

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

Resposta do *Eucalyptus* à aplicação de fontes fosfatadas com diferentes solubilidades

**Adam da Cruz Rodrigues**

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

Piracicaba  
2022

Adam da Cruz Rodrigues  
Engenheiro Florestal

Resposta do *Eucalyptus* à aplicação de fontes fosfatadas com diferentes solubilidades  
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba  
2022

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

Rodrigues, Adam da Cruz

Resposta do *Eucalyptus* à aplicação de fontes fosfatadas com diferentes solubilidades / Adam da Cruz Rodrigues. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

43 p.

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

1. Eucalipto 2. Cultivo mínimo 3. Fertilização de P 4. Nutrição florestal I.  
Título

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Rosinete e Edilson, por todos os ensinamentos, a dedicação, os sacrifícios para que eu pudesse estudar e chegar aonde estou hoje e por todo apoio às minhas escolhas.

Aos meus irmãos Karol, Karine e Andrey por estarem sempre ao meu lado.

Aos meus professores pelos ensinamentos e por me guiarem até aqui.

**A vocês, dedico este trabalho.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar sabedoria, saúde, paz e por colocar, em meu caminho, pessoas maravilhosas, que me apoiaram e que tornaram possível a conclusão deste trabalho;

Ao Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves, pela oportunidade, pela confiança, pela paciência e pelos ensinamentos na condução deste trabalho;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), à Universidade de São Paulo (USP), ao Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais e a todos os funcionários, em especial à Gi, que colaboraram para minha formação profissional;

Ao Programa Temático de Silvicultura e Manejo (PTSM) do IPEF, por todo o apoio logístico e financeiro e ao Alexandre de Vicente Ferraz, por todo apoio e pelos ensinamentos;

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida;

Aos meus amigos e colegas Amanda, Alvaro, Antônio, Ivanka, José Henrique, Liamara e Sílvio por todo o apoio, as discussões, as reflexões e os ensinamentos ao longo desses anos;

Aos estagiários do PTS, em especial ao Flávio, ao Gustavo, à Isabella, ao Rafael e à Victória, por todo o apoio na realização das atividades;

À equipe da Estação Experimental de Itatinga, em especial ao Rildo Moreira, ao Lourival e à Elaine, por todo o apoio na realização das atividades;

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Pavinato e à Ana Teles pela amizade e pelo suporte nas análises laboratoriais, nas discussões, nas reflexões e nas contribuições ao meu trabalho;

À equipe do Laboratório de Química do Solo-ESALQ, em nome do Luis Silva (*in memoriam*), por todo o apoio nas análises químicas de solo;

À equipe do LEA, Alba, Daiele, Juliana e Gisele, pelo apoio na realização das análises laboratoriais;

À Virginia, pelo apoio nos momentos dificeis, pelo carinho, pelo amor e pela compreensão;

Aos meus grandes amigos, Enrico, Eduardo e Lúcio, pelo apoio, pela recepção e pelos bons momentos compartilhados;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho.

**Muito Obrigado!**

## EPÍGRAFE

*“Take these broken wings and learn to fly...”.*

Blackbird, The Beatles.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	8
ABSTRACT.....	9
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>11</b>
REFERÊNCIAS .....	15
<b>2. ALTERAÇÕES NAS FRAÇÕES DE P NO SOLO, NA NUTRIÇÃO E NO CRESCIMENTO DE POVOAMENTOS DE <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> CAUSADAS PELA APLICAÇÃO DE FOSFATOS SOLÚVEIS E POUCO SOLÚVEIS .....</b>	<b>17</b>
RESUMO .....	17
ABSTRACT .....	18
2.1 INTRODUÇÃO .....	19
2.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	21
2.2.1 Área experimental .....	21
2.2.2 Instalação, delineamento e tratamentos.....	23
2.2.3 Atributos químicos do solo .....	24
2.2.4 Fracionamento de P no solo .....	25
2.2.5 Crescimento das árvores.....	27
2.2.6 Acúmulo de nutrientes na biomassa aérea .....	27
2.2.7 Análise de dados .....	28
2.3 RESULTADOS.....	29
2.3.1 Fósforo no solo .....	29
2.3.2 Crescimento das árvores.....	33
2.3.3 Acúmulo de P na biomassa aérea .....	35
2.4 DISCUSSÃO .....	37
2.5 CONCLUSÃO .....	39
REFERÊNCIAS .....	41

## RESUMO

### **Resposta do *Eucalyptus* à aplicação de fontes fosfatadas com diferentes solubilidades**

A fertilização fosfatada cumpre papel imprescindível na manutenção das altas produtividades das florestas de *Eucalyptus* no Brasil, geralmente localizadas em áreas de solos de baixa fertilidade e de alta capacidade de fixação de P. Frente ao crescimento constante das áreas de florestas de *Eucalyptus* nos últimos anos e à demanda mundial pela produção cada vez mais sustentável e com menor emprego de insumos (e.g., fertilizantes), faz-se necessário o estudo de práticas de manejo sustentáveis que maximizem a eficiência de uso de fertilizantes fosfatados. Esse uso, em conjunto com fatores edafoclimáticos, afeta, de diferentes formas, a composição das frações de fósforo no solo, a eficiência de uso dos nutrientes pelas plantas e a produtividade florestal. Esse efeito se modifica ao longo da rotação de cultivo e necessita de avaliação cuidadosa. O manejo da fertilização fosfatada deve envolver o adequado suprimento do nutriente às plantas. Sendo o P um recurso proveniente de reservas finitas, é necessário aprofundar a compreensão, na fertilização fosfatada para o *Eucalyptus*, para utilizar, de forma mais eficaz, os fertilizantes sobre o solo e a consequente produtividade dos plantios. O objetivo geral, neste trabalho, foi analisar a influência do emprego de diferentes manejos da fertilização fosfatada com fontes solúveis e poucos solúveis no solo, sobre a nutrição e o crescimento de povoamentos de *Eucalyptus*. Estruturalmente, a dissertação foi dividida em dois capítulos. No primeiro, objetivou-se uma revisão focada na problemática do trabalho. No segundo, apresentaram-se as avaliações da aplicação de P com fontes de diferentes solubilidades nas frações e nos estoques de P no solo, na nutrição e no crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* ao longo de uma rotação de cultivo.

**Palavras-chave:** Eucalipto, Cultivo mínimo, Fertilização de P, Nutrição florestal

## ABSTRACT

### **Response of *Eucalyptus* to application of phosphate sources with different solubilities**

Phosphate fertilization plays an essential role in maintaining the high productivity of Eucalyptus forests in Brazil, mostly located in areas of low fertility soils with high capacity of P fixation. Given the constant growth of *Eucalyptus* forests in recent years and the worldwide demand for increasingly sustainable production with less use of inputs (e.g. fertilizers), it is critical to study sustainable management practices that maximize the efficiency of phosphate fertilizer use. This use, together with soil and climatic factors, affects, in different ways, the composition of phosphorus fractions in the soil, the efficiency of nutrient use by plants and forest productivity. This effect modifies along the crop rotation and needs thorough evaluation. The management of phosphate fertilization should involve an adequate supply of the nutrient to the plants. Since P is a resource that comes from finite reserves, it is essential to deepen the understanding of phosphate fertilization for *Eucalyptus*, in order to use, in a more efficient way, the fertilizers on the soil and the consequent productivity of the plantations. The general objective of this study was to assess the influence of the use of different managements of phosphate fertilization with soluble and low soluble sources in the soil, on the nutrition and growth of *Eucalyptus* stands. The dissertation was structurally divided into two chapters. In the first, it was aimed at a review focused on the issues of the present study. The second chapter presents the results of P application with sources of different solubility on the fractions and stocks of P in the soil, nutrition and growth of *Eucalyptus grandis* stands throughout a rotation of growth.

**Keywords:** Eucalyptus, Minimum tillage, Forest nutrition, P fertilization



## 1. INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, as plantações de eucalipto somaram, em 2019, área total de, aproximadamente, 7 milhões de hectares de florestas certificadas (IBÁ, 2020). Tal crescimento ocorreu anualmente, devido aos investimentos empresariais em melhorias tecnológicas e à expansão do portfólio de produtos para diversos setores. Em virtude desse aumento, crescem as demandas nacional e internacional por uma produção cada vez mais sustentável e eficiente de alimentos, de fibras e de energia, com menor emprego de insumos, tais como os fertilizantes (Cordell et al., 2009).

No contexto dos insumos, as rochas fosfáticas constituem as únicas fontes globais mais significativas para produzir fertilizantes e produtos químicos fosfatados (Jasinsk et al., 1999). Se mantida a atual taxa de consumo de fertilizantes fosfatados, espera-se que as reservas mundiais de minérios de alta qualidade se esgotem até o fim do século 21. Tal fato levaria ao consumo de fontes de menor qualidade e de maiores custos, impactando a sustentabilidade na utilização desse insumo (Hinsinger et al., 2011; Withers et al., 2018).

O consumo mundial de  $P_2O_5$ , contido em ácido fosfórico, em fertilizantes e em outros produtos, deverá aumentar para além de 50 milhões de toneladas (Mt) em 2022, em relação aos 47,0 Mt consumidos em 2018. África, Índia e América do Sul seriam responsáveis por cerca de 75% do crescimento projetado (Jasinsk, 2019).

Os depósitos desse minério se encontram amplamente distribuídos pelo mundo, sendo o Marrocos o maior detentor de reservas (71% das reservas mundiais). China, Marrocos e Estados Unidos representam, juntos, mais de 70% da produção global (Jasinsk, 2021, 2019). No Brasil, em 2020, a produção nacional de diferentes fontes fosfatadas foi de 6,1 Mt, equivalente a 46% dos fertilizantes fosfatados consumidos no país. A importação continua o principal meio de atender à demanda nacional, uma vez que, naquele mesmo ano, foram importadas mais de 7,1 Mt de diferentes fontes fosfatadas (Jasinsk, 2021; SGM, 2021).

A baixa disponibilidade natural de fósforo (P) nos solos tropicais, em razão de seu alto grau de intemperização, torna o manejo adequado da fertilização fosfatada um dos fatores imprescindíveis para manter a alta produtividade dos povoamentos florestais brasileiros. Esses solos são, em sua maioria, Latossolos e Argissolos bem desenvolvidos,

ácidos, distróficos e de mineralogia predominantemente caulinítica e oxídica, portanto, com elevada capacidade de fixação de P (Gonçalves et al., 2008; Laclau et al., 2000).

O P no solo ocorre na forma de compostos inorgânicos e orgânicos, que variam de íons em solução (formas lábeis) a compostos estáveis na fase sólida (formas não lábeis). Os compostos inorgânicos de P (Pi) possuem grande afinidade com as formas amorfas e cristalinas de Al, Fe, e Ca, com as quais podem formar compostos pouco estáveis, muito estáveis e até mesmo precipitados. Esse processo, denominado fixação ou adsorção de P no solo, é uma das razões para a queda do aproveitamento do P fornecido às plantas via fertilizantes fosfatados. Os compostos orgânicos com P (Po) encontram-se associados a moléculas orgânicas de variada taxa de decomposição, como ácidos nucleicos, fosfolipídios, fosfatos de açúcar, fosfatos de inositol (Foltran et al., 2019; Negassa e Leinweber, 2009).

Os plantios de *Eucalyptus* no Brasil, geralmente, se estabelecem em sistema de cultivo mínimo do solo, com manutenção de resíduos de colheita e preparo do solo apenas nas linhas de plantio. Por isso, os teores de matéria orgânica nas camadas superficiais geralmente são altos, o que contribui para formar complexos organominerais entre coloides de argila e substâncias húmicas, e de quelatos entre essas substâncias e os cátions polivalentes (e.g.,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ ). Nessas circunstâncias, conjuntamente com a aplicação localizada dos fertilizantes fosfatados, o potencial de fixação de P é baixo, com presença de formas orgânicas lábeis desse nutriente, gradativamente mineralizadas e disponibilizadas às plantas (Bazani et al., 2014; Folli-Pereira et al., 2012; Foltran et al., 2019).

As concentrações de P total no solo — somando-se frações disponíveis e menos disponíveis, orgânicas e inorgânicas — variam na margem de  $10^1$  a  $10^3 \text{ mg kg}^{-1}$  a depender do horizonte, da textura, do grau de intemperismo, do tipo e da intensidade de uso do solo (Kruse et al., 2015). Um dos fatores que condiciona o potencial de resposta do *Eucalyptus* à fertilização fosfatada é a disponibilidade de P no solo. Teores de P, extraído por resina, entre 0 e  $2 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $3$  e  $4 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $5$  e  $7 \text{ mg dm}^{-3}$  e  $\geq 8 \text{ mg dm}^{-3}$  são considerados muito baixos, baixos, médios e altos, respectivamente. O potencial de resposta à fertilização diminui conforme a faixa de disponibilidade de P aumenta (Bazani et al., 2014; Gonçalves, 2011; Gonçalves et al., 2008).

A demanda de nutrientes em plantações de *Eucalyptus* pode ser basicamente dividida em dois momentos principais: antes e depois do fechamento das copas. Na fase anterior ao fechamento, há maior demanda nutricional, as plantas dependem do solo como

fonte de nutrientes para desenvolver as raízes e expandir a área foliar. Na fase posterior, há o franco crescimento da parte aérea e o estabelecimento da ciclagem de nutrientes. As respostas à fertilização tendem a diminuir nessa fase, que se estende até o fim do ciclo, pois as disponibilidades de água e de luz passam a ser mais limitantes ao crescimento das árvores do que a disponibilidade de nutrientes (Gonçalves, 2011; Laclau et al., 2010). A maior taxa de absorção de P pelo *Eucalyptus* ocorre até o segundo ano de idade da floresta, fase do fechamento da copa das árvores (Bazani et al., 2014).

As práticas de fertilização em plantações florestais caracterizam-se por recomendações baseadas no conteúdo de nutrientes disponíveis no solo e no potencial produtivo das espécies (Gonçalves et al., 2008). Em contraponto a cultivos agrícolas, onde os fertilizantes fosfatados são aplicados em quantidades até três vezes maiores que a de P removida na colheita (exportação) (Rodrigues et al., 2016), no cultivo de eucalipto, aplicam-se quantidades iguais ou inferiores ao exportado. Fatores, como ciclo de cultivo mais longo, resposta da cultura à fertilização fosfatada, alta eficiência na utilização de P (ciclagens bioquímica e biogeoquímica) e alta capacidade de associação com fungos micorrízicos, colaboram para as baixas quantidades aplicadas (Campos et al., 2011; Gonçalves, 2011; Pernambuco, 2013; Rocha et al., 2019b).

A exportação de P nos plantios de *Eucalyptus* varia de 30 a 60 kg ha<sup>-1</sup> de P em rotações de, aproximadamente, sete anos, considerando um IMA de 30 a 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, e a aplicação de fertilizantes fosfatados dificilmente supera 44 kg ha<sup>-1</sup> por rotação (Rocha et al., 2019b). Respostas de crescimento à fertilização fosfatada são esperadas em doses máximas de até 70 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, em solos com teor de argila superior a 35 % e valores muito baixos de P extraído por resina (0 e 2 mg dm<sup>-3</sup>) (Bazani et al., 2014; Gonçalves, 2011; Gonçalves et al., 2008).

Ainda que os fertilizantes sejam aplicados em baixas quantidades, os custos da fertilização podem ultrapassar patamares convencionais (25% do custo total de implantação), devido à grande variação da taxa cambial do dólar (Bazani et al., 2014). Nesse contexto, um dos grandes desafios do setor florestal tem sido identificar o equilíbrio entre estratégias e métodos silviculturais que permitam alta produtividade de madeira no longo prazo, com o mínimo de impactos negativos ao meio ambiente (Gonçalves, 2011).

Diferentes formas de manejo da fertilização fosfatada são usuais no país, desde a utilização de misturas granuladas com diferentes formulações (e.g., NPK 04-28-06, 06-30-06,

06-26-06) à aplicação de fertilizantes solúveis (e. g., MAP, DAP, superfosfatos), de rápida disponibilização de P às plantas e pouco solúveis (e.g., Fosfato natural reativo), de disponibilização gradual — utilizados como fonte única ou aplicados conjuntamente (Bazani et al., 2014). A fertilização com fontes de diferentes solubilidades promove diferentes respostas ao crescimento inicial do *Eucalyptus* e, como consequência, alteram as características químicas do solo de diferentes formas (Foltran et al., 2019). Além das características dos fertilizantes, as respostas à fertilização de P são também produtos das condições do clima, da disponibilidade de água no solo, da eficiência na obtenção e no uso do nutriente pela cultura e da interação com microrganismos (Gonçalves et al., 2013).

O manejo da fertilização fosfatada deve envolver, de modo eficiente, o adequado suprimento do nutriente às plantas. Sendo o P um recurso proveniente de reservas finitas, é preciso levar em conta os custos inerentes à aquisição dos fertilizantes. É necessário aprofundar a compreensão da fertilização fosfatada para o *Eucalyptus*, explorando, ainda mais, os efeitos dos fertilizantes sobre o solo e sobre a produtividade dos plantios. Dessa forma, será possível abranger as suas implicações no custo de formação da floresta, tornando a produção nacional cada vez mais competitiva no mercado internacional (Bazani et al., 2014; Herring e Fantel, 1993; Van Vuuren et al., 2010).

Nesse contexto, para melhor entender o efeito da utilização de diferentes práticas de fertilização com fontes fosfatadas solúveis e reativas mais convencionais, avaliaram-se povoamentos de *Eucalyptus grandis* ao longo de uma rotação de cultivo. Essas informações se encontram no capítulo intitulado **“Alterações nas frações de P no solo, na nutrição e no crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* causadas pela aplicação de fosfatos solúveis e pouco solúveis”**.

## Referências

- Bazani, J.H., Gonçalves, J.L. de M., Rocha, J.H.T., Melo, E.A.S.C., Prieto, M., 2014. Nutrição fosfatada em plantações de Eucalipto. *Informações Agronômicas* 148, 28.
- Campos, D.T. da S., Silva, M. de C.S. da, Luz, J.M.R. da, Telesfora, R.J., Kasuya, M.C.M., 2011. Colonização micorrízica em plantios de eucalipto. *Rev. Árvore* 35, 965–974. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000600002>
- Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Glob. Environ. Chang.* 19, 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Folli-Pereira, M. da S., Meira-Haddad, L.S., Bazzolli, D.M.S., Kasuya, M.C.M., 2012. Micorriza arbóscular e a tolerância das plantas ao estresse. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 36, 1663–1679. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600001>
- Foltran, E.C., Rocha, J.H.T., Bazani, J.H., Gonçalves, J.L. de M., Rodrigues, M., Pavinato, P., Valduga, G.R., Erro, J., Garcia-Mina, J.M., 2019. Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. *For. Ecol. Manage.* 435, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.053>
- Gonçalves, J.L. de M., 2011. Fertilização de plantação de Eucalipto, in: Gonçalves, J.L. de M., Pulito, A.P., Arthur Junior, J.C., Silva, L.D. (Orgs.), *Anais II Encontro brasileiro de silvicultura. PTSM/IPEF/FUPEF*, Campinas, p. 342.
- Gonçalves, J.L. de M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F. de B., Lima, W. de P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.P.D., Laclau, J.P., Nouvellon, Y., Epron, D., 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *For. Ecol. Manage.* 301, 6–27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>
- Gonçalves, J.L.M., Stape, J.L., Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Ranger, J., 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: The Brazilian experience. *South. For.* 70, 105–118. <https://doi.org/10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534>
- Herring, J.R., Fantel, R.J., 1993. Phosphate rock demand into the next century: Impact on world food supply. *Nonrenewable Resour.* 2, 226–246. <https://doi.org/10.1007/BF02257917>
- Hinsinger, P., Brauman, A., Devau, N., Gérard, F., Jourdan, C., Laclau, J.-P., Le Cadre, E., Jaillard, B., Plassard, C., 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant Soil* 348, 29–61. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y>
- Jasinsk, S.M., 2022. Phosphate rock, Mineral Commodity Summaries 2022. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>
- Jasinsk, S.M., 2019. Phosphate rock, Mineral Commodity Summaries 2019. Reston, VA.
- Jasinsk, S.M., Kramer, D.A., Ober, J.A., Searls, J.P., 1999. Fertilizers: Sustaining Global Food Supplies, USGS Fact Sheet 155-99.
- Kruse, J., Abraham, M., Amelung, W., Baum, C., Bol, R., Kühn, O., Lewandowski, H., Niederberger, J., Oelmann, Y., Rüger, C., Santner, J., Siebers, M., Siebers, N., Spohn, M., Vestergren, J., Vogts, A., Leinweber, P., 2015. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178, 43–88. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400327>
- Laclau, J.P., Ranger, J., de Moraes Gonçalves, J.L., Maquère, V., Krusche, A. V., M'Bou, A.T., Nouvellon, Y., Saint-André, L., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., Deleporte, P., 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by

intensive monitoring in Congo and Brazil. *For. Ecol. Manage.* 259, 1771–1785. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010>

Laclau, J.P., Ranger, J., Nzila, J. de D., Bouillet, J.P., 2000. Nutrient cycling in a short rotation Eucalyptus plantation and an adjacent savanna in Congo. *Site Manag. Product. Trop. Plant. For. a Prog. report. Work. Proceedings, Kerala, India, 7-11 December 1999.*

Negassa, W., Leinweber, P., 2009. How does the hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 305–325. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800223>

Pernambuco, U.F. De, 2013. Aspectos Da Simbiose Micorrízica Arbuscular. *An. da Acad. Pernambucana Ciência Agronômica* 5, 180–208.

Rocha, J.H.T., Menegale, M.L.C., Rodrigues, M., Gonçalves, J.L. de M., Pavinato, P.S., Foltran, E.C., Harrison, R., James, J.N., 2019. Impacts of timber harvest intensity and P fertilizer application on soil P fractions. *For. Ecol. Manage.* 437, 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.051>

Rodrigues, M., Pavinato, P.S., Withers, P.J.A., Teles, A.P.B., Herrera, W.F.B., 2016. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Sci. Total Environ.* 542, 1050–1061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>

SGM, S. de G.M. e T. mineral, 2021. Anuário Estatístico: Setor de Transformação de Não Metálicos. Ministério de Minas e Energia.

Van Vuuren, D.P., Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., 2010. Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Glob. Environ. Chang.* 20, 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004>

Withers, P.J.A., Rodrigues, M., Soltangheisi, A., de Carvalho, T.S., Guilherme, L.R.G., Benites, V. de M., Gatiboni, L.C., de Sousa, D.M.G., Nunes, R. de S., Rosolem, C.A., Andreote, F.D., Oliveira, A. de, Coutinho, E.L.M., Pavinato, P.S., 2018. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. *Sci. Rep.* 8, 2537. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>

## 2. ALTERAÇÕES NAS FRAÇÕES DE P NO SOLO, NA NUTRIÇÃO E NO CRESCIMENTO DE POVOAMENTOS DE *EUCALYPTUS GRANDIS* CAUSADAS PELA APLICAÇÃO DE FOSFATOS SOLÚVEIS E POUCO SOLÚVEIS

### **RESUMO**

A fertilização fosfatada desempenha papel imprescindível na manutenção das altas produtividades de madeira nas plantações de *Eucalyptus* no Brasil, geralmente localizadas em áreas com solos de baixa fertilidade e de alta capacidade de fixação de P. Os fertilizantes fosfatados, em conjunto com fatores edafoclimáticos, afetam, de diferentes formas, as frações de P no solo, a eficiência de uso dos nutrientes e a produtividade florestal. Esse efeito se modifica ao longo da rotação de cultivo. Os objetivos deste estudo foram avaliar os efeitos da aplicação de P com fontes solúveis e pouco solúveis nas frações e nos estoques de P no solo, na nutrição e no crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* ao longo de uma rotação de cultivo. O experimento foi instalado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, SP, em uma área com clima subtropical úmido (Cfa): média 1300 mm de precipitação pluvial anual, temperatura média anual de 20,4°C. O relevo da área é plano e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura média-arenosa ( $200 \text{ g kg}^{-1}$  de argila). O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições. Como fontes solúveis de P, testaram-se o superfosfato simples e o fosfato monoamônico, além de um fosfato natural reativo, aplicado isoladamente ou em mistura com essas fontes solúveis. Ao longo da rotação de cultivo, fizeram-se várias amostragens para quantificar as frações inorgânicas e orgânicas de P no solo (lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis), a absorção de nutrientes e o crescimento das árvores. A fertilização com fosfato reativo alterou os teores de P em profundidade no solo, mais do que as outras fontes. A fração de P mais alterada foi a moderadamente lábil, associada à solubilização de fosfato de cálcio, que sofreu diminuição de mais de 90% entre 36 e 93 meses pós-plantio. Nesse tratamento, as fontes principais de P absorvidas foram oriundas das frações P-Ca e Po, pois não ocorreu modificação do teor de P não lábil. Nos tratamentos que receberam aplicação de fosfato natural reativo, ocorreu alto acúmulo de P e de Ca no lenho, relacionado à alta solubilização P-Ca e à aplicação localizada deste no sulco de plantio. A fertilização fosfatada, seja com fonte solúvel, seja com pouco solúvel, favoreceu o maior crescimento das árvores, notadamente, nos primeiros anos de cultivo. As plantas fertilizadas com fontes solúveis de P apresentaram maior crescimento em relação às fertilizadas com fontes pouco solúveis. O fato pode ser atribuído ao ótimo arranque inicial de crescimento das árvores, diferença que se manteve ao longo da rotação de cultivo. As árvores absorveram o P fornecido pelos fertilizantes e parte do Po-lábil e moderadamente lábil, efeito detectado por meio da alteração dos teores dessas frações de P no solo. A mineralização de Po no solo teve papel essencial no crescimento das árvores, especialmente no tratamento Controle, que não recebeu aplicação suplementar de P. Constatou-se que a análise de rotina de P (extraído por resina) subestima a disponibilidade de P no solo para a nutrição de árvores de *E. grandis*.

Palavras-chave: Fertilização fosfatada, Fósforo orgânico, Fracionamento de Hedley

## ABSTRACT

Phosphate fertilization plays an essential role in maintaining high wood yields in *Eucalyptus* plantations in Brazil, usually located in areas with low soil fertility and high P fixation capacity. Phosphate fertilizers, together with edaphoclimatic factors, affect, in different ways, the fractions of P in the soil, the efficiency of nutrient use and forest productivity. This effect modifies along the crop rotation. The objectives of this study were to assess the effects of applying P using soluble and low-soluble sources on the fractions and stocks of P in the soil, nutrition, and growth of *Eucalyptus grandis* stands throughout a crop rotation. The experiment was set up at the Experimental Station of Forest Sciences in Itatinga, SP, in an area with a humid subtropical climate (Cfa): average annual rainfall of 1300 mm, average annual temperature of 20.4°C. The topography of the area is flat, and the soil was classified as Oxisols (Red Yellow Latosol in Brazilian classification) of medium-sandy texture (200 g kg<sup>-1</sup> of clay). Experimental design was the randomized block layout, with four treatments and four repetitions. The soluble P sources tested were simple superphosphate and monoammonium phosphate, as well as a natural reactive phosphate, applied alone or in mixture with these soluble sources. Throughout the rotation, several samples were taken to quantify the inorganic and organic P fractions in the soil (labile, moderately labile, and non-labile), nutrient uptake and tree growth. Fertilization with reactive phosphate altered the P contents deeper in the soil than the other sources. The most altered fraction of P was moderately labile, associated with calcium phosphate solubilization, which decreased over 90% between 36- and 93-months post-planting. In this treatment, the main sources of absorbed P came from the P-Ca and Po fractions, since there was no change in the content of non-labile P. In treatments that received the application of reactive phosphate, there was a high accumulation of P and Ca in the wood, related to the high solubility of P-Ca and the localized application of this in the planting furrow. Phosphate fertilization, either with a soluble or a low-soluble source, resulted in greater tree growth, especially in the first years of cultivation. Plants fertilized with soluble sources of P showed greater growth than those fertilized with low-soluble sources. This fact could be explained by the excellent early growth of the trees, a difference that was maintained throughout the rotation. The trees absorbed the P supplied by the fertilizers and part of the labile and moderately labile Po; an effect detected due to the changes in the contents of P fractions in the soil. The mineralization of Po in the soil played an essential role in tree growth, especially in the Control treatment, which did not receive supplemental application of P. It was found that routine analysis of P (extracted by resin) underestimates the availability of P in the soil for the nutrition of *E. grandis* trees.

Keywords: Phosphate fertilization, Organic phosphorus, Hedley fractionation

## 2.1 Introdução

A definição da fonte ideal para a fertilização fosfatada em plantios florestais constitui assunto constantemente revisitado. Durante as décadas de 1980 e 1990, conduziram-se diversos estudos, em casas de vegetação e em condições de campo, para verificar a eficiência do uso de rochas fosfatadas brasileiras (fosfato de Araxá, Patos, Catalão) no fornecimento de P em plantações de *Eucalyptus* (Barros et al., 1990; Bazani et al., 2014).

Em trabalho sobre o efeito da solubilidade dos fertilizantes fosfatados na produção de madeira de *Eucalyptus*, em solos de textura argilosa (Latossolo Vermelho distrófico) e arenosa (Neossolo Quartzarênico), Gava (2003) comparou a eficiência do fosfato natural reativo (FNR) de Gafsa, considerado pouco solúvel, à do superfosfato triplo (SPT), considerado solúvel. Observou, portanto, maior eficiência econômica do fósforo com a utilização SPT em comparação à do FNR, para as duas condições de solo.

As quantidades necessárias de FNR foram, aproximadamente, cinco vezes maiores que a de SPT para a obtenção do mesmo crescimento em altura e volume no primeiro ano. Bazani et al. (2014) obtiveram resultados similares ao avaliar povoamentos até os dois anos de idade, onde a utilização de fontes solúveis de P promoveram o maior crescimento das plantas em diferentes aspectos (e.g., índice de área foliar, acúmulo de P, biomassa aérea).

As fontes solúveis de P (e.g., MAP, DAP, Superfosfatos), fornecidas via fertilização, são adsorvidas no solo e se tornam parte da fração moderadamente lábil (Foltran et al., 2019). No entanto essa adsorção pode ser considerada temporária, uma vez que o P se torna disponível após o segundo ano de cultivo devido à ação de ectomicorrizas associadas às raízes das plantas e de outros microrganismos do solo (Foltran et al., 2019; Hallama et al., 2019; Rocha et al., 2016a).

O fosfato natural reativo também promove incrementos no P-lábil, embora de forma mais gradativa. Dada a grande quantidade de fosfato de cálcio (P-Ca) nesse fertilizante, sua liberação ocorre de forma lenta e gera um estoque significativo de fósforo na fração moderadamente lábil no solo. Por meio do fracionamento de P no solo, observou-se que, aos 36 meses pós-plantio, o P-Ca ainda não havia sido completamente solubilizado (Foltran et al., 2019).

As respostas à fertilização encontradas na fase inicial do crescimento da floresta decrescem ao longo da rotação de cultivo e podem deixar de existir ao final da rotação (Gonçalves, 2011; Bazani et al., 2014). Nessa direção, os efeitos sobre as frações de P no solo podem também variar durante a rotação, alterando os teores de formas orgânicas e inorgânicas de P, podendo afetar a nutrição e o crescimento dos povoamentos (Costa et al., 2016; Rocha et al., 2019b).

Neste estudo, testaram-se as seguintes hipóteses:

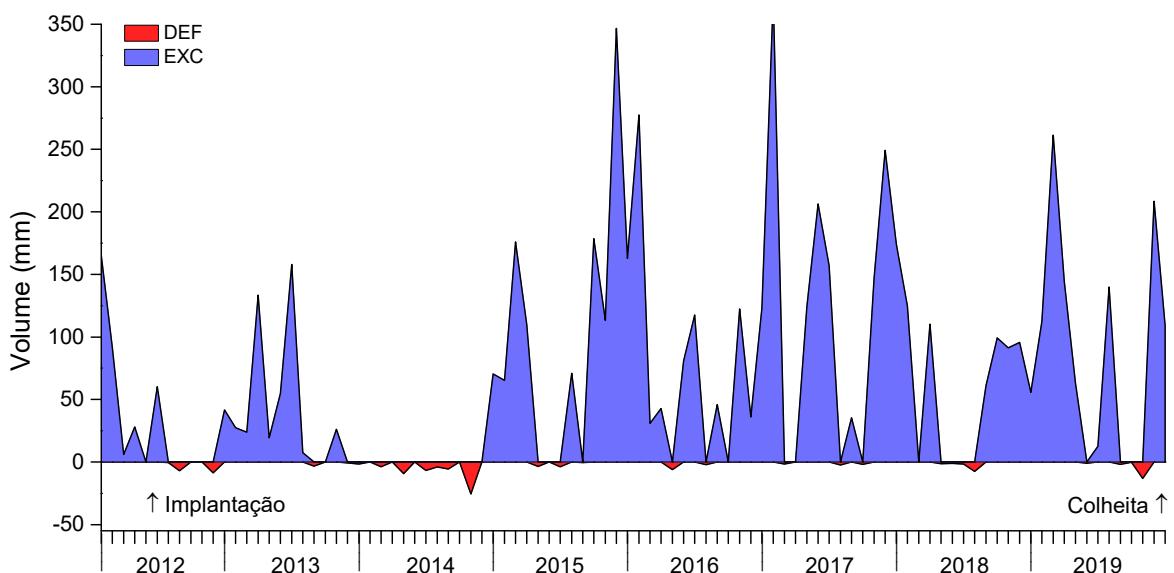
- I. O crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* é maior com a aplicação de fertilizantes fosfatados;
- II. A fertilização com fontes solúveis de P (MAP e SPS) resulta em maior crescimento ao fim da rotação do que a com fontes menos solúveis (FNR);
- III. Ocorre intensa modificação de frações lábeis e moderadamente lábeis ao longo de uma rotação de cultivo em povoamentos de eucalipto que receberam aplicações de fertilizantes fosfatados;
- IV. Frações orgânicas lábeis e moderadamente lábeis de P são fundamentais para a nutrição do eucalipto, mesmo com a aplicação de fertilizantes fosfatados.

Os objetivos deste estudo foram avaliar os efeitos da aplicação de P com fontes solúveis e pouco solúveis, utilizadas como fontes únicas e conjuntas de P, nas frações e nos estoques de P no solo, na nutrição e no crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* ao longo de uma rotação de cultivo.

## 2.2 Material e métodos

### 2.2.1 Área experimental

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (SP), pertencente à ESALQ/USP ( $23^{\circ}02' S$ ;  $48^{\circ}38' W$ ), a 863 m de altitude. O clima é classificado como subtropical úmido (Cfa), segundo classificação de Köppen (Alvares et al., 2013). Historicamente, as chuvas concentram-se, na região, nos meses de dezembro a março, porém, nos últimos anos, ocorreram períodos atípicos de secas. No período entre agosto de 2013 e dezembro de 2014, decorreram 16 meses sequenciais de déficit hídrico com um volume acumulado de aproximadamente 480 mm, valor 35% abaixo da média histórica do período (738 mm). O balanço hídrico para o ano de 2015 foi 68% superior aos valores históricos da área, com excedente hídrico de 1047 mm. A temperatura média anual da área é de  $20,4^{\circ}C$ , com mínimas de  $2^{\circ}C$  no mês mais frio e de  $31^{\circ}C$  no mais quente (Figura 1) (Bazani, 2014; Foltran, 2017).



**Figura 1.** Balanço hídrico mensal sequencial pelo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955) para o local do experimento, durante os anos de 2012 a 2019 (CAD=280 mm). DEF – deficiência hídrica e EXC – excedente hídrico.

O relevo da área é plano e o solo, classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura média-arenosa até 150 cm de profundidade ( $200 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) e média-argilosa de 150 a 200 cm ( $250 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) (Tabela 1) (Gonçalves et al., 2012; Santos et al., 2018). Essas características do solo são condizentes com a grande maioria dos solos utilizados para as plantações florestais no Brasil, representando, de forma eficiente, a realidade do cenário nacional (Gonçalves et al., 2013).

A região possui vegetação característica do bioma cerrado. No local de estudo, entre os anos de 1940 e 1997, foi manejado plantio de *Eucalyptus saligna* Sm., em sistema de talhadia, objetivando a produção de madeira para fins energéticos. Durante esse período, era comum não investir em práticas de fertilização (Bazani, 2014; Foltran, 2017).

Entre 1997 e 2011, passou-se a cultivar *E. saligna*, com baixo aporte de nutrientes. O manejo de fertilização consistia na aplicação de  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de NPK 10:20:10 no ato do plantio. Após corte raso, averiguou-se produtividade média de  $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Bazani, 2014). No período anterior ao início do presente estudo, o solo da área experimental apresentou teores de P e K disponíveis abaixo dos níveis considerados adequados ( $P \geq 5 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $K \geq 1 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) para o pleno desenvolvimento do eucalipto (Tabela 1) (Bazani et al., 2014; Gonçalves, 2011).

**Tabela 1.** Atributos físicos e químicos do solo de acordo com os métodos analíticos apresentados em Embrapa (1997). Amostragem realizada em pré-plantio, tomando-se amostras compostas (20:1) distribuídas aleatoriamente por toda a área experimental.

Prof.	Areia	Silte	Argila	pH CaCl <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>	C	N	C/N	P	K	Ca	Mg	Al	CTC
cm	————— g kg <sup>-1</sup> —————			————— g kg <sup>-1</sup> —————				mg kg <sup>-1</sup>	————— mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> —————				
0-10	781	18	201	3,8	18,0	1,8	10,0	2,0	0,4	7,2	4,8	15,0	84,7
10-20	798	26	176	4,0	10,3	1,2	8,8	3,0	0,2	5,5	3,4	13,1	67,6
20-30	808	15	177	3,9	7,9	1,0	8,3	1,0	0,2	2,7	1,7	9,4	45,6
30-40	807	15	177	3,9	2,9	0,7	4,3	1,0	0,1	1,3	0,9	7,0	39,8
40-60	784	16	200	3,9	4,9	0,7	7,0	1,0	0,1	0,8	0,6	9,8	32,9
60-100	767	32	201	3,9	3,6	0,6	6,0	1,0	0,1	0,6	0,5	5,6	29,9
100-150	734	26	240	4,0	2,3	0,5	4,6	1,0	0,1	0,7	0,5	3,3	30,1
150-200	738	11	251	4,1	nd <sup>(2)</sup>	nd	nd	1,0	0,1	0,6	0,5	1,4	23,8

<sup>1</sup>pH – CaCl<sub>2</sub> 0,01 mmol L<sup>-1</sup>. Métodos: C - dicromato/colorimétrico; N - digestão sulfúrica/ Kjeldahl; P, K - extrator Mehlich-1; Ca; Mg - extrator acetato de amônio 1 mol L<sup>-1</sup>; Al - extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. <sup>2</sup>nd – valor não determinado. Fonte: Bazani, 2014; Foltran, 2017.

## 2.2.2 Instalação, delineamento e tratamentos

Em 2012, o experimento foi instalado utilizando mudas seminais de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden, procedência Coff's Harbour, oriundas de monoprogênieis selecionadas para o estado de São Paulo (Oda, et al., 2011; Foltran, 2017). O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições. Cada parcela contou com uma área total de 486 m<sup>2</sup> (81 árvores, 6 m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), que incluiu uma área útil de 150 m<sup>2</sup> (25 árvores) e bordadura dupla de 336 m<sup>2</sup> (56 árvores).

O preparo de solo seguiu o sistema de cultivo mínimo, mantendo os resíduos da rotação anterior sobre o solo, com subsolagem de 60 cm de profundidade restrita à linha de plantio. A fertilização fosfatada foi realizada manualmente em filete contínuo no sulco da subsolagem, a 20cm de profundidade. Estabeleceu-se o fornecimento de 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em dose única, sob forma assimilável pelas plantas, tendo, como base, resultados de pesquisas e recomendações feitas para o estado de São Paulo por Gonçalves et al. (2011), além do teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> indicado no rótulo dos produtos (Bazani, 2014; Foltran, 2017). Os tratamentos consistiram na aplicação de fertilizantes fosfatados com diferentes solubilidades no solo (Tabelas 2, 3 e 4).

**Tabela 2.** Descrição dos tratamentos experimentais

Tratamento	Descrição
Controle	Ausência de fertilização fosfatada
SSP	Fósforo solúvel: Superfosfato simples (SPS) + fosfato monoamônico (MAP)
RP	Fósforo reativo (pouco solúvel): Fosfato natural reativo de Gafsa (FNR)
PM	Mistura na proporção 1:1 de fontes solúveis (SPS e MAP) e fonte pouco solúvel (FNR)

Fonte: Bazani, 2014; Foltran, 2017.

Para fosfato natural reativo, nos tratamentos RP e PM, definiu-se a dose de acordo com o teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em ácido cítrico 2 % (P-HCl 2 %), enquanto, para SSP, de acordo com o teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em citrato neutro de amônio e água (P-CNA + H<sub>2</sub>O) (Tabela 3 e 4).

Além do P, na fertilização de base, foram aplicados — em covas laterais (10-15 cm distantes das mudas) — 30 kg ha<sup>-1</sup> de FTE-BR12 (1,8 % B, 0,8 % Cu, 2,0 % Mn, 9,0 % Zn, 3,0 % Fe, 0,1 % Mo) e pequenas doses de N, K, Cu (CuSO<sub>4</sub>), Mn (MnSO<sub>4</sub>) e Zn (ZnSO<sub>4</sub>) para equilibrar as quantidades desses nutrientes. Antes da implantação, aplicaram-se, em área total, 2.000 kg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico (38 % CaO, 12 % MgO). Processou-se a fertilização de cobertura em duas aplicações: a primeira, aos 2,7 meses pós-plantio (20 kg ha<sup>-1</sup> de N, 47

kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 5 kg ha<sup>-1</sup> de B) e a segunda, aos 5,7 meses pós-plantio, posteriormente ao fim do período de inverno (30 kg ha<sup>-1</sup> de N e 91 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) (Tabela 4).

**Tabela 3.** Teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel obtido por diferentes extratores nos fertilizantes fosfatados

Fertilizante	Teor de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>						Relação <sup>(2)</sup>		
	Garantia <sup>(1)</sup>		Determinado						
	CNA+H <sub>2</sub> O	HCl 2 %	H <sub>2</sub> O	CNA+H <sub>2</sub> O	HCl 2 %	Total	H <sub>2</sub> O	CNA+H <sub>2</sub> O	HCl 2 %
%									
SPS	18	nd	16	16	18	21	76	80	88
MAP	52	nd	49	52	51	53	91	98	98
FNR	nd	10	0,4	2	13	30	1	7	44

<sup>1</sup>Garantia declarada no rótulo do produto; <sup>2</sup>Relação - proporção em relação ao P-total; <sup>3</sup>nd – valor não determinado.  
Fonte: Bazani, 2014.

**Tabela 4.** Quantidades de macronutrientes aplicados na fertilização de base dos diferentes tratamentos experimentais.

Tratamento	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>						K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	S-SO <sub>4</sub>				
		Garantia <sup>(1)</sup>		Determinado <sup>(2)</sup>											
		CNA+H <sub>2</sub> O	HCl 2 %	H <sub>2</sub> O	CNA+H <sub>2</sub> O	HCl 2 %	Total								
kg ha <sup>-1</sup>															
Controle	66	-	-	-	-	-	-	146	760	240	75				
SSP	66	60	-	56	58	59	63	146	774	240	73				
RP	66	-	60	2	12	78	180	146	960	240	89				
PM	66	30	30	29	35	69	122	146	867	240	81				

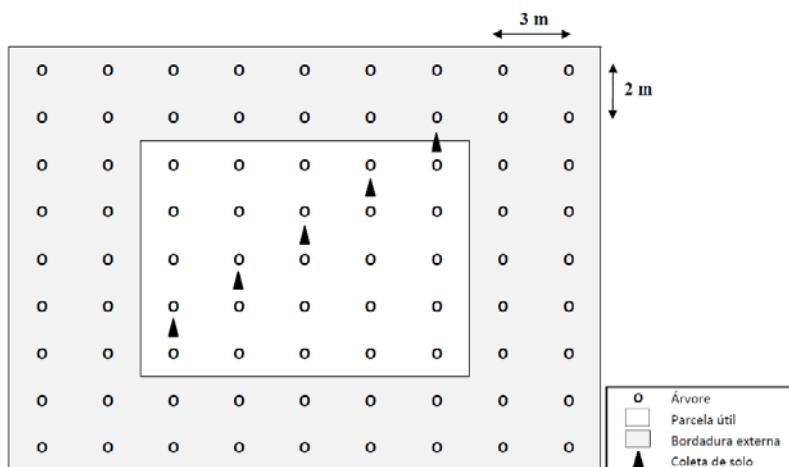
<sup>1</sup>Quantidades calculadas a partir dos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> da garantia no rótulo do produto. <sup>2</sup>Quantidades calculadas a partir dos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> determinados. Para os demais nutrientes, foram calculadas a partir dos teores da garantia.

## 2.2.3 Atributos químicos do solo

Para determinar os atributos químicos do solo, coletaram-se — com o auxílio de trado tipo holandês, considerando três blocos por tratamento — amostras nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade. Cada amostra foi formada pelo agrupamento de cinco subamostras, coletadas em um transecto diagonal na área útil da parcela, na linha de plantio (Figura 2).

Secaram-se as amostras de solo em estufa de circulação forçada de ar, a uma temperatura constante de 45°C, posteriormente peneiradas (malha 2 mm). As amostras foram encaminhadas para análise química em laboratório especializado, a fim de determinar pH (CaCl<sub>2</sub>, 0,01 mmol L<sup>-1</sup>), matéria orgânica (dicromato/colorimétrico), N (ácido

sulfúrico/Kjeldahl), P, K, Ca, Mg (resina trocadora de íons), Al (KCl, 1 mol L<sup>-1</sup>) e H+Al (SMP), conforme a metodologia de Raij et al. (2001).



**Figura 2.** Coleta de solo na parcela útil, destaque para a disposição dos pontos na parcela

#### 2.2.4 Fracionamento de P no solo

Para determinar as frações de fósforo no solo ao final do ciclo, realizou-se o fracionamento químico pelo método de Hedley et al. (1982), com modificações por Condron et al. (1985). Ao final da rotação (93 meses pós-plantio), amostras de solo foram coletadas conforme descrito no item anterior (2.2.3) em todos os tratamentos e submetidas à extração sequencial do P orgânico e inorgânico (Foltran et al., 2019; Teles, 2018).

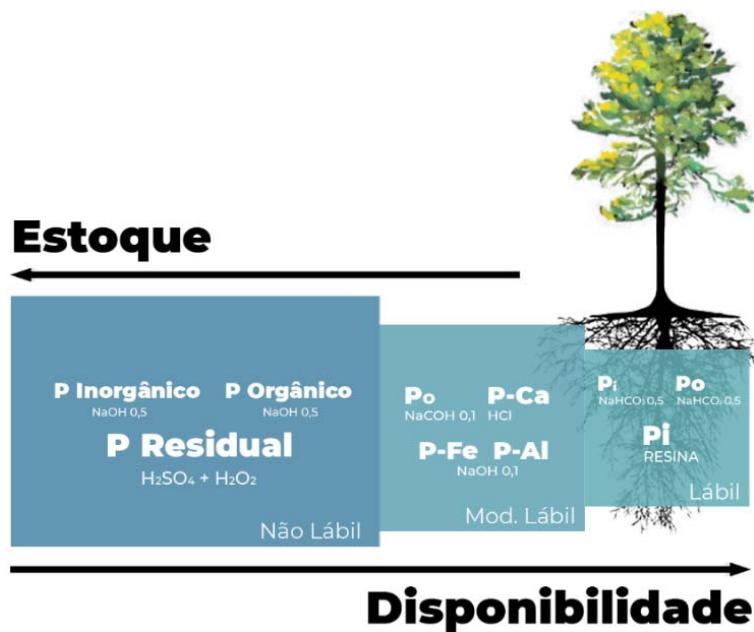
A partir de 0,5 g de amostras de solo seco e peneirado, o P foi extraído sequencialmente na seguinte ordem:

- Resina trocadora de ânions (RTA) (AMI-7001CRX - 2 cm<sup>2</sup>) ( $P_{\text{resina}}$ );
- Bicarbonato de sódio 0,5 M ( $\text{NaHCO}_3$  a pH 8,5) ( $P_{\text{bic}}$  e  $P_{\text{obic}}$ );
- 0,1 M de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) ( $P_{\text{hid}\,0,1}$  e  $P_{\text{ohid}\,0,1}$ );
- 1,0 M de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ) ( $P_{\text{HCl}}$ );
- 0,5 M de  $\text{NaOH}$  ( $P_{\text{hid}\,0,5}$  e  $P_{\text{ohid}\,0,5}$ ).

Após essa etapa de extrações, o solo restante foi seco em estufa, à temperatura de 50° C, e digerido em uma solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ , a fim de determinar o fósforo residual ( $P_{\text{residual}}$ ). Uma alíquota dos extratos alcalinos, para fazer digestão com persulfato de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) e ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) em autoclave, permitiu obter-se o P total ( $P_t$ ). O teor

de P orgânico (Po) de cada fração foi obtido por diferença entre o Pt e o P inorgânico (Pi) de cada extrato.

As leituras dos extratos, tanto ácidos como alcalinos, foram feitas em espectrofotômetro de absorção, seguindo a metodologia de Murphy e Riley (1962). Agruparam-se as formas de P entre lábeis ( $P_{\text{resina}} + P_{\text{bic}} + P_{\text{obic}}$ ), moderadamente-lábeis ( $P_{\text{hid}0,1} + P_{\text{ohid}0,1} + P_{\text{HCl}}$ ) e não lábeis ( $P_{\text{hid}0,5} + P_{\text{ohid}0,5} + P_{\text{residual}}$ ), (Foltran et al., 2019; Rodrigues et al., 2016; Teles, 2018) (Figura 3).



**Figura 3.** Distribuição dos reservatórios de P identificados pela extração sequencial proposta por Hedley et al. (1982), com modificações de Condron et al. (1985). Em branco, descrevem-se os extractores utilizados para determinar os reservatórios.

Para observar as alterações nas frações de P ao longo do ciclo, utilizaram-se dados de fracionamentos realizados em diferentes períodos. Em conjunto com dados de fracionamento de P de uma área nativa próxima ao experimento, usaram-se dados do período anterior à instalação do experimento (tempo zero), aos 12 e aos 36 meses pós-plantio dos tratamentos Controle, SSP e RP. Nessas ocasiões, o solo foi amostrado nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade. Cada amostra foi formada de 18 subamostras coletadas na linha de plantio, considerando três blocos por tratamento. Combinaram-se volumes proporcionais do solo de cada profundidade, com o intuito de formar uma amostra representativa da camada de 0-20 cm e, posteriormente, foram submetidos à extração sequencial do P (Foltran et al., 2019).

Para que fosse possível a análise comparativa com os dados de 93 meses pós-plantio, realizou-se uma média entre os teores das camadas de 0-10 e 10-20 cm dos tratamentos Controle, SSP e RP, para obter os teores da camada de 0-20 cm.

### **2.2.5 Crescimento das árvores**

A fim de analisar o crescimento volumétrico da floresta ao longo dos anos, foram estudadas informações de inventários realizados bimestralmente, desde 2014, até os 40 meses pós-plantio. Após esse período, devido à diminuição do ritmo de crescimento, os inventários passaram a ser semestrais até os 55 meses; depois, somente o realizado ao fim da rotação (pré-colheita). Mensuraram-se o diâmetro altura do peito (DAP) e a altura de todas as árvores da área útil da parcela. Em todos os períodos analisados, árvores fora da amplitude de  $\pm 2$  desvios-padrão foram removidas do banco de dados para realizar as análises.

Com o objetivo de calcular o volume das árvores, colheram-se amostras destrutivas aos 12, 24 e 93 meses. Obteve-se o volume das árvores abatidas por meio de cubagem rigorosa, com os diâmetros medidos a cada metro, até o mínimo de 5 cm. O volume sólido foi calculado por meio da fórmula de Smalian (Scolforo e Thiersch, 2004). A partir dos dados de cubagem, ajustou-se, por meio de regressão múltipla, equação de volume de madeira com casca, utilizando a de Schumacher-Hall (1933) e tendo, como variáveis, o DAP e a altura total das árvores. Dividindo-se os volumes obtidos pela respectiva idade, calcularam-se os incrementos médios para cada tratamento.

### **2.2.6 Acúmulo de nutrientes na biomassa aérea**

Ao fim da rotação, a partir dos dados obtidos do inventário, organizaram-se os indivíduos em quatro classes diamétricas de frequência, com um desvio-padrão de amplitude. Foram selecionadas seis árvores das classes centrais em cada tratamento para quantificar a biomassa da área total, os componentes do tronco (casca e lenho) e a copa (folhas e galhos).

A quantificação da biomassa aérea foi realizada por meio da determinação da massa fresca total, em campo, e de amostras, posteriormente submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar, a uma temperatura de 65°C, até a massa constante. A massa seca de lenho e casca foi determinada a partir de amostras compostas por discos

retirados do tronco a cada metro; já a de galhos e folhas, a partir de amostras representativas ( $\pm 300\text{g}$ ) tomadas em campo. O produto da massa fresca total das árvores, pela razão da massa seca com a massa fresca das amostras, resultou na massa seca total.

Para estimar a biomassa dos povoamentos, testaram-se modelos, de modo a selecionar o que tivesse mais precisão na estimativa de cada componente, a partir de critérios como raiz do erro médio ao quadrado (RMSE), critério de Informação de Akaike (AIC) e gráficos diagnósticos (Burkhart & Tomé, 2012). Utilizaram-se DAP e H como variáveis independentes para o ajuste.

As amostras secas dos componentes foram homogeneizadas e moídas em moinho Willey. Posteriormente, encaminhadas para a análise química em laboratório especializado para determinar o teor de macro e de micronutrientes, de acordo com o método descrito por Malavolta et al. (1997). Nele, N foi quantificado por digestão sulfúrica, B por digestão por via seca/incineração, enquanto os demais nutrientes, por digestão nítrico-perclórica.

Após a digestão das amostras, determinou-se o nitrogênio pelo método de micro-Kjeldahl; o fósforo e o boro, por Colorimetria; o enxofre, por turbidimetria e o potássio, por fotometria de chama. Por fim, os elementos cálcio, magnésio, ferro, cobre, manganês e zinco foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O produto da biomassa, estimada por hectare de cada componente com os teores de nutrientes, resultou no respectivo acúmulo de nutrientes.

## 2.2.7 Análise de dados

Os dados foram testados quanto à normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e à homoscedasticidade (teste de O'Neill & Mathews). Também se submeteram à análise de variância (teste F) ( $p < 0,10$ ), tendo, como fonte de variação, blocos e tratamentos. Para comparar as médias, utilizou-se o teste LSD de Fisher ( $p < 0,10$ ). As análises foram realizadas no software R 4.1.2 (R Core Team, 2021).

## 2.3 Resultados

### 2.3.1 Fósforo no solo

Ao final da rotação de cultivo, o tratamento Controle apresentou os menores teores de P-resina no solo (Tabela 5). O teor de P, neste tratamento, foi, em média, 71% menor do que em RP, 46% menor que SSP e 35% menor que PM, para todas as camadas analisadas. Em RP, encontraram-se os maiores teores de P, sobretudo nas camadas 0-10 e 10-20 cm, nas quais o teor médio foi de  $12,9 \text{ mg kg}^{-1}$ . Em comparação a SSP e a PM, os teores em RP foram, em média, 64% maiores na camada 0-10 cm, 49% na 0-20 cm e 39% na 20-40 cm. Mesmo com o aumento da profundidade do solo, os teores de P mostraram-se altos.

**Tabela 5.** Atributos químicos nas camadas de solo de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, sob povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com fontes fosfatadas solúveis e pouco solúveis, no fim da rotação de cultivo (93 meses pós-plantio)

Tratamento	pH <sup>(1)</sup>	C <sup>(2)</sup>	N <sup>(3)</sup>	C/N	P	K	Ca	Mg	Al	CTC
		$\text{g kg}^{-1}$			$\text{mg kg}^{-1}$	$\text{mmolc kg}^{-1}$				
<b>0-10</b>										
Controle	3,9 a <sup>(4)</sup>	12,8 a	0,52 c	24,9 a	2,8 b	0,81 b	3,1 a	3,0 a	7,9 a	14,8 a
SSP	3,8 ab	12,3 a	0,70 b	17,9 a	5,8 b	1,07 a	1,7 a	2,7 a	9,4 a	14,9 a
RP	3,7 c	13,6 a	0,71 ab	19,1 a	13,7 a	0,45 c	4,6 a	3,1 a	9,9 a	18,1 a
PM	3,8 bc	14,8 a	0,83 a	17,8 a	4,2 b	0,55 c	3,6 a	4,1 a	9,4 a	17,6 a
<b>10-20</b>										
Controle	3,9 a	8,3 a	0,40 c	21,2 a	2,3 b	0,37 b	3,0 a	1,4 a	7,6 a	12,4 a
SSP	3,9 a	7,7 a	0,57 b	14,1 b	6,5 b	0,49 a	0,9 a	2,0 a	8,4 a	11,9 a
RP	3,8 a	9,2 a	0,75 a	12,2 b	12,0 a	0,47 a	1,0 a	2,4 a	7,9 a	11,9 a
PM	3,9 a	9,5 a	0,63 b	15,0 b	5,8 b	0,37 b	1,7 a	2,6 a	8,5 a	13,2 a
<b>20-40</b>										
Controle	3,9 a	5,5 a	0,47 a	11,7 a	2,8 b	0,43 a	1,8 a	1,1 a	6,6 a	10,0 a
SSP	3,9 a	5,2 a	0,44 a	11,9 a	3,7 b	0,55 a	0,7 a	1,3 a	8,1 a	10,7 a
RP	3,7 b	4,0 a	0,54 a	7,4 b	5,7 a	0,42 a	1,5 a	0,9 a	8,9 a	11,8 a
PM	3,7 b	4,8 a	0,46 a	10,5 a	3,3 b	0,38 a	1,2 a	1,4 a	7,8 a	10,9 a

<sup>1</sup>pH –  $\text{CaCl}_2$  0,01  $\text{mmol L}^{-1}$ . <sup>2</sup>C – dicromato/colorimétrico, <sup>3</sup>N – ácido sulfúrico/Kjeldahl; P, K, Ca, Mg – resina trocadora de íons; Al - KCl (1 mol  $\text{L}^{-1}$ ) (Raij et al., 2001). <sup>4</sup>Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste LSD a 10 %. Tratamentos: sem fertilização de P (Controle), fosfato solúvel (SSP), fosfato reativo (RP) e mistura (SSP+RP) na proporção de 1:1 (PM).

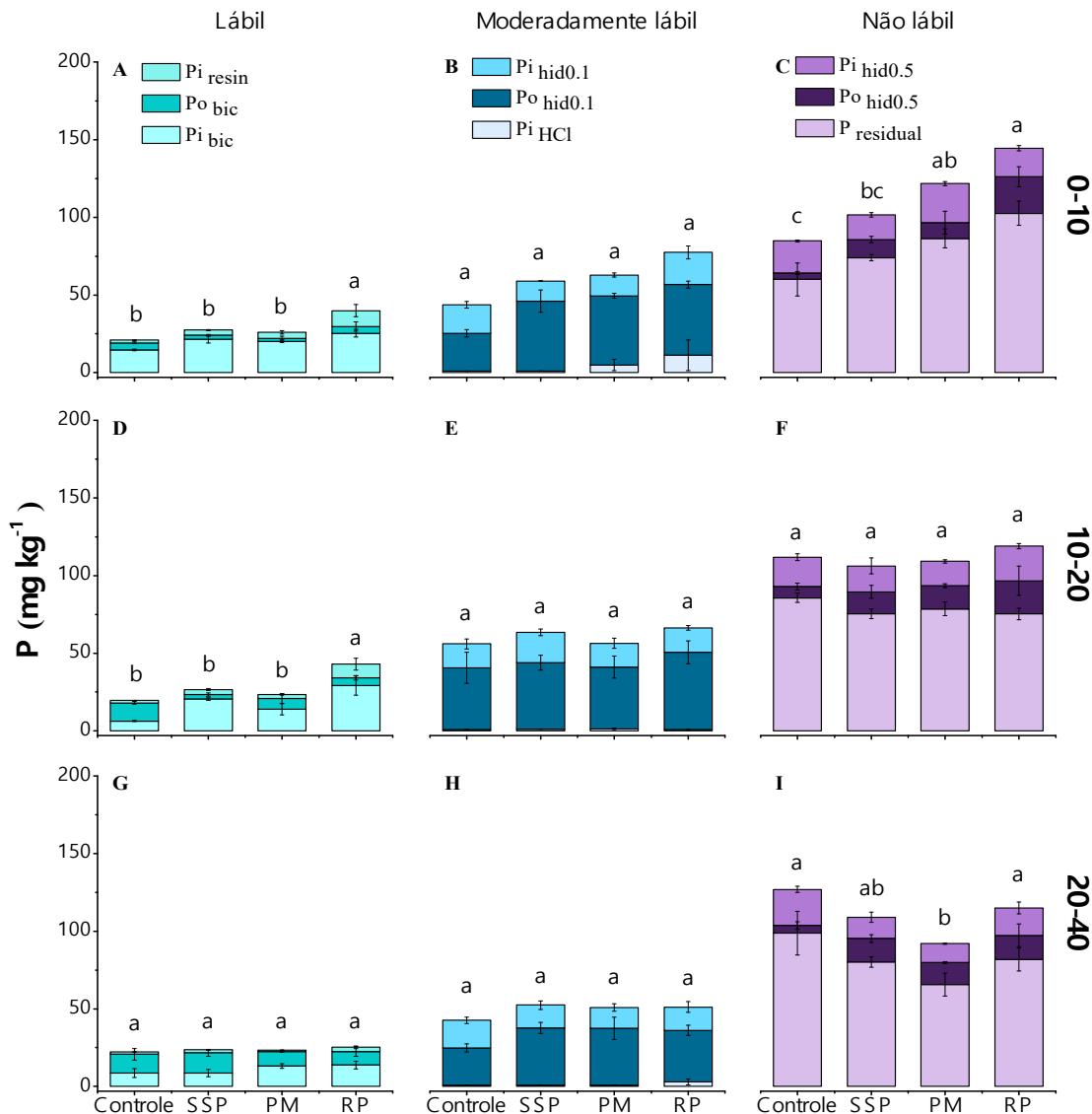
Ao final da rotação, os tratamentos fertilizados com P apresentaram teor médio de P total (SSP, 190 mg kg<sup>-1</sup>; RP, 227 mg kg<sup>-1</sup>; e PM, 189 mg kg<sup>-1</sup>), maiores que o Controle (176 mg kg<sup>-1</sup>) na camada 0-40 cm (Figura 4). Analisando-se individualmente as camadas, houve aumento de P total no Controle com o aprofundamento das camadas: 150 mg kg<sup>-1</sup> em 0-10 cm, 187 mg kg<sup>-1</sup> em 10-20 cm, e 192 mg kg<sup>-1</sup> em 20-40 cm. Na maior profundidade, o Controle apresentou teor de P total 6% maior que os demais tratamentos.

A maior parte da fração lábil de P foi composta pelas formas inorgânicas de P (Pi), constituindo-se 88% do P disponível na camada 0-10 cm, 72%, em 10-20 cm e, 54%, em 20-40 cm (Figura 4). Observaram-se os maiores teores de Pi e de P-lábil em RP. Nesse tratamento, os maiores teores de P-lábil foram observados na camada de 0-20 cm (42 mg kg<sup>-1</sup>), em média, 38% maior que em SSP e PM e 51% maior do que no Controle.

Os teores de P orgânico (Po) lábil ao final da rotação foram, em média, de duas a três vezes maiores nas camadas de 10-20 cm (7 mg kg<sup>-1</sup>) e 20-40 cm (11 mg kg<sup>-1</sup>), comparados ao da camada de 0-10 cm (3 mg kg<sup>-1</sup>) (Figura 4). As maiores proporções de Po em relação ao Pi foram encontradas no Controle, representando 22% do P-lábil na camada de 0-10 cm (duas vezes mais que os demais tratamentos), 60%, na camada de 10-20 cm, e 54% na camada de 20-40 cm.

O P moderadamente-lábil, no mesmo período, foi composto, em maior parte, por Po: 65% na camada de 0-10 cm, 71% na de 10-20 cm e 66% na de 20-40 cm (Figura 4). Os tratamentos fertilizados com P apresentaram quantidades maiores de Po em relação ao Controle em todas as camadas, com médias de 45 mg kg<sup>-1</sup> em 0-10 cm, 44 mg kg<sup>-1</sup> em 0-20 cm e 36 mg kg<sup>-1</sup> em 20-40 cm. Encontraram-se quantidades significativas de P-Ca apenas em RP na camada de 0-10 cm (11,3 mg kg<sup>-1</sup>).

No fim da rotação de cultivo, diferenças no teor de P não-lábil foram observadas nas camadas de 0-10 cm, onde os tratamentos fertilizados com P apresentaram teores, em média, 30% maiores que o Controle, relação que se inverte com o aumento da profundidade. Na camada de 20-40 cm, o Controle apresentou teor de P não-lábil 17% maior que os tratamentos fertilizados com P. O P não-lábil compôs, em média, 60% do P total do solo em todas as camadas (P-lábil = 14%, P moderadamente-lábil = 29%). Mais de 70% do P não-lábil foram compostos por P residual (Figura 4).

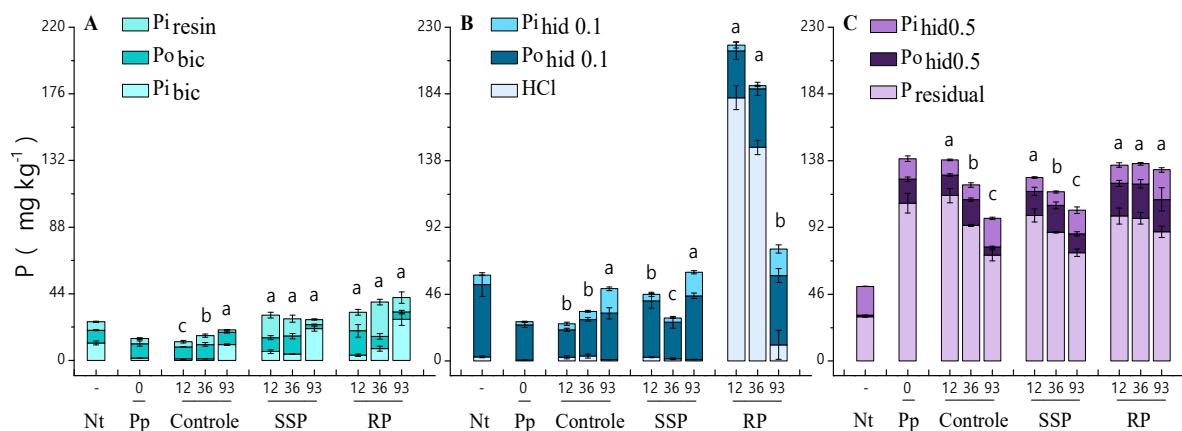


**Figura 4.** Frações lábil (A, D, G), moderadamente-lábil (B, E, H) e não-lábil (C, F, I) de formas inorgânicas e orgânicas de P nas camadas 0-10, 10-20 e 20-40 cm do solo, sob povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com fontes fosfatadas solúveis e pouco solúveis, no fim da rotação de cultivo (93 meses pós-plantio). Médias com mesma letra não diferem pelo teste LSD a 10%. Tratamentos: sem fertilização de P (Controle), fosfato solúvel (SSP) e fosfato natural reativo (RP).

Ao longo da rotação de cultivo, diferenças no P-lábil foram encontradas apenas no tratamento Controle (Figura 5). Ele apresentou maiores teores de Po-lábil em todos os períodos analisados, correspondendo, em média, a 54% do P-lábil ( $\pm 8,5 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Houve aumento de Pi em todos os tratamentos entre os períodos analisados. Entre os 36 e 93 meses pós-plantio (p.p.), o Pi sofreu incrementos de 40% no Controle, de 35% em SSP e de 17% em RP. Os maiores teores de Pi foram observados em SSP e RP, compondo, em média, 90% do P-lábil ( $\pm 30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) nesses tratamentos aos 93 meses p.p. (camada 0-20 cm).

O P moderadamente-lábil foi composto, na maior parte, por Po nos tratamentos Controle e SSP, em todos os períodos analisados (Figura 5). Correspondeu, em média, a 79% dessa fração nesses tratamentos até os 36 meses p.p., e a 68% após esse período. Entre 36 e 93 meses p.p., houve aumento de 50% e de 75% no Pi dos tratamentos Controle e SSP, respectivamente. Encontraram-se quantidades significativas de P-Ca apenas em RP, a qual compôs 80% do P moderadamente-lábil até 36 meses p.p. Após esse período, sofreu diminuição de mais de 90%, quando passaram a predominar as formas orgânicas de P que compôs 66% dessa fração.

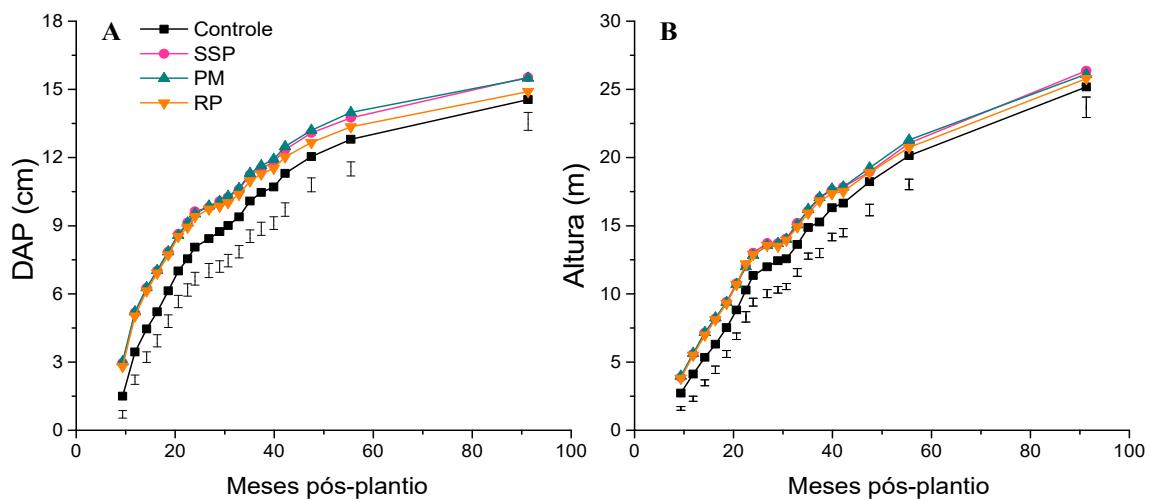
Perceberam-se modificações no P não-lábil somente nos tratamentos Controle e SSP (Figura 5). A diminuição nesses tratamentos ocorreu gradativamente entre os períodos analisados. Apenas os tratamentos SSP e RP se equiparam aos teores de P-lábil e moderadamente-lábil encontrados no Cerrado nativo. Todos os tratamentos apresentaram teores de P não-lábil superiores ao Cerrado, determinados por maiores proporções de Po e de P residual.



**Figura 5.** Frações lábil (A), moderadamente-lábil (B) e não-lábil (C) de formas inorgânicas e orgânicas de P na camada 0-20 cm de solo, sob povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com fontes fosfatadas solúveis e pouco solúveis, ao longo da rotação de cultivo (0, 12, 36 e 93 meses pós-plantio). Médias com mesma letra não diferem pelo teste LSD a 10%. Tratamentos: cerrado nativo (Nt), pré-plantio (Pp), sem fertilização de P (Controle), fosfato solúvel (SSP) e fosfato pouco solúvel (RP).

### 2.3.2 Crescimento das árvores

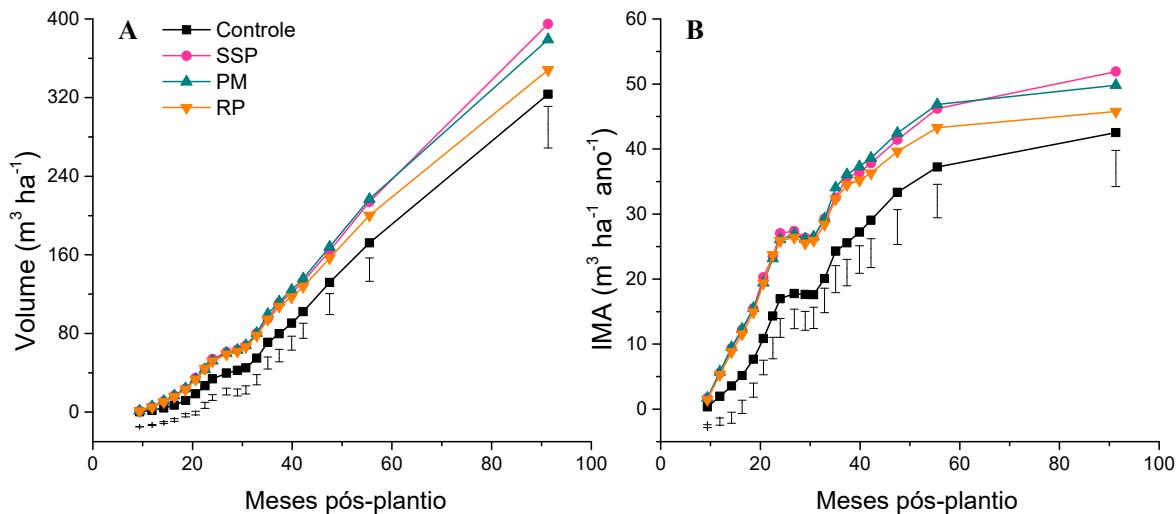
Os tratamentos que receberam fertilização de P apresentaram maior crescimento em relação ao Controle, especialmente ao longo dos primeiros anos de plantio (Figura 6). As diferenças de DAP e de altura foram, em média, 26% e 21% maiores até 24 meses, respectivamente, decrescendo a valores abaixo de 15% para ambos os parâmetros após esse período. Diferenças significativas para DAP e altura foram encontradas somente até 60 e 40 meses pós-plantio, respectivamente. Não houve diferença significativa entre os tratamentos fertilizados com P e o Controle ao final da rotação.



**Figura 6.** Diâmetro altura do peito (DAP) (A) e altura (B) das árvores de *Eucalyptus grandis* fertilizados com fontes fosfatadas solúveis e pouco solúveis, ao longo de uma rotação de cultivo. Barras se referem à diferença mínima significante (DMS) do teste LSD a 10 %. Tratamentos: sem fertilização de P (Controle), fosfato solúvel (SSP), fosfato natural reativo (RP) e mistura (SSP+RP) na proporção de 1:1 (PM).

Quanto ao volume produzido de madeira, diferenças significativas se apresentaram ao longo de toda a rotação (Figura 7). SSP e PM exibiram crescimento volumétrico em média 40% maior que o Controle até os 55 meses p.p., reduzindo a 16% aos 93 meses p.p. Nominalmente, as diferenças de valores entre esses tratamentos se mantiveram altas aos 93 p.p., da ordem de  $64 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  em média. As maiores diferenças ocorreram ao longo dos primeiros 2 anos, com média de 54%.

A partir dos 30 meses p.p., o Controle sofreu incrementos cada vez maiores, aproximando-se de RP após os 40 meses p.p. (Figura 7). A partir desse momento, as diferenças entre tais tratamentos reduziram-se a patamares abaixo dos 20%, chegando a 7% aos 93 meses p.p. A diferença de volume entre RP e Controle aos 93 meses p.p. foi de  $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e, em relação ao demais tratamentos, de  $39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , em média.



**Figura 7.** Volume (A) e Incremento Médio Anual (IMA) (B) de madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* fertilizados com fontes fosfatadas solúveis e pouco solúveis, ao longo de uma rotação de cultivo. Barras referem-se à diferença mínima significante (DMS) do teste LSD a 10%. Tratamentos: sem fertilização de P (Controle), fosfato solúvel (SSP), fosfato natural reativo (RP) e mistura (SSP+RP) na proporção de 1:1 (PM).

Ao fim da rotação, as diferenças em biomassa aérea entre os tratamentos seguiram os mesmos padrões observados para volume (Tabela 6). SSP e PM apresentaram quantidades de biomassa em média 18% maiores que o Controle, para todos os componentes. RP, por outro lado, apresentou diferenças de apenas 7%. A diferença de biomassa total entre Controle e RP foi de 18 t  $ha^{-1}$ , e média de 43 t  $ha^{-1}$  em relação aos demais tratamentos.

**Tabela 6.** Volume, Incremento Médio Anual (IMA) de tronco e biomassa aérea de árvores de *Eucalyptus grandis* fertilizados com fontes fosfatadas de diferentes solubilidades, ao final da rotação de cultivo (93 meses pós-plantio).

Tratamento	Volume	IMA	Lenho	Casca	Galho	Folha	Biomassa total
	$m^3 ha^{-1}$	$m^3 ha^{-1} ano^{-1}$					
Controle	324 c <sup>(1)</sup>	43 c	169 c	22 c	4,4 b	3,7 c	198 c
SSP	395 a	52 a	212 a	26 a	5,7 a	4,7 a	248 a
RP	348 bc	46 bc	185 bc	23 bc	4,7 b	3,9 bc	216 bc
PM	379 ab	50 ab	200 ab	25 ab	5,5 a	4,5 ab	235 ab

<sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste LSD a 10 %. Tratamentos: sem fertilização de P (Controle), fosfato solúvel (SSP), fosfato natural reativo (RP) e mistura (SSP+RP) na proporção de 1:1 (PM).

### 2.3.3 Acúmulo de P na biomassa aérea

As diferenças de teores de P apresentaram-se apenas nos componentes lenho e galho (Tabela 7). No lenho, o RP apresentou teores 20% maiores que SSP e 40% maiores que PM e Controle. Os tratamentos que receberam fertilização fosfatada exibiram teores foliares de P em média 12% maiores que no Controle.

**Tabela 7.** Teor de macro e de micronutrientes em componentes de biomassa aérea em árvores de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com fontes fosfatadas de diferentes solubilidades ao final da rotação de cultivo (93 meses pós-plantio).

Componente	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
g kg <sup>-1</sup>											
<b>Lenho</b>											
Controle	1,0 a <sup>(1)</sup>	0,08 c	0,33 a	0,46 a	0,10 a	0,36 b	11 a	0,89 a	19 b	12 a	1,8 a
SSP	1,0 a	0,11 b	0,33 a	0,40 b	0,10 a	0,36 b	11 a	0,66 b	20 b	11 a	1,4 a
RP	1,0 a	0,14 a	0,29 a	0,49 a	0,11 a	0,41 a	11 a	0,60 b	26 a	11 a	1,4 a
PM	1,1 a	0,08 c	0,28 a	0,48 a	0,09 b	0,40 a	10 a	0,49 c	15 b	10 a	1,8 a
<b>Casca</b>											
Controle	4,0 a	0,42 c	1,7 a	10 c	1,6 a	0,59 a	16 bc	3,1 a	37 b	137 a	5,1 a
SSP	3,7 a	0,48 ab	1,4 bc	12 ab	1,3 a	0,57 a	15 c	2,6 b	45 a	56 c	4,7 a
RP	3,6 a	0,54 a	1,2 c	11 bc	1,5 a	0,63 a	19 a	2,1 c	37 b	58 bc	4,8 a
PM	3,2 b	0,45 bc	1,5 ab	12 a	1,5 a	0,59 a	16 b	2,2 c	48 a	71 b	4,1 a
<b>Galho</b>											
Controle	5,1 a	0,39 b	1,6 b	4,7 b	2,0 a	0,44 c	18 b	4,7 a	43 c	183 a	6,4 a
SSP	5,5 a	0,54 a	1,9 a	6,2 a	1,6 b	0,49 b	20 a	5,3 a	72 a	145 b	6,2 a
RP	5,3 a	0,58 a	1,5 bc	4,4 bc	1,4 c	0,56 a	16 c	5,5 a	64 b	181 a	6,2 a
PM	5,0 a	0,54 a	1,4 c	4,3 c	1,5 bc	0,49 bc	16 c	5,3 a	39 c	155 b	6,6 a
<b>Folha</b>											
Controle	16,8 a	1,0 c	5,6 a	4,9 a	2,4 a	0,93 a	34 a	3,7 bc	139 a	196 a	8,9 a
SSP	16,8 a	1,1 ab	5,4 a	3,8 d	1,9 c	0,95 a	33 ab	3,9 b	164 a	144 b	7,8 b
RP	16,2 a	1,2 a	5,0 ab	4,3 b	2,2 b	0,89 a	30 b	4,4 a	152 a	155 b	9,0 a
PM	15,9 a	1,1 bc	4,4 b	4,1 c	2,1 b	0,88 a	31 b	3,4 c	153 a	151 b	7,8 b

<sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste LSD a 10%. Tratamentos: sem fertilização de P (Controle), fosfato solúvel (SSP), fosfato natural reativo (RP) e mistura (SSP+RP) na proporção de 1:1 (PM).

Os tratamentos que receberam fertilização fosfatada também acumularam maiores quantidades de P que o Controle (Tabela 8). Relativamente, RP acumulou mais P na biomassa aérea, pois, mesmo produzindo 13% a menos de biomassa total que SSP, acumulou, praticamente, a mesma quantidade total de P. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior acúmulo de P no lenho observado em RP, devido à maior participação relativa deste componente na biomassa aérea. SSP e RP apresentaram acúmulo total de P, em média, 22% maiores que PM e 38% maiores que o Controle.

Nos demais componentes, as diferenças de acúmulo de P entre os tratamentos fertilizados com P e o Controle foram, em média, 24% na casca, 41% no galho e 21% na folha (Tabela 8). Para esses componentes, não houve diferença significativa de acúmulo entre os tratamentos fertilizados com P.

**Tabela 8.** Acúmulo de macro e micronutrientes em componentes de biomassa aérea em árvores de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com fontes fosfatadas de diferentes solubilidades ao final da rotação de cultivo (93 meses pós-plantio).

Componente	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	kg ha <sup>-1</sup>						g ha <sup>-1</sup>				
<b>Lenho</b>											
Controle	169 a <sup>(1)</sup>	13 c	56 b	77 a	18 b	60 b	1821 b	149 a	3113 a	1938 a	294 a
SSP	213 a	23 b	70 a	84 a	21 a	76 a	2357 a	138 a	4091 a	2300 a	301 a
RP	184 a	26 a	53 b	90 a	20 ab	75 a	1989 b	110 b	4796 a	2001 a	255 a
PM	209 a	15 c	56 b	96 a	17 b	79 a	2054 b	100 b	2958 a	2061 a	358 a
<b>Casca</b>											
Controle	87 a	9 b	37 a	217 b	36 a	13 a	341 c	67 a	819 b	3002 a	112 a
SSP	94 a	12 a	35 a	307 a	34 a	15 a	379 bc	67 a	1167 a	1460 b	122 a
RP	84 a	12 a	26 b	245 b	35 a	15 a	433 a	47 b	851 b	1329 b	110 a
PM	79 a	11 a	39 a	301 a	37 a	15 a	401 ab	54 b	1222 a	1780 b	103 a
<b>Galho</b>											
Controle	22 c	1,7 b	7 b	21 b	8,8 a	1,9 b	77 b	21 b	187 c	804 a	28 b
SSP	31 a	3,1 a	11 a	36 a	9,2 a	2,8 a	112 a	30 b	411 a	837 a	35 a
RP	25 bc	2,7 a	7 b	21 b	6,6 b	2,6 a	74 b	26 ab	299 c	848 a	29 b
PM	28 ab	3,0 a	8 b	24 b	8,0 ab	2,7 a	86 b	30 a	212 b	851 a	36 a
<b>Folha</b>											
Controle	62 a	3,9 b	20 a	18 a	8,7 a	3,4 b	125 bc	14 b	509 c	718 a	33 a
SSP	78 a	5,3 a	25 a	18 a	9,1 a	4,4 a	151 a	18 a	763 a	667 a	37 a
RP	64 a	4,6 a	20 a	17 a	8,5 a	3,5 b	119 c	17 a	596 bc	606 a	35 a
PM	72 a	4,9 a	20 a	18 a	9,3 a	3,9 ab	139 ab	15 ab	682 ab	672 a	35 a
<b>Total</b>											
Controle	341 a	28 c	120 b	332 b	71 a	79 b	2364 c	250 a	4629 a	6462 a	467 a
SSP	416 a	44 a	141 a	444 a	74 a	97 a	2999 a	254 a	6431 a	5264 b	495 a
RP	357 a	46 a	106 b	373 b	70 a	96 a	2615 bc	200 b	6541 a	4783 b	430 a
PM	387 a	35 b	122 ab	439 a	72 a	101 a	2680 b	199 b	5074 a	5363 b	532 a

<sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste LSD a 10%. Tratamentos: sem fertilização de P (Controle), fosfato solúvel (SSP), fosfato natural reativo (RP) e mistura (SSP+RP) na proporção de 1:1 (PM).

## 2.4 Discussão

A fertilização com fosfato natural reativo alterou os teores de P em profundidade no solo, mais do que as outras fontes (Tabela 5). Esse efeito se relaciona às maiores quantidades de P total aplicadas nesse tratamento, traduzido nos altos teores de P observados ao longo de toda a rotação de cultivo (Figura 4 e 5). É alta a solubilidade desse fosfato natural, de modo que as quantidades aplicadas de P, baseadas nos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> disponíveis em ácido cítrico mais água (Bazani, 2014), poderiam ter sido menores.

Também constitui evidência dessa alta solubilidade o trabalho de Dias et al. (2000), os quais, analisando P no solo extraído por diferentes métodos (Resina trocadora de ânions (RTA), Melich-I, Bray-I) em terras de características semelhantes, observaram teores de P, na linha de plantio, inferiores a 4 mg kg<sup>-1</sup> na camada de 0-15 cm, para todos os métodos de análise (115 meses de idade; FNR, 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado no sulco de subsolagem a 20 cm de profundidade). Esse resultado se pode relacionar ao fato de que nem todo FNR aplicado foi solubilizado após 115 meses, ou, talvez, à constatação de que os produtos secundários, formados após a solubilização (formas não-lábeis de P), são muito estáveis.

As árvores em RP continuaram a absorver P do solo até o final da rotação, modificando os teores de P das frações menos disponíveis (Figura 5; Tabela 8). Nesse tratamento, a maior variação ocorreu no P-moderadamente-lábil entre 36 e 93 meses p.p., período quando também houve o aumento do P-lábil. Tal variação associa-se à solubilização de fosfato de cálcio (P-Ca), como se atestou pelas variações obtidas pelo extrator P<sub>HCl</sub>, forma de P contida em grande quantidade nos fosfatos naturais reativos. Até os 36 meses p.p., nesse tratamento, Foltran et al. (2019) verificaram que grande parte do P-Ca ainda não havia sido solubilizado, provavelmente, em virtude do longo período de deficiência hídrica no solo, ocorrido entre 2014 e 2015 (Figura 1). Após esse período, com melhores condições de umidade no solo, e devido à alta acidez dele, as taxas da solubilização de P-Ca foram altas (Figura 5) (Dias et al., 2000; Rafael et al., 2018). Ainda devem ter contribuído para a solubilização de P-Ca a alta atividade de raízes finas, da fosfatase ácida e a intensa infecção micorrízica (Foltran, 2017; Johri et al., 2015; Negassa e Leinweber, 2009).

Nos tratamentos que receberam aplicação de fosfato natural reativo (RP e PM), percebeu-se alto acúmulo de P, especialmente em RP, e Ca no lenho (Tabela 8). Esse maior acúmulo de Ca em tais tratamentos se relaciona à solubilização P-Ca, em maior quantidade

nesses tratamentos (Figura 4 e 5). A maior absorção de Ca também se liga à aplicação localizada do fosfato natural no sulco de plantio.

As maiores variações de P não-lábil ocorreram no Controle e em SSP (Figura 5). A diminuição do P não-lábil com a idade do povoamento liga-se à sua solubilização por fungos micorrízicos, bem como à mineralização de Pi em Po (Hallama et al., 2019). Costa et al. (2016) demonstraram que, em povoamentos de eucalipto, as plantas podem acessar todas as frações de P no solo em rotações relativamente longas, por meio da atividade de raízes, da fosfatase ácida no solo e da intensa associação micorrízica. Isso pode explicar a diminuição dos teores de P-não-lábil no Controle e SSP. Em RP, as fontes principais de P absorvidas foram oriundas das frações P-Ca e Po, pois não ocorreu modificação do teor de P não-lábil entre 36 e 93 meses p.p.

Constatou-se, neste estudo, que a análise de rotina de P (extraído por resina) subestima a disponibilidade de P no solo. No fim da rotação de cultivo, o P inorgânico lábil ( $P_{IRTA} + P_{bic}$ ), camada 0-40 cm, no Controle, foi quatro vezes maior que o P encontrado na análise de rotina (Tabela 5; Figura 4). Quando se consideram, também, as frações orgânicas de P, a disponibilidade é sete vezes maior do que a detectada pela análise de rotina.

A fertilização fosfatada, seja com fonte solúvel, seja com pouco solúvel, favoreceu o maior crescimento das árvores, notadamente, nos primeiros anos de cultivo, que se manteve ao longo da rotação (Figura 7). Os resultados evidenciam a resposta à aplicação de P em solos anteriormente cobertos com Cerrado (Melo et al., 2016; Rocha et al., 2019a). A diminuição do ritmo de crescimento das árvores, nos tratamentos fertilizados com P no fim da rotação de cultivo, relativamente ao Controle, associa-se à maior competição por luz e por água nesses tratamentos, nos quais havia árvores de porte maior.

A fertilização com fontes solúveis de P foi suficiente para garantir um ótimo crescimento das árvores ao longo da rotação de cultivo (Figura 7). A rápida disponibilização de P corrigiu a deficiência desse nutriente, possibilitando rápido crescimento das árvores nos primeiros anos de cultivo (Bazani et al., 2014; Gava et al., 1997). As árvores consumiram o P fornecido pelos fertilizantes e parte do Po-lábil e moderadamente-lábil, efeito detectado por meio da alteração dos teores de tais frações de P entre os 36 e 93 meses p.p. (Figura 5; Tabela 8) (Foltran et al., 2019; O'Hara et al., 2006). As micorrizas devem ter tido alto efeito na mineralização de Po, pois se constatou que as raízes finas estavam com uma taxa de 30% de infecção micorrízica aos 36 meses p.p. (Foltran, 2017).

A boa produtividade de madeira no Controle ao fim da rotação (Figura 7; Tabela 6) reflete a grande capacidade do *Eucalyptus* em adaptar-se a solos com baixa disponibilidade de P e com alta acidez, desde que bem suprido em água (Gonçalves et al., 2008). Tal capacidade adaptativa relaciona-se à exploração de horizontes subsuperficiais do solo pelo sistema radicular (Laclau et al., 2013), à disponibilização de P por meio da mineralização de frações orgânicas de P e à alta eficiência no uso de nutrientes (Gonçalves et al., 2013).

A mineralização de Po no solo desempenhou papel essencial no crescimento das árvores, especialmente no Controle, que não recebeu aplicação suplementar de P. Entre 36 e 93 meses p.p., o aumento da fração lável de P encontrado nesse tratamento ocorreu, majoritariamente, devido à conversão de Po em Pi (Figura 5). Essa mineralização de Po é realizada por fungos ectomicorrízicos (Robin et al., 2019) e por outros microrganismos do solo (Hallama et al., 2019). Os aportes de Po no solo, oriundos da ciclagem biogeoquímica (decomposição de serapilheira e de raízes finas), são relevantes durante a rotação de cultivo em solos manejados no sistema de cultivo mínimo, como neste experimento (Costa et al., 2016; Laclau et al., 2010). Quando o sistema de manejo do solo é intensivo, com remoção de resíduos florestais (serapilheira e sobras da colheita de madeira), o P constitui um dos nutrientes mais limitantes para o crescimento do eucalipto (Rocha et al., 2019c, 2016b).

A estratégia de fornecimento de P, pela mistura entre fontes solúveis e pouco solúveis, mostrou-se mais influenciada pelo efeito das fontes solúveis, em termos de crescimento. As altas produtividades observadas podem-se justificar pelo arranque inicial de crescimento, devido à alta solubilidade de P das fontes solúveis (Bazani et al., 2014). Pode-se inferir que o fosfato reativo, aplicado nesse tratamento ( $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), foi solubilizado e absorvido ao longo da rotação de cultivo, como observado em RP, influenciando pouco os teores de P do solo ao fim da rotação.

## 2.5 Conclusão

- A fertilização com fosfato natural reativo alterou os teores de P em profundidade no solo, mais do que as outras fontes. A fração de P mais alterada foi a moderadamente-lável, associada à solubilização de fosfato de cálcio. Nesse tratamento, as fontes principais de P absorvidas originaram-se das frações P-Ca e Po, pois não ocorreu modificação do teor de P não-lável;

- Nos tratamentos que receberam aplicação de fosfato natural reativo, observou-se alto acúmulo de P e Ca no lenho, relacionado à alta solubilização P-Ca e à aplicação localizada deste no sulco de plantio;
- Constatou-se que a análise de rotina de P (extraído por resina) subestima a disponibilidade de P no solo para a nutrição de árvores de *E. grandis*;
- A fertilização fosfatada, seja com fonte solúvel, seja com pouco solúvel, favoreceu o maior crescimento das árvores, notadamente, nos primeiros anos de cultivo. A diminuição do ritmo de crescimento das árvores, nos tratamentos fertilizados com P no fim da rotação de cultivo, relativamente ao Controle, associou-se à maior competição por luz e água nesses tratamentos, nos quais havia árvores de porte maior. Durante a rotação de cultivo, houve longos períodos de estiagem, causando estresse hídrico nas árvores, o que diminuiu os efeitos diferenciais entre tratamentos com fertilização fosfatada;
- As plantas fertilizadas com fontes solúveis de P (SSP) apresentaram maior crescimento em relação às fertilizadas com fontes pouco solúveis (RP). O fato pode ser atribuído ao ótimo arranque inicial de crescimento das árvores, diferença que se manteve ao longo da rotação de cultivo;
- As árvores absorveram o P fornecido pelos fertilizantes e parte do Po-lábil e moderadamente-lábil, efeito detectado por meio da alteração dos teores dessas frações de P no solo;
- A mineralização de Po no solo desempenhou papel essencial no crescimento das árvores, especialmente no Controle, que não recebeu aplicação suplementar de P.

## Referências

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Barros, N.F. De, Novais, R.F. de, Neves, J.C.L., 1990. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. Relação solo-eucalipto. Viçosa, MG Folha Viçosa 127–186.
- Bazani, J.H., 2014. Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto. Universidade de São Paulo, Piracicaba. <https://doi.org/10.11606/D.11.2014.tde-11112014-160156>
- Bazani, J.H., Gonçalves, J.L. de M., Rocha, J.H.T., Melo, E.A.S.C., Prieto, M., 2014. Nutrição fosfatada em plantações de Eucalipto. *Informações Agronômicas* 148, 28.
- Costa, M., Gama-Rodrigues, A., Gonçalves, J., Gama-Rodrigues, E., Sales, M., Aleixo, S., 2016. Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. *Forests* 7, 15. <https://doi.org/10.3390/f7010015>
- Dias, L.E., Fernandez, J.Q.P., De Barros, N.F., De Novais, R.F., De Moraes, É.J., Daniels, W.L., 2000. Availability of phosphorus in a Brazilian oxisol cultivated with eucalyptus after nine years as influenced by phosphorus-fertilizer source, rate, and placement. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31, 837–847. <https://doi.org/10.1080/00103620009370481>
- Foltran, E.C., 2017. Dinâmica do fósforo no sistema solo-planta em função da solubilidade de fertilizantes fosfatados, em plantios de *Eucalyptus grandis*. Universidade de São Paulo, Piracicaba. <https://doi.org/10.11606/D.11.2017.tde-25072017-171626>
- Foltran, E.C., Rocha, J.H.T., Bazani, J.H., Gonçalves, J.L. de M., Rodrigues, M., Pavinato, P., Valduga, G.R., Erro, J., Garcia-Mina, J.M., 2019. Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. *For. Ecol. Manage.* 435, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.053>
- GAVA, J.L., 2003. Efeito comparativo de fontes e doses de fósforo em plantios de eucalipto. Relatório Técnico da Cia. Suzano Pap. e Celul. 25.
- Gava, J.L., Gonçalves, J.L.M., Shibata, F.Y., Corradini, L., 1997. Eficiência relativa de fertilizantes fosfatados no crescimento inicial de eucalipto cultivado em solos do cerrado. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 21, 497–504. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000300020>
- Gonçalves, J.L. de M., 2011. Fertilização de plantação de Eucalipto, in: Gonçalves, J.L. de M., Pulito, A.P., Arthur Junior, J.C., Silva, L.D. (Orgs.), *Anais II Encontro brasileiro de silvicultura. PTSM/IPEF/FUPEF*, Campinas, p. 342.
- Gonçalves, J.L. de M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F. de B., Lima, W. de P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.P.D., Laclau, J.P., Nouvellon, Y., Epron, D., 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *For. Ecol. Manage.* 301, 6–27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>
- Gonçalves, J.L.D.M., Alvares, C.A., Gonçalves, T.D., Moreira, R.M., Mendes, J.C.T., Gava, J.L., 2012. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. *Sci. For. Sci.* 40, 187–201.
- Gonçalves, J.L.M., Stape, J.L., Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Ranger, J., 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: The Brazilian experience. *South. For.* 70, 105–118.

<https://doi.org/10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534>

Hallama, M., Pekrun, C., Lambers, H., Kandeler, E., 2019. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant Soil* 434, 7–45. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7>

Johri, A.K., Oelmüller, R., Dua, M., Yadav, V., Kumar, M., Tuteja, N., Varma, A., Bonfante, P., Persson, B.L., Stroud, R.M., 2015. Fungal association and utilization of phosphate by plants: success, limitations, and future prospects. *Front. Microbiol.* 6, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00984>

Laclau, J.-P., da Silva, E.A., Rodrigues Lambais, G., Bernoux, M., le Maire, G., Stape, J.L., Bouillet, J.-P., Gonçalves, J.L. de M., Jourdan, C., Nouvellon, Y., 2013. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. *Front. Plant Sci.* 4, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00243>

Laclau, J.P., Ranger, J., de Moraes Gonçalves, J.L., Maquère, V., Krusche, A. V., M'Bou, A.T., Nouvellon, Y., Saint-André, L., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., Deleporte, P., 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *For. Ecol. Manage.* 259, 1771–1785. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010>

Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. de., 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações, 2º ed, Potafos. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba.

Melo, E.A.S.C., Gonçalves, J.L. de M., Rocha, J.H.T., Hakamada, R.E., Bazani, J.H., Wenzel, A.V.A., Arthur, J.C., Borges, J.S., Malheiros, R., de Lemos, C.C.Z., Ferreira, E.V. de O., Ferraz, A. de V., 2016. Responses of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. *Forests* 7, 1–15. <https://doi.org/10.3390/f7010002>

Negassa, W., Leinweber, P., 2009. How does the hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 305–325. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800223>

O'Hara, C.P., Bauhus, J., Smethurst, P.J., 2006. Role of light fraction soil organic matter in the phosphorus nutrition of *Eucalyptus globulus* seedlings. *Plant Soil* 280, 127–134. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-2675-8>

R Core Team, 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Rafael, R.B.A., Fernández-Marcos, M.L., Cocco, S., Ruello, M.L., Weindorf, D.C., Cardelli, V., Corti, G., 2018. Assessment of Potential Nutrient Release from Phosphate Rock and Dolostone for Application in Acid Soils. *Pedosphere* 28, 44–58. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60437-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60437-5)

Raij, B. van., Andrade, J.C. de., Cantarella, H., Quaggio, J.A., 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

Robin, A., Pradier, C., Sanguin, H., Mahé, F., Lambais, G.R., de Araujo Pereira, A.P., Germon, A., Santana, M.C., Tisseyre, P., Pablo, A.-L., Heuillard, P., Sauvadet, M., Bouillet, J.-P., Andreote, F.D., Plassard, C., de Moraes Gonçalves, J.L., Cardoso, E.J.B.N., Laclau, J.-P., Hinsinger, P., Jourdan, C., 2019. How deep can ectomycorrhizas go? A case study on *Pisolithus* down to 4 meters in a Brazilian eucalypt plantation. *Mycorrhiza* 29, 637–648. <https://doi.org/10.1007/s00572-019-00917-y>

Rocha, J.H.T., Gonçalves, J.L. de M., Ferraz, A. de V., Poiati, D.A., Arthur Junior, J.C., Hubner, A., 2019a. Growth dynamics and productivity of an *Eucalyptus grandis* plantation under omission of N, P, K Ca and Mg over two crop rotation. *For. Ecol. Manage.* 447, 158–168.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.060>

Rocha, J.H.T., Gonçalves, J.L. de M., Gava, J.L., Godinho, T. de O., Melo, E.A.S.C., Bazani, J.H., Hubner, A., Arthur Junior, J.C., Wichert, M.P., 2016a. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a *Eucalyptus* plantation over two short rotations. *For. Ecol. Manage.* 379, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.042>

Rocha, J.H.T., Marques, E.R.G., Gonçalves, J.L. d. M., Hübner, A., Brandani, C.B., Ferraz, A. d. V., Moreira, R.M., 2016b. Decomposition rates of forest residues and soil fertility after clear-cutting of *Eucalyptus grandis* stands in response to site management and fertilizer application. *Soil Use Manag.* 32, 289–302. <https://doi.org/10.1111/sum.12283>

Rocha, J.H.T., Menegale, M.L.C., Rodrigues, M., Gonçalves, J.L. de M., Pavinato, P.S., Foltran, E.C., Harrison, R., James, J.N., 2019b. Impacts of timber harvest intensity and P fertilizer application on soil P fractions. *For. Ecol. Manage.* 437, 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.051>

Rocha, J.H.T., Menegale, M.L.C., Rodrigues, M., Gonçalves, J.L. de M., Pavinato, P.S., Foltran, E.C., Harrison, R., James, J.N., 2019c. Impacts of timber harvest intensity and P fertilizer application on soil P fractions. *For. Ecol. Manage.* 437, 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.051>

Santos, H.G. dos, Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C. dos, Oliveira, V.A. de, Lumbreiras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A. de, Araujo Filho, J.C. de, Oliveira, J.B. de, Cunha, T.J.F., 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos, Embrapa Solos.

Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. The Water Balance. *Publ. Climatol.* 8, 104.