprimento médio de 4 cm. A largura e o comprimento foram mensurados com o auxílio de um gabarito graduado (1 cm) e uma câmera fotográfica, no momento da marcação, 5, 10 e 30 dias após a escolha das folhas. Em laboratório, as imagens foram processadas com o auxílio do software *Image J versão 1.x* (SCHNEIDER et al., 2012).

3.2.3. Análise estatística

Os resultados foram aferidos para verificação da existência de “outliers”, de normalidade (Shapiro-Wilk, $p=0,05$) e de homogeneidade de variâncias. Quando necessário, os dados foram transformados segundo o método de potência ótima de Box-Cox. Foram realizadas análises descritivas e de variância (ANOVA) dos dados e, quando constatada diferença entre tratamentos, as médias foram comparadas por meio da análise de contrastes de interesse ($p=0,05$). Os dados foram analisados por meio do programa estatístico SAS (9.3) (SAS INSTITUTE, 2011).

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1. Índice de Infecção por ferrugem

O período de menor probabilidade de incidência da ferrugem foi entre os meses de setembro e de dezembro de 2016, com o índice de infecção por ferrugem médio de 3,6 (Figura 21). Esse período foi caracterizado por temperaturas máximas próximas aos 27 °C e período de molhamento foliar inferior a 10 h. O índice esperado de infestação por ferrugem foi elevado no mês de janeiro (4,9) e no período entre abril e julho de 2017 (média de infestação esperada = 8,3). Neste período, observou-se média de molhamento foliar de 12 h e temperatura máxima média de 22 °C. O favorecimento ambiental da ferrugem ocorre em temperaturas máximas variando entre 18 e 25 °C (temperatura ótima = 23 °C) e prolongados períodos de molhamento

foliar (períodos maiores que 6 h por 5-7 dias) (MASSON et al., 2013; GONÇALVES et al., 2013).

Figura 21 Temperatura máxima média, período de molhamento foliar e índice esperado de infestação por ferrugem do eucalipto na área experimental, desde o plantio até o período final da infestação. *Barras na vertical indicam o desvio padrão da média

A infestação teve início no mês de janeiro de 2017, pois as plantas jovens, com aproximadamente 6 meses, foram muito suscetíveis à ferrugem. Aos 12 meses, junho de 2017, apesar das condições climáticas favorecerem o surto da doença, as plantas encontravam-se menos suscetíveis ao ataque, devido ao crescimento em altura das árvores (média = 5 m). Os ataques da ferrugem mais severos ocorrem em plantios jovens entre 3 e 12 meses de idade (MASSON et al., 2013). A ferrugem ataca plantas jovens com altura inferior a 4 m, em tecidos tenros como primórdios foliares, terminais de galhos e hastes (FIGUEIREDO, 2001; BOAVA et al., 2010a). Quando atingem os 4 m de altura, as plantas se tornam menos susceptíveis devido à alteração do microclima que favorece a infecção (MASSON et al., 2013).

3.3.2. Avaliação de incidência e severidade da doença

A avaliação do ataque foi realizada ao longo de todo o período de infestação (Tabela 18). O número de plantas sadias diferiu nos contrastes COMP e –Cu+R ($F=4,88$; $p<0,05$) e COMP e –Zn+R ($F=9,57$; $p<0,01$). O tratamento COMP foi o mais atacado pela ferrugem, com apenas 2 % de plantas sadias, enquanto no –Cu+R a ferrugem não atingiu 12 % das plantas e, no –Zn+R, 16 %. A quantidade de plantas atacadas pela ferrugem nos níveis 1, 2 e 3 não apresentaram diferenças entre os contrastes. Em média, 40 % das plantas foram atacadas em nível 1, 40 % em nível 2 e 10 % em nível 3.

A incidência média da ferrugem do eucalipto foi influenciada pela fertilização mineral. O tratamento –Zn+R apresentou a menor infestação (média = 30 %) e severidade do ataque da ferrugem (média = 0,9). O tratamento COMP diferiu do –Zn+R e apresentou infestação de 39 % ($F = 6,1$; $p<0,05$) e severidade média de 1,2 ($F = 7,4$; $p<0,05$). O tratamento –Cu+R apresentou incidência média de 37 % e, o –B+R, de 32 %, não diferindo dos demais tratamentos. A severidade média dos tratamentos –Cu+R e –B+R foi de 1,0.

Tabela 18 Índice de infestação e de severidade da ferrugem (*Puccinia psidii*) em povoamento de eucalipto influenciado pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) e ausência (–R) de resíduos florestais da colheita

Tratamentos	Sadias (0)	Nível de infestação			Índice de Infestação	Severidade média
		1	2	3		
		%				
COMP	2	40	45	13	39,2	1,2
–B+R	8	40	37	14	34,4	1,1
–B–R	12	42	36	10	30,9	1,0
–Cu+R	12	34	40	14	36,1	1,1
–Cu–R	2	45	43	10	38,2	1,1
–Zn+R	16	39	40	5	29,4	0,9
–Zn–R	11	49	30	10	30,6	0,9
F-contraste						
COMP × –B+R	1,76 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,21 ^{ns}	0,04 ^{ns}	1,50 ^{ns}	1,30 ^{ns}
COMP × –Cu+R	4,88*	0,76 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,60 ^{ns}	1,30 ^{ns}
COMP × –Zn+R	9,57*	0,02 ^{ns}	0,47 ^{ns}	2,60 ^{ns}	6,10*	7,40*
–B+R × –B–R	0,78 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,20 ^{ns}
–Cu+R × –Cu–R	4,88*	2,55 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,20 ^{ns}
–Zn+R × –Zn–R	1,22 ^{ns}	2,11 ^{ns}	1,90 ^{ns}	1,02 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,05 ^{ns}

Classes: 0 – plantas livres da infestação; 1 – presença de poucas pústulas, 2 – presença de pústulas espalhadas pelo limbo e predominantes em tecidos jovens; 3 – abundante presença de pústulas e necrose das regiões atingidas. (*) significativo a 5 %; (^{ns}) não significativo.

O nível de infestação e a severidade do ataque da ferrugem apresentaram comportamentos similares entre os tratamentos ao longo do tempo (Figura 22). Em janeiro de 2017, a infestação variou entre 30 e 40 %, exceto no tratamento –Zn+R, que apresentou menos

de 20 % de infestação no período. A severidade do ataque em janeiro variou entre 0,7 e 1,2. Entre os meses de fevereiro e março de 2017, a infestação se manteve alta com índices de infestação entre 35 e 50 %. A severidade neste período apresentou aumento, alterando o intervalo para 1,2 e 1,6. Entre os meses de abril e junho de 2017, a infestação diminuiu (<20 %) até desaparecer em agosto de 2017 e a severidade média no período variou entre 0,6 e 0,8.

Figura 22 Curva de infestação (a) e de severidade (b) da ferrugem em plantação seminal de *Eucalyptus grandis* influenciada pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais

3.3.3. Análise epidemiológica

A média dos valores da área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD), para a severidade, variou entre 10 e 13 (Figura 23). Houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos COMP e -Zn+R ($F = 8,75$; $p < 0,01$). O tratamento COMP apresentou a AACPD 20 % maior do que o tratamento -Zn+R. Os tratamentos -Cu+R e -B+R apresentaram AACPD inferior ao tratamento COMP, porém esta diferença não foi significativa. Os resíduos florestais não influenciaram a AACPD da ferrugem do eucalipto em nenhum dos contrastes, por exercerem pouca influência sobre a nutrição das plantas até o sexto mês de idade.

A AACPD é uma variável utilizada em estudos epidemiológicos que permite o agrupamento da severidade do ataque da doença, ao longo do tempo, em um único valor. O seu uso torna a comparação entre tratamentos mais simples, sendo uma variável fortemente correlacionada aos danos na produção em sistemas agrícolas e florestais (TAKAHASHI, 2002). Takahashi (2002) considerou a AACPD uma boa variável a ser utilizada na modelagem dos danos causados pela ferrugem em plantações de eucalipto. Segundo o autor, foram encontradas

relações elevadas entre a AACPD e a produtividade das árvores, com coeficientes de determinação variando entre 0,66 e 0,89.

A nutrição das plantas pode influenciar a AACPD. Silva et al. (2013), em mudas do híbrido de *E. urophylla* × *E. camaldulensis*, verificaram que uso de fosfitos de Zn e de Cu foram capazes de reduzir a AACPD do oídio. Os resultados obtidos com o uso destes fosfitos se equipararam aos de fungicidas químicos. Os fosfitos são considerados fertilizantes a base de fósforo que possuem mobilidade no floema e no xilema (DIANESE; BLUM, 2010). Os fosfitos não são metabolizados pelas plantas, e por isto se acumulam por longos períodos em pontos de crescimento, como raízes e ponteiros. Esta habilidade é importante no controle de oídio, e de outras doenças fúngicas, pois reduzem a capacidade de infecção do patógeno. A capacidade dos fosfitos de Zn e de Cu em controlar o oídio é atribuída à ação tóxica dos micronutrientes sobre o fungo, e ao fato de ambos, Zn e Cu, serem importantes cofatores na indução de resistências em plantas (SILVA et al., 2013).

Figura 23 Área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) da ferrugem em povoamento de *Eucalyptus grandis* influenciado pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais aos 12 meses de idade. O valor da tabela indica o F dos contrastes de interesse; (*) significativo a 5 %

3.3.4. Quantificação de dano do ataque

O plantio foi realizado no inverno de 2016. Seis meses pós-plantio, em janeiro de 2017, as plantas apresentaram os primeiros sintomas de ferrugem do eucalipto (*Puccinia psidii*). Os sintomas foram caracterizados por pústulas amarelas que provocaram seca e morte dos tecidos

atingidos. Aos 12 meses após o plantio, com o prolongamento do período seco e a diminuição da suscetibilidade ao ataque das plantas, os esporos desapareceram, deixando algumas sequelas.

A redução da área fotossintética ocasionada por doenças foliares, como a ferrugem, pode causar perdas de crescimento e predispor a planta ao ataque de outros patógenos. A ferrugem do eucalipto pode reduzir a produtividade em mais de 50 % de crescimento volumétrico de madeira, dependendo da severidade, do padrão, do tempo e da frequência com que o patógeno ataca as plantas (BALMELLI et al., 2013; ALVARES et al., 2017).

O DAP foi influenciado pela fertilização aos 12 e 15 meses de idade (Tabela 19). O COMP foi diferente de -B+R e de -Zn+R. A nutrição não influenciou o crescimento do povoamento em altura, aos 6, 9, 12 e 15 meses, e em volume, aos 12 e 15 meses idade. O IAF não foi influenciado pelas omissões de B, Cu e Zn. Não houve resposta das variáveis de crescimento à remoção dos resíduos florestais até os 15 meses de idade do plantio.

A falta de respostas à omissão de micronutrientes em altura e em volume pode ser atribuída à capacidade de fornecimento destes nutrientes pelo solo, diminuindo o potencial de resposta do eucalipto à fertilização (GONÇALVES et al., 2011). Entretanto, as diferenças em crescimento de diâmetro entre os tratamentos podem estar relacionadas ao ataque da ferrugem e não apenas as respostas à fertilização. Os tratamentos com menor DAP, COMP, -Cu+R e -Cu-R, foram acometidos com os maiores níveis de severidade de ataque. Esses tratamentos também apresentaram a maior quantidade de plantas infestadas por ferrugem, classificadas como nível 2 e 3.

Tabela 19 Crescimento em altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP) e volume de madeira com casca (Volume), e índice de área foliar (IAF) em povoamento de eucalipto influenciado pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (-B, -Cu e -Zn) associado a presença (+R) e ausência (-R) de resíduos florestais aos 6, 9, 12 e 15 meses de idade. (*) significativo a 5 %; (ns) não significativo

Classe de infestação		H				DAP			Volume		IAF
		6	9	12	15	9	12	15	12	15	12
		m				cm			m³ ha⁻¹		m²m⁻²
COMP		2,2	3,7	4,8	6,8	2,9	4,0	5,6	5,6	12,9	3,2
–B+R		2,3	4,0	5,2	6,9	3,2	4,4	5,9	6,7	14,1	3,5
–B–R		2,4	4,0	5,1	7,0	3,3	4,4	5,8	6,8	13,9	3,6
–Cu+R		2,3	3,8	4,9	6,8	3,1	4,2	5,7	6,0	13,2	3,3
–Cu–R		2,3	3,8	5,0	6,9	3,0	4,2	5,7	6,0	13,5	3,3
–Zn+R		2,2	4,0	5,1	6,9	3,1	4,4	5,9	6,7	14,1	3,5
–Zn–R		2,2	4,0	5,2	7,1	3,2	4,4	5,9	6,8	14,7	3,6
F-contraste											
COMP	× –B+R	0,15 ^{ns}	1,79 ^{ns}	3,08 ^{ns}	0,43 ^{ns}	2,23 ^{ns}	5,16 [*]	5,27 [*]	2,73 ^{ns}	2,58 ^{ns}	2,38 ^{ns}
COMP	× –Cu+R	0,02 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,60 ^{ns}	1,85 ^{ns}	1,72 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,23 ^{ns}
COMP	× –Zn+R	0,00 ^{ns}	1,75 ^{ns}	1,58 ^{ns}	0,61 ^{ns}	1,01 ^{ns}	7,40 [*]	4,55 [*]	2,73 ^{ns}	2,80 ^{ns}	2,41 ^{ns}
–B+R	× –B–R	0,33 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,05 ^{ns}
–Cu+R	× –Cu–R	0,40 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,00 ^{ns}
–Zn+R	× –Zn–R	0,01 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,27 ^{ns}	1,09 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,05 ^{ns}

A severidade do ataque da ferrugem se correlacionou negativamente com as variáveis de crescimento em altura ($r = -0,790$; $p = 0,0343$), diâmetro ($r = -0,927$; $p = 0,0027$) e volume ($r = -0,861$; $p = 0,0128$) aos 15 meses de idade. As perdas médias em altura, diâmetro e volume de madeira variaram dependendo da classe de infestação (Figura 24). O percentual de perda em altura por classe de infestação foi de 10 % para a classe 2 e de 25 % para a classe 3. O diâmetro foi reduzido em 15 % em plantas com nível 2 de ataque e de 35 % em 3. O volume foi o mais impactado, sendo que a classe de infestação 1 ocasionou perdas de incremento em madeira de 7 %, a classe 2 de 40 % e a classe 3 de 60 %.

Em um estudo no Vale do Paraíba do Sul, SP, Takahashi (2002) verificou perdas de 25 a 35 % em altura e em diâmetro em plantações seminais de *Eucalyptus grandis* com 6 meses de idade como consequência da severidade do ataque da ferrugem. Esses dados estão de acordo com os encontrados neste estudo, no qual a severidade nível 3 levou a redução de 25 % na altura e de 35 % em diâmetro.

O IAF se correlacionou de forma inversa e significativa ao ataque da ferrugem ($r = -0,851$; $p = 0,015$). As perdas em IAF foram de 5 % em plantas atacadas com baixa severidade (classe 1), 22 % com média severidade (classe 2) e 36 % com alta severidade (classe 3) (Figura 25). O IAF é uma variável que representa a capacidade da planta de explorar o meio, estando estreitamente associado ao ciclo do carbono, ao ciclo da água e à produtividade florestal (CANTINHO et al., 2014). O IAF tende a ser mais elevado em povoamentos bem nutridos e com boa disponibilidade de água (WHITEHEAD; BEADLE, 2004). As doenças foliares são fatores que possuem grande influência sobre a área foliar das árvores, pois causam a morte e a seca de folhas. Alves (2011), ao avaliar o efeito de doses de fertilizantes em clones de eucalipto, verificou que a seca do ponteiro teve relação inversa com o IAF. Hakamada et al. (2015) verificaram aumento de 8 % no IAF em plantio de *Eucalyptus* atacados por ferrugem com controle curativo ($4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) e, de 22 %, com controle preventivo ($4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), comparativamente aos povoamentos não tratados ($3,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$).

Figura 24 Média de diâmetro (a), altura (b) e volume (c e d) de árvores de *Eucalyptus grandis* em diferentes classes de severidade de ataque por ferrugem, aos 6, 9, 12 e 15 meses. Classes: 0 – plantas livres da infestação; 1 – presença de poucas pústulas, 2 – presença de pústulas espalhadas pelo limbo e predominantes em tecidos jovens; e 3 – abundante presença de pústulas e necrose das regiões atingidas. *Barras na vertical indicam a diferença mínima significativa entre as classes de ataque da ferrugem ($p < 0,05$)

Figura 25 Índice de área foliar médio (IAF) das árvores de *Eucalyptus grandis* em diferentes classes de severidade causada por ferrugem do eucalipto, aos 12 meses de idade. Classes: 0 – plantas livres da infestação; 1 – presença de poucas pústulas, 2 – presença de pústulas espalhadas pelo limbo e predominantes em tecidos jovens; 3 – abundante presença de pústulas e necrose das regiões atingidas. *Barra na vertical indica a diferença mínima significativa entre as classes de ataque da ferrugem ($p < 0,05$)

3.3.5. Análise nutricional

Os tratamentos $-Zn+R$ e COMP diferiram quanto aos teores foliares de K ($F = 16,06$; $p < 0,01$) e Ca ($F = 5,2$; $p < 0,05$). O tratamento COMP apresentou menores teores foliares de K ($5,4 \text{ g kg}^{-1}$) e Ca ($5,7 \text{ g kg}^{-1}$) quando comparado aos demais tratamentos ($K = 7,0 \text{ g kg}^{-1}$; $Ca = 6,6 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 20).

Tabela 20 Teores de macronutrientes e micronutrientes de árvores de *Eucalyptus grandis* influenciadas pela aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes ($-B$, $-Cu$ e $-Zn$) associado a presença (+R) e ausência ($-R$) de resíduos florestais colheita aos 6 meses de idade

Tratamento	Macronutriente						Micronutriente				
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
COMP	23,8	1,5	5,4	5,7	2,4	0,8	46,8	8,0	56,2	369,3	19,6
$-B+R$	28,5	1,6	6,3	7,2	2,8	1,0	18,7	8,1	48,3	329,1	20,8
$-B-R$	28,8	1,6	7,3	6,2	2,6	0,9	18,2	8,2	52,3	394,1	20,5
$-Cu+R$	29,2	1,5	6,8	6,3	2,6	1,0	54,2	8,1	53,7	410,9	21,0
$-Cu-R$	30,3	1,6	7,2	7,2	2,6	1,5	43,6	7,2	58,5	344,4	21,6
$-Zn+R$	26,6	1,5	7,2	6,8	2,6	1,1	46,8	7,8	52,8	395,6	20,0
$-Zn-R$	28,9	1,5	7,2	6,1	2,4	1,1	43,6	8,3	56,3	316,3	20,4
F-contraste											
COMP × $-B+R$	0,11 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,30 ^{ns}	53,14*	1,19 ^{ns}	2,54 ^{ns}	0,92 ^{ns}	3,32 ^{ns}
COMP × $-Cu+R$	0,46 ^{ns}	2,02 ^{ns}	9,18*	1,31 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,25 ^{ns}	0,34 ^{ns}	1,58 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,22 ^{ns}
COMP × $-Zn+R$	0,00 ^{ns}	1,28 ^{ns}	16,06*	5,21*	1,06 ^{ns}	2,77 ^{ns}	0,34 ^{ns}	1,81 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,18 ^{ns}
$-B+R$ × $-B-R$	2,25 ^{ns}	2,22 ^{ns}	12,38*	2,61 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,86 ^{ns}	1,36 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,64 ^{ns}	2,15 ^{ns}	0,21 ^{ns}
$-Cu+R$ × $-Cu-R$	0,89 ^{ns}	1,20 ^{ns}	0,77 ^{ns}	1,74 ^{ns}	0,38 ^{ns}	3,93 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,94 ^{ns}	1,04 ^{ns}	0,94 ^{ns}
$-Zn+R$ × $-Zn-R$	0,88 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,09 ^{ns}	2,06 ^{ns}	3,12 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,90 ^{ns}	0,17 ^{ns}

O teor de K se correlacionou negativamente com os parâmetros de avaliação da ferrugem, ou seja, AACPD ($r = -0,69$; $p=0,08$); infestação ($r = -0,67$; $p=0,10$) e severidade da doença ($r = -0,69$; $p=0,08$) (Tabela 21). O teor de Ca não se correlacionou significativamente com as medidas de avaliação da ferrugem. O teor de Cu, apesar de não apresentar diferença entre os tratamentos, se correlacionou negativamente com o ataque da ferrugem, apresentando correlação significativa ($p<0,10$) para os parâmetros AACPD ($r = -0,69$; $p=0,09$), infestação ($r = -0,71$; $p=0,07$) e severidade da doença ($r = -0,71$; $p=0,07$).

Silva (2007) estudou a influência de nutrientes na incidência e na severidade da mancha foliar do eucalipto causada por *Xanthomonas axonopodis*. O autor verificou, assim como neste trabalho, correlação negativa ($r = -0,76$; $p<0,01$) entre teores foliares de K das árvores e a intensidade da doença. A redução na incidência da mancha foliar do eucalipto é atribuída ao fato do K propiciar melhor controle estomático, maior produção de compostos relacionados à defesa das plantas e redução nos teores de açúcares nas folhas. A redução dos açúcares solúveis nas folhas pode restringir a capacidade de colonização de organismos patogênicos. Almeida (2009), em um plantio seminal de *Eucalyptus grandis*, verificou aumento da incidência da ferrugem nos tratamentos sem aplicação de K. Segundo este autor, nos tratamentos que receberam K apenas 15 % das plantas apresentaram sintomas, e nos tratamentos sem K, 39 % das plantas foram atacadas.

Silva (2007) também avaliou o efeito do Cu sobre a bacteriose foliar do eucalipto e encontrou correlação positiva entre os teores de Cu e a intensidade da doença ($r = 0,82$; $p<0,01$), resultados estes contrastantes com os deste estudo. A literatura aponta o Cu como um importante inibidor da atividade de microrganismos patogênicos. As informações sobre a função fisiológica do Cu em reações de defesa do hospedeiro são limitadas. O mecanismo mais comum de ação do Cu é por meio da toxicidade direta, sendo usado na composição de bactericidas e fungicidas. O efeito do Cu também se relaciona à resistência da planta, atuando como cofator de diversos sistemas enzimáticos envolvidos na produção de compostos fenólicos antimicrobianos e lignina (ELMER; DATNOFF, 2014).

Tabela 21 Correlação de Pearson (r) entre teores foliares de macronutrientes e micronutrientes e variáveis de avaliação do ataque da ferrugem do eucalipto

Variável	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	AACPD	Inf.
P	-0,05 ^{ns}												
K	-0,11 ^{ns}	0,86 ^{***}											
Ca	-0,36 ^{ns}	0,66 [*]	0,76 ^{**}										
Mg	-0,27 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,64 [*]									
S	0,23 ^{ns}	0,95 ^{***}	0,80 ^{**}	0,61 ^{ns}	0,55 ^{ns}								
B	0,44 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,43 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,65 [*]							
Cu	0,10 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,72 [*]	0,64 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,11 ^{ns}						
Fe	0,27 ^{ns}	0,70 [*]	0,42 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,72 [*]	0,74 [*]	-0,11 ^{ns}					
Mn	-0,80 ^{**}	0,14 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,51 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,07 ^{ns}				
Zn	0,14 ^{ns}	0,67 [*]	0,32 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,71 [*]	0,75 ^{**}	-0,17 ^{ns}	0,87 ^{***}	0,12 ^{ns}			
AACPD	0,02 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	-0,69 [*]	-0,44 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	-0,29 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,68 [*]	0,16 ^{ns}	-0,36 ^{ns}	0,21 ^{ns}		
Inf.	0,11 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,67 [*]	-0,47 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,71 [*]	0,25 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,96 ^{***}	
Sev.	-0,10 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	-0,69 [*]	-0,40 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,71 [*]	0,12 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,98 ^{***}	0,97 ^{***}

Notas: N, P, K, Ca, Mg, e S (g kg⁻¹); B, Cu, Mn, Fe, Zn (mg kg⁻¹); AACPD: área abaixo da curva de progresso da doença; Inf.: infestação; Sev.: severidade do ataque da ferrugem do eucalipto. Nota: *** p<0,01; ** p<0,05; * p<0,10; (ns) não significativo.

3.3.6. Maturação foliar

O comprimento foliar do tratamento –Zn+R diferiu dos demais tratamentos aos 10 dias após o início da avaliação, apresentando crescimento 10 % maior (Figura 26). A largura das folhas não foi influenciada até os 10 dias de acompanhamento. Aos 30 dias de avaliação, a largura das folhas do tratamento –Cu+R diferiu apenas do tratamento COMP. Durante o período de maior incidência da ferrugem, o crescimento foliar do tratamento –Zn+R pode ter atenuado o ataque da doença em razão do rápido desenvolvimento foliar. O tratamento –Zn+R, apesar da restrição nutricional, diferiu dos demais tratamentos, principalmente, devido aos maiores teores foliares de K.

Figura 26 Comprimento e largura foliar de árvores de *Eucalyptus grandis*, aos 6 meses de idade, em função da aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) de resíduos florestais da colheita

O efeito da nutrição sobre o crescimento das plantas é, em geral, abordado em função da relação dos nutrientes no metabolismo. Contudo, a nutrição pode, além disto, mudar o padrão de crescimento, a morfologia e anatomia, e a composição química das plantas. Estas alterações de crescimento podem aumentar ou diminuir a tolerância das plantas aos patógenos (HUBER et al., 2012).

Os estádios foliares do eucalipto podem determinar o ataque de doenças em materiais genéticos suscetíveis (SMITH et al., 2006; SMITH et al., 2007; SOUZA, 2008). Souza (2008) avaliou a anatomia de três estádios de desenvolvimento de folhas de eucalipto, diferenciando clones resistentes e suscetíveis ao ataque da ferrugem. As folhas em estádios iniciais de desenvolvimento apresentaram parede celular delgada e de menor espessura comparativamente às folhas mais velhas. Nos estádios mais maduros, os tecidos foliares encontram-se mais diferenciados com as células da epiderme bastante unidas, sem espaços intercelulares e cutícula bem espessa.

Smith et al. (2006) estudaram as diferenças anatômicas entre folhas de *Eucalyptus nitens* resistentes e suscetíveis ao ataque de *Mycosphaerella*. As folhas resistentes apresentaram cutícula e epiderme abaxial e adaxial mais espessas e alta proporção de parênquima paliçádico. A presença de cutícula mais espessa exerceu ação de barreira física à penetração das hifas deste fungo. O aumento do parênquima paliçádico retardou ou até preveniu o desenvolvimento das hifas devido a incapacidade de alguns fungos de penetrar e colonizá-lo.

Battie-Laclau et al. (2014) estudaram os efeitos morfológicos da deficiência de K em folhas de eucalipto. Os autores verificaram que o suprimento adequado de K resultou em folhas mais grossas, epiderme abaxial e adaxial mais espessas e maior proporção de parênquima paliçádico, características importantes para a resistência de plantas aos patógenos. Além disto, plantas deficientes em K tendem a acumular açúcares solúveis em suas folhas, como resultado da diminuição da atividade de fosfatases. A alta concentração de açúcares foliares aumenta a eficiência de germinação dos esporos de fungos. Assim, a concentração destes assimilados solúveis no apoplasto determina o crescimento do patógeno durante a penetração e nas fases pós-penetração (SILVEIRA et al., 2003; HUBER et al., 2012).

No momento da marcação das folhas, todos os tratamentos se classificaram no estágio de desenvolvimento 2/5, com comprimento foliar próximo a 40 % da expansão total (Figura 27). Os tratamentos -Zn+R e -Cu+R apresentaram folhas classificadas como moderadamente resistentes mais rápido comparativamente aos tratamentos COMP e -B+R. Aos 6 dias após a marcação das folhas, o limbo foliar dos tratamentos -Zn+R e -Cu+R atingiram 60 % de seu comprimento total, o que aconteceu nos tratamentos -B+R e COMP apenas no nono dia.

Figura 27 Estádios foliares de árvores de *Eucalyptus grandis* aos 6 meses de idade em função da aplicação (COMP) ou omissão de micronutrientes (–B, –Cu e –Zn) associado a presença (+R) de resíduos florestais da colheita. A proporção CI/CF é dada pela razão entre a mensuração inicial (CI), e a mensuração final (CF), 30 dias após a marcação das folhas

Os estudos sobre estádios de desenvolvimento foliar são importantes para a compreensão de patossistemas. Na suscetibilidade ao ataque da ferrugem do eucalipto, o desenvolvimento foliar das plantas é dividido em cinco estádios, considerando a expansão total da folha. O estágio 1/5 é considerado o mais suscetível ao ataque, e indica folhas com cerca de 20 % de comprimento total do limbo. No estágio 3/5, as folhas possuem, aproximadamente, 60 % do comprimento final e tornam-se moderadamente resistentes à ferrugem. O estágio 5/5 é representado por folhas completamente expandidas e resistentes ao ataque da ferrugem (SOUZA, 2008; BOAVA et al., 2010b).

Boava et al. (2010b) avaliaram as diferenças bioquímicas entre estádios foliares em clones resistentes e suscetíveis ao ataque da ferrugem em eucalipto. Os autores verificaram que as folhas no estágio de desenvolvimento 3/5 apresentaram maior atividade enzimática de quitinases e peroxidases. Boava et al. (2010a) afirmaram que, embora as peroxidases não possam ser usadas como marcadores de resistência, podem ser empregadas como indicadores, pois a função das peroxidases é a formação de lignina pela polimerização de fenóis.

3.4. Conclusões

A incidência, a severidade e a área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) da ferrugem foram influenciadas pela fertilização. A omissão de nutrientes ocasionou aumento nos teores foliares de K e de Ca. Os tratamentos –Zn+R e –B+R foram os tratamentos que apresentaram a menor infestação, severidade e AACPD. Os tratamentos COMP e –Cu+R apresentaram maior infestação e severidade do ataque da doença. Os nutrientes que mais se correlacionaram com as variáveis de avaliação da infestação foram o K e o Cu. Os tratamentos com maiores teores foliares destes nutrientes, também foram aqueles com menor severidade e grau de infestação.

Os danos de crescimento em DAP, altura, volume e índice de área foliar diferiram quanto às classes de ataque da ferrugem. A classe de maior intensidade (classe 3) causou perda de 35 % no DAP e no IAF, de 25 % na altura e de 60 % no volume das árvores atacadas, até os 15 meses pós-plantio.

Os estádios foliares foram influenciados pela fertilização. As folhas dos tratamentos –Zn+R e –Cu+R apresentaram aumento no regime de crescimento, entrando no estágio de menor suscetibilidade ao ataque da ferrugem (3/5) antes dos demais tratamentos.

REFERÊNCIAS

- ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V.; MAFIA, R. G.; ASSIS, T.F. **Clonagem e doenças do eucalipto**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2009.
- ALMEIDA, J. C. R. de. **Nutrição , crescimento , eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio**. Teses (doutorado) - Universidade de São Paulo, 2009. 112 p.
- ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C.; MATTOS, E. M.; MIRANDA, A. C.; MORAES, W. B.; SILVA, P. H. M.; FURTADO, E. L.; STAPE, J. L. Climatic favourability zones for *Eucalyptus* rust in Brazil. **Forest Pathology**, v. 47, n. 1, p. 1–17, 2017.
- ALVES, F. de F. **Seca de ponteiro e crescimento de clones de eucalipto em diferentes doses de adubação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 2011. 48 p.
- BALMELLI, G.; SIMETO S.; ALTIER, N.; MARRONI, V.; DIEZ, J. J. Long term losses caused by foliar diseases on growth and survival of *Eucalyptus globulus* in Uruguay. **New Forests**, v. 44, n. 2, p. 249–263, 2013.

- BATTIE-LACLAU, P. JEAN-PAUL LACLAU, J. P.; BERI, B.; MIETTON, L.; MUNIZ, M. R. A.; ARENQUE, B. C.; PICCOLO, M de C.; JORDAN-MEILLE, L.; BOUILLET, J. P.: NOUVELLON, Y. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. **Plant, Cell and Environment**, v. 37, n. 1, p. 70–81, 2014.
- BELL, R. W.; DELL, B. **Micronutrients for Sustainable Food, Feed, Fibre and Bioenergy Production**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2008.
- BOAVA, L. P.; KUHN, O. J.; PASCHOLATI, S. F.; PIERO, R. M. di; FURTADO, E. L. Atividade de quitinases e peroxidases em folhas de eucalipto em diferentes estágios de desenvolvimento após tratamento com acibenzolar-S-metil (ASM) e inoculação com *Puccinia psidii*. **Tropical Plant Pathology**, v. 35, n. 2, p. 124–128, 2010a.
- BOAVA, L. P.; KUHN, O. J.; PASCHOLATI, S. F.; PIERO, M. R. di; FURTADO, E. L. Efeito de indutores bióticos e abióticos na atividade de quitinase e peroxidase e no controle da ferrugem causada por *Puccinia psidii* em eucalipto. **Summa Phytopathol**, v. 36, n. 2, p. 168–172, 2010b.
- CANTINHO, R. Z.; PONZONI, F. J.; SANTOS, S. B. Estimativas de índice de área foliar de plantios de *Eucalyptus* spp. segundo três alternativas metodológicas. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 485–492, 2014.
- DIANESE, A. de C.; BLUM, L. E. B. **O Uso de Fosfitos no Manejo de Doenças Fúngicas em Fruteiras e Soja**. 1. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010.
- DORDAS, C. Role of Nutrients in Controlling Plant Diseases in Sustainable Agriculture : A Review Role. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 28, n. 1, p. 33–46, 2008.
- ELMER, W. H.; DATNOFF, L. E. Mineral Nutrition and Suppression of Plant Disease. In: ALFEN, N. VAN (Ed.). **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**. 4. ed. San Diego: Elsevier, 2014. v. 4p. 231–244.
- FIGUEIREDO, M. B. Doenças fúngicas emergentes em grandes culturas. **Biológico**, v. 63, n. 1, p. 29–32, 2001.
- FURTADO, E. L. DIAS, D.C.; OHTO, C.T.; ROSA, D. D. **Doenças do Eucalipto no Brasil**. Botucatu: FCA/UNESP, 2009.
- GRAHAM, R. D. Effects of Nutrient Stress on Susceptibility of Plants to Disease with Particular Reference to the Trace Elements. **Advances in Botanical Research**, v. 10, n. C, p. 221–276, 1983.
- GRAHAM, R. D.; WEBB, M. J. Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants. In: MORTVEDT, J. J. et al. (Eds.). **Micronutrients in Agriculture**. Soil Science Society of America, 1991. p. 333–339.

- GONÇALVES, J. L. de M. Fertilização de plantação de eucalipto. In: GONÇALVES, J. L. de M.; PULITO, A. P.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; SILVA, L.D. (Orgs.). Campinas: **Anais do Encontro Brasileiro de Silvicultura**, 2011, p. 342.
- GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>>.
- HAKAMADA, R.; TAKAHASHI, S.; TEIXEIRA, J. da S.; MOREIRA, G.; LEMOS, C.; VOMERO, P.; GARCIA, C. **Wood Productivity and Light Use Efficiency Affected by Rust (*Puccinia psidii*) in *Eucalyptus urophylla* Clone**. IUFRO Eucalypt Conference 2015. **Anais...Zhanjiang: IUFRO**, 2015
- HUBER, D. M. **Management of nutrition to control plant pathogens**. X Congreso Nacional Agronómico/ III Congreso de Fitopatologia. 1996
- HUBER, D.; RÖMHELD, V.; WEINMANN, M. Relationship between Nutrition, Plant Diseases and Pests. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. p. 283–298.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. Amsterdam Boston: Academic Press, 2012.
- MASSON, M. V.; MORAES, W. B.; FURTADO, E. L. Chemical Control of *Eucalyptus* Rust: Brazilian Experiences. In: **Fungicides - Showcases of Integrated Plant Disease Management from Around the World**. InTech, 2013.
- MATOH, T.; KOBAYASHI, M. Boron Function in Plant Cell Walls: Research Progress Since 1997. In: BROWN, P. H. et al. (Eds.). **Proceedings of an International Workshop on All Aspects of Animal and Plant Boron Nutrition**. 1. ed. Bonn: Springer, 2002. p. 143–157.
- MCKINNEY, H. Influence of soil temperature and moisture on infection of wheat 33 seedlings by *Helminthosporium sativum*. **Journal of Agricultural Research** v. 26, p. 195-34 217, 1923.
- RUIZ, R. A. R.; RUIZ, R. A. R.; ALFENAS, A. C.; FERREIRA, F. A.; VALE, F. X. R. Influência da temperatura, do tempo de molhamento foliar, fotoperíodo e intensidade de luz sobre a infecção de *Puccinia psidii* em eucalipto. **Fitopatologia Brasileira**, v. 14, p. 55–61, 1989.
- SAS. **SAS user's guide: statistics**. Cary, 2011. Disponível em: <<https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/base/procstat93m1.pdf>>

- SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012.
- SILVA, A. G. dA. **Histopatologia e influência de nutrientes na intensidade da bacteriose foliar do eucalipto causada por *Xanthomonas axonopodis***. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. 2007. 58 p.
- SILVA, A. C.; RESENDE, M. L. V.; SOUZA, P. E.; SILVA, N. C. N.; SILVA, M. B.; VITORINO, L. R. R. Coffee-leaf extract and phosphites on the curative control of powdery mildew in eucalyptus mini-stumps. **Forest Pathology**, v. 43, n. 4, p. 297-305, 2013.
- SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N. Aspectos nutricionais envolvidos na ocorrência de doenças com ênfase para o eucalipto. **Circular técnica IPEF**, v. 200, p. 1-13, 2003.
- SMITH, A. H.; PINKARD, E. A.; HUNTER, G. C.; WINGFIELD, M. J.; MOHAMMED, C. L. Anatomical variation and defence responses of juvenile *Eucalyptus nitens* leaves to *Mycosphaerella* leaf disease. **Australasian Plant Pathology**, v. 35, p. 725-731, 2006.
- SMITH, A. H.; GILL, W. M.; PINKARD, E. A.; MOHAMMED, C. L. Anatomical and histochemical defence responses induced in juvenile leaves of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* by *Mycosphaerella* infection. **Forest Pathology**, v. 37, n. 6, p. 361-373, 2007.
- SOUZA, R. R. S. **Caracterização anatômica quantitativa e composição de óleos essenciais em três estágios foliares de clones de eucalipto e sua relação com a ferrugem**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2008. 104 p.
- TAKAHASHI, S. S. **Ferrugem do eucalipto: índice de infecção, análise temporal e estimativas de danos relacionadas à intensidade da doença no campo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2002. p. 113 p.
- VAN LIEROP, P.; LINDQUIST, E.; SATHYAPALA, S.; FRANCESCHINI, G. Global forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 78-88, 2015.
- WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 113-140, 2004.
- ZAMPROGNO, K. C.; FURTADO, E. L.; MARINO, C. L.; BONINE, C. A.; DIAS, D. C. Utilização de análise de segregantes agrupados na identificação de marcadores ligados a genes que controlam a resistência à ferrugem (*Puccinia psidii* Winter) em *Eucalyptus* sp. **Summa Phytopathologica**, v. 34, n. 3, p. 253-255, 2008.