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

Crescimento, nutrição mineral e eficiência do uso da água em povoamento
de eucalipto fertilizado com fontes alternativas ao KCl

Fábio Henrique Silva Floriano de Toledo

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

Piracicaba
2017

Fábio Henrique Silva Floriano de Toledo
Engenheiro Florestal

Crescimento, nutrição mineral e eficiência do uso da água em povoamento de eucalipto
fertilizado com fontes alternativas ao KCl
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011.

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

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

Piracicaba
2017

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

Toledo, Fábio Henrique Silva Floriano de

Crescimento, nutrição mineral e eficiência do uso da água em plantação de eucalipto fertilizado com fontes alternativas ao KCl / Fábio Henrique Silva Floriano de Toledo. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

100 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Eucaliptocultura 2. Agromineral 3. Fonolito 4. Sódio 5. Remineralizador I. Título

Dedicatória

Aos Meus Pais,
Amigos e
Colegas
Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por mais um grande feito na minha vida. Logo em seguida à minha avó Lygia, por todo o seu apoio, preocupação e cobrança, pois com certeza, sem ela nada disso seria possível;

Aos meus pais; Luiz Roberto e Fátima Angelina e aos meus irmãos Luiz Eduardo e Paula, por todo o apoio e conselhos dados durante esse longo e difícil caminho por mim trilhado; à minha namorada Marisol Miranda pelo amor, companheirismo e ajuda nos vários momentos difíceis por mim superados.

Aos verdadeiros amigos conquistados ao longo da minha vida, antes e depois do ingresso à Universidade, por todo o companheirismo, amizade, conselhos e experiências de vida trocadas entre nós, em especial a Lucas Ciolfi (in memoriam), Paulo César Ciolfi e Nilda, Paulo Tadeu, Ícaro Marostegan e Nadine, Rodrigo Baptistela e Gi, Fabio Oliveira, Rafael Saverga, Bruno Maio, Patrik Tomaz e Gra, Rodrigo Fiat, Gabriel Conagin e Bu, Juan Maximiliano (in memoriam), Camilo Zero, Douglinhas (in memoriam), Filipe Firmino, Diego Rocha e Katia.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) por me proporcionar um ensino de primeira qualidade, tanto na graduação quanto no mestrado. Além de ter a chance fazer amigos incríveis e para a vida toda (Peludo, Batata, Baleta, Éuzio, Ernani, Verme, Thi, Tu, Shima, Matheus, Ygãoo, Gleisson, Iberê, João Faustino, entre vários outros).

À Universidade de São Paulo (USP), o Departamento de Ciências Florestal (LCF), o Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais (PPGRF), e a Universidade da Colúmbia Britânica (UBC) por fornecerem tudo de que necessitei para obtenção do título de doutor;

Às empresas International Paper (IP), Mineração Curimbaba/Yoorin, e ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), por toda ajuda logística, técnica e econômica fornecida; À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo dado através da bolsa de estudo tanto no Brasil quanto no Canadá;

Aos professores da USP e UBC por todo conhecimento transmitido e companheirismo ao longo de minha pós-graduação;

Ao Professor José Leonardo, pela orientação e ajuda no desenvolvimento da minha tese, além de toda a amizade e confiança em mim depositada; a Professora Cindy E. Prescott pela confiança e oportunidade de me juntar ao seu grupo de pesquisa na UBC em Vancouver, Canadá;

Aos Pós-doutorandos, amigos e praticamente co-orientadores Alexandre Ferraz e Eric Oliveira, sem vocês a jornada teria sido muito mais difícil.

Aos companheiros de República; Allan, Fausto, Paulo, Josimar e Felipe; Por fim, aos amigos do PTSM, em especial José Rocha e Karla, José Bazani, Carolina Brandani, Carla Papai, Eduardo Melo, Juan Rojas, José Carlos de Deus Júnior, Yesid Mariño, Estela Foltran, Arthur, Sabino, Natanael, Amarildo, e todos os estagiários que por lá passaram.

Epígrafe

“O ganho do nosso estudo é termo-nos tornado melhor e mais sábio”.

Michel de Montaigne

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	14
1. INTRODUÇÃO	15
Referências	19
2. Fertilidade do solo, nutrição e crescimento de povoamento de eucalipto fertilizado com fontes alternativas ao KCl.....	23
Resumo	23
2.1. Introdução.....	25
2.2. Material e Métodos	26
2.2.1. Caracterização da área experimental	26
2.2.2. Instalação e condução do experimento	29
2.2.3. Avaliações.....	31
2.2.3.1. Fertilidade do solo	31
2.2.3.2. Análise química foliar	31
2.2.3.3. Inventário florestal e produção de biomassa aérea	32
2.2.3.4. Absorção e estoque de nutrientes nas árvores	34
2.2.3.5. Área foliar.....	34
2.2.3.6. Deposição de folheto e nutrientes.....	35
2.2.3.7. Análises estatísticas.....	35
2.3. Resultados.....	36
2.3.1. Fertilidade do solo.....	36
2.3.2. Estado nutricional das plantas	38
2.3.3. Teores, estoque e distribuição de nutrientes nos compartimentos aéreos das árvores	42
2.3.4. Crescimento das árvores.....	46
2.3.5. Ciclagem de nutrientes.....	48
2.4. Discussão	52
2.4.1. Fertilidade do solo.....	52
2.4.2. Estado nutricional das plantas	53
2.4.3. Teores, estoque e distribuição de nutrientes nos compartimentos aéreos das árvores	55
2.4.4. Crescimento das árvores.....	57
2.4.5. Ciclagem de nutrientes.....	58
2.5. Conclusões.....	60
Referências	61
3. Relações hídricas e eficiência do uso da água em povoamento de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>grandis</i> fertilizado com fontes alternativas ao KCl.....	69
Resumo	69
Abstract.....	70
3.1. Introdução.....	71
3.2. Material e métodos	73
3.2.1. Caracterização da área experimental, tratamentos e delineamento experimental	73
3.2.2. Avaliações.....	73
3.2.2.1. Umidade no solo	73
3.2.2.2. Potencial hídrico foliar	74
3.2.2.3. Transpiração	75
3.2.2.4. Eficiência do uso da água (EUA) e índice de área foliar (IAF)	77
3.2.2.5. Análises estatísticas.....	78
3.3. Resultados.....	79

3.3.1. Umidade no solo.....	79
3.3.2. Potencial hídrico foliar.....	82
3.3.3. Transpiração, eficiência do uso da água e índice de área foliar.....	85
3.4. Discussão.....	88
3.4.1. Umidade no solo.....	88
3.4.2. Potencial hídrico foliar.....	89
3.4.3. Transpiração, eficiência do uso da água e índice de área foliar.....	91
3.5. Conclusões	93
Referências	95

RESUMO

Crescimento, nutrição mineral e eficiência do uso da água em povoamento de eucalipto fertilizado com fontes alternativas ao KCl

A fertilização potássica em plantações de eucalipto gera aumento de produtividade em até 120%. Além disso, o K desenvolve funções fisiológicas relacionadas à regulação hídrica da planta, como a regulação osmótica, a fotossíntese e o processo de abertura e fechamento dos estômatos. Devido ao elevado custo do KCl, amplamente utilizado em plantações florestais, a quantidade de estudos empenhados em identificar fontes alternativas de K tem adquirido maior relevância, como por exemplo ensaios conduzidos com rocha fonolito. Esta rocha passou a despertar elevado interesse por apresentar inúmeras reservas minerais espalhadas pelo país e por conter K e micronutrientes além de elementos benéficos como o Na e o Si. O objetivo do presente estudo foi avaliar a substituição do KCl por NaCl ou fonolito em povoamento de eucalipto. Para isso, foram mensurados: i) o fornecimento, estoque e ciclagem de K, Na e Si via produção de folhodo e; ii) as relações hídricas e a eficiência do uso da água (EUA) pelas árvores de *Eucalyptus*. A fertilização com fonolito aumentou a quantidade de Na trocável no solo aos 22 meses após o plantio ($2 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ a mais que o Controle), proporcionando maiores estoques do elemento na parte aérea das árvores (61% superior ao Controle), culminando em altas deposições de Na por meio da serapilheira. A rocha apresentou discretos aumentos nos teores foliares de K aos 22 meses após o plantio (14%). A utilização de NaCl promoveu aumentos nos teores de Na nas folhas e demais compartimentos aéreos e intensificou a ciclagem de Na via produção de folhodo. Devido ao alto déficit hídrico apresentado durante o primeiro ano de estudo, o crescimento das árvores foi similar entre todos os tratamentos. A fertilização com fonolito proporcionou maior consumo de água, elevou o índice de área foliar (IAF) e o crescimento do tronco (volume e biomassa), acarretando em EUA similar às plantas fertilizadas com KCl. A utilização de NaCl, apesar de acarretar um menor consumo de água, proporcionou EUA igual às plantas fertilizadas com KCl. A utilização do fonolito e do NaCl como fontes alternativas ao KCl pode propiciar adequado suprimento de íons K e Na para a cultura do eucalipto, propiciando mesma produção de madeira em relação a fertilização convencional.

Palavras-chave: Eucaliptocultura; Agromineral; Fonolito; Sódio; Remineralizador

ABSTRACT

Growth, mineral nutrition and water use efficiency of a *Eucalyptus* plantation fertilized with alternative sources to KCl

Potassium fertilization in *Eucalyptus* plantations generates an increase of productivity by up to 120%. In addition, the K develops physiological functions related to hydrological plant control, such as the osmotic adjustment, photosynthesis and the process of stomatal opening and closure. Due to the high cost of KCl, widely used in plantations, the amount of researches to identify K alternative sources has acquired greater importance, such as the tests conducted with phonolite rock. This rock has aroused great interest because it presents several mineral reserves around the country and contains K and micronutrients as well as beneficial elements like Na and Si. The aim of this study was to evaluate the replacement of KCl by NaCl or phonolite in *Eucalyptus* stand. It was measured: i) the supply, storage and cycling of K, Na and Si via litterfall production and, ii) the water relations and water use efficiency (WUE) by *Eucalyptus* trees. Fertilization with phonolite increased the amount of exchangeable sodium in the soil at 22 months after planting ($2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ above the Control), providing higher stocks of the element in the tree shoot (61% higher than the Control), culminating at high Na deposition through litterfall. Rock showed small increases in K foliar concentration at 22 months after planting (14%). The use of NaCl promoted increases in Na concentration in the leaves and other aerial compartments and intensified Na cycling through leaf litter production. Due to the high water deficit presented during the first year of this study, the growth of trees was similar for all the treatments. Fertilization with phonolite provided greater water consumption, increased the leaf area index (LAI) and stem growth (volume and biomass), resulting in WUE similar to plants fertilized with KCl. The use of NaCl, despite to lead a smaller water consumption, provided WUE equal to plants fertilized with KCl. The use of phonolite and NaCl as KCl alternative sources could provide adequate supply of K and Na ions for *Eucalyptus* cultivation, providing equal wood production when compared to conventional fertilization.

Keywords: Eucalypt plantation; Agromineral; Phonolite; Sodium; Remineralizer

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precipitação pluvial mensal e temperatura média do ar registrados por estação meteorológica localizada no município de Luiz Antônio – SP. Início do experimento – mês do plantio das mudas de eucalipto	27
Figura 2. Deficiência e excedente hídrico do solo no município de Luiz Antônio – SP, segundo metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), durante o período de 2013 a 2015. CAD - Capacidade de água disponível no solo (2 m de profundidade) = 280 mm	27
Figura 3. Teores de K e Na trocáveis aos 10 (a e c) e 22 (b e d) meses após o plantio em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média, em plantação de eucalipto, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com KCl; FO_{120} - 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com fonolito; e NaCl - 73 kg ha ⁻¹ de Na ₂ O fertilizado com NaCl. Barras na horizontal junto aos pontos representam o erro padrão da média	37
Figura 4. Teores de Si trocáveis aos 10 (a) e 22 (b) meses após o plantio em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média em plantação de eucalipto, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com KCl; FO_{120} - 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com fonolito; e NaCl - 73 kg ha ⁻¹ de Na ₂ O fertilizado com NaCl. Barras na horizontal junto aos pontos representam o erro padrão da média	37
Figura 5. Teor foliar de K (a), Na (b) e Si (c) em plantação do híbrido <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>grandis</i> nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com KCl; FO_{120} - 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com fonolito; e NaCl - 73 kg ha ⁻¹ de Na ₂ O fertilizado com NaCl. Espaço compreendido entre as linhas tracejadas indica a faixa de teor adequado de K para a cultura do eucalipto (GONÇALVES, 2011). Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. Barra na vertical indica a LSD ($\alpha=0,05$). ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$)	39
Figura 6. Teor foliar de K em plantas de eucalipto submetidas às doses de K ₂ O fertilizado com KCl aos 10 (a), 22 (b) e 33 (c) meses após o plantio, e com fonolito aos 10 (d), 22 (e) e 33 (f) meses após o plantio. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. ns - modelo não significativo. * e **: significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste t	41
Figura 7. Teor foliar de Na em plantas de eucalipto fertilizadas com fonolito submetidas às doses crescentes de Na ₂ O aos 10 (a), 22 (b) e 33 (c) meses após o plantio, e de SiO ₂ aos 10 (d), 22 (e) e 33 (f) meses após o plantio. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. ns - modelo não significativo. **: significativo a 1% de probabilidade pelo teste t	42
Figura 8. Estoque e distribuição de K, Na e Si aos 13 (a, c, e) e 33 (b, d, f) meses após o plantio na parte aérea das árvores de eucalipto nos tratamentos Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com KCl; FO_{120} - 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com fonolito; e NaCl - 73 kg ha ⁻¹ de Na ₂ O fertilizado com NaCl. Colunas seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$). A barra representa a diferença mínima significativa	45
Figura 9. Altura (a) e diâmetro à altura do peito (DAP) em plantação de eucalipto nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com KCl; FO_{120} - 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O fertilizado com fonolito; e NaCl - 73 kg ha ⁻¹ de Na ₂ O fertilizado com NaCl. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$)	47

- Figura 10. Deposição de serapilheira mensal (a), estacional (b), acumulada (c) e índice de área foliar (d) em plantação de eucalipto nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO_{120} – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$). Barra na vertical representa LSD ($\alpha=0,05$)49
- Figura 11. Teores de K (a), Na (b) e Si (c) na serapilheira nas diferentes estações do ano em plantação de eucalipto nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO_{120} – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras acima das colunas representam o erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$). Colunas seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)50
- Figura 12. Deposição via folheto e acumulação na serapilheira de K (a), Na (b) e Si (c) nas diferentes estações do ano em plantação de eucalipto nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO_{120} – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras acima das colunas representam o erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$). Colunas seguidas pela mesma letra minúscula, em cada estação, não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)52
- Figura 13. Medição da umidade no solo com sonda capacitiva FDR (a) e coleta de amostras de solo indeformado para calibração do método74
- Figura 14. Sondas inseridas no tronco da árvore (a). Sistema hidráulico de pressão variável (b). Passagem forçada de água pelo segmento do caule (c). Diferenciação entre cerne e albúmeno com solução de safranina76
- Figura 15. Precipitação pluvial e umidade no solo ao longo do tempo para as camadas de 0 - 30 cm (a) e 30 - 160 cm (b) em Latossolo Vermelho Amarelo de textura média sob plantação de eucalipto, dos 14 aos 30 meses de idade, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{180} – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO_{180} – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. Capacidade de campo: água retida no solo sob pressão de -0,01 MPa; Ponto de murcha permanente: água retida no solo sob pressão de 1,5 MPa; CAD - Capacidade de água disponível no solo (2 m de profundidade) = 280 mm80
- Figura 16. Precipitação pluvial e umidade no solo ao longo do tempo para as camadas de 0 - 30 cm (a) e 30 - 160 cm (b) em Latossolo Vermelho Amarelo de textura média sob plantação de eucalipto, dos 14 aos 30 meses de idade, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. Capacidade de campo: água retida no solo sob pressão de -0,01 MPa; Ponto de murcha permanente: água retida no solo sob pressão de 1,5 MPa; CAD - Capacidade de água disponível no solo (2 m de profundidade) = 280 mm81
- Figura 17. Potencial hídrico foliar e déficit de pressão de vapor (DPV) na antemã (a) e ao meio dia (b) em plantação de eucalipto, dos 16 aos 28 meses de idade, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{180} – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO_{180} – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito. Barras na vertical indicam a LSD ($\alpha=0,1$). Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$)83

- Figura 18. Potencial hídrico foliar e déficit de pressão de vapor (DPV) na antemanhã (a) e ao meio dia (b) em plantação de eucalipto, dos 16 aos 28 meses de idade, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na vertical indicam a LSD ($\alpha=0,1$). Barras na vertical junto aos pontos representam erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$) 84
- Figura 19. Gradiente do potencial hidrodinâmico da água da raiz para a parte aérea ($\Psi_{\text{planta}} = \Psi_{\text{wf antemanhã}} - \Psi_{\text{wf meio dia}}$) em plantas de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* fertilizadas com KCl e fonolito (a) e KCl e NaCl (b); Controle – Ausência de potássio; KCl_{120,180} – 120 e 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl, respectivamente; FO₁₈₀ – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl 85
- Figura 20. Transpiração média e déficit de pressão de vapor diários (a) e transpiração acumulada (b), entre os 18 e 30 meses após o plantio de eucalipto, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₈₀ – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₈₀ – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. 86
- Figura 21. Transpiração média e déficit de pressão de vapor diários (a) e transpiração acumulada (b), entre os 18 e 30 meses após o plantio de eucalipto, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores anuais do balanço hídrico climatológico, segundo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), para o local do experimento, durante o período de condução do estudo	28
Tabela 2. Caracterização química do solo da área experimental antes da instalação do experimento	28
Tabela 3. Caracterização física do solo da área experimental antes da instalação do experimento	29
Tabela 4. Tratamentos avaliados no experimento	30
Tabela 5. Caracterização da fonte alternativa de K (rocha fonolito moída) utilizada no experimento	30
Tabela 6. Equações para estimativa do volume do tronco (com casca) e biomassa aérea	33
Tabela 7. Teor de K, Na e Si nos compartimentos aéreos de eucalipto fertilizado com fontes alternativas ao KCl	44
Tabela 8. Volume do tronco com casca de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>grandis</i> fertilizado com fontes alternativas ao KCl. Valores entre parênteses representam a variação percentual em relação ao Controle	48
Tabela 9. Biomassa aérea de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>grandis</i> fertilizado com fontes alternativas ao KCl. Valores entre parênteses representam a variação percentual em relação ao Controle	48
Tabela 10. Equações para estimativa do volume (com casca) e biomassa do tronco das árvores de eucalipto aos 18 e 30 meses após o plantio.....	78
Tabela 11. Incrementos em índice de área foliar, volume e biomassa do tronco, consumo de água e eficiência do uso da água dos 18 aos 30 meses após o plantio, em <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>grandis</i> fertilizado com fontes alternativas ao KCl.....	88

1. INTRODUÇÃO

Apesar da diminuição da área total de florestas naturais ao longo do globo entre os anos de 1990 e 2015 (4,28 para 3,99 bilhões de hectares), houve aumento da área total de florestas plantadas (167,5 para 277,9 milhões de hectares). Porém, a taxa de crescimento dos últimos cinco anos (2010 - 2015) foi de 1,2%, considerada abaixo da taxa sugerida como mínima para o suprimento satisfatório de madeira e fibra para todo o mundo (PAYN et al., 2015). Em função da baixa taxa de produção/consumo de produtos florestais por países em desenvolvimento ou crescimento demográfico acelerado (por exemplo: China e África do Sul), existe grande oportunidade de expansão das áreas de florestas plantadas (PAYN et al., 2015).

Atualmente, o gênero *Eucalyptus* é o segundo mais plantado no mundo, atrás apenas do *Pinus*. Existem mais de 20 milhões de hectares plantados com espécies de eucalipto, sendo mais da metade concentrada em três países: Índia, Brasil e China, representando respectivamente 20, 19 e 13% da área total cultivada (RITTER, 2014). A área total de florestas, no Brasil, cobre 54,4% do território nacional. As florestas plantadas representam 1,15% desta área, e apenas 0,84% do território nacional. Dentre as oito essências florestais mais plantadas no Brasil (Eucalipto, *Pinus*, Acácia, Seringueira, Paricá, Teca, Araucária e *Populus*), maior destaque é dado às plantações de eucalipto em função do rápido crescimento, dos avanços no manejo florestal, das práticas silviculturais e dos anos de pesquisas em melhoramento genético (SFB, 2013). No Brasil, as plantações de eucalipto se encontram espalhadas por 16 estados, sendo que Minas Gerais (28,2%), São Paulo (20,4%), Mato Grosso do Sul (11,9%) e Paraná (11,5%) apresentam as maiores extensões de florestas plantadas (ABRAF, 2013). No ano de 2011, a produção de bens florestais superou a marca de R\$17 bilhões, fornecendo mais de 600 mil empregos para o setor (SFB, 2013).

Os povoamentos florestais no Brasil são frequentemente realizados em áreas com solos muito intemperizados, sendo assim, com baixa fertilidade. Em recente estudo, constatou-se que as classes de solos mais utilizadas para plantações florestais eram os Latossolos (de textura média) e os Neossolos Quartzarênicos (GONÇALVES et al., 2013). Porém, mesmo nestas condições, o país conta com a maior produtividade de folhosas e coníferas do mundo, 36 e 31 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente (IBÁ, 2016). Tais patamares de produtividade são alcançados devido a fatores climáticos favoráveis, ao manejo florestal adequado, às características genéticas e à fertilização florestal (PAES et al., 2013).

Em termos mundiais, mais de 95% do K produzido é utilizado como fertilizante. O KCl representa 90% desse total, demonstrando a grande dependência mundial do setor agrícola

e florestal em relação a esse fertilizante (IBRAM, 2012). Em levantamento realizado no ano de 2014, constatou-se que os maiores depósitos de sais de K se encontram no Canadá, Bielorrússia e Rússia, com 1,1, 0,75 e 0,6 bilhões de toneladas de K_2O , respectivamente. Quanto aos fertilizantes potássicos, os mesmos países detêm mais de 70% da produção mundial. Já o Brasil, ocupa a 11ª posição em reservas e na produção mundial de K (DNPM, 2015).

O consumo nacional de K_2O sempre apresentou tendências crescentes, assim como suas projeções futuras, posicionando o país entre os três maiores consumidores de potássio do mundo (OGASAWARA et al., 2010; IBRAM, 2012). Em relatório recente sobre a evolução da demanda mundial por fertilizantes potássicos, estimou-se aumento do consumo de 31 milhões de toneladas de fertilizantes em 2014 para 34,5 milhões de toneladas em 2018 (taxa de 2,6% ano⁻¹), sendo o Brasil responsável por 18% do consumo mundial (FAO, 2015).

As rochas com potencial de utilização na agricultura, também conhecidas como agrominerais, possuem grande importância para pequenos e médio produtores, assim como na agricultura familiar e orgânica, pois podem ser fontes de nutrientes mais baratas que os fertilizantes convencionais (LUZ et al., 2010). De acordo com Luz et al. (2010) os mesmos autores, existem rochas importantes para o fornecimento de macronutrientes: rochas ultrabásicas alcalinas leucíticas (K, Mg, Ca, etc), basalto/gabro (Mg, Ca, etc), carbonatito (Ca, Mg, P, K, etc), kimberlito (K, Mg, etc), rochas silicáticas alcalinas - sienitos e nefelina sienitos (K, etc), rochas ácidas - granitos e gnaisses (K, etc), gipsita e rejeitos industriais - principalmente “fosfogesso” (S, Ca, P) e calcários – calcíticos e dolomíticos (Ca e Mg). Ressalta-se a importância das fontes potássicas visando diminuir a dependência externa desse nutriente. Nesse caso, as rochas mais relevantes são aquelas que possuem feldspato potássico em sua composição, assim como o fonolito e glauconito (verdete) (MARTINS et al., 2015). Salienta-se ainda que materiais silicáticos são fontes alternativas de micronutrientes, pois, comumente os apresentam de forma homogênea em sua constituição, além de, em alguns casos, possuírem poder de neutralização do solo (MARTINS et al., 2010). Além do fornecimento de nutrientes por meio de rochagem, é interessante frisar a importância desta prática na disponibilização de elementos benéficos como o Na e o Si. Rochas, quando moídas e aplicadas ao solo, podem disponibilizar maior quantidade de Si por, geralmente, possuírem altos teores do mesmo.

O K é o segundo nutriente mais demandado pelo eucalipto, existindo respostas em crescimento ao longo dos anos, tanto para plantações conduzidas por talhadia quanto em alto fuste (FARIA et al., 2002). Devido à grande parte dos solos florestais brasileiros serem deficientes neste nutriente, a prática da fertilização torna-se necessária para potencializar o

crescimento e desenvolvimento das plantações (ALMEIDA et al., 2007). Dessa forma, a obtenção de insumos para a fabricação de fertilizantes potássicos se torna importantíssima, além do agravante de existir apenas uma jazida desse nutriente em operação no país, resultando em bilhões de dólares gastos com importações (IBRAM, 2013).

O Na é considerado um elemento benéfico para as plantas. Sua importância é notada devido à sua essencialidade para certas espécies, efeito positivo no crescimento vegetal e possibilidade de substituição parcial do K em alguns mecanismos (MARSCHNER, 2012). A substituição do K pelo Na foi evidenciada para o controle osmótico e estomático, na fotossíntese, como íon acompanhante de transporte em grandes distâncias e como ativador de enzimas (SUBBARAO et al., 2003; KRONZUCKER et al., 2013). Porém, os resultados variam em relação à espécie avaliada. Em plantas xerófitas, são conhecidos importantes papéis do Na no ajuste do metabolismo, através do seu acúmulo nas folhas, aumentando a tolerância das plantas à seca (MA et al., 2012; KANG et al., 2015).

Fertilizações com fontes silicatadas fornecem o ácido monossilícico Si(OH)_4 , forma como é absorvida pelas raízes, porém ainda não se sabe ao certo a sua forma de translocação pelos vegetais (MARSCHNER, 2012), com exceção do arroz (MA; YAMAJI., 2008), podendo variar entre as espécies. Na planta, o Si tem como funções a ativação de mais de 60 enzimas e influencia no controle estomático (quando associado ao K) aumentando a tolerância da planta ao déficit hídrico (SCHOULTZ et al., 2012). O Si tem uma participação indireta no aumento de produtividade dos vegetais, pois promove o endurecimento das folhas, tornando-as mais eretas, aliviando estresses bióticos e abióticos (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 2012).

A água é apontada como fator abiótico mais limitante ao crescimento de plantações florestais nos trópicos (STAPE et al., 2004a). De acordo com Stape et al. (2004), a cada incremento de 100 mm ano⁻¹ de precipitação pluvial há incremento de 2,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na produtividade. Citam ainda a importância de maiores valores de precipitação e baixas taxas de déficit de pressão de vapor para a manutenção da eficiência de uso da água (EUA) em níveis elevados, culminando em altas produtividades. Tendo em vista os inúmeros povoamentos florestais localizados em áreas com déficit hídrico, notadamente em climas Aw e Cwa segundo a classificação de Köppen (GONÇALVES et al, 2013), e episódios de crises hídricas e elevação da temperatura média do ar no estado de São Paulo (MARENGO; ALVES, 2015), estudos concernentes à dinâmica da água e EUA em povoamentos de eucalipto fertilizados com K tornam-se cada vez mais relevantes, principalmente atrelados a utilização de fontes alternativas de nutrientes.

Portanto, este estudo objetivou avaliar o crescimento e a nutrição de uma plantação clonal de *Eucalyptus urophylla* x *grandis*, bem como suas respostas ecofisiológicas quando submetido às fertilizações potássicas, sódicas e rocha fonolito, em região com período de déficit hídrico pronunciado.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.C.R., LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, R.M.; ROJAS, J.S.D. Índice de área foliar de *Eucalyptus grandis* em resposta à adubação com potássio e sódio. In: I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o ciclo Hidrológico. 2007. Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi, 2007. p.1 -7.
- DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2015. 135p.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America**, Washington, v. 91, p. 11-17, 1994.
- FAO. **World fertilizer trends and outlook to 2018**. Roma, 2015. 53p.
- FARIA, G.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; LIMA, J.C.; TEIXEIRA, J.L. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 577-584, 2002.
- IBÁ. Industria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2016**, Brasília, IBÁ, 2016. 100p.
- IBRAM. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. Brasília, 2015. 25p.
- GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.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**, Amsterdam, v. 301. p. 6-27, 2013.
- KANG, J.J.; ZHAO, W.Z.; ZHAO, M.; ZHENG, Y.; YANG, F. NaCl and Na₂SiO₃ coexistence strengthens growth of the succulent xerophyte *Nitraria tangutorum* under drought. **Plant Growth Regulation**, Basel, v. 77, p. 223–232, 2015.

- KRONZUCKER, H.J.; COSKUN, D.; SCHULZE, L.M.; WONG, J.R.; BRITTO, D.T. Sodium as nutrient and toxicant. **Plant and Soil**, New York, v. 369, p. 1-23, 2013.
- OGASAWARA, E.; KULAIF, Y.; FERNANDES, F.R.C. A indústria brasileira de fertilizantes (cadeia NPK, enxofre, rocha fosfática e potássio) - projeções de 2010 a 2030. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B.(Ed). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010. p. 145-168.
- LUZ, A.B.; LOUREIRO, F.E.L.; SAMPAIO, J.A.; CASTILHOS, Z.C.; BEZERRA, M.S. Rochas, minerais e rotas tecnológicas para a produção de fertilizantes alternativos. In: FERNANDES, F.R.C.; LUZ, A.B.; CASTILHOS, Z.C. (Ed). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010. p. 61-88.
- MA, Q.; YUE, L.J.; ZHANG, J.L.; WU, G.Q.; BAO, A.K.; WANG, S.M. Sodium chloride improves photosynthesis and water status in the succulent xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum*. **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, p. 4–13, 2012.
- MA, J.F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and molecular life sciences**, Basel, v. 65, p. 3049-3057, 2008.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Geosp - Espaço e Tempo**. v. 19, p. 485-494, 2016.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3ª ed. Londres: Academic Press, 2012. 651 p.
- MARTINS, E.S.; RESENDE, A.V.; OLIVEIRA, C.G.; FURTINI-NETO, A.E. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: FERNANDES, F.R.C.; LUZ, A.B.; CASTILHOS, Z.C. (Ed). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010. p. 89-104.
- MARTINS, V.; SILVA, D.R.G.; MARCHI, G.; LEITE, M.C.A.; MARTINS, E.S.; GONÇALVES, A.S.F.; GUILHERME, L.R.G. Effect of alternative multinutrient sources

on soil chemical properties. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 194-204, 2015.

PAES, F.A.S.V; LIMA, A.M.N.; HAKAMADA, R.E.; BARROS, N.F. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1081-1090, 2013.

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**, Amsterdam, v. 352, p. 57-67, 2015.

RITTER, M. Field guide to the cultivated eucalypts (Myrtaceae) and how to identify them. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, St. Louis, v. 99, p. 642–687, 2014.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas do Brasil em resumo - 2013: dados de 2007-2012**. Brasília: SFB, 2013. 186 p.

SCHOULTZ, B.; BORA, K.C.; NOGUEIRA, A.C.; AUER, C.G. Uso do silicato de potássio no controle de oídio em mudas de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, p. 93-99, 2012.

SUBBARAO, G.V.; ITO, O.; BERRY, W.L.; WHEELER, R.M. Sodium - A functional plant nutriente. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 22, p. 391-416, 2003.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 17-31, 2004.

2. FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DE POVOAMENTO DE EUCALIPTO FERTILIZADO COM FONTES ALTERNATIVAS AO KCl

Resumo

A grande maioria dos povoamentos florestais ocupa áreas com solos distróficos, sendo frequentemente pobres em K. Cerca de 90% do KCl utilizado no Brasil é importado; por isso, os esforços para a identificação de fontes alternativas de K têm se tornado necessário. A rocha fonolito apresenta-se como interessante fonte alternativa ao KCl, devido à existência de K em sua composição, e por ser fonte de elementos benéficos como o Na e o Si. Outra fonte alternativa ao KCl é o NaCl, o qual promove o fornecimento de Na em substituição parcial ao K, não alterando as condições nutricionais do eucalipto, e possui menor preço. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar a fertilidade do solo, nutrição, estoque, deposição de K, Na e Si e o crescimento em povoamentos de clones dos híbridos *Eucalyptus urophylla* x *grandis* fertilizado com fontes alternativas ao KCl. Comparou-se a ausência da fertilização potássica e sódica com a aplicação de 73 kg ha⁻¹ de Na₂O, fertilizado com NaCl, e doses de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizados com KCl e fonolito. Durante o estudo, foram avaliados a fertilidade do solo, o estado nutricional das árvores, o crescimento e produção de biomassa aérea vegetal, o estoque, e a deposição de K, Na e Si por meio da serapilheira. A fertilização com KCl elevou o teor trocável de K do solo em 24%, o teor de K nas folhas em 5%, o estoque de K na biomassa aérea em 19% e a deposição de K, via serapilheira, em 25%. A aplicação de NaCl elevou o teor trocável de Na no solo em 43%, o teor de Na nas folhas em 67%, o estoque de Na na biomassa aérea em 92% e a deposição de Na em 51%. O uso do fonolito aumentou em sete vezes o teor trocável de Na na camada superficial do solo, aumentou o teor foliar de Na em 61%, o estoque de Na na biomassa aérea em 61% e a deposição de Na em 76%. O fonolito aumentou o teor de K foliar em 14% apenas aos 22 meses após o plantio, e proporcionou maior estoque de Si na biomassa aérea das plantas, alocando-o, principalmente, nas folhas. Nenhuma fertilização promoveu maior incremento em volume do tronco e biomassa aérea até os 33 meses de idade, mas apresentaram indícios de resposta em crescimento ao longo do tempo. De forma geral, o fonolito e o NaCl se apresentaram como fontes alternativas ao KCl, tendo em vista o fornecimento de Na às árvores sem comprometer o crescimento e desenvolvimento das árvores.

Palavras-chave: Fertilização; Silvicultura; Ciclagem de nutrientes; Elementos benéficos

Abstract

The vast majority of forest stands occupies areas of dystrophic soils, often poor in K. About 90% of KCl used in Brazil is imported. Therefore, efforts to identify K alternative sources have become necessary. The phonolite rock presents itself as an interesting alternative source to KCl because of the existence of K in its composition, and because it is a source of beneficial elements such as Na and Si. Another alternative source to KCl is NaCl, which promotes the provision of Na partially replacing K, not changing the *Eucalyptus* nutritional conditions, and has the lowest price. Thus, the aim of this study was to evaluate soil fertility, nutrition, stock, deposition of K, Na and Si and the growth of a stand of hybrid clones of *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* fertilized with KCl alternative sources. We compared the absence of potassium and sodium fertilization with application of 73 kg ha⁻¹ Na₂O, fertilized with NaCl, and doses of 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ K₂O fertilized with KCl and phonolite. During the study, we evaluated soil fertility, nutritional status of the trees, growth and biomass production, and the stock and deposition of K, Na and Si via litterfall. Fertilization with KCl increased the exchangeable K content of soil in 24%, the K concentration in the leaves at 5%, the stock of K in the aboveground biomass by 19% and the deposition of K via litterfall by 25%. The application of NaCl increased the content of exchangeable Na in the soil at 43%, the concentration of Na in the leaves at 67%, the Na stock in aboveground biomass of 92% and the deposition of Na by 51%. The use of phonolite increased by seven times the content of exchangeable Na in the first soil layer, increased foliar Na concentration by 61%, the stock Na in aboveground biomass by 61%, and the deposition of Na by 76%. The phonolite increased leaf K content of 14% at 22 months after planting and provided high stock of Si in the aerial biomass of the plants by allocating it, mainly, in the leaves. No fertilization promoted greater increase in stem volume and biomass up to 33 months of age, but showed evidence of growth response there of over time. In general, the phonolite and NaCl has shown to be alternatives to KCl sources in order to provide Na without compromising the growth and development of trees.

Keywords: Fertilization; Forestry; Cycling nutrients; Beneficial elements

2.1. Introdução

As plantações florestais brasileiras se localizam em solos muito intemperizados, Latossolos de textura média e Neossolos Quartzarênicos, tornando-se imprescindível a prática de fertilização para o fornecimento de nutrientes necessários para a formação e manutenção de povoamentos florestais de alta produtividade (GONÇALVES et al, 2013). Mesmo instalados em locais pouco propícios ao crescimento vegetal, o Brasil possui a maior produtividade entre plantações de folhosas ($36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e coníferas do mundo ($31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (IBÁ, 2016). Além da fertilização, as condições climáticas favoráveis, o manejo florestal adequado e as características genéticas apropriadas são responsáveis por tais patamares de produtividade (PAES et al, 2013). Porém, em longo prazo, a sustentabilidade dos povoamentos florestais de rápido crescimento deve ser alvo de reflexão, tendo em vista as grandes quantidades de K que são exportadas ($> 100 \text{ kg ha}^{-1}$, aos 7 anos de idade) a cada rotação de plantio pela remoção da biomassa (LACLAU et al, 2010; ROCHA et al, 2014).

O K é o segundo nutriente mais consumido pelo eucalipto. Desta forma, as fertilizações potássicas proporcionam grandes respostas em crescimento, tanto para plantações conduzidas por talhadia quanto em alto fuste, principalmente em solos com baixa fertilidade química (FARIA et al, 2002; GONÇALVES et al, 2008; LACLAU et al, 2009). O K contribui para manter o alto turgor requerido para a elongação celular de órgãos em crescimento, especialmente na zona cambial, para a formação de madeira (FROMM, 2010), para aumentar a longevidade foliar do eucalipto (LACLAU et al, 2009), além de desempenhar importante papel de regulador do potencial osmótico, controlar os movimentos estomáticos, ativar enzimas envolvidas na respiração e na fotossíntese e auxiliar no transporte de solutos (BRISKIN; BLOOM, 2013). Por ser um nutriente móvel e lixiviável nas plantas, o K assume grande importância para a ciclagem de nutrientes nas plantações de rápido crescimento (LACLAU et al, 2005; 2010; ZÖRB et al, 2014). Espécies de eucalipto mostram-se muito eficientes na retranslocação de K acumulado na biomassa, permitindo que várias espécies do gênero se adaptem e sejam produtivas em sítios de baixa fertilidade química natural (LACLAU et al, 2000).

No Brasil existe apenas uma jazida de extração de K em operação, localizada no município de Rosário do Catete (Sergipe). A extração de sais de K abastece menos de 10% da demanda nacional e tem previsão de funcionamento até 2018, com estudos em andamento visando a extensão de sua vida útil (DNPM, 2015). Em função da relevância do K para as plantas, é de suma importância que esforços sejam feitos em prol do descobrimento de novas

fontes do elemento, bem como testes de viabilidade econômica e prática das mesmas (LUZ et al, 2010). Além das fontes orgânicas, são exemplos de fontes alternativas de K: rochas moídas (verdete, fonolito, rocha ultramáfica, etc.) e subprodutos de mineração (GUERRINI, 2014; MARTINS et al., 2015). O fonolito destaca-se como fonte alternativa ao KCl por apresentar numerosas reservas pelo país, demonstrar resultados promissores em disponibilização de K e fornecer elementos benéficos como o Na e o Si (CORTES et al., 2010; LUZ et al, 2010; MARTINS et al., 2015).

Neste estudo foram formuladas as seguintes hipóteses;

- I) A aplicação de fonolito aumenta o teor de K, Na e Si trocável no solo sob cultivo de eucalipto;
- II) A fertilização com fonolito gera absorção balanceada de K, Na e Si em povoamentos clonais de eucalipto, aumentando os estoques de cada um desses elementos na biomassa aérea das árvores;
- III) O uso de fonolito promove maior crescimento de povoamento de eucalipto comparativamente à fertilização com KCl e NaCl;
- IV) A deposição de K, Na e Si, por meio das folhas senescentes, é maior em povoamento de eucalipto fertilizado com fonolito em comparação ao KCl e NaCl.

O presente estudo objetivou avaliar a resposta de plantações clonais do híbrido *E. urophylla* x *grandis*, promovida pela fertilização com doses e fontes de nutrientes, por meio da, i) alteração na fertilidade do solo; ii) modificação nos teores foliares e estoque de K, Na e Si nos compartimentos aéreos; iii) evolução do crescimento das árvores; iv) influência das fertilizações na ciclagem de K, Na e Si por meio da deposição de folhas.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi instalado em junho de 2013 no município de Luiz Antônio - SP (21° 38' 48,9'' S e 47° 41' 35,9'' O), em altitude média de 665 m. De acordo com a classificação de Köppen, a região possui clima mesotérmico úmido (Cwa), com temperatura média anual de 22 °C e precipitação pluvial média anual de 1.400 mm (ALVARES et al., 2013). Ao longo do período de estudo, foram caracterizados mensalmente a pluviosidade e a temperatura média do ar em uma estação meteorológica, instalada em área com características climáticas similares à do presente experimento (Figura 1). Com base nas variáveis climáticas coletadas, foi calculado

o balanço hídrico do solo durante o período de condução do estudo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955) entre janeiro de 2013 e dezembro de 2015 (Figura 2, Tabela 1).

Figura 1. Precipitação pluviométrica mensal e temperatura média do ar registrados por estação meteorológica localizada no município de Luiz Antônio – SP. Início do experimento – mês do plantio das mudas de eucalipto

Figura 2. Deficiência e excedente hídrico do solo no município de Luiz Antônio – SP, segundo metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), durante o período de 2013 a 2015. CAD - Capacidade de água disponível no solo (2 m de profundidade) = 280 mm

Tabela 1. Valores anuais do balanço hídrico climatológico, segundo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), para o local do experimento, durante o período de condução do estudo

Ano	Temperatura Média			PP ⁽¹⁾	ETP ⁽²⁾	ETR ⁽³⁾	EXC ⁽⁴⁾	DEF ⁽⁵⁾	Meses com
	Máxima	Média	Mínima						DEF ⁽⁶⁾
	°C			mm					
2013	22,4	21,6	20,9	1449	1293	1177	271	117	5
2014	24,4	23,0	21,7	1110	1547	1180	0	367	9
2015	28,5	22,4	17,9	1344	1105	1052	222	54	6
Média	25,1	22,4	20,2	1301	1315	1136	164	179	6,7
DP ⁽⁷⁾	3,1	0,7	2,0	173	222	73	144	166	2,1

(1) Precipitação pluvial anual; (2) Evapotranspiração potencial, calculada segundo Thornthwaite e Mather (1955); (3) Evapotranspiração real; (4) Soma do excedente hídrico no ano; (5) Soma do déficit hídrico no ano; (6) Número de meses que apresentaram déficit hídrico no ano; (7) Desvio padrão. Capacidade de água disponível (CAD) = 280 mm

Antes da implantação do experimento, foram coletadas amostras compostas de solo (10:1) até 60 cm de profundidade, distribuídos ao longo da área experimental (1,7 ha) para a caracterização química e física (Tabela 2 e 3), conforme métodos descritos por Raij et al., (2001) e Embrapa (1997). O relevo local é suave ondulado e o solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura média (EMBRAPA, 2013). O solo apresentou altos teores de P e Ca, médios de Mg e M.O. e muito baixo de K na camada de 20 cm de solo (GONÇALVES, 2011). Devido ao baixo teor de K, a área experimental foi considerada ideal para teste com fertilizantes potássicos.

Tabela 2. Caracterização química do solo da área experimental antes da instalação do experimento

Profundidade	M.O.S. ⁽¹⁾	pH ⁽²⁾	P ⁽³⁾	Si ⁽⁴⁾	K ⁽³⁾	Ca ⁽³⁾	Mg ⁽³⁾	Al ⁽⁵⁾	Na ⁽⁶⁾	C.T.C.	H + Al
cm	g dm ⁻³	-	mg dm ⁻³	mg kg ⁻¹	mmol _c dm ⁻³						
0-20	16,0	4,3	8,5	2,7	0,5	8,3	3,3	4,5	0,2	53,4	41,3
20-40	14,5	4,3	6,5	3,0	0,2	4,5	2,5	5,3	0,1	41,6	34,3
40-60	11,8	4,3	6,0	3,1	0,2	3,5	2,0	6,3	0,1	36,8	31,0

M.O.S. - Matéria orgânica do solo; C.T.C. - Capacidade de troca de cátions; (1) -oxidação com dicromato/colorimétrico; (2) - solução de CaCl₂ em 0,01 mol L⁻¹ (1:2,5); (3) - resina trocadora de íons; (4) - solução de CaCl₂ em 0,01 mol L⁻¹ (1:10); (5) - KCl (1 mol L⁻¹); (6) - Mehlich-I

Tabela 3. Caracterização física do solo da área experimental antes da instalação do experimento

Prof.	Composição granulométrica			Ds ^{*(1)}	Dp ^{*(2)}	Porosidade			CC ^{*(6)}	PMP ^{*(7)}	AD ^{*(8)}
	Argila	Silte	Areia			PT ^{*(3)}	Map ^{*(4)}	Mip ^{*(5)}			
cm	g kg ⁻¹			g cm ⁻³		mm ³ mm ⁻³			mm cm ⁻¹		
0-20	172	88	741	1,37	2,67	0,49	0,30	0,19	0,15	0,07	0,8
20-40	186	88	727	-	-	-	-	-	-	-	-
40-60	196	79	725	1,45	2,69	0,46	0,26	0,20	0,17	0,08	0,9

Prof. – profundidade; * Referentes às profundidades de 0-10 e 40-50 cm. Ds - densidade do solo; Dp - densidade de partículas; PT - porosidade total; Map - Macroporosidade; Mip - microporosidade; CC - capacidade de campo; PMP - ponto de murcha permanente; AD - água disponível. (1) - método do anel volumétrico; (2) - método do picnômetro; (3) = $1 - (Ds/Dp)$; (4) = $PT - Mip$; (5) - água retida a -0,006 MPa; (6) - água retida a -0,01 MPa; (7) - água retida a -1,5 MPa e (8) = $CC (\%) - PMP (\%)/10$

2.2.2. Instalação e condução do experimento

Os tratamentos constituíram-se de duas fontes de K (KCl e fonolito) e uma de Na (NaCl). Logo após o plantio todos os tratamentos receberam 10 kg ha⁻¹ de K₂O, segundo a fertilização completa de plantio, visando garantir a sobrevivência das mudas. Foram empregadas as doses de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de K₂O da seguinte forma: 1 - Controle absoluto sem fertilização (Controle-A); 2 - Controle sem fertilização potássica (Controle); 3, 4 e 5 - fertilização com 83, 183 e 283 kg ha⁻¹ de KCl (KCl_{60, 120 e 180}); 6, 7 e 8 - fertilização com 625, 1375 e 2125 kg ha⁻¹ de fonolito (FO_{60, 120 e 180}); 9 - fertilização com 204 kg ha⁻¹ de NaCl (NaCl) (Tabela 4). O fertilizante KCl apresentou 60% de K₂O disponível, enquanto o NaCl conteve 52,5% de Na₂O disponível. O fonolito apresentou, 8% de K₂O e 5% de Na₂O total. No tratamento NaCl, a quantidade molar de Na⁺ foi igual a de K⁺ aplicada nos tratamentos KCl₁₂₀ e FO₁₂₀.

O fonolito é uma rocha vulcânica alcalina, com alto teor de Si, contendo essencialmente feldspato alcalino e feldspatóides. Após o processo de moagem, o fonolito pode ser utilizado como fertilizante, de modo semelhante ao calcário (LUZ et al., 2010). Dentre as rochas que possuem potencial de utilização como fertilizantes, o fonolito se destaca pelo alto teor de K total, sendo frequentemente estudada como substituto do KCl na agricultura brasileira (CORTES et al., 2010). Uma amostra do lote de fonolito utilizado no presente estudo foi analisada para efeito de caracterização (MAPA, 2014) (Tabela 5).

Tabela 4. Tratamentos avaliados no experimento

Tratamento	Fertilização completa de plantio					1ª fertilização de cobertura (1ª FC)					2ª fertilização de cobertura (2ª FC)		
	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	FTE ⁽¹⁾	CAL ⁽²⁾	N	K ₂ O	B	Na ₂ O	SiO ₂	K ₂ O	B	Na ₂ O
	kg ha ⁻¹												
1 Controle-A	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 Controle	10	10	60	20	2000	50	-	1,7	-	-	-	3,3	-
3 KCl ₆₀	10	10	60	20	2000	50	50	1,7	-	-	-	3,3	-
4 KCl ₁₂₀	10	10	60	20	2000	50	50	1,7	-	-	60	3,3	-
5 KCl ₁₈₀	10	10	60	20	2000	50	50	1,7	-	-	120	3,3	-
6 FO ₆₀	10	10	60	20	2000	50	50	1,7	30	380	-	3,3	-
7 FO ₁₂₀	10	10	60	20	2000	50	110	1,7	64	830	-	3,3	-
8 FO ₁₈₀	10	10	60	20	2000	50	170	1,7	100	1300	-	3,3	-
9 NaCl	10	10	60	20	2000	50	-	1,7	33	-	-	3,3	40

⁽¹⁾ FTE – Fritted traced elements (FTEBR-12); ⁽²⁾ CAL – Calcário dolomítico

Tabela 5. Caracterização da fonte alternativa de K (rocha fonolito moída) utilizada no experimento

Teor	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Na ₂ O	SiO ₂	Granulometria
								(passante pela peneira de 0,3 mm)**
	%							
Total	ND	8,2	0,7	ND	4,5	4,8	61,9	91
Solúvel*	-	1,2	-	-	-	3,9	-	

*Solúvel em ácido cítrico 2%, relação 1/100. **Peneira N° 50 ABNT. ND – Não detectado

Utilizou-se o delineamento em blocos ao acaso, com nove tratamentos e quatro repetições, totalizando 36 parcelas. Cada parcela compreendeu oito linhas com oito plantas e bordadura dupla, perfazendo 16 árvores na área útil. Em junho de 2013, foi realizado o plantio do clone IPB8 (*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden; nº de registro: 21008) no espaçamento 3 m x 2,5 m.

Na fertilização completa de plantio, foram fornecidos 10 kg ha⁻¹ de N, 10 kg ha⁻¹ de K₂O, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 20 kg ha⁻¹ de *Fritted traced elements* (FTE) e 2000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico (aplicado em área total sem incorporação). O tratamento Controle-A recebeu fertilização mais restrita, sendo fornecido apenas N, K₂O e P₂O₅ nas quantidades de 10 kg ha⁻¹. O N, P, K e o FTE foram aplicados em covetas laterais (aproximadamente 20 cm de distância da muda). As fontes de N, P e micronutrientes utilizadas foram o sulfato de amônio (20% de N e 24% de S), o superfosfato triplo (46% de P₂O₅) e o FTE BR-12 (1,8% de B, 0,8% de Cu, 2,0% de Mn, 0,1% de Mo e 9,0% de Zn).

A fertilização de cobertura (FC) foi parcelada em duas aplicações, sendo um terço da dose aplicada aos três meses após o plantio, e os outros dois terços, aos oito meses. Esta

fertilização foi realizada sobre o solo na área de projeção da copa. Na 1ª FC, todos os tratamentos receberam 50 kg ha⁻¹ de N e 1,7 kg ha⁻¹ de B. Os tratamentos KCl₆₀, 120 e 180 receberam 50 kg ha⁻¹ de K₂O. O tratamento NaCl recebeu 33 kg ha⁻¹ de Na₂O. Na 2ª FC, todos os tratamentos receberam 3,3 kg ha⁻¹ de B. Os tratamentos KCl₁₂₀ e KCl₁₈₀ receberam 60 e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente. O tratamento NaCl recebeu 40 kg ha⁻¹ de Na₂O. A fertilização com fonolito (FO₆₀, FO₁₂₀ e FO₁₈₀) foi realizada em aplicação única, distribuído superficialmente em área total e sem incorporação, aos dois meses após o plantio das mudas. A opção por este método de aplicação ocorreu devido à lenta solubilização do fonolito. A fonte de B utilizada foi a ulexita acidificada (10% de B solúvel). As demais fontes foram as mesmas utilizadas na fertilização completa de plantio.

2.2.3. Avaliações

2.2.3.1. Fertilidade do solo

A fertilidade do solo foi determinada aos 10 e 22 meses após o plantio, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm. Visando a comparação entre as fontes alternativas ao KCl, avaliaram-se os tratamentos Controle, KCl₁₂₀, FO₁₂₀ e NaCl. A amostragem foi realizada na linha de plantio da área útil da parcela com trado holandês. Cada parcela teve quatro pontos amostrados, em sentido diagonal, os quais foram agrupados para formar uma amostra composta. O solo foi seco ao ar, destorreado e peneirado (malha 2 mm). Foram analisados os teores trocáveis de K (extraído por resina trocadora de ânions), Na (Mehlich 1) e Si (solução de CaCl₂ a 0,01 mol L⁻¹; relação 1:10) (RAIJ et al., 2001; KORNDÖRFER et al., 2004).

2.2.3.2. Análise química foliar

Aos 10, 22 e 33 meses após o plantio foram coletados os 3º e 4º pares de folha completamente desenvolvidos em galhos localizados no terço superior da copa, em quatro árvores de circunferência à altura do peito (CAP) médias na área útil da parcela. Foram avaliados todos os tratamentos, com exceção do Controle-A. Nas duas primeiras épocas, foram coletadas 16 folhas por planta, sendo quatro folhas por quadrante (N, S, L e O). Na última época, coletou-se as folhas em árvores abatidas para realização da cubagem rigorosa e biomassa aérea. As amostras foram secas em estufa (65 °C) até atingirem massa constante, trituradas em moinho (Willey) e encaminhadas ao Laboratório de Ecologia Aplicada (LEA/ESALQ/USP) e Laboratório de Tecnologia de Fertilizantes (LAFER/ICIAG/UFU). As amostras foram

digeridas em ácido nitroperclórico para posterior determinação dos teores de K e Na com auxílio do fotômetro de chama (MALAVOLTA et al., 1997). Os teores de Si foram determinados com auxílio do espectrofotômetro UV-visível, após passarem por digestão em água oxigenada (KORNDÖRFER et al., 2004).

2.2.3.3. Inventário florestal e produção de biomassa aérea

O crescimento das árvores foi avaliado aos 10, 18, 22 e 33 meses após o plantio por meio da mensuração da altura total (H), com auxílio de régua milimetrada e hipsômetro (modelo Vertex III), e CAP, com fita métrica. Posteriormente, os dados de CAP foram transformados em diâmetro à altura do peito (DAP). Foram avaliados os tratamentos Controle, KCl_{120} , FO_{120} e $NaCl$. O volume do tronco e a biomassa aérea das árvores foram estimados aos 13 e 33 meses após o plantio. Nestas épocas, foram abatidas 27 árvores, uma árvore por tratamento, em três blocos experimentais. A seleção das árvores foi realizada com base em três classes diamétricas, as quais foram estabelecidas a partir da classificação de todas as árvores do experimento. Todos os tratamentos tiveram um representante por classe diamétrica. Nos dois períodos, os nove tratamentos foram considerados estatisticamente iguais, em relação à CAP das árvores. Por isso, reuniram-se todos os indivíduos, em cada campanha, para formar a base de dados utilizada no ajuste das equações de volume do tronco e biomassa aérea (Tabela 6).

O método de cubagem rigorosa utilizado foi o de Smalian (SCOLFORO; THIERSCH, 2004). Para o ajuste das equações de volume do tronco e biomassa aérea foram testados os modelos de Spurr, Stoate e Schumacher-Hall (GOMES; GARCIA, 1993). A escolha das equações utilizadas foi baseada nos critérios do coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) (GOMES; GARCIA, 1993).

Tabela 6. Equações para estimativa do volume do tronco (com casca) e biomassa aérea

Equação	R ² ajustado (%)
<i>13 meses após o plantio</i>	
Volume do tronco com casca (Vol _{tc}) - Schumacher-Hall $Vol_{tc} = 9,8 \times 10^{-5} DAP^{1,6655} H^{0,8658}$	99*
Biomassa do lenho (B _l) – Schumacher-Hall $B_l = 5,8 \times 10^{-2} DAP^{2,3675}$	94*
Biomassa de casca (B _c) - Schumacher-Hall $B_c = 1,18 \times 10^{-2} DAP^{2,2565}$	92*
Biomassa de galho (B _g) - Schumacher-Hall $B_g = 0,3994 DAP^{2,1820} H^{-1,0057}$	87*
Biomassa de folha (B _f) - Schumacher-Hall $B_f = 0,1452 DAP^{1,5625}$	88*
Índice de Área foliar (IAF) – Stoate $IAF = -0,0203 - 0,01108 DAP^2 H + 0,1631 DAP^2$	86*
<i>33 meses após o plantio</i>	
Volume do tronco com casca (Vol _{tc}) - Stoate $Vol_{tc} = 0,01881 + 6,33 \times 10^{-5} DAP^2 H - 6,03 \times 10^{-4} DAP^2$	99*
Biomassa do lenho (B _l) – Schumacher-Hall $B_l = 6,21 \times 10^{-4} DAP^{1,5799} H^{2,3981}$	94*
Biomassa de casca (B _c) - Schumacher-Hall $B_c = 2,66 \times 10^{-2} DAP^{1,9543}$	74*
Biomassa de galho (B _g) - Schumacher-Hall $B_g = 1,02 \times 10^{-3} DAP^{3,3449}$	95*
Biomassa de folha (B _f) - Spurr $B_f = -0,6491 + 1,76 \times 10^{-3} DAP^2 H$	93*
Índice de Área foliar (IAF) – Spurr $IAF = 0,0966 + 2,01 \times 10^{-3} DAP^2 H$	91*

Unidades: Volume - m³ árvore⁻¹, Biomassa – kg árvore⁻¹, DAP - cm, H - m; *significância do modelo p < 0,0001

As árvores utilizadas para a cubagem rigorosa foram separadas em compartimentos aéreos (lenho, casca, galho e folha) e tiveram suas massas frescas totais medidas em campo com balança digital (0,01 kg de precisão). Amostras de cada compartimento da planta foram coletadas e também pesadas em campo. Essas amostras foram levadas ao laboratório e secas em estufa de circulação forçada de ar (65 °C), até atingirem massa constante, e tiveram sua massa seca aferida. Com essas informações, foi calculada a umidade das amostras para extrapolação e estimação da biomassa seca de cada árvore.

2.2.3.4. Absorção e estoque de nutrientes nas árvores

Os compartimentos (lenho, galho, casca e folha) das árvores abatidas para a mensuração da biomassa aérea foram submetidos à análise química para a determinação dos teores de K, Na e Si (metodologia descrita no item 2.2.3.2.). Foram avaliados os tratamentos Controle, KCl₁₂₀, FO₁₂₀ e NaCl. As quantidades de nutrientes estocadas por compartimento (EN_{ij}), em cada tratamento, foram estimadas segundo a eq. (1):

$$EN_{ij} = TN_{ij} \times BS_j \quad (1)$$

Em que:

EN_{ij} = Estoque do nutriente “i” no compartimento “j” da árvore (kg ha⁻¹);

TN_{ij} = Teor médio do nutriente “i” no compartimento “j” da árvore (g kg⁻¹ ou mg kg⁻¹);

BS_j = Biomassa seca do compartimento “j” da árvore (kg ha⁻¹).

2.2.3.5. Área foliar

As copas das árvores abatidas foram divididas em três posições (superior, médio e inferior), das quais foram coletadas 30 folhas sadias por terço, que tiveram suas massas medidas em campo. As folhas foram armazenadas e mantidas em ambiente refrigerado até chegarem ao laboratório, onde foram escaneadas (Epson Perfection V550 Photo; 300 DPI de resolução) e tiveram a área foliar determinada com o auxílio do software ImageJ. Em seguida, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar (65 °C) até atingirem massa constante e tiveram sua massa seca aferida. De posse dos resultados, foi calculada a área foliar específica (AFE) utilizando-se a eq. (2):

$$AFE \text{ (m}^2 \text{ kg}^{-1}\text{)} = \frac{\text{(Área foliar da amostra)}}{\text{(Massa seca da amostra)}} \quad (2)$$

O índice de área foliar (IAF) de cada árvore abatida foi calculado pelo produto da massa seca de folhas pela AFE de cada terço. O IAF das demais árvores da área útil da parcela foram estimados segundo as equações geradas (Tabela 6), utilizando-se a mesma metodologia citada para as equações de volume e biomassa.

2.2.3.6. Deposição de folheto e nutrientes

A coleta da serapilheira depositada teve início aos 15 meses após o plantio, sendo realizada quinzenalmente, por 15 meses. Foram confeccionados coletores com cano de policloroeteno (PVC) e rede de sombrite com área de 0,25 m². Foram instalados quatro coletores dentro da área útil de cada parcela, sendo dois coletores na linha e dois na entre linha de plantio. A serapilheira depositada compreendeu apenas as folhas senescentes, uma vez que ao início das coletas esse era o único material presente nos coletores.

O material recolhido foi pesado em balança digital (0,01 g de precisão) após passar por secagem em estufa (65°C) até atingir massa constante. As amostras foram agrupadas segundo as estações climáticas do ano, moídas e analisadas quimicamente para a obtenção dos teores de K, Na e Si (métodos descritos no item 2.2.3.2.). A deposição de K, Na e Si foi calculada por meio do produto da massa seca da serapilheira pelo seu respectivo teor nutricional.

2.2.3.7. Análises estatísticas

Os resultados foram aferidos quanto à presença de “outliers”, normalidade (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) e homogeneidade de variância. Quando necessário, foram realizadas transformações dos dados de acordo com o método da potência ótima de Box-Cox. Os dados foram submetidos à análise descritiva (média e erro padrão da média) e análise de variância (ANAVA, $\alpha = 0,1$) e tiveram suas médias comparadas entre si pelo teste LSD ($\alpha = 0,05$). Para relacionar as doses dos fertilizantes com os teores nutricionais, foi realizada regressão simples testando modelos polinomiais. Quando oportuno, foi realizada correlação de Pearson ($\alpha = 0,05$), entre as variáveis resposta. Os dados foram analisados com o software estatístico SAS 9.3 (SAS INSTITUTE, 2011).

2.3. Resultados

2.3.1. Fertilidade do solo

Aos dez meses após o plantio, maiores teores trocáveis de K ocorreram após a fertilização com KCl em todas as cinco camadas de solo amostradas (Figura 3a). Houve diminuição do teor trocável de K em todos os tratamentos aos 22 meses (Figura 3b). O maior teor deste nutriente ocorreu no tratamento NaCl. Os teores trocáveis de Na foram inferiores aos de K (Figura 3c). Apenas na camada 0-10 cm, houve maior teor de Na, devido à fertilização com fonolito. Aos 22 meses, houve grande aumento no teor de Na na primeira camada do solo no FO₁₂₀ (Figura 3d).

Aos dez meses, todos os tratamentos apresentaram aumento do teor de Si em profundidade (Figura 4a). Apenas a fertilização com KCl promoveu teor igual ao Controle para este elemento nas duas primeiras camadas do solo, e menores valores nas demais profundidades. O FO₁₂₀ e o NaCl apresentaram diminuição nos teores trocáveis de Si, em relação ao Controle. O KCl₁₂₀ apresentou valores aproximados aos do Controle nas camadas 0-10 e 10-20 cm. Aos 22 meses, houve aumento nos teores de Si na camada de 0-10 cm no FO₁₂₀. Os teores de Si diminuíram no Controle, NaCl e nas duas primeiras camadas do KCl₁₂₀, comparativamente aos teores apresentados aos 10 meses (Figura 4b).

Figura 3. Teores de K e Na trocáveis aos 10 (a e c) e 22 (b e d) meses após o plantio em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média, em plantação de eucalipto, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na horizontal junto aos pontos representam o erro padrão da média

Figura 4. Teores de Si trocáveis aos 10 (a) e 22 (b) meses após o plantio em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média em plantação de eucalipto, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na horizontal junto aos pontos representam o erro padrão da média

2.3.2. Estado nutricional das plantas

Os teores foliares de K diminuíram entre os 10 e 22 meses após o plantio, voltando a aumentar aos 33 meses (Figura 5a). Aos 10 meses, não houve diferença entre as fertilizações testadas. Aos 22 meses, o KCl_{120} apresentou teor foliar de K 25% superior ao Controle e, o NaCl, 6% inferior. O tratamento FO_{120} apresentou o segundo maior teor foliar de K (14% superior ao Controle). Aos 33 meses, o KCl_{120} continuou com o maior teor foliar de K (5% superior ao Controle), seguido dos tratamentos Controle, NaCl e FO_{120} . Aos 10 meses após o plantio, os teores foliares de K de todos os tratamentos estavam dentro da faixa de teor adequado para a cultura do eucalipto, com exceção do tratamento NaCl (GONÇALVES, 2011). Aos 22 meses, todos os teores se encontraram abaixo do limite inferior da referida faixa. Onze meses depois, os teores foliares do KCl_{120} e do Controle voltaram a se situar dentro da faixa de teor adequado de K, enquanto os teores do NaCl e do FO_{120} permaneceram abaixo do limite mínimo da mesma.

Figura 5. Teor foliar de K (a), Na (b) e Si (c) em plantação do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *grandis* nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ - 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl - 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Espaço compreendido entre as linhas tracejadas indica a faixa de teor adequado de K para a cultura do eucalipto (GONÇALVES, 2011). Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. Barra na vertical indica a LSD ($\alpha=0,05$). ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$)

De forma semelhante ao K, houve diminuição dos teores foliares de Na entre 10 e 22 meses após o plantio (Figura 5b). Entre 22 e 33 meses, os teores foliares de Na aumentaram em todos os tratamentos, com exceção do KCl₁₂₀. Aos 10 meses, não houve diferença entre os teores foliares de Na para os tratamentos testados. Aos 22 meses, o NaCl apresentou teor de Na 51% superior ao Controle, seguido pelo KCl₁₂₀ (44%) e FO₁₂₀ (23%). Aos 33 meses, o maior teor foliar de Na foi encontrado no NaCl (67% superior ao Controle), seguido pelo FO₁₂₀ (61%), e o menor teor foi encontrado no Controle e KCl₁₂₀ (16% inferior ao Controle). De forma contrária ao comportamento do K e Na, o Si apresentou aumento no teor foliar entre os 10 e 22 meses após o plantio (Figura 5c). Entre 22 e 33 meses, todos os teores foliares de Si diminuíram.

Aos 10 meses, o maior teor foliar de Si foi encontrado no NaCl, 31% superior ao Controle, seguido pelo FO₁₂₀ (12%), e os menores teores foram encontrados no Controle e no KCl₁₂₀. Aos 22 meses, não houve diferença estatística entre os tratamentos propostos. Aos 33 meses, os maiores teores foliares de Si foram obtidos nos tratamentos FO₁₂₀, NaCl e KCl₁₂₀ (250, 216 e 200% superiores ao Controle, respectivamente).

A aplicação de KCl não influenciou o teor foliar de K aos 10 e 33 meses após o plantio (Figura 6a, c). Aos 22 meses, a fertilização com KCl propiciou resposta raiz quadrática em função das doses aplicadas (Figura 6b). A aplicação de fonolito não influenciou o teor foliar de K nas três avaliações (Figura 6d, e, f). De forma semelhante à resposta obtida para o teor foliar de K, a fertilização com doses de fonolito não influenciou o teor foliar de Na nas duas primeiras avaliações (Figura 7a e b). Aos 33 meses, houve resposta quadrática para os teores de Na devido às doses aplicadas de fonolito (Figura 7c). Houve resposta linear positiva, aos 10 meses (Figura 7d), e raiz quadrática, aos 33 meses (Figura 7f), para o teor foliar de Si em função das doses de fonolito aplicadas. Aos 22 meses, a fertilização com fonolito não apresentou influência no teor foliar de Si (Figura 7e). Mesmo obtendo resposta para os teores foliares de K, Na e Si após aplicação dos fertilizantes, os aumentos nos teores foliares foram mínimos, com exceção ao aumento de Si foliar após fertilização com fonolito, aos 33 meses após o plantio.

Figura 6. Teor foliar de K em plantas de eucalipto submetidas às doses de K₂O fertilizado com KCl aos 10 (a), 22 (b) e 33 (c) meses após o plantio, e com fonolito aos 10 (d), 22 (e) e 33 (f) meses após o plantio. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. ns - modelo não significativo. * e **: significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste t

Figura 7. Teor foliar de Na em plantas de eucalipto fertilizadas com fonolito submetidas às doses crescentes de Na₂O aos 10 (a), 22 (b) e 33 (c) meses após o plantio, e de SiO₂ aos 10 (d), 22 (e) e 33 (f) meses após o plantio. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. ns - modelo não significativo. **: significativo a 1% de probabilidade pelo teste t

2.3.3. Teores, estoque e distribuição de nutrientes nos compartimentos aéreos das árvores

Aos 13 meses após o plantio, a fertilização com KCl proporcionou o maior teor de K nas folhas e os menores teores de Na no lenho, casca e galho (Tabela 7). A fertilização com NaCl promoveu o maior teor de Na na casca e no lenho e o menor teor de K na casca. No FO₁₂₀, o teor de Na no lenho foi intermediário entre o NaCl e o KCl₁₂₀. Neste tratamento, os teores de K na casca e na folha foram similares aos encontrados no Controle e no NaCl. O Controle apresentou o maior teor de Si na casca. Não houve nenhuma diferença nos teores de Si entre

tratamentos para os compartimentos lenho, galho e folha. Houve aumento nos teores de K em todos os compartimentos aéreos e em todos os tratamentos ao longo do tempo. Aos 33 meses, evidenciou-se maiores teores deste nutriente no KCl_{120} para o lenho e folha. Na mesma data, o NaCl apresentou baixos teores de K em todos os compartimentos. O FO_{120} apresentou valores intermediários para este nutriente em todos os compartimentos aéreos, tendo os teores de K nas folhas similares ao KCl_{120} . Os teores de Na foram maiores no NaCl em todos os compartimentos aéreos, seguido pelo FO_{120} e, menores, no Controle e KCl_{120} . O FO_{120} apresentou os maiores teores de Si nas folhas. Os demais tratamentos e compartimentos não apresentaram diferenças estatísticas entre si, com relação aos teores de Si. Os teores deste elemento foram os únicos que diminuíram ao longo do tempo, em média, houve diminuição de 190, 21, 5 e 7 vezes para os teores de Si no lenho, galho, casca e folha, respectivamente.

A fertilização com KCl promoveu maior estoque de K na biomassa aérea das árvores (29 kg ha^{-1} de K) aos 13 meses após o plantio, enquanto os demais tratamentos apresentaram menores valores ($\approx 21 \text{ kg ha}^{-1}$ de K) (Figura 8a). Este comportamento permaneceu até os 33 meses, com maior estoque de K no KCl_{120} , seguido do FO_{120} e Controle e, menores valores, no NaCl (Figura 8b). No NaCl ocorreu maior estoque de Na nas duas épocas avaliadas (65 e 91% superior ao Controle, respectivamente), seguido pelo FO_{120} (16 e 61% superior ao Controle, respectivamente) (Figura 8c, d). Os menores estoques deste elemento foram evidenciados no tratamento KCl_{120} e Controle. As fertilizações testadas promoveram estoque total de Si similar entre si aos 13 meses ($\approx 28 \text{ kg ha}^{-1}$ de K) (Figura 8e). Aos 33 meses, o FO_{120} apresentou o maior estoque deste elemento (3 vezes maior que o Controle), tendo grande diferença para os demais tratamentos (Figura 8f). O Si foi o único elemento estudado que reduziu os valores estocados na biomassa aérea com o aumento da idade do povoamento. Este comportamento é devido à baixa retranslocação interna do Si em plantas de eucalipto, ressaltando maior intensidade da ciclagem biogeoquímica para o elemento.

Tabela 7. Teor de K, Na e Si nos compartimentos aéreos de eucalipto fertilizado com fontes alternativas ao KCl

Idade	Tratamento ⁽¹⁾	Lenho	Galho	Casca	Folha
<hr/>					
K (g Kg ⁻¹)					
13 meses	Controle	0,8 a	1,3 a	2,5 ab	3,4 b
	KCl ₁₂₀	1,0 a	2,4 a	3,3 a	4,0 a
	FO ₁₂₀	0,8 a	1,5 a	2,1 bc	3,2 b
	NaCl	0,8 a	1,4 a	1,5 c	3,2 b
	<hr/>				
	Controle	0,09 c	0,21 a	0,12 c	0,25 a
	KCl ₁₂₀	0,09 c	0,10 b	0,14 bc	0,31 a
	FO ₁₂₀	0,14 b	0,14 ab	0,27 b	0,34 a
	NaCl	0,21 a	0,24 a	0,43 a	0,37 a
	<hr/>				
	Controle	1,9 a	2,2 a	2,3 a	2,7 a
	KCl ₁₂₀	1,9 a	2,1 a	2,0 b	2,8 a
	FO ₁₂₀	1,8 a	2,1 a	2,0 b	2,9 a
	NaCl	2,0 a	2,1 a	2,0 b	2,8 a
	<hr/>				
	Controle	0,96 b	2,9 a	3,8 ab	5,0 b
	KCl ₁₂₀	1,10 a	2,9 a	4,2 a	6,0 a
	FO ₁₂₀	0,96 b	2,5 ab	3,4 bc	5,1 ab
	NaCl	0,90 b	2,2 b	3,2 c	4,3 b
33 meses	<hr/>				
	Controle	0,35 c	0,28 c	0,56 c	0,45 c
	KCl ₁₂₀	0,25 d	0,30 c	0,59 c	0,46 c
	FO ₁₂₀	0,56 b	0,35 b	0,65 b	0,89 b
	NaCl	0,68 a	0,48 a	0,74 a	0,97 a
	<hr/>				
	Controle	0,01 a	0,2 a	0,5 a	0,01 c
	KCl ₁₂₀	0,01 a	0,1 a	0,5 a	0,01 c
	FO ₁₂₀	0,03 a	0,2 a	0,3 a	1,5 a
	NaCl	0,01 a	0,1 a	0,5 a	0,1 b

⁽¹⁾Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada elemento, não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

Figura 8. Estoque e distribuição de K, Na e Si aos 13 (a, c, e) e 33 (b, d, f) meses após o plantio na parte aérea das árvores de eucalipto nos tratamentos Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Colunas seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$). A barra representa a diferença mínima significativa

Aos 13 meses após o plantio, as fertilizações proporcionaram distribuição similar de K dentro dos compartimentos analisados (Figura 8a). A distribuição seguiu a seguinte ordem: folha (47%) > galho (25%) > lenho (19%) > casca (9%). Aos 33 meses, a distribuição do K nos compartimentos aéreos também se apresentou de forma similar entre os tratamentos, mas a ordem dos compartimentos foi alterada, indicando aumento da alocação do nutriente no lenho e na casca, e diminuição na folha e no galho: lenho (42%), folha (27%), casca (16%) e galho

(15%) (Figura 8b). Aos 13 meses, a distribuição de Na nos compartimentos aéreos dos tratamentos KCl_{120} , FO_{120} e $NaCl$ seguiu a seguinte ordem: folha (42%) > lenho (29%) > galho (20%) > casca (9%) (Figura 8c). O Controle apresentou inversão entre o galho e o lenho na sequência apresentada anteriormente. Aos 33 meses, o Controle e o KCl_{120} apresentaram a seguinte ordem de distribuição de Na: lenho (66%) > casca (14%) > folha (12%) > galho (8%) (Figura 8d). O $NaCl$ e o FO_{120} apresentaram inversão na sequência dos componentes folha e casca: lenho (72%) > folha (14%) > casca (8%) > galho (6%). Houve similaridade na distribuição do Si nos componentes aéreos entre os tratamentos aos 13 meses, apresentando a seguinte ordem: lenho (36%) > folha (31%) > galho (27%) > casca (6%) (Figura 8e). Aos 33 meses, a fertilização com fonolito promoveu maior alocação do Si para folha e lenho (54 e 29%, respectivamente) e menor para o galho e casca (8 e 9%, respectivamente) (Figura 8f). A utilização de $NaCl$ aos 33 meses, aumentou a alocação do Si para a casca e folha (42 e 39%, respectivamente) e menor proporção para o galho e lenho (11 e 8%, respectivamente). O Controle e o KCl_{120} apresentaram distribuições deste elemento em proporções similares: casca (44 e 49%), lenho (33 e 37%), galho (22 e 13%) e folha (1 e 1%), respectivamente.

2.3.4. Crescimento das árvores

O crescimento em altura e diâmetro à altura do peito (DAP) não apresentou diferenças entre as fertilizações testadas (Figura 9). Aos 33 meses de idade, o KCl_{120} apresentou o maior valor absoluto de DAP, e o Controle, o menor, apresentando tendências de diferenciação entre tratamentos ao longo do tempo. As demais fertilizações apresentaram valores intermediários a esses tratamentos.

Figura 9. Altura (a) e diâmetro à altura do peito (DAP) em plantação de eucalipto nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$)

O volume do tronco não apresentou diferença entre as fertilizações aos 13 e 33 meses após o plantio (Tabela 8). O Controle apresentou os menores valores absolutos de volume, seguido do NaCl, em ambas épocas avaliadas. O tratamento fertilizado com KCl apresentou os maiores valores absolutos em volume para ambas épocas (2 e 6% maior que o Controle), enquanto a fertilização com fonolito apresentou as segundas maiores médias (1 e 4% maior que o Controle). Entre os 13 e 33 meses, houve maior incremento volumétrico no KCl₁₂₀ e FO₁₂₀ (921 e 894%, respectivamente) e, menores, no Controle e NaCl (862 e 883%, respectivamente).

As fertilizações testadas não apresentaram diferenças em relação à produção de biomassa aérea total, bem como nos diferentes compartimentos estudados aos 13 meses de idade (Tabela 9). Contudo, nesta época, o FO₁₂₀ foi o único a apresentar menor valor absoluto de produção de galho comparado ao Controle (-3%), influenciando a menor biomassa total para este tratamento (-1%). As fertilizações também não proporcionaram diferenças para a produção de biomassa aérea total e entre os compartimentos aos 33 meses (Tabela 9). Ao contrário do ocorrido na época anterior, as produções de biomassa de todos os compartimentos dos tratamentos fertilizados apresentaram incremento relativo ao Controle. O KCl₁₂₀ proporcionou tendência de maiores incrementos de biomassa para lenho (7%), casca (4%), galho (10%), folha (8%) e total (7%). Valores intermediários ocorreram no FO₁₂₀: lenho (4%), casca (2%), galho (6%), folha (5%) e total (4%). Os menores incrementos de biomassa aérea foram evidenciados no NaCl: lenho (2%), casca (2%), galho (4%), folha (3%) e total (3%).

Em 2014 e início de 2015, houve a pior seca dos últimos 80 anos no estado de São Paulo, apresentando diminuição de 62% das chuvas totais acumuladas e aumento em 2,5 °C na temperatura média (MARENGO; ALVES, 2016). Este cenário proporcionou menor crescimento que o esperado das árvores de eucalipto, influenciando negativamente a eficiência dos fertilizantes testados.

Tabela 8. Volume do tronco com casca de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* fertilizado com fontes alternativas ao KCl. Valores entre parênteses representam variação percentual em relação ao Controle

Tratamento ⁽¹⁾	Volume	
	13º mês	33º mês
	m ³ ha ⁻¹	
Controle	13,6 a	133,8 a
KCl ₁₂₀	13,9 a (2)	142,3 a (6)
FO ₁₂₀	13,8 a (1)	138,6 a (4)
NaCl	13,7 a (1)	136,8 a (2)

⁽¹⁾Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

Tabela 9. Biomassa aérea de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* fertilizado com fontes alternativas ao KCl. Valores entre parênteses representam variação percentual em relação ao Controle

Tratamento ⁽¹⁾	Lenho	Casca	Galho	Folha	Total
Mg ha ⁻¹					
13 meses					
Controle	5,2 a	0,9 a	3,6 a	3,1 a	12,8 a
KCl ₁₂₀	5,2 (0) a	0,9 (0) a	3,6 (0) a	3,1 (0) a	12,8 (0) a
FO ₁₂₀	5,2 (0) a	0,9 (0) a	3,5 (-3) a	3,1 (0) a	12,7 (-1) a
NaCl	5,2 (0) a	0,9 (0) a	3,6 (0) a	3,1 (0) a	12,8 (0) a
33meses					
Controle	44,8 a	4,8 a	6,0 a	5,5 a	61,1 a
KCl ₁₂₀	47,9 (7) a	5,0 (4) a	6,6 (10) a	6,0 (8) a	65,5 (7) a
FO ₁₂₀	46,5 (4) a	4,9 (2) a	6,4 (6) a	5,8 (5) a	63,6 (4) a
NaCl	45,9 (2) a	4,9 (2) a	6,2 (4) a	5,7 (3) a	62,7 (3) a

⁽¹⁾Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada época avaliada, não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

2.3.5. Ciclagem de nutrientes

A deposição de serapilheira ocorreu em maior intensidade no mês de janeiro de 2015 e, as menores deposições nos meses de setembro a novembro de 2014 (Figura 10a). Este comportamento influenciou a deposição da serapilheira estacional. No decorrer de um ano, houve menor deposição na primavera e maior no verão (Figura 10b). Houve diferenças para as

deposições de serapilheira apenas nos meses de março e abril de 2015, em decorrência do maior volume de chuva dos meses anteriores (Figura 10). A omissão de K promoveu as maiores deposições de serapilheira nestas épocas.

Figura 10. Deposição de serapilheira mensal (a), estacional (b), acumulada (c) e índice de área foliar (d) em plantação de eucalipto nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$). Barra na vertical representa LSD ($\alpha=0,05$)

O Controle apresentou menores deposições de serapilheira acumulada durante os meses de dezembro de 2014 e março de 2015 (Figura 10c). Por outro lado, os tratamentos fertilizados com NaCl e KCl apresentaram as maiores deposições de serapilheira acumulada na maioria dos meses avaliados. O índice de área foliar (IAF) não apresentou diferença estatística entre os tratamentos (Figura 10d), mas demonstrou tendência em diferenciar-se ao longo do tempo. Em termos absolutos, em relação ao Controle, o KCl₁₂₀ apresentou maior IAF (5% superior), seguido dos FO₁₂₀ (4% superior) e NaCl (2% superior), aos 33 meses após o plantio.

O KCl_{120} apresentou os maiores teores de K nas folhas depositadas, durante as estações do ano (Figura 11a). De forma oposta, o NaCl apresentou os menores teores de K. O FO_{120} apresentou teores de K abaixo do Controle durante as três primeiras épocas avaliadas, mas, na última estação (inverno de 2015), foram encontrados teores de K similares aos do KCl_{120} . Os teores de K da serapilheira depositada foram menores nos períodos mais chuvosos (primavera e verão) e, maiores, nos períodos mais secos (outono e inverno).

Figura 11. Teores de K (a), Na (b) e Si (c) na serapilheira nas diferentes estações do ano em plantação de eucalipto nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha^{-1} de K_2O fertilizado com KCl; FO_{120} – 120 kg ha^{-1} de K_2O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha^{-1} de Na_2O fertilizado com NaCl. Barras acima das colunas representam o erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$). Colunas seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

Os teores de Na da serapilheira não apresentaram diferença estatística apenas para o outono de 2015 (Figura 11b). Nas demais estações, os maiores teores de Na foram apresentados pelo NaCl e FO_{120} . Os teores de Na da serapilheira depositada foram similares entre a primavera de 2014 e o verão de 2015. No outono de 2015, houve aumento nos teores de Na no Controle e

diminuição para as demais fertilizações. No inverno de 2015, houve aumento nos teores de Na da serapilheira para o NaCl e FO₁₂₀ e, diminuição, no Controle. Na primavera de 2014, a fertilização com NaCl proporcionou maior teor de Si na serapilheira depositada (Figura 11c). No verão e outono de 2015, as fertilizações promoveram teores de Si similares, apresentando 1,6 g kg⁻¹, em média, nas duas épocas. No inverno de 2015, a omissão de K apresentou maior teor de Si (2,3 g kg⁻¹), enquanto as demais fertilizações apresentaram valores similares entre si (1,2 g kg⁻¹). Diferentemente do comportamento apresentado pelo K, os teores de Si da serapilheira não apresentaram padrão de deposição em relação à época chuvosa e seca. Observou-se, porém, correlação positiva entre as médias dos teores foliares de Si na serapilheira com sua massa seca depositada ($r = 0,97$; $p < 0,05$) (Figura 10b).

A deposição de K via serapilheira foi menor no período chuvoso (primavera e verão), quando comparado com o período seco (outono e inverno) (Figura 12a). Em todas as estações, o maior retorno de K via serapilheira ocorreu no KCl₁₂₀, o menor, no NaCl, e quantidades intermediárias no FO₁₂₀ e Controle (Figura 12a). O NaCl proporcionou maior deposição de Na via serapilheira (Figura 12b) durante todas as estações, com exceção do outono de 2015. O FO₁₂₀ foi o segundo maior contribuinte na deposição de Na, sendo considerado igual ao NaCl nas estações primavera de 2014 e verão de 2015. Os demais tratamentos apresentaram as menores deposições de Na. A quantidade anual acumulada de Na foi maior no NaCl, seguido pelo FO₁₂₀. A deposição de Si via serapilheira (Figura 12c) seguiu o mesmo padrão do teor foliar de Si entre os tratamentos (Figura 11c). Houve diferença entre as fontes testadas na primavera de 2014 e inverno de 2015, em que o NaCl e o Controle proporcionaram as maiores deposições de Si, respectivamente. A quantidade anual acumulada de Si não foi influenciada pelas fertilizações. A deposição acumulada de Si ($\approx 8,6$ kg ha⁻¹) foi responsável por grande parte da diminuição no estoque do elemento na biomassa aérea (Figura 8).

Figura 12. Deposição via folheto e acumulação na serapilheira de K (a), Na (b) e Si (c) nas diferentes estações do ano em plantação de eucalipto nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras acima das colunas representam o erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, α=0,1). Colunas seguidas pela mesma letra minúscula, em cada estação, não diferem entre si pelo teste LSD (α=0,05)

2.4. Discussão

2.4.1. Fertilidade do solo

Aos dez meses de idade, o KCl₁₂₀ promoveu maior aumento no teor trocável de K⁺ em função da maior solubilidade do KCl comparado ao fonolito. Sabe-se que este fertilizante possui a maior solubilidade dos fertilizantes potássicos (RESENDE et al., 2006). Martins et al. (2015) afirmam que a baixa disponibilidade de K⁺ das rochas se deve à dificuldade de rompimento de sua estrutura por meios naturais. Aos 22 meses, houve diminuição nos teores de K⁺ trocáveis em todos os tratamentos, sendo menos pronunciados no tratamento NaCl. Dessa forma, há indícios de menor absorção de K⁺ em decorrência do aumento no teor trocável de Na⁺ no solo (INOCENCIO et al., 2014).

Aos dez meses, apenas na profundidade 0-10 cm houve maior teor de Na^+ trocável no FO₁₂₀. Os demais tratamentos apresentaram teores de Na^+ trocável próximos entre si em todas as profundidades. Aos 22 meses, houve a mesma tendência apresentada anteriormente, mas os teores de Na^+ trocáveis foram mais elevados no FO₁₂₀. Isto ocorreu pela provável maior solubilidade de Na, frente aos demais elementos presentes na rocha (HINSINGER et al., 2001), e pela aplicação ter sido realizada em área total e sem incorporação. Adicionalmente, maiores taxas de deposição de serapilheira são comuns em resposta à aplicação de Na em eucalipto (ALMEIDA et al., 2010), a qual proporciona menor vida útil das folhas quando relacionadas à fertilização potássica (LACLAU et al., 2009), adicionando maiores quantidades de Na nas camadas superficiais do solo.

Aos dez meses de idade, o FO₁₂₀, o NaCl e o Controle apresentaram tendência de aumento de Si trocável em profundidade. Cornelis et al. (2010), estudando o ciclo do Si em espécies de coníferas e folhosas, também encontraram aumento no teor trocável de Si em profundidade. O FO₁₂₀ e o NaCl apresentaram menores teores trocáveis de Si no solo. Acredita-se que o fornecimento de Na realizado nestes tratamentos proporcionou aumento da abundância e atividade da fauna do solo, aumentando assim a disponibilidade e absorção dos nutrientes e elementos do solo pelas plantas (JIA et al., 2015; KASPARI et al., 2009). Silva et al. (2012), estudando o uso de rocha basáltica moída como fertilizante para *Eucalyptus benthamii*, mostraram que a combinação da rocha com esterco bovino aumentou o teor trocável de Si no solo. Segundo eles, os microrganismos presentes no esterco podem acelerar o intemperismo biológico da rocha, liberando elementos de sua composição mineralógica, de modo semelhante ao papel desenvolvido pela fauna do solo. O KCl₁₂₀ apresentou maiores teores de Si trocável nas camadas 0-10 e 10-20 cm, aos 10 meses após o plantio. Possivelmente, íons K^+ foram absorvidos em maior quantidade devido ao fornecimento deste nutriente por meio de fertilizante de alta solubilidade (KCl), resultando em menor absorção e acúmulo de Si nestas camadas.

2.4.2. Estado nutricional das plantas

O fornecimento de Na às plantas promove menor absorção de K, como também observado por Inocencio et al. (2014) e Almeida et al. (2010). Esses íons possuem características semelhantes, podendo haver competição durante a absorção (KRONZUCKER et al., 2013; ZHU; GONG, 2014). Almeida et al. (2010), testando fertilizações sódicas, potássicas e a combinação das duas fontes em plantação de *Eucalyptus grandis* aos 12 e 36 meses de idade, encontraram maior teor foliar de K nas plantas fertilizadas com KCl, valores

intermediários com a fertilização KCl + NaCl e menores após a fertilização com NaCl. Para os teores foliares de Na, os mesmos autores encontraram maiores valores nas plantas fertilizadas com KCl + NaCl, seguidos da fertilização sódica e menores com a fertilização potássica. Testando a substituição gradual de K^+ por Na^+ em espécies nativas, Inocencio et al. (2014) encontraram o mesmo comportamento observado por Almeida et al. (2010), havendo menor acúmulo de K na parte aérea das mudas com a diminuição da relação K/Na da solução nutritiva. No presente estudo, a fertilização com fonolito, fonte de K e Na, apresentou menores teores foliares de K e maiores de Na aos 33 meses, comparado ao KCl₁₂₀ e ao Controle, pela competição na absorção entre estes dois íons.

Mesmo não sendo um gênero acumulador de Si, o aumento nos teores foliares deste elemento em florestas de eucalipto, após fertilização silícica, já foram reportados na literatura (CARVALHO et al., 2003; CAMARGO, 2011). Camargo (2011), estudando a absorção e translocação de Si em *E. camaldulensis* aos 9, 12 e 24 meses de idade, obteve aumento no teor foliar de Si ao longo do tempo para todos os tratamentos estudados, inclusive o Controle. Dentre as doses de Si aplicadas por meio de $CaSiO_3$ no solo, a maior dose (896 kg ha⁻¹ de SiO_2) aumentou os teores foliares de Si, possivelmente, em função do aumento no pH do solo. No presente estudo, houve aumento no teor foliar de Si entre os 10 e 22 meses, e diminuição, entre os 22 e 33 meses. Possivelmente, a alta taxa de crescimento ocorrida durante todo o período estudado proporcionou a diluição do elemento nos tecidos vegetais, mantendo os teores foliares de Si entre 1 e 3,4 g kg⁻¹, a qual corresponde à amplitude dos teores foliares de Si relatadas para florestas naturais de *Eucalyptus* sp. na Austrália (COOKE; LEISHMAN, 2012).

Resposta em incremento volumétrico e aumento no teor foliar de K em plantação de eucalipto fertilizado com doses de KCl já foram relatados na literatura (ALMEIDA, 2009; MELO, 2014; MELO et al., 2016). Almeida (2009), testando doses de KCl em plantação de *E. grandis* em diferentes idades, obteve respostas quadráticas para o teor foliar de K aos seis e nove meses e linear positiva aos 12, 18, 21, 24, 30 e 36 meses de idade. Melo (2014), testando a aplicação de doses de KCl no híbrido *E. urophylla* x *globulus* nos municípios de Mogi Guaçu e Luiz Antônio/SP, não obteve incremento volumétrico após aplicação de doses de KCl aos 18 e 24 meses de idade, sendo estas evidenciadas apenas aos 36 e 48 meses (comportamento quadrático). Estes dados contrastam com as respostas evidenciadas no presente estudo, em que as respostas à aplicação de KCl ocorreram aos 22 meses após o plantio, não sendo evidenciadas aos 33 meses. A resposta em incremento volumétrico e aumento no teor foliar de K pode estar relacionado não apenas à característica de solubilização das fontes, mas também ser função da

fertilização com fontes NPK realizadas ao longo dos anos por empresas do setor florestal, proporcionando efeitos residuais de K no solo (FARIA et al., 2002).

Adams et al. (2005), testando concentrações de Na em solução nutritiva em espécies de eucalipto com média e alta tolerância à salinidade, obtiveram respostas crescentes nos teores foliares de Na para todas as espécies. A fertilização com fonolito deste estudo apresentou resposta similar à de Adams et al. (2005) apenas aos 33 meses após o plantio, sugerindo que a lenta solubilidade desta fonte apresenta potencial de fornecimento de Na e K após período de incubação. Camargo (2011) obteve aumento no teor foliar de Si em povoamentos de *E. camaldulensis*, entre 9 e 24 meses de idade, após aplicação de doses entre 220 e 900 kg ha⁻¹ de SiO₂ via CaSiO₃. A aplicação de fonolito também apresentou resposta crescente quanto ao fornecimento de Si às plantas de *E. urophylla* x *grandis*, sendo ela linear aos 10 meses e raiz quadrática aos 33 meses, indicando o fornecimento de Si para as plantas ao longo do tempo.

2.4.3. Teores, estoque e distribuição de nutrientes nos compartimentos aéreos das árvores

As fertilizações com KCl e NaCl promoveram maiores teores de K e Na, respectivamente, nos compartimentos da biomassa aérea nas duas épocas avaliadas. Almeida (2009) também obteve aumento nos teores de K e Na, em todos os compartimentos aéreos, para os indivíduos fertilizados com KCl e NaCl. A fertilização com fonolito proporcionou teores de K e Na intermediários nas duas avaliações da biomassa aérea. O fornecimento combinado de K e Na por meio da fertilização com fonolito aumentou os teores de Na, não apresentando a mesma eficiência na absorção de K. Nasim et al. (2008) mostraram que a absorção de K foi menor na presença de Na em povoamento de *E. camaldulensis* e *E. tereticornis*. Inocencio et al. (2014), constataram aumento no teor de Na e diminuição de K na parte aérea das plantas conforme o aumento de Na na solução nutritiva. A influência na absorção desses elementos pode ser explicada pela afinidade que transportadores de K, como os da família HKT, demonstram ter com o Na, aumentando a translocação interna do elemento na planta (BENITO et al., 2014). Apesar de disponibilizar Si para o solo (MARTINS et al., 2015), o fonolito não proporcionou aumento nos teores de Si aos 13 meses após o plantio. Ao longo do tempo (33 meses), houve aumento no teor de Si para o compartimento folhas apenas quando o povoamento foi fertilizado com esta rocha. Cornelis et al. (2010) também obtiveram os maiores teores do elemento para o compartimento folhas em *Fagus sylvatica* (7,4 g kg⁻¹) e *Quercus sessiliflora* (5,5 g kg⁻¹).

De forma semelhante ao presente estudo, Almeida et al. (2010) obtiveram maior estoque de K na biomassa aérea das árvores fertilizadas com KCl quando comparados ao Controle e à fertilização com NaCl, aos 12 meses de idade. Estes autores encontraram maior estoque de Na na biomassa aérea para o tratamento fertilizado com NaCl, comparados ao Controle e à fertilização com KCl, aos 24 meses de idade. A fertilização com fonolito não aumentou o estoque de K na biomassa aérea quando comparado ao Controle, diferentemente das respostas obtidas para os estoques de Na e Si. Tendo em vista o extenso período em que a área se encontra sob plantio com eucalipto, atualmente na quinta rotação da cultura, frequentes aplicações de fontes NPK, proporcionaram efeitos residuais destes nutrientes na área e exaustão dos demais elementos, como o Na e o Si (FARIA et al., 2002).

Os primeiros anos após o plantio de espécies de rápido crescimento em zonas tropicais são conhecidos por apresentarem altas taxas de incremento em madeira (SNOWDON, 2002). De acordo com o acelerado crescimento, entende-se que o maior estoque de K nas folhas, aos 13 meses após o plantio, refletiu sua importância nas funções fisiológicas ligadas à fotossíntese (ZÖRB et al., 2014). O segundo maior estoque de K, apresentado no compartimento galho, indica maior redistribuição de fotoassimilados, auxiliado pelo K^+ , formados nas folhas para as demais partes da planta (ZÖRB et al., 2014). O terceiro maior estoque de K, apresentado no lenho, reflete o período de incrementos cambial e formação de xilema, atuando na expansão celular e regulação osmótica durante esta etapa de crescimento, exigindo grandes quantidades de K (FROMM, 2010). O menor estoque de K na casca evidencia pequena formação deste componente, em função da pequena dimensão e idade das árvores (SONMEZ et al., 2007). Com o decorrer do tempo, aos 33 meses, a maior alocação de K ocorreu no lenho, seguido pela folha, casca e galho. O aumento no estoque de K na casca deve-se à maior produção desta estrutura (SONMEZ et al., 2007). Por ser similar ao K^+ em suas funções químicas básicas e reatividade, e mesmo apresentando diferenças quanto ao raio iônico hidratado e propriedades liotrópicas (KRONZUCKER et al., 2013), o Na^+ apresentou distribuição semelhante à do K^+ , com inversão dos compartimentos galho e lenho, aos 13 meses, possivelmente devido à baixa ou ausente substituição do K na função de transporte de fotoassimilados. Aos 33 meses, a distribuição do Na nos compartimentos aéreos das árvores fertilizadas com KCl e sob omissão de K foram similares, enquanto os tratamentos fertilizados com NaCl e fonolito apresentaram maior estoque de Na nas folhas do que na casca.

Aos 13 meses, não houve diferença no estoque de Si entre os tratamentos propostos. O maior estoque deste elemento ocorreu no lenho, indicando a participação na formação de compostos estruturais, em ligações com polifenóis, e substituindo a lignina na sustentação da

parede celular (BRISKIN; BLOOM, 2013). O segundo maior estoque de Si foi encontrado na folha, órgão sob alta taxa fotossintética nesta idade, onde este elemento participa no processo de funcionamento dos estômatos e em reações fotoquímicas (ZHU; GONG, 2014). Nos galhos foi encontrado o terceiro maior estoque de Si, evidenciando movimentação de Si dentro da planta no primeiro ano de crescimento. O menor estoque de Si ocorreu na casca, como observado para o K e Na, devido à baixa taxa de formação desse compartimento na fase jovem do ciclo de crescimento. Aos 33 meses, houve mudança na distribuição de Si entre os compartimentos. As fertilizações que não forneceram Si às plantas alocaram maior quantidade do elemento nas cascas. A aplicação de Si via fonolito proporcionou grande aumento no estoque de Si, principalmente nas folhas, corroborando com os dados apresentados por Cornelis et al. (2010).

2.4.4. Crescimento das árvores

De forma geral, o crescimento de árvores em solos distróficos submetidas à fertilização potássica, frequentemente apresenta resposta positiva ao longo do tempo (ALMEIDA et al., 2010; MELO et al., 2016). Este comportamento de crescimento é conhecido como resposta tipo II (SNOWDON, 2002), sendo comprovada sua aplicabilidade em florestas de rápido crescimento em climas tropicais (GONÇALVES et al., 2008). Como no presente estudo, há casos em que a resposta à fertilização potássica leva anos para ocorrer (MELO et al., 2016). Estes autores, estudando respostas de crescimento volumétrico em povoamentos de eucalipto submetidos à fertilização potássica, constataram resposta dos tratamentos fertilizados, relativamente ao Controle, apenas entre 18 e 36 meses de idade, dependendo da condição edafoclimática.

Almeida et al. (2010) encontraram maior incremento da produção de biomassa nos tratamentos que receberam KCl e NaCl, entre 12 e 36 meses de idade, respectivamente. Neste mesmo estudo, o maior incremento foi constatado no tratamento fertilizado com KCl para o compartimento lenho (213%), e o menor, no tratamento fertilizado com NaCl, para o compartimento galho (24%), ambos aos 12 meses de idade. No presente estudo, a produção de biomassa aérea aos 13 e 33 meses de idade não apresentou diferenças significativas sendo os valores maiores do que os apresentados por Almeida et al. (2010), principalmente na produção de biomassa do lenho aos 13 meses de idade. Deduziu-se que, povoamentos clonais apresentam produção inicial de lenho maior do que povoamentos seminais (ALMEIDA et al., 2010; LACLAU et al., 2010).

Sabe-se que o fator abiótico de maior impacto na restrição do crescimento de povoamentos florestais nos trópicos é a falta de água (GONÇALVES et al., 2008). Stape et al. (2010) encontraram ganhos médios de 30% em plantações que receberam irrigação, sendo as maiores diferenças observadas em ambientes com alta deficiência hídrica (67% de incremento). No ano de 2014 e início de 2015, o estado de São Paulo passou por um período de precipitação pluvial abaixo das médias históricas, culminando na pior seca dos últimos 80 anos (MARENGO; ALVES, 2016). Os autores citam a diminuição de 62% das chuvas totais acumuladas e aumento em 2,5 °C em relação à temperatura média histórica para o estado. No município do presente estudo, em 2014, a precipitação pluvial foi 27% abaixo e a temperatura média 2,3 °C acima da média histórica local (ALVARES et al., 2013). Ademais, ressalta-se que durante o ano de 2014 não foi observado excedente hídrico no município de Luíz Antônio/SP, restringindo o crescimento dos povoamentos florestais da região, e mascarando possíveis diferenciações em crescimento proporcionadas pelas fertilizações testadas.

2.4.5. Ciclagem de nutrientes

A deposição de serapilheira é crescente ao longo dos primeiros anos em plantações de eucalipto situados nos trópicos (LACLAU et al., 2010). Sabe-se, também, que há influência dos fertilizantes, e do parcelamento das suas doses, na produção de serapilheira ao longo dos meses do ano (SILVA et al., 2013). No tocante à fertilização potássica, e a possível substituição de K por Na, diferenças na deposição de serapilheira são evidenciadas próximo ao início do terceiro ano após o plantio (LACLAU et al., 2009; ALMEIDA et al., 2010). Almeida et al. (2010) não obtiveram diferenças entre os tratamentos até o final do segundo ano de plantio. Os mesmos autores evidenciaram maiores deposições de serapilheira para a omissão de K na época chuvosa. No presente estudo, diferenças na deposição de serapilheira entre as fertilizações propostas foram evidenciadas em março e abril de 2015, sendo o maior valor apresentado pelo tratamento Controle (abril de 2015). Este comportamento ocorreu em função da fertilização com K, a qual aumenta a longevidade das folhas (LACLAU et al., 2009), diminuindo sua taxa de deposição. Seguindo o mesmo raciocínio, percebeu-se a tendência em maior produção de biomassa de folhas nos tratamentos que receberam fertilizantes potássicos e sódicos (Tabela 9). As fontes alternativas, fonolito e NaCl, proporcionaram comportamento semelhante ao KCl. A utilização de fonolito, NaCl e KCl não induziram diferenças nos IAFs obtidos aos 13 e 33 meses após o plantio, não promovendo diferenças na produção de serapilheira entre os tratamentos. Almeida et al. (2010) obtiveram grandes aumentos de IAF após aplicação de KCl em plantas de

eucalipto, durante os três primeiros três anos da floresta, porém, a produção de serapilheira acumulada durante este tempo não apresentou diferença entre as aplicações de K e Na.

As quantidades de K e Na depositadas por meio da serapilheira (componente folhas), no presente estudo, tiveram maior influência dos teores dos elementos no folheto depositado do que de sua biomassa produzida. Fontes prontamente solúveis, como o KCl e NaCl, podem propiciar maior absorção de K e Na pelas plantas (RESENDE et al., 2006) quando comparadas às rochas moídas (MARTINS et al., 2015). Silva et al. (2013) obtiveram aumento na deposição de K proporcional as doses de KCl fornecidas à plantas de *E. grandis*. Os resultados sugerem que, comparativamente ao Controle, a aplicação de fonolito proporciona maiores deposições de Na e iguais de K, em função do efeito residual da utilização de fertilizantes NPK em rotações anteriores.

A deposição do Si apresentou padrão diferente dos encontrados para o K e Na, não havendo maior deposição deste elemento quando ele foi aplicado. Há relatos na literatura sobre o auxílio na absorção balanceada e distribuição de íons nos vegetais promovido pelo Si (ZHU; GONG, 2014). Mesmo não havendo estudos sobre ciclagem de Na e Si em eucalipto, sabe-se que a absorção de Si nessas plantas ocorre com maior intensidade na fase inicial de crescimento (CARVALHO et al., 2003; CAMARGO, 2011). Acredita-se que maiores deposições de Si promovidas pela fertilização sódica indiquem maior absorção inicial de Si em ambiente com altos teores de Na, ou baixa relação de K/Na no solo, visando a melhor distribuição do Na no interior planta. Este comportamento corrobora com os maiores teores foliares de Si apresentados pelo tratamento NaCl entre os 10 e 22 meses após o plantio (Figura 5c). A maior deposição de Si, encontrada no Controle, evidencia a menor longevidade das folhas que não receberam fertilização potássica, refletindo a deposição das folhas que apresentaram altos teores de Si, como observado aos 22 meses após o plantio (Figura 5c).

2.5. Conclusões

I- A aplicação de fonolito não aumentou os teores trocáveis de K no solo, e aumentou o teor trocável de Na.

II- A fertilização com fonolito não promoveu aumento nos teores foliares de K, mas proporcionou aumento nos teores foliares de Na ao longo do tempo. A aplicação de fonolito aumentou o estoque de Na e Si na biomassa aérea total.

III- Na fase juvenil, os crescimentos em altura, diâmetro à altura do peito, volume do tronco e biomassa aérea das árvores fertilizadas com fonolito apresentaram valores similares aos fertilizados com NaCl, KCl e ausência de K.

IV- A fertilização com fonolito aumentou a deposição de Na por meio da serapilheira, e manteve as deposições de K e Si. As maiores deposições de K e Na ocorreram nas plantas fertilizadas com KCl e NaCl.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, M.A.; RICHTER, A.; HILL, A.K.; COLMER, T.D. Salt tolerance in *Eucalyptus* spp.: identity and response of putative osmolytes. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 28, p. 772-787, 2005.
- ALMEIDA, J.C.R.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; RANGER, J.; SAINT-ANDRÉ, L. A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficit soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1786-1795, 2010.
- ALMEIDA, J.C.R. **Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio**. 2009. 112f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2009.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, p. 711-728, 2013.
- BENITO, B.; HARO, R.; AMTMANN, A.; CUIN, T. A.; DREYER, I. The twins K⁺ and Na⁺ in plants. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 171, p. 723-731, 2014.
- BRISKIN, D.P.; BLOOM, A. Nutrição mineral. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E. (Ed.). **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre, Artmed, 2013. cap 5, p. 117-130.
- CAMARGO, J.M.M. **Seleção de clones, absorção e translocação de silício, e seu efeito sobre a população do psílideo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* (Moore) (Hemiptera: Psyllidae) em plantas de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn**. 2011. 106f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2011.
- CARVALHO, R.; FURTINI-NETO, A.E.; CURI, N.; RESENDE, A.V. Absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em latossolo e cambissolo. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 27, p. 491-500, 2003.

- COOKE, J.; LEISHMAN, M.R. Tradeoffs between foliar silicon and carbon-based defences: evidence from vegetation communities of contrasting soil types. **Oikos**, Lund, v. 121, p. 2052-2060, 2012.
- CORNELIS, J.T.; RANGER, J.; ISERENTANT, A.; DELVAUX, B. Tree species impact the terrestrial cycle of silicon through various uptakes. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 97, p.231-245, 2010.
- CORTES, G.P.; FERREIRA, R.C.; CORTES, G.P.; RAMPAZZO, L.; FERREIRA, L.C. Fonolito como substituto do cloreto de potássio e/ou outras fontes de potássio na agricultura e pecuária no Brasil. In: 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2009, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa Cerrados, 2010. p.75-83.
- DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2015. 135p.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. Brasília: EMBRAPA, 2013, 353p.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 1997. 212p.
- FARIA, G.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; LIMA, J.C.; TEIXEIRA, J.L. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 577-584, 2002.
- FROMM, J. Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. **Tree Physiology**, Victoria, v. 30, p. 1140–1147, 2010.
- GOMES, F.P.; GARCIA, C.H. A determinação de equações volumétricas na engenharia florestal. **Série técnica IPEF**, Piracicaba, v. 9, p. 1-36, 1993.
- GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.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**, Amsterdam, v. 301. p. 6-27, 2013.
- GONÇALVES, J.L.M. Fertilização de plantação de eucalipto. In: II ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 2011, Campinas. **Anais...** Campinas: PTSM/IPEF/FUPEF, 2011. p.85-113.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, Grahamstown, v. 70, p. 105-118, 2008.
- GUERRINI, I.A. Contribuição do uso de resíduos para a nutrição e produção de espécies florestais. In: PRADO, R. M.; WADT, P. G. S. (Ed). **Nutrição e adubação de espécies Florestais e palmeiras**. Jaboticabal: FUNEP. 2014. p. 137-191.
- HINSINGER, P.; BARROS, O.N.F.; BENEDETTI, M.F.; NOACK, Y.; CALLOT, G. Plant-induced weathering of a basaltic rock: Experimental evidence. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 65, p. 137–152, 2001.
- IBÁ. Industria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2016**, Brasília, IBÁ, 2016. 100p.
- INOCENCIO, M.F.; CARVALHO, J.G.; FURTINI NETO, A.E. Potássio, sódio e crescimento inicial de espécies florestais sob substituição de potássio por sódio. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, p. 113-123, 2014.
- JIA, Y.; KONG, X.; WEISER, M.D.; LV, Y.; AKBAR, S.; JIA, X.; TIAN, K.; HE, Z.; LIN, H., BEI, Z., TIAN, X. Sodium limits litter decomposition rates in a subtropical forest: Additional tests of the sodium ecosystem respiration hypothesis. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 93, p. 98-104, 2015.
- KASPARI, M.; YANOVIK, S.P.; DUDLEYD, R.; YUANE, M.; CLAY, N.A. Sodium shortage as a constraint on the carbon cycle in an inland tropical rainforest. **Proceedings of**

the National Academy of Sciences of the United States of America, Washington, v. 106, p. 19405-19409, 2009.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; NOLLA, A. Análise de silício no solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, **boletim técnico nº 2**, 2004. 34p.

KRONZUCKER, H.J.; COSKUN, D.; SCHULZE, L.M.; WONG, J.R.; BRITTO, D.T. Sodium as nutrient and toxicant. **Plant and Soil**, New York, v. 369, p. 1-23, 2013.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L.M.; MAQUÈRE, V.; KRUSCHE, A.V.; M'BOU, A.T.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1771-1785, 2010.

LACLAU, J.P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONÇALVES, J.L.M.; SAINT-ANDRÉ, L.; VENTURA, M.; RANGER, J.; MOREIRA, R.M.; NOUVELLON, Y. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. **Tree Physiology**, Oxford, v. 29, p. 111-124, 2009.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; DELEPORTE, P.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; MARLET, S.; BOUILLET, J.P. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo 3. Input–output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 210, p. 375-391, 2005.

LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, p. 181-196, 2000.

LUZ, A.B.; LOUREIRO, F.E.L.; SAMPAIO, J.A.; CASTILHOS, Z.C.; BEZERRA, M.S. Rochas, minerais e rotas tecnológicas para a produção de fertilizantes alternativos. In: FERNANDES, F.R.C.; LUZ, A.B.; CASTILHOS, Z.C. (Ed). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010. p. 61-88.

- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Geosp - Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 19, p. 485-494, 2016.
- MARTINS, V.; SILVA, D.R.G.; MARCHI, G.; LEITE, M.C.A.; MARTINS, E.S.; GONÇALVES, A.S.F.; GUILHERME, L.R.G. Effect of alternative multinutrient sources on soil chemical properties. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 194-204, 2015.
- MELO, E.A.S.C.; GONÇALVES, J.L.M.; ROCHA, J.H.T.; HAKAMADA, R.E.; BAZANI, J.H.; WENZEL, A.V.A.; ARTHUR JUNIOR, J.C.; BORGES, J.S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C.C.Z.; FERREIRA, E.V.O.; FERRAZ, A.V. Responses of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, Basel, v. 7, p. 1-15, 2016.
- MELO, E.A.S.C. **Nutrição e fertilização de plantações clonais de eucalipto sob diferentes condições edafoclimáticas**. 2014. 186f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2014.
- NASIM, M.; QURESHI, R.H.; AZIZ, T.; SAQIB, M.; NAWAZ, S.; SAHI, S.T.; PERVAIZ, S. Growth and ionic composition of salt-stressed *Eucalyptus camaldulensis* and *Eucalyptus tereticornis*. **Pakistan Journal of Botany**, Carachi, v. 40, p. 799-805, 2008.
- PAES, F.A.S.V; LIMA, A.M.N.; HAKAMADA, R.E.; BARROS, N.F. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1081-1090, 2013.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 285p.

- RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, C.G.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.T.; KINPARA, D.I.; OLIVEIRA FILHO, E.C. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço e Geografia**, Brasília, v. 9, p. 19-42, 2006.
- ROCHA, J.H.T.; GONÇALVES, J.L.M.; MARQUES, E.R.G.; BRANDANI, C.B. Nutrição e sustentabilidade de plantações florestais. In: III ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 2014, Campinas. **Anais...** Campinas: PTSM/IPEF/FUPEF, 2014. p.149-178.
- SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. Cary, 2011.
- SCOLFORO, J.R.S.; THIERSCH, C.R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 285p.
- SILVA, A.; ALMEIDA, J.A.; SCHMITT, C.; COELHO, C.M.M. Avaliação dos efeitos da aplicação de basalto moído na fertilidade do solo e nutrição de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, p. 69-76, 2012.
- SILVA, P.H.M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P.L.; GONÇALVES, A.N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301. p. 67-78, 2013.
- SNOWDON, P. Modeling Type 1 and Type 2 growth responses in plantations after application of fertilizer or other silvicultural treatments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163. p. 229-244, 2002.
- SONMEZ, T.; KELES, S.; TILKI, F. Effect of aspect, tree age and tree diameter on bark thickness of *Picea orientalis*. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v. 22, p. 193-197, 2007.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.A.; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C.; AZEVEDO,

M.R. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1684-1694, 2010.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey, v. 8, p. 1-104, 1955.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 34, p. 455-472, 2014.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture – Status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 171, p. 656-669, 2014.

3. RELAÇÕES HÍDRICAS E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM POVOAMENTO DE *EUCALYPTUS UROPHYLLA* X *GRANDIS* FERTILIZADO COM FONTES ALTERNATIVAS AO KCL

Resumo

O K desenvolve diversas funções fisiológicas na planta. Dentre elas citam-se as funções concernentes às relações hídricas, assim como a regulação osmótica e o controle do processo de abertura e fechamento dos estômatos. O Na é classificado como elemento benéfico para os vegetais, uma vez que promove aumentos na produção de diversas espécies, podendo, também, substituir o K nas funções de regulação osmótica. Tendo em vista que a água é o fator que mais limita o crescimento de povoamentos florestais nos trópicos, estudos sobre fertilizações potássicas e sódicas e suas influências nas relações hídricas em plantações florestais se tornam essenciais para este setor. O presente estudo objetivou compreender as relações hídricas presentes em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* submetido às fertilizações potássica e sódica. Para tal, realizaram-se duas comparações: i) Ausência de fertilização potássica e sódica (Controle) comparado às aplicações de 283 kg ha⁻¹ de KCl e 2125 kg ha⁻¹ de fonolito (180 kg ha⁻¹ de K₂O em ambos os tratamentos) e; ii) Tratamento Controle comparado às aplicações de 204 kg ha⁻¹ de NaCl e 183 kg ha⁻¹ de KCl (3,5 kmol de Na e K, respectivamente). Durante o estudo, foram avaliados os teores de umidade no solo, o potencial hídrico foliar (Ψ_{wf}), a transpiração média e acumulada das árvores e a eficiência do uso da água (EUA). Houve menor umidade no solo após as fertilizações com KCl e fonolito. Dentre a comparação entre as fertilizações com KCl e NaCl, a fertilização com Na proporcionou menores teores de umidade no solo. A fertilização com fonolito proporcionou maior Ψ_{wf} , comparativamente à aplicação do KCl. Menores Ψ_{wf} foram apresentados pelas árvores fertilizadas com NaCl, comparativamente às fertilizadas com KCl. A utilização do fonolito como fonte alternativa de K promoveu transpiração acumulada 16 e 9% superior aos tratamentos Controle e KCl, respectivamente, porém apresentou EUA similar às árvores fertilizadas com KCl. As árvores fertilizadas com NaCl apresentaram transpiração acumulada 9% abaixo das árvores fertilizadas com KCl, porém, levando em conta seu menor incremento em volume e biomassa do tronco, a EUA foi similar entre os dois tratamentos. Concluiu-se que as fertilizações com fonolito e NaCl demonstraram respostas positivas sobre algumas características ecofisiológicas, e podem ser utilizados como fontes alternativas ao KCl.

Palavras-chave: Consumo de água; Estatus hídrico da planta; Transpiração; Fluxo de seiva; Ecofisiologia

Abstract

The K develops several physiological functions in the plant. Among them, it is possible to highlight the functions associated to water relations as well as osmotic regulation and the opening and closure stomatal control. Na is classified as a beneficial element for plants, since it promotes increases in the production of several species, and may also replace the functions of the K osmotic regulation. Given that water is the main factor that may limit the growth of forest plantations in the tropics. Thus, studies about potassic and sodic fertilizations and their influence on water relations in forest plantations become essential for the forestry sector. This study aimed to understand the water relations present in a stand of *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* submitted to potassic and sodic fertilizations. To this end, two comparisons were performed: i) Absence of potassium and sodium fertilization (Control) compared to applications of 283 kg ha⁻¹ of KCl and 2125 kg ha⁻¹ of phonolite (180 kg ha⁻¹ de K₂O both treatments) and; ii) Treatment Control applications compared to 204 kg ha⁻¹ of NaCl and 183 kg ha⁻¹ of KCl (3,5 kmol of Na and K, respectively). During the study, it was evaluated the soil moisture content, leaf water potential (Ψ_{wf}), the monthly average and accumulated transpiration of trees and water use efficiency (WUE). There was less moisture in the soil after fertilization with KCl and phonolite, compared to the Control. Among the comparison between fertilizations with KCl and NaCl the Na fertilization gave lower moisture in the soil. The fertilization with phonolite provided a greater Ψ_{wf} when compared to the application of KCl. Lower Ψ_{wf} was presented by trees fertilized with NaCl when compared to the ones fertilized with KCl. The use of phonolite as an alternative source of K promoted accumulated transpiration 16 and 9% higher than the Control treatment and KCl, respectively, but showed WUE similar to the trees fertilized with KCl. The fertilized trees with NaCl had accumulated transpiration of 9% below the trees fertilized with KCl. However, taking into account its smaller increase in trunk volume and biomass, the WUE was similar between the two treatments. It was concluded that the fertilizations with phonolite and NaCl showed positive responses about some ecophysiological features, and could be used as KCl alternative sources.

Keywords: Water consumption; Plant hydrological status; Transpiration; Sap flow; Ecophysiology

3.1. Introdução

A água é o fator mais limitante ao crescimento de plantações florestais localizadas em regiões tropicais (STAPE et al., 2004a). Há casos em que florestas de rápido crescimento, como povoamentos de eucalipto, ocasionam redução da água disponível superficialmente (ex. lagos) e subterrâneas como o lençol freático (RODRÍGUEZ-SUÁREZ et al., 2011), mesmo apresentando alta eficiência do uso da água (OTTO et al., 2014). Desta forma, estudos concernentes à quantidade de água utilizada, taxas de transpiração, balanço da água no solo e captação de água pelas raízes em plantações florestais são temas frequentemente discutidos (SOARES; ALMEIDA, 2001).

Assim como a água, a nutrição também é reconhecida como fator limitante no crescimento e desenvolvimento de plantações florestais (NAMBIAR, 1990). Inicialmente, foram realizados estudos de fertilização com N, P e K, e a disponibilidade de água para as árvores, tendo em vista suas rápidas e significativas respostas em crescimento às aplicações (COLE et al., 1990; HERBERT, 1990). Estudos recentes demonstram que o K é um dos nutrientes que mais afeta a eficiência do uso da água e o crescimento das árvores de eucalipto, bem como as características morfológicas, anatômicas e ecofisiológicas das plantas (BATTIE-LACLAU et al., 2013, 2014a, 2014b; CRISTINA et al., 2015). Estudos similares a estes foram conduzidos com Na, tendo em vista a possibilidade de substituição parcial do K por esse elemento (ALMEIDA et al., 2010; SETTE JÚNIOR et al., 2013). Estes pesquisadores evidenciaram crescimento e maior acúmulo de Na nas árvores de *E. grandis* fertilizadas com NaCl, sem alteração nas condições nutricionais da planta.

Battie-Laclau et al. (2014a), comparando tratamentos fertilizados com K em plantação de *E. grandis*, constataram maiores taxas de assimilação de CO₂ e consequente aumento da capacidade fotossintética quando comparados ao controle (sem adubação potássica). Nesse mesmo estudo foram observadas diferenças morfológicas como aumento na área foliar específica, espessura do limbo e do parênquima foliar, tamanho de estômatos e espaços intercelulares nos tratamentos fertilizados com K. Battie-Laclau et al. (2014b), estudando a exclusão de chuvas em árvores de *E. grandis* fertilizados com KCl, concluíram que houve aumento da condutância estomática e ajuste osmóticos nos indivíduos fertilizados com K, quando comparados com o controle. Os mesmos autores, observaram influência da disponibilidade de água no solo e do déficit de pressão de vapor na condutância estomática das árvores fertilizadas com KCl. Almeida et al. (2007), estudando plantações de *E. grandis* fertilizadas com KCl, obtiveram aumento expressivo do índice de área foliar das plantas

fertilizadas com K nos primeiros 24 meses, indicando influência da fertilização potássica na transpiração, produtividade e eficiência do uso de água para esta espécie.

Assim como o K, o Na promove influência nos mecanismos ecofisiológicos, proporcionando modificações no comportamento de plantações de eucalipto. Battie-Laclau et al. (2014a), estudando a aplicação de NaCl em plantação de *E. grandis*, evidenciaram aumento de 1,6 vezes na assimilação de CO₂, quando comparado aos tratamentos sem fertilização potássica e sódica. Segundo esses autores, o resultado pode ser atribuído à redução da resistência estomática e mesofílica à difusão de CO₂, acarretando em aumento da capacidade fotossintética. Os mesmos pesquisadores verificaram o aumento da área foliar específica, espessura foliar e do parênquima, tamanho dos estômatos, de forma semelhante aos dados obtidos em árvores fertilizadas com KCl. Sabe-se também, que árvores fertilizadas com Na apresentam aumento no potencial osmótico e condutância estomática e, diminuem o potencial hídrico foliar e a reserva de água no solo (BATTIE-LACLAU et al., 2013, 2014b).

A prática da aplicação de rocha moída (rochagem) em área total visando o fornecimento de nutrientes para as plantas vem ganhando destaque no Brasil. Tendo em vista a enorme quantidade de fertilizantes potássicos importados no país, a substituição do KCl por rochas com elevados teores de K torna-se uma alternativa bastante atrativa (CARVALHO, 2013). O fonolito é uma rocha de origem vulcânica que possui em sua composição mineralógica o predomínio de feldspato potássico e feldspatóides (microclínio e ortoclásio (KAlSi₃O₈), sanidina ((Na,K)AlSi₃O₈) e nefelina (Na,K)AlSiO₄)), apresentando-se como fonte de liberação lenta de nutrientes e elementos benéficos, especialmente K e Na (TEIXEIRA et al., 2012). Existem poucos estudos relacionando rochagem ao crescimento e respostas ecofisiológicas das plantas, sendo os maiores esforços concentrados em plantações agrícolas, deixando de explorar sua utilização em essências florestais (BOLLAND; BAKER, 2000; WILPERT; LUKES, 2003; SILVA et al., 2008).

Neste contexto, as seguintes hipóteses foram levantadas;

- I) O emprego de fonolito como fonte de K em povoamento de eucalipto mantém maiores teores de umidade no solo comparativamente à fertilização com KCl;
- II) A fertilização com NaCl mantém os teores de umidade no solo similares ao proporcionado pela fertilização com KCl;
- III) A lenta liberação de elementos apresentada pelo fonolito promove maiores potenciais hídricos foliares quando comparado à fertilização com KCl;
- IV) Fertilizações com KCl e NaCl promovem potenciais hídricos foliares similares entre si;

V) A fertilização com fonolito promove maior transpiração, incremento em crescimento e eficiência do uso da água em árvores de eucalipto, comparativamente à fertilização com KCl;

VI) As fertilizações com KCl e NaCl aumentam a transpiração, incremento em crescimento e a eficiência do uso da água em árvores de eucalipto em mesma proporção.

O presente estudo objetivou avaliar a resposta de uma plantação clonal de *E. urophylla* x *grandis* à fertilização com KCl, NaCl e fonolito, por meio da: i e ii) variação da umidade no solo; iii e iv) do potencial hídrico foliar mensal das árvores; v e vi) da transpiração e eficiência do uso de água pelas árvores de eucalipto.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Caracterização da área experimental, tratamentos e delineamento experimental

Este estudo foi realizado na mesma área experimental descrita no capítulo dois. Algumas avaliações, por serem dispendiosas, foram reduzidas aos tratamentos Controle, KCl₁₂₀, KCl₁₈₀, FO₁₈₀ e NaCl. Os tratamentos foram separados em dois grupos para a realização das análises: 1º) Controle x KCl₁₈₀ x FO₁₈₀ e 2º) Controle x KCl₁₂₀ x NaCl. No primeiro grupo foi comparado o potencial de uso do fonolito comparativamente ao KCl. O segundo visou testar a substituição da fertilização potássica (KCl) pela sódica (NaCl).

3.2.2. Avaliações

3.2.2.1. Umidade no solo

A umidade no solo foi avaliada quinzenalmente, nos tratamentos Controle, KCl₁₂₀, KCl₁₈₀, FO₁₈₀ e NaCl. Em agosto de 2014, foram instalados no solo três tubos (repetições) com dois metros de comprimento em cada tratamento. Os tubos foram alocados na área útil de cada parcela, sendo distribuídos da seguinte forma: i) um na linha de plantio (entre plantas), onde o solo foi preparado pela subsolagem; ii) um na entrelinha de plantio, alinhado a duas árvores mais próximas; iii) na entrelinha de plantio, equidistante de quatro árvores circundantes. A umidade foi estimada por meio de uma sonda capacitiva FDR (Reflectometria no Domínio da Frequência), modelo DIVINER (Figura 13a). O método se baseia na constante dielétrica do solo para medir a sua umidade, onde cria-se um campo elétrico de alta frequência ao redor do sensor, partindo do tubo de acesso e penetrando no solo. A sonda foi previamente calibrada para as condições do experimento ($\theta\% = 80,14 \cdot F^{2,732}$), onde relacionou-se a quantidade de

água no solo (θ) com a frequência (F) medida (Figura 13b). Para a calibração, foram coletadas amostras de solo indeformadas, com o auxílio de anéis volumétricos, para a determinação da umidade gravimétrica (U_g) e a densidade do solo (D_s), e posterior conversão em umidade volumétrica ($\theta\% = U_g \cdot D_s \cdot 100$). Os tubos atingiram a profundidade de 160 cm, e as leituras foram realizadas a cada 10 cm. Os resultados foram apresentados como o somatório da umidade nas camadas de 0-30 e 30-160 cm, ressaltando a dinâmica da variação temporal do conteúdo da água no solo nas camadas superficiais e em profundidade.

Figura 13. Medição da umidade no solo com sonda capacitiva FDR (a) e coleta de amostras de solo indeformado para calibração do método

3.2.2.2. Potencial hídrico foliar

O potencial hídrico foliar (Ψ_{wf}) foi utilizado como indicador do estado hídrico das plantas. Suas medições tiveram início em 10/2014, sendo obtidas mensalmente. As avaliações foram realizadas nos mesmos tratamentos em que foram estimadas as umidades no solo. Foram selecionadas quatro árvores com CAP média por parcela, sendo as leituras feitas em folhas completamente expandidas (uma folha por árvore) no terço médio da copa. As leituras foram realizadas com câmara de pressão tipo Scholander, ligada a um cilindro contendo nitrogênio comprimido. Foram conduzidas medições na antemanhã (≈ 4 h) e ao meio dia (≈ 13 h), realizadas no mesmo dia. Após mensuração do Ψ_{wf} , realizou-se o cálculo do gradiente do potencial hidrodinâmico da água da raiz para a parte aérea das plantas (Ψ_{planta}), subtraindo-se os Ψ_{wf} (antemanhã - meio dia) (FRANKS et al. 2007, BATTIE-LACLAU et al., 2014b). O déficit de pressão de vapor (DPV) do ar foi calculado durante a madrugada e ao meio dia, visando correlacioná-lo com os valores de potenciais hídricos foliares mensurados durante o período estudado. O intervalo dos dados de temperatura e umidade relativa do ar, considerado

para o cálculo do DPV, foi o tempo gasto para cada medição dos Ψ_{wf} . O cálculo do DPV foi estimado pelas eq. (3, 4 e 5) (ALLEN et al, 1998):

$$DPV = e_s - e_a \quad (3)$$

$$e_s = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T}{237,3 + T}\right)} \quad (4)$$

$$e_a = \frac{(UR \cdot e_s)}{100} \quad (5)$$

Em que:

DPV = déficit de pressão de vapor (kPa);

e_s = pressão de vapor saturado (kPa);

e_a = pressão de vapor atual (kPa);

T = temperatura média (°C);

UR = umidade relativa do ar média (%)

3.2.2.3. Transpiração

A transpiração das árvores foi estimada pela medição do fluxo de seiva descrito por Granier (1985). Este método foi empregado em quatro árvores por parcela, nos tratamentos Controle, KCl_{120} , KCl_{180} , FO_{180} e NaCl. A instalação do sistema de medição teve início entre os meses de novembro e dezembro de 2014, passando por período de aferição, sendo apresentados os dados entre janeiro e dezembro de 2015. Os dados foram coletados diariamente e, posteriormente, extrapolados para as demais árvores do experimento. Para a medição do fluxo de seiva, cada árvore teve dois pares de sondas inseridas em seu xilema, a uma altura de 1,3 m do nível do solo. Cada par de sonda possuiu duas agulhas distantes verticalmente 10 cm uma da outra. As sondas possuem um termopar no centro de uma agulha hipodérmica, sendo que a sonda superior possui uma resistência elétrica que eleva a temperatura no local de inserção no tronco. O fluxo de seiva é estimado por meio da diferença de temperatura entre as sondas. Caso não haja fluxo, a diferença de temperatura entre as sondas é máxima. Havendo fluxo, o calor da sonda se dissipa por convecção, diminuindo a temperatura entre elas. As sondas foram conectadas a um sistema automático de armazenamento de dados (datalogger Campbell CR 1000). Como a área experimental não possuía energia elétrica, painéis solares foram fixados em uma torre de nove metros de altura, a 50 metros de distância do experimento, para o carregamento das baterias por meio de energia solar.

Em abril de 2015, foi realizada calibração da equação que permitiu correlacionar o fluxo de seiva com a transpiração das árvores, nas condições do presente estudo. Para esta calibração, foram selecionadas 24 árvores (seis por classe de DAP) ao lado do experimento, onde foram colocados tubos de policloroeteno (PVC) de 2 mm de diâmetro, uma semana antes do abate, para a inserção dos sensores durante a calibração e permitir a perfeita simulação do ocorrido em condições de campo. Destas árvores, cortaram-se segmentos de 0,6 metros de caule (compreendendo as perfurações), vedando suas extremidades com filme plástico para evitar perda de água, e transportando-os para o laboratório. A calibração foi realizada mediante a passagem forçada de água através do segmento de caule recentemente cortado. A passagem forçada da água foi realizada utilizando um sistema hidráulico capaz de fornecer uma pressão variável suficiente para simular fluxos variáveis de seiva através do caule.

Figura 14. Sondas inseridas no tronco da árvore (a). Sistema hidráulico de pressão variável (b). Passagem forçada de água pelo segmento do caule (c). Diferenciação entre cerne e alburno com solução de safranina

Durante a simulação do fluxo de seiva, foram instalados dois sensores no segmento do caule e os dados térmicos dos mesmos foram armazenados em um datalogger (Campbell, modelo CR1000) a cada minuto. A vazão da solução que passou através do segmento do caule foi medida em uma balança automatizada (precisão de 0,1 mL), que foi desenvolvida para tal finalidade utilizando como elemento sensor uma célula de carga. Deste modo, pôde ser relacionado, por meio de uma regressão, o índice térmico (fator k) com a densidade de fluxo de seiva (u ; 10^{-6} m s^{-1}) (eq. 6). Como foram instalados dois pares de sensores em cada segmento de caule, foram utilizados valores médios do fator k . As medidas, tanto térmicas como volumétricas, para cada pressão fornecida, foram mensuradas a cada segundo, armazenando-se a média a cada minuto. Como resultado da calibração, obteve-se a seguinte eq. (7):

$$k = \frac{(\Delta T_{\text{máximo}} - \Delta T_{\text{atual}})}{\Delta T_{\text{atual}}} \quad (6)$$

Em que:

$\Delta T_{\text{máximo}}$ = diferença de temperatura entre os sensores quando o fluxo é nulo ($^{\circ}\text{C}$);

ΔT_{atual} = diferença de temperatura entre os sensores quando o fluxo é maior que zero ($^{\circ}\text{C}$);

$$FS = 559,03 \cdot 10^{-6} \cdot k^{1,689} \cdot A \quad (7)$$

Em que:

FS = fluxo de seiva ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$);

A = área ativa condutora de seiva (m^2);

k = índice térmico.

Durante o trabalho de calibração, foi mensurada a área ativa condutora de seiva (A). O cálculo da A, representado pela área do alburno, foi calculada subtraindo-se o valor da área do cerne da área total do segmento de caule (média das extremidades). A espessura da casca foi medida e descontada da área total. A diferenciação entre a área do alburno e do cerne foi realizada após passagem forçada de solução de Safranina através do segmento de caule. A calibração e cálculo da A foram realizados em dois períodos (abril e agosto de 2015).

3.2.2.4. Eficiência do uso da água (EUA) e índice de área foliar (IAF)

A EUA foi calculada durante um ano, entre os 18 e 30 meses após o plantio. A EUA foi obtida pela relação entre o incremento em biomassa do tronco com base na matéria seca (MS) ou volume do tronco das árvores (Vol) e o volume total de água (Va) usado pela cultura durante o período da avaliação (eq. 8), estimado pela transpiração total das plantas (fluxo de seiva). Foram ajustadas equações de volume e biomassa do tronco para as árvores aos 18 e 30 meses, agrupando-se os dados obtidos nas medições de biomassas aos 13 e 33 meses (Tabela 10). O procedimento para o ajuste das equações foi o mesmo descrito no capítulo anterior.

$$EUA = \frac{(\Delta MS \text{ ou } \Delta Vol)}{\Delta Va} \quad (8)$$

Em que:

EUA = eficiência do uso da água (kg ou dm³ m⁻³);

ΔMS = incremento em matéria seca de lenho (kg);

ΔVol = incremento em volume (dm³);

ΔVa = volume de água utilizado (m³).

Tabela 10. Equações para estimativa do volume (com casca) e biomassa do tronco das arvores de eucalipto aos 18 e 30 meses após o plantio

Equação	R ² ajustado (%)
Volume do tronco com casca (Vol_{tcc}) - Schumacher-Hall $Vol_{tcc} = 5,1 \times 10^{-5} DAP^{1,8197} H^{1,046}$	99*
Biomassa do tronco (B_t) – Spurr $B_t = 0,3542 + 0,0159 DAP^2 H$	99*
Índice de Área foliar (IAF) – Stoate $IAF = 1,9165 - 0,002 DAP^2 H + 0,0899 DAP^2 - 0,2402 H$	94*

Unidades: Volume - m³ árvore⁻¹, Biomassa – kg árvore⁻¹, DAP - cm, H - m; *significância do modelo $p < 0,0001$

A metodologia empregada para a estimação do IAF foi a mesma descrita no item 2.2.3.5. O IAF foi calculado entre os 18 e 30 meses após o plantio. Os dados de DAP e H referentes aos 30 meses foram estimados utilizando-se interpolação entre os inventários realizados aos 22 e 33 meses de idade da plantação.

3.2.2.5. Análises estatísticas

Os resultados foram aferidos quanto à presença de “outliers”, normalidade (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) e homogeneidade de variância. Quando necessário foram realizadas transformações dos dados de acordo com o método da potência ótima de Box-Cox. Posteriormente os dados foram submetidos à análise de variância (ANAVA), utilizando-se o teste F ($\alpha = 0,1$) e tiveram suas médias comparadas entre si pelo teste LSD ($\alpha = 0,1$). Os dados de PHF e DPV foram analisados com auxílio do teste de correlação de Pearson ($\alpha = 0,05$). As análises foram realizadas com o software estatístico SAS (9.3) (SAS INSTITUTE, 2011).

3.3. Resultados

3.3.1. Umidade no solo

Para a comparação entre a fertilização com KCl e fonolito na camada de 0-30 cm, houve, na maioria das datas, tendência de maior teor de umidade no solo nos tratamentos Controle e FO₁₈₀ (Figura 14a). Em 40% das avaliações, o tratamento Controle apresentou os maiores teores de umidade. O tratamento fertilizado com fonolito apresentou os maiores teores de umidade em 60% do tempo, sendo mais frequentes entre 29/05 e 14/12/2015, período que compreendeu a estiagem e começo das chuvas (Figura 1). Os menores teores de umidade ocorreram no tratamento KCl₁₈₀. De modo geral, em pouco mais da metade das avaliações (54%), os níveis médios de umidade no solo se encontraram entre a tensão de ponto de murcha permanente (PMP) e da capacidade de campo (CC) para a camada de 0-30 cm. Valores médios de umidade no solo abaixo do PMP foram registrados em 26% das avaliações e, 20%, acima da CC. O teor de umidade no solo, na camada de 0-30 cm, apresentou correlação positiva com a precipitação pluvial ocorrida durante o período avaliado ($r = 0,86$; $p < 0,01$), evidenciando a importância da chuva na recarga hídrica do solo.

A umidade no solo na profundidade de 30-160 cm apresentou padrão semelhante à camada superficial (0-30 cm), porém, em todas as avaliações, o tratamento Controle apresentou os maiores teores de umidade (124 mm em média), o KCl₁₈₀ as menores (40% menor, comparativamente ao Controle) e, o FO₁₈₀, valores intermediários (30% menor comparativamente ao Controle) (Figura 15b). O KCl₁₈₀ apresentou teor de umidade acima do PMP em 6% das avaliações, seguido pelo tratamento FO₁₈₀ (26%). A umidade no solo no tratamento Controle, em 57% das medições, os teores ficaram acima do PMP. A umidade no solo correlacionou-se positivamente com a precipitação pluvial ($r = 0,61$; $p < 0,01$).

Figura 15. Precipitação pluvial e umidade no solo ao longo do tempo para as camadas de 0 - 30 cm (a) e 30 - 160 cm (b) em Latossolo Vermelho Amarelo de textura média sob plantação de eucalipto, dos 14 aos 30 meses de idade, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{180} – 180 kg ha^{-1} de K_2O fertilizado com KCl; FO_{180} – 180 kg ha^{-1} de K_2O fertilizado com fonolito. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média. Capacidade de campo: água retida no solo sob pressão de -0,01 MPa; Ponto de murcha permanente: água retida no solo sob pressão de 1,5 MPa; CAD - Capacidade de água disponível no solo (2 m de profundidade) = 280 mm

A comparação entre os tratamentos Controle, KCl_{120} e $NaCl$, na profundidade de 0-30 cm, apresentou teores de umidade no solo similares entre si (Figura 16a). Maiores diferenças na umidade no solo ocorreram em 26/11 e 10/12/2014. O tratamento $NaCl$ apresentou teores de umidade médio 14 e 16% inferiores ao tratamento Controle, respectivamente. De forma geral, a média dos tratamentos apresentou teores de umidade 23% abaixo do PMP, 49% entre a CC e o PMP e 28% acima da CC nas avaliações. Na profundidade de 30-160 cm, em 91% das

avaliações, a umidade do solo foi menor no tratamento NaCl e, em 69% das avaliações, foi maior no KCl₁₂₀ (Figura 16b). O teor médio de umidade no solo, entre os tratamentos Controle, KCl₁₂₀ e NaCl, foi, em 43% das datas, abaixo do PMP e, 57% entre a CC e o PMP. Não houve teores de umidade no solo acima da CC na camada de 30-160 cm.

Figura 16. Precipitação pluvial e umidade no solo ao longo do tempo para as camadas de 0 - 30 cm (a) e 30 - 160 cm (b) em Latossolo Vermelho Amarelo de textura média sob plantação de eucalipto, dos 14 aos 30 meses de idade, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na vertical junto aos pontos representam erro padrão da média. Capacidade de campo: água retida no solo sob pressão de -0,01 MPa; Ponto de murcha permanente: água retida no solo sob pressão de 1,5 MPa; CAD - Capacidade de água disponível no solo (2 m de profundidade) = 280 mm

3.3.2. Potencial hídrico foliar

Comparativamente aos tratamentos Controle, KCl_{180} e FO_{180} , o potencial hídrico foliar (Ψ_{wf}) no período da antemanhã variou pouco (Figura 17a). Na maioria das avaliações, 71%, a média dos Ψ_{wf} ficaram abaixo de -0,5 MPa. Em 21/07/2015, o Ψ_{wf} variou entre -1 e -0,5 MPa. Em 08/10/2014, 19/08 e 19/10/2015, ocorreram os menores valores de Ψ_{wf} no Controle (média = -2,0 MPa), seguido pelo KCl_{180} (média = -1,6 MPa), e maiores no FO_{180} (média = -1,4 MPa). Maiores respostas aos tratamentos ocorreram ao meio dia, com padrão bem diferente da antemanhã (Figura 17b). Ocorreram altos valores de Ψ_{wf} em 08/10/14 e 19/08/2015, seguindo a mesma ordem dos tratamentos na antemanhã. Em 19/10/2015, os valores de Ψ_{wf} foram similares entre os tratamentos (média = -2,3 MPa). Dentre todas as avaliações ao meio dia, os menores Ψ_{wf} foram obtidos na seguinte ordem de frequência: Controle (43%), FO_{180} (36%) e KCl_{180} (21%). De forma oposta, a frequência dos maiores Ψ_{wf} , foi: FO_{180} (43%), KCl_{180} (36%) e Controle (21%).

No Controle, KCl_{120} e NaCl , os Ψ_{wf} obtidos na antemanhã não apresentaram grande variação na maioria das avaliações (Figura 18a). Em 64% das medições, os valores de Ψ_{wf} foram menores que -0,5 MPa. A maior diferença entre os tratamentos foi obtida em 19/08/2015, em que o Controle apresentou menor Ψ_{wf} , e, o KCl_{120} , maior, mesmo com valor mediano de DPV (0,46 kPa). A média dos menores Ψ_{wf} ocorreram no mês de outubro de 2014 e 2015, entre -1,0 e -2,5, provavelmente, devido ao final do período de estiagem. Os Ψ_{wf} apresentaram maior variação ao meio dia (Figura 18b). Houve maior frequência dos menores Ψ_{wf} , ao meio dia, no Controle (43%), seguido pelo NaCl (36%) e KCl_{120} (21%). De forma oposta, maiores Ψ_{wf} ocorreram, em maior frequência, no KCl_{120} (57%), seguidos pelo Controle (29%) e NaCl (14%).

Figura 17. Potencial hídrico foliar e déficit de pressão de vapor (DPV) na antemã (a) e ao meio dia (b) em plantação de eucalipto, dos 16 aos 28 meses de idade, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₈₀ – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; FO₁₈₀ – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito. Barras na vertical indicam a LSD ($\alpha=0,1$). Barras na vertical junto aos pontos representam erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$)

Figura 18. Potencial hídrico foliar e déficit de pressão de vapor (DPV) na antemanhã (a) e ao meio dia (b) em plantação de eucalipto, dos 16 aos 28 meses de idade, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{120} – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; NaCl - 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na vertical indicam a LSD ($\alpha=0,1$). Barras na vertical junto aos pontos representam erro padrão da média. ns - diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,1$)

Os tratamentos Controle, KCl_{180} e FO_{180} proporcionaram diminuição no Ψ_{planta} em relação à diminuição do Ψ_{wf} na antemanhã (Figura 19a). A aplicação de KCl em menor quantidade, KCl_{120} , proporcionou Ψ_{planta} relativamente constante durante as 14 avaliações (Figura 19b), apresentando média de 1,0 MPa. O tratamento NaCl também apresentou Ψ_{planta} constante, 20% superior ao tratamento KCl_{120} .

Figura 19. Gradiente do potencial hidrodinâmico da água da raiz para a parte aérea ($\Psi_{\text{planta}} = \Psi_{\text{wf antemanhã}} - \Psi_{\text{wf meio dia}}$) em plantas de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* fertilizadas com KCl e fonolito (a) e KCl e NaCl (b); Controle – Ausência de potássio; KCl_{120,180} – 120 e 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl, respectivamente; FO₁₈₀ – 180 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl

3.3.3. Transpiração, eficiência do uso da água e índice de área foliar

Houve grandes variações na transpiração diária média ao longo do ano nos tratamentos Controle, KCl₁₈₀ e FO₁₈₀ (Figura 20a). A média da transpiração diária, em mm árvore⁻¹, foi 2,8 (Controle), 3,3 (KCl₁₈₀) e 3,7 (FO₁₈₀). Dentre estes tratamentos, o FO₁₈₀ e o KCl₁₈₀ apresentaram maior variação da transpiração durante o ano ($s = 1,8$ mm árvore⁻¹ dia⁻¹). A menor variação ocorreu no Controle ($s = 1,4$ mm árvore⁻¹ dia⁻¹). O maior valor ocorreu no FO₁₈₀ (8,6 mm árvore⁻¹ dia⁻¹) e, o menor, no Controle (1,0 mm árvore⁻¹ dia⁻¹). O FO₁₈₀ apresentou a maior transpiração acumulada, 26% superior ao Controle (Figura 20b). O KCl₁₈₀ apresentou a maior transpiração acumulada até 08/08/2015 e, a partir desta data, menor do que o FO₁₈₀, superando o Controle em 16%. A transpiração anual, em relação à precipitação pluvial ocorrida no ano de 2015, foi de 67% no Controle, 77% no KCl₁₈₀ e 84% no FO₁₈₀.

Houve alta variação da transpiração diária no Controle, KCl₁₂₀ e NaCl (Figura 21a). A maior média ocorreu no KCl₁₂₀ (3,5 mm árvore⁻¹ dia⁻¹), seguida pelo NaCl (3,2 mm árvore⁻¹ dia⁻¹), e menor no Controle (2,8 mm árvore⁻¹ dia⁻¹). A menor variação ocorreu no Controle ($s = 1,4$ mm árvore⁻¹ dia⁻¹), seguido do KCl₁₂₀ ($s = 1,6$ mm árvore⁻¹ dia⁻¹) e, a maior variação, no NaCl ($s = 1,7$ mm árvore⁻¹ dia⁻¹). A transpiração acumulada no Controle, KCl₁₂₀ e NaCl apresentou valores similares entre si até 24/06/2015 (Figura 21b). A partir desta data, o KCl₁₂₀ passou a apresentar maior transpiração acumulada e, a diferença entre os demais tratamentos, aumentou a partir de 30/10/2015. Em 14/12/2015, o KCl₁₂₀ apresentou transpiração acumulada

18% superior ao Controle, e o NaCl superou o Controle em 7%. A transpiração anual, relativamente à precipitação pluvial ocorrida no ano de 2015, foi 79% (KCl_{120}) e 71% (NaCl).

Figura 20. Transpiração média e déficit de pressão de vapor diários (a) e transpiração acumulada (b), entre os 18 e 30 meses após o plantio de eucalipto, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl_{180} – 180 kg ha⁻¹ de K_2O fertilizado com KCl; Fo_{180} – 180 kg ha⁻¹ de K_2O fertilizado com fonolito. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média.

Figura 21. Transpiração média e déficit de pressão de vapor diários (a) e transpiração acumulada (b), entre os 18 e 30 meses após o plantio de eucalipto, nos tratamentos: Controle – Ausência de potássio; KCl₁₂₀ – 120 kg ha⁻¹ de K₂O fertilizado com KCl; NaCl – 73 kg ha⁻¹ de Na₂O fertilizado com NaCl. Barras na vertical junto aos pontos representam o erro padrão da média.

O incremento em volume do tronco, entre 18 e 30 meses após o plantio, foi maior no FO₁₈₀ (7% superior ao Controle), intermediário no KCl₁₈₀ (3% superior ao controle) e menor no Controle. O incremento em biomassa do tronco seguiu a mesma sequência, sendo 8% para o FO₁₈₀ e 4% para o KCl₁₈₀ comparativamente ao Controle. O maior consumo de água, comparativamente ao Controle, ocorreu nas árvores do FO₁₈₀ (20%), seguido pelo tratamento KCl₁₈₀ (11%). O menor consumo de água e incremento em índice de área foliar (IAF) ocorreu no Controle. A fertilização potássica por meio de fonolito e do KCl proporcionou incrementos

em IAF similares entre as plantas, 18% superior ao Controle. Houve maior eficiência do uso da água (EUA) no Controle. O tratamento KCl_{180} apresentou EUA 9% inferior ao Controle, e o FO_{180} 12% (Tabela 11). As árvores fertilizadas com K foram 7% superior ao Controle, e 3% superior à fertilização com Na em termos de volume do tronco (Tabela 11). Os incrementos em biomassa do tronco seguiram a mesma ordem, apresentando 8 e 3% superiores ao Controle, respectivamente. O consumo de água das árvores do KCl_{120} foi 8% superior ao Controle. O incremento em IAF foi semelhante entre o Controle, o KCl_{120} e o NaCl. Não houve diferença entre as EUA na formação de volume e biomassa de tronco.

Tabela 11. Incrementos em índice de área foliar, volume e biomassa do tronco, consumo de água e eficiência do uso da água dos 18 aos 30 meses após o plantio, em *Eucalyptus urophylla* x *grandis* fertilizado com fontes alternativas ao KCl

Tratamento	Incremento		Índice de área foliar (IAF)		Consumo de água	Eficiência do uso da água	
	Volume	Biomassa	18 meses	30 meses		Volume	Biomassa
	$m^3 ha^{-1}$	$Mg ha^{-1}$	$m^2 m^{-2}$		$m^3 árvore^{-1}$	$dm^3 m^{-3}$	$kg m^{-3}$
Controle	83,5 b	35,9 b	3,5 a	5,2 b	7,9 c	8,1 a	3,5 a
KCl_{180}	86,3 b	37,2 b	3,4 a	5,4 a	8,8 b	7,4 b	3,2 b
FO_{180}	89,7 a	38,7 a	3,5 a	5,5 a	9,5 a	7,1 b	3,1 b
Controle	83,5 B	35,9 B	3,5 A	5,2 A	7,9 B	8,1 A	3,5 A
KCl_{120}	89,7 A	38,8 A	3,5 A	5,5 A	8,5 A	7,9 A	3,4 A
NaCl	85,9 AB	37,0 AB	3,5 A	5,3 A	8,1 B	8,1 A	3,5 A

Controle – Ausência de potássio; $KCl_{120,180}$ – 120 e 180 $kg ha^{-1}$ de K_2O fertilizado com KCl, respectivamente; FO_{180} – 180 $kg ha^{-1}$ de K_2O fertilizado com fonolito; e NaCl – 73 $kg ha^{-1}$ de Na_2O fertilizado com NaCl. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,1$) para a comparação entre Controle, KCl_{180} e FO_{180} . Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,1$) para a comparação entre Controle, KCl_{120} e NaCl

3.4. Discussão

3.4.1. Umidade no solo

A omissão de K ou a baixa solubilidade do fonolito foram responsáveis por menores taxas de crescimento das plantas, demandando assim menor quantidade de água. Fertilizações com KCl resultaram em maior consumo de água, por conseguinte em menor unidade no solo (Figura 15a, b). Segundo Martins et al. (2015), as fontes alternativas de K, como fonolito e rocha ultramáfica, disponibilizam K de forma lenta, quando comparadas ao KCl, podendo diminuir as respostas em crescimento de volume e biomassa.

Nas camadas de 0-30 e 30-160 cm, as umidades no solo ficaram abaixo do PMP, principalmente ao longo do período de estiagem, inverno e princípio da primavera, (Figura 15 e 16). Não houve morte de árvores, indicando a capacidade do eucalipto de absorver água em potencial hídrico abaixo de -1,5 MPa. Algumas espécies de *Eucalyptus* têm capacidade de explorar camadas profundas do solo por meio de seu sistema radicular, o qual pode atingir 9,2 m de profundidade ao 1,5 ano de idade, e realizar associações com micorrizas, aumentando a capacidade de absorção de água e nutrientes (ROBINSON et al., 2006; TEDERSOO et al., 2010; CHRISTINA et al., 2011; LACLAU et al., 2013). Wang et al. (2009), estudando a dinâmica da umidade no solo em profundidade em povoamentos de *Pinus tabulaeformis* e *Caragana microphylla*, constataram que ambas as espécies apresentaram umidade no solo próximo do PMP, evidenciando menor capacidade de absorção de água comparativamente ao *Eucalyptus* sp.. Em 26/11 e 10/12/2014, durante um período chuvoso, houve maior diferença na umidade no solo nos tratamentos fertilizados com KCl e fonolito (Figura 14a, b). Silva et al. (2013) verificaram que a fertilização potássica possibilitou maior crescimento de raízes até 1,6 metros de profundidade, possibilitando maior absorção de água e maior crescimento em volume e biomassa.

As fertilizações potássica e sódica proporcionaram umidades no solo similares na profundidade de 0-30 cm (Figura 16a). Em grande parte das avaliações, os tratamentos apresentaram teores de umidade entre a CC e o PMP ou acima da CC, o que evidencia poucos períodos de estresse hídrico para as plantas. Na profundidade 30-160 cm, ocorreram menores umidades no solo no NaCl e, maiores, no KCl₁₂₀. Battie-Laclau et al. (2014b), estudando a fertilização sódica e potássica em plantação de *E. grandis*, constataram maior estoque de água em tratamento fertilizado com KCl comparativamente à fertilização com NaCl, durante, aproximadamente, um ano e meio após o plantio, indicando maior consumo de água pelas árvores fertilizadas com Na nos primeiros meses de idade.

3.4.2. Potencial hídrico foliar

Nas poucas datas em que houve diferenças no Ψ_{wf} , o FO₁₈₀ e o KCl₁₈₀ apresentaram maiores valores do que o Controle. Provavelmente, melhor controle estomático após fornecimento de K (Figura 18). De forma contrária, Battie-Laclau et al. (2016) encontraram maiores Ψ_{wf} nas árvores que não receberam fertilização potássica ou sódica, 9 meses após o plantio de eucalipto. Historicamente, a região de estudo destes pesquisadores, apresenta poucos períodos de déficit hídrico e possui melhor distribuição das chuvas. Sobre estas condições, as

fertilizações potássica e sódica proporcionaram aumento no IAF, aumentando a superfície evaporativa das plantas, propiciando valores menores de Ψ_{wf} . No presente estudo, o NaCl proporcionou maiores Ψ_{wf} na antemanhã e menores ao meio dia, no mesmo dia de avaliação (Figura 19). Devido ao melhor controle estomático pelas plantas fertilizadas com K, o FO₁₈₀ e o KCl₁₈₀ mantiveram os maiores Ψ_{wf} durante o período da antemanhã até o meio dia, nos dias de maior resposta para o Ψ_{wf} (Figura 18). Battie-Laclau et al. (2014b) encontraram os mesmos comportamentos de Ψ_{wf} apresentados em KCl₁₈₀ e FO₁₈₀.

Franks et al. (2007), em plantações de *E. gomphocephala* na Austrália, afirmam existir flutuação dos valores de Ψ_{wf} ao longo do tempo. Mesmo apresentando tais variações, a espécie estudada por estes pesquisadores exibiu um constante gradiente do potencial hidrodinâmico da água da raiz para a parte aérea (Ψ_{planta}), indicando que altas variações de Ψ_{wf} não comprometem a condutância hidráulica da espécie estudada. Provavelmente, devido à menor influência do déficit hídrico no crescimento das plantas fertilizadas com KCl e NaCl (com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de K₂O e 73 kg ha⁻¹ de Na₂O), o KCl₁₂₀ e o NaCl apresentaram Ψ_{planta} constantes (Figura 19a). Ao utilizar maior dose de K₂O (180 kg ha⁻¹), o Ψ_{planta} deixou de ser constante, apresentando comportamento similar ao Controle (Figura 19b). De acordo com Battie-Laclau et al. (2014b) o Ψ_{planta} é responsável por impulsionar a absorção de água pelas plantas. Os mesmos autores, verificaram que o estado hídrico de *E. grandis* submetidos à exclusão parcial de chuva apresentou Ψ_{planta} de 1,0 MPa para o tratamento Controle, e 0,4 MPa, para o tratamento fertilizado com KCl ao final da segunda época seca. Concluíram que a aplicação de K induz menor potencial para absorção de água sob condição de estresse hídrico, podendo levar à disfunção hidráulica e, conseqüentemente, à morte da planta em eventuais períodos de déficit hídrico severo. O KCl₁₂₀ apresentou Ψ_{planta} de 1,0 MPa, e o NaCl 1,2 MPa, o que indica baixo potencial de disfunção hidráulica. Este resultado foi fruto do curto tempo avaliado e do aumento da precipitação ocorrida no final do ano de 2014 (Figura 1).

Plantas bem nutridas em K apresentam maior produtividade ao longo do tempo, devido ao aumento no IAF, que, por sua vez, amplia a área fotossintética e evaporativa das plantas, aumentando a susceptibilidade ao estresse hídrico, evidenciando menores Ψ_{wf} (BATTIE-LACLAU et al., 2014b; 2016). Devido ao elevado déficit hídrico ocorrido em 2014 (Figura 2), as árvores não apresentaram o crescimento esperado e suficiente para exibir resultados similares aos citados na literatura.

3.4.3. Transpiração, eficiência do uso da água e índice de área foliar

A variação média entre todos os tratamentos foi de 6,5 mm árvore⁻¹, enquanto que a transpiração diária média foi 3,3 mm árvore⁻¹. Variações na transpiração diária em árvores do gênero *Eucalyptus* foram documentadas na literatura (GENTIL, 2010; DRAKE et al, 2012; DEUS JUNIOR, 2014). Gentil (2010), estudando plantações de *E. grandis* x *urophylla* com e sem irrigação, em Eunápolis - BA, encontrou transpiração média de 7,6 mm árvore⁻¹ dia⁻¹ em ambos os tratamentos. Deus Júnior (2014), comparando transpirações entre plantações mistas e puras de *E. grandis* e *Acacia mangium*, em Itatinga - SP, apresentou transpirações variáveis entre o terceiro e quarto ano após o plantio. O autor evidenciou transpiração diária média de 2,9 mm no plantio puro de *E. grandis*. A transpiração pode sofrer variações em função das condições climáticas. Segundo Gonçalves et al. (2013), regiões com o tipo climático Cwa (classificação de Köppen), como a região do presente estudo, apresentam frequentes períodos de estresse hídrico, afetando a transpiração das plantas e a produtividade dos povoamentos de eucalipto. Grandes variações na transpiração diária também são influenciadas pelo genótipo plantado e sua idade. Em detalhada revisão sobre a regulação fisiológica da produtividade e EUA em *Eucalyptus*, Whitehead e Beadle (2004) assinalaram variação na transpiração diária entre 0,2 e 8 mm dia⁻¹, dentre 11 espécies de *Eucalyptus*, variando de 1 a 230 anos de idade, sob diferentes condições de crescimento.

Neste estudo, a maior transpiração diária média foi evidenciada no tratamento fertilizado com fonolito, seguido pela fertilização com KCl. O fornecimento de K para as plantas aumenta a alocação de carbono na biomassa aérea, em especial nas folhas, aumentando também seu teor nutricional, culminando em maiores taxas fotossintéticas e de transpiração (FORRESTER, 2013). Dessa forma, a diferença entre o fonolito e o KCl foi devido à lenta liberação de K e Na, apresentada pelo fonolito, fornecendo os elementos no momento de maior requerimento nutricional para o crescimento das árvores, o qual apresentou atraso, devido à falta de chuvas ocorrido no início do experimento. O KCl₁₂₀ apresentou maior transpiração diária média que o NaCl, indicando maior influência do nutriente K no incremento em IAF e transpiração, quando comparado com o Na (GATTWARD et al., 2012).

Foi observado aumento na transpiração anual acumulada entre os meses mais chuvosos (janeiro - março e setembro - dezembro de 2015) e, diminuição, nos meses com menores índices de precipitação pluvial (abril - agosto de 2015) (Figuras 20b e 21b) devido ao aumento dos níveis de precipitação, corroborando com os dados apresentados por Stape et al. (2004a). Os valores de transpiração anual acumulada observados durante o ano avaliado foram coerentes

com a relatada na literatura. Deus Júnior (2014) observou transpiração anual acumulada de 1180 mm em plantio de *E. grandis*, equivalente a 76,4% da precipitação anual, e Cabral et al. (2010) encontrou 959 mm em clones de *E. grandis* x *urophylla* aos dois anos de idade, ambos no estado de São Paulo. No Espírito Santo, a transpiração acumulada de um povoamento de *E. grandis* x *urophylla* com quatro anos de idade foi de 1394 mm (HUBBARD et al., 2010).

A EUA estimados neste estudo (média de 3,3 kg m⁻³), são similares aos encontrados por Stape et al. (2004a) em árvores de *Eucalyptus* sp. de alta produtividade (incremento médio anual > 20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). Stape et al. (2004b) encontraram valores de EUA de 3,8 kg m⁻³ em ano úmido e com irrigação e, 1,8 kg m⁻³, em ano com precipitações pluviais normal sem irrigação, em povoamentos clonais de *E. grandis* x *urophylla*. Sob condições de fertilização, em especial a potássica, plantas de eucalipto apresentam aumento em IAF, maior longevidade das folhas, maior taxa fotossintética, maior alocação de carbono na biomassa aérea e, inevitavelmente, maior consumo de água via transpiração (WHITEHEAD; BEADLE, 2004; CHRISTINA et al., 2015; BATTIE-LACLAU et al., 2016).

A seca ocorrida no estado de São Paulo nos anos de 2014 e 2015, influenciou na baixa produtividade média de madeira, durante os primeiros meses após o plantio (MARENGO; ALVES, 2015). Em 2015, com melhor distribuição da precipitação pluvial, o KCl aplicado propiciou maiores incrementos em volume e biomassa do tronco comparativamente ao Controle, e maior consumo de água. Este comportamento resultou em similar EUA entre os demais tratamentos (relativo à comparação Controle x KCl₁₂₀ x NaCl).

A ausência de fertilização potássica do tratamento Controle, propiciou menor incremento em volume e biomassa de tronco, menor incremento em IAF e menor taxa de consumo de água, culminando em maior EUA (relativo à comparação Controle x KCl₁₈₀ x FO₁₈₀). Por outro lado, as árvores que receberam aplicação de fonolito dispuseram do K e Na necessários para aumentar o incremento em volume e biomassa do tronco, aumentar o IAF e, conseqüentemente, consumirem mais água, resultando em menor EUA. O K aplicado por meio de KCl foi rapidamente absorvido no início do experimento, reduzindo seu reflexo no incremento em volume e biomassa do tronco durante o período avaliado, aumentando o incremento em IAF, mantendo o consumo de água superior ao apresentado pelo Controle, culminando em menor EUA. De forma geral, o baixo incremento em volume e biomassa do tronco, evidenciado nos tratamentos fertilizados com KCl e fonolito, resultaram em EUA menores que os observados no tratamento Controle. Tendo em vista que as maiores doses de K₂O usadas resultaram em menores EUA, e que a região apresenta histórico de déficit hídrico, destaca-se a importância de práticas de manejo que procuram diminuir o consumo de água pelas

plantas, como aplicação de baixas doses de K, visando reduzir o risco de mortalidade de árvores em possíveis eventos de secas extremas. Porém, esta prática pode diminuir a produtividade desses povoamentos (CHRISTINA et al., 2015).

3.5. Conclusões

I) A fertilização com fonolito mantém maiores teores de umidade no solo quando comparados à aplicação de KCl;

II) A fertilização com NaCl proporcionou menor teor de umidade no solo quando comparados à aplicação de KCl;

III) O emprego do fonolito proporcionou maior média de Ψ_{wf} do que a fertilização com KCl;

IV) As árvores fertilizadas com NaCl demonstraram Ψ_{wf} menores às fertilizadas com KCl, apresentando grande variação entre as datas de avaliação;

V) O fonolito proporcionou maior transpiração acumulada, maior incremento em volume e biomassa do tronco e igual eficiência do uso da água do que a fertilização com KCl;

VI) A fertilização com NaCl proporcionou menor transpiração acumulada, e iguais incrementos em volume e biomassa do tronco e eficiência do uso da água do que a fertilização com KCl.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Dranaige Paper, 56).
- ALMEIDA, J.C.R.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; RANGER, J.; SAINT-ANDRÉ, L. A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficit soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam. v. 259, p. 1786-1795, 2010.
- ALMEIDA, J.C.R., LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, R.M.; ROJAS, J.S.D. Índice de área foliar de *Eucalyptus grandis* em resposta à adubação com potássio e sódio. In: I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o ciclo Hidrológico. 2007. Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi, 2007. p.1 -7.
- BATTIE-LACLAU, P.; ROJAS, J.S.D.; CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; MOREIRA, M.Z.; GONÇALVES, J.L.M.; ROUPSARD, O.; LACLAU, J.P. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Manegement**, Amsterdam, v. 364, p. 77-89, 2016.
- BATTIE-LACLAU, P; LACLAU, J.P.; BERI, C.; MIETTON, L; MUNIZ, M.R.A.; ARENQUE, B.C.; PICCOLO, M.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**, Oxford, v. 37, p. 70–81, 2014a.
- BATTIE-LACLAU, P; LACLAU, J.P.; DOMECH, J.C.; CHRISTINA, M.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, R.M.; KRUSCHE, A.V.; BOUVET, J.M.; NOUVELLON, Y. Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. **New Phytologist**, Landcaster, v. 203, p. 401–413, 2014b.

- BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J.P.; PICCOLO, M.C.; ARENQUE, B.C.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M.R.A.; JORDAN-MEILLE, L.; BUCKERIDGE, M.S.; NOUVELLON, Y.; RANGER J.; BOUILLET, J.P. Influence of potassium and sodium nutrition on leaf area components in *Eucalyptus grandis* trees. **Plant and Soil**, New York, v. 371, p. 19–35, 2013.
- BOLLAND, M.D.A.; BAKER, M.J. Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 56, p. 59-68, 2000.
- CABRAL, O.M.R.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.C.; LIGO, M.A.V.; FREITAS, H.C.; TATSCH, J.D. The energy and water balance of a *Eucalyptus* plantation in southeast Brazil. **Journal of Hydrology**, Corvallis, v. 388, p. 208-216, 2010.
- CARVALHO, A.M.X. Rochagem: um novo desafio para o manejo sustentável da fertilidade do solo. In: SILVA, J.C.; SILVA, A.A.S.; ASSIS, R.T. (Ed). **Sustentabilidade produtiva e inovação no campo**. Uberlândia: Composer. 2013. p. 117-132.
- COLE, D.W.; FORD, E.D.; TURNER, J. Nutrients, moisture and productivity of established forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 30, p. 283-299, 1990.
- CHRISTINA, M.; MAIRE, G.; BATTIE-LACLAU, P.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P.; JOURDAN, C.; GONÇALVES, J.L.M.; LACLAU, J.P. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, p. 2022-2039, 2015.
- CHRISTINA, M; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P. Almost symmetrical vertical growth rates above and below in one of the world's most productive forests. **Ecosphere**, Washington, v. 2, p. 1-10, 2011.
- DEUS JUNIOR, J. C. **Transpiração e eficiência de uso da água em plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium***. 2014. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2014.

- DRAKE, P.L.; MENDHAM, D.S.; WHITE, D.A.; OGDEN, G.N.; DELL, B. Water use and water-use efficiency of coppice and seedling *Eucalyptus globulus* Labill.: a comparison of stand-scale water balance components. *Plant and Soil*, New York, v. 350, p. 221–235, 2012.
- FORRESTER, D.I. Growth responses to thinning, pruning and fertiliser application in *Eucalyptus* plantations: A review of their production ecology and interactions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 310, p. 336-347, 2013.
- FRANKS, P.J.; DRAKE, P.L.; FROEND, R.H. Anisohydric but isohydrodynamic: seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 30, p. 19-30, 2007.
- GATTWARD, J.N.; ALMEIDA, A.A.F.; SOUZA JUNIOR, J.O.; GOMES, F.P.; KRONZUCKER, H.J. Sodium–potassium synergism in *Theobroma cacao*: stimulation of photosynthesis, water-use efficiency and mineral nutrition. **Physiologia Plantarum**, Sweden, v.146, p. 350-362, 2012.
- GENTIL, M.S. **Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de *Eucalyptus* aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia**. 2010. 71f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2010.
- GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières**, Versailles, v. 42, p. 193-200, 1985.
- HERBERT, M.A. Fertilizer/site interactions on the growth and foliar nutrient levels of *Eucalyptus grandis*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 30, p. 247-257, 1990.
- HUBBARD, R.M.; STAPE, J.; RYAN, M.G.; ALMEIDA, A.C.; ROJAS, J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1714-1721, 2010.

- LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; REINE, C.; GONÇALVES, J.L.M.; KRUSHE, A.V.; JOURDAN, C.; MAIRE, G.; BOUILLET, J.P. Mixing *Eucalyptus* and *Acacia* trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. **Oecologia**, Berlin, v. 172, p. 903-913, 2013.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Geosp - Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 19, p. 485-494, 2016.
- MARTINS, V.; SILVA, D.R.G.; MARCHI, G.; LEITE, M.C.A.; MARTINS, E.S.; GONÇALVES, A.S.F.; GUILHERME, L.R.G. Effect of alternative multinutrient sources on soil chemical properties. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 194-204, 2015.
- NAMBIAR, E.K.S. Interplay between nutrients, water, root growth and productivity in young plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 30, p. 213-232, 1990.
- OTTO, M.S.G.; HUBBARD, R.M.; BINKLEY, D.; STAPE, J.L. Dominant clonal *Eucalyptus grandis* x *urophylla* trees use water more efficiently. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 328, p. 117-121, 2014.
- ROBINSON, N.; HARPER, R.J.; SMETTEM, K.R.J. Soil water depletion by *Eucalyptus* spp. Integrated into dryland agricultural systems. **Plant and Soil**, New York, v. 286, p. 141-151, 2006.
- RODRÍGUEZ-SUÁREZ, J.A.; SOTO, B.; PEREZ, R.; DIAZ-FIERROS, F. Influence of *Eucalyptus globulus* plantation growth on water table levels and low flows in a small catchment. **Journal of Hydrology**, Corvallis, v. 396, p. 321-326, 2011.
- SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. Cary, 2011.
- SETTE JÚNIOR, C.R.; LACLAU, J.P.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOREIRA, R.M.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J.; ALMEIDA, J.C.R. Source-driven remobilizations of

- nutrients within stem wood in *Eucalyptus grandis* plantations. **Trees - Structure and Function**, Berlim, v. 27, p. 827-839, 2013.
- SILVA, E.A.; CASSIOLATO, A.M.R.; MALTONI, K.L.; SCABORA, M.H. Efeitos da rochagem e de resíduos orgânicos sobre aspectos químicos e microbiológicos de um subsolo exposto e sobre o crescimento de *Astronium fraxinifolium* Schott. **Árvore**, Viçosa, v. 32, p. 323-333, 2008.
- SILVA, P.H.M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P.L.; GONÇALVES, A.N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 67-78, 2013.
- SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, Corvallis, v. 253, p. 130-147, 2001.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 17-31, 2004.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. GOMES, A.N. Water use, water limitation, and water use efficiency in a *Eucalyptus* plantation. **Bosque**, Valdivia, v. 25, p. 35-41, 2004.
- TEDERSOO, L.; MAY, T.W.; SMITH, M.E. Ectomycorrhizal lifestyle in fungi: global diversity, distribution, and evolution of phylogenetic lineages. **Mycorrhiza**, Berlin, v. 20, p. 217-263, 2010.
- TEIXEIRA, A.M.S.; SAMPAIO, J.A.; GARRIDO, F.M.S.; MEDEIROS, M.E. Avaliação da rocha fonolito como fertilizante alternativo de potássio. **Holos**, Natal, v. 5, p. 21-33, 2012.
- WANG, Z.; LIU, B.; LIU, G.; ZHANG, Y. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau. **Science in China Series D: Earth Sciences**, Beijing, v. 52, p. 835-842, 2009.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C.L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 113-140, 2004.

WILPERT, K; LUKES, M. Ecochemical effects of phonolite rock powder, dolomite and potassium sulfate in a spruce stand on an acidified glacial loam. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 65, p. 115-127, 2003.