

ANNA CAROLYNA FERNANDES FERREIRA

**EFEITO DO MANEJO DE RESÍDUOS DA COLHEITA E DA ADUBAÇÃO NO
CRESCIMENTO DO EUCALIPTO, NA ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E NAS
FRAÇÕES DE FÓSFORO DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Nairam Félix de Barros

Coorientador: Ivo Ribeiro da Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F383e
2021
Ferreira, Anna Carolyna Fernandes, 1991-
Efeito do manejo de resíduos da colheita e da adubação no
crescimento do eucalipto, na absorção de nutrientes e nas frações
de fósforo do solo / Anna Carolyna Fernandes Ferreira. – Viçosa,
MG, 2021.

1 tese eletrônica (80.f): il. (algumas color.).

Orientador: Nairam Félix de Barros.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2021.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2021.116>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Eucalipto - Nutrição. 2. Fertilização de plantas. 3. Solos
florestais - Fertilização. 4. Fósforo. I. Barros, Nairam Félix de.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
III. Título.

CDD 22. ed. 631.8

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fátima Alves CRB6/2578

ANNA CAROLYNA FERNANDES FERREIRA

EFEITO DO MANEJO DE RESÍDUOS DA COLHEITA E DA ADUBAÇÃO NO
CRESCIMENTO DO EUCALIPTO, NA ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E NAS
FRAÇÕES DE FÓSFORO DO SOLO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 23 de julho de 2021.

Assentimento:



Anna Carolyna Fernandes Ferreira
Autora



Nairam Félix de Barros
Orientador

*Aos meus pais, Maury e Líllian Ferreira
e aos meus irmãos Gabriel e Miguel.*

Com gratidão e orgulho,

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por cuidar tão bem de mim e sempre me conduzir pelo melhor caminho.

Aos meus pais, Maury e Lílian, por nunca medirem esforços para subsidiarem meus sonhos e por sempre me apoiarem nas decisões.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade de estudo e por toda infraestrutura que tive acesso durante o período de doutoramento.

Agradeço à CAPES e à FAPEMIG pelo auxílio financeiro e concessão das bolsas de estudo, sem as quais não seria possível a realização da minha pesquisa.

Ao professor e orientador Nairam Félix de Barros, que sempre tive como ídolo, pela confiança e dedicação aos ensinamentos que contribuíram para meu treinamento.

Ao professor Samuel Vasconcelos Valadares por ter me “adotado” como orientanda, pela confiança depositada em mim, pela contribuição técnica e científica e palavras de apoio.

Aos professores Ivo Ribeiro da Silva e Leonardus Vergütz pelo apoio técnico.

Agradeço imensamente à CENIBRA- Celulose Nipo Brasileira e ao NUTREE, por terem concedido todo o suporte técnico e financeiro para a realização deste estudo. Agradeço especialmente ao Guilherme Luiz de Jesus, Fernando Palha Leite, Gilson, Anderson e Fabrício Gebrim.

À Bruna Ferreira, minha companheira de experimentos, estagiária e amiga querida. Sem a ajuda dela tudo ficaria infinitamente mais difícil.

Aos amigos queridos que sempre estiveram comigo nos surtos e melhores momentos dessa longa e exaustiva jornada. Um abraço especial a vocês, amados: Patrícia Barros, Djalma Pereira, Géssica Carvalho, Naiara Souza, Sérgio Carneiro, Nathalie Sena, Francis Henrique, Larissa Freitas, Klever Silveira, Lavínnia Dayrell, Anelize Fernandes, Júlia Condé, Priscila Moreira, Jônatas Pedro e Maíra Ferman.

À galera do fundão, porque essa sempre forma!!!

E por fim, mas não menos importante, quero agradecer a cidade de Viçosa por ser tão amável e acolhedora.

RESUMO GERAL

FERREIRA, Anna Carolyn Fernandes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2021. **Efeito do manejo de resíduos da colheita e da adubação no crescimento do eucalipto, na absorção de nutrientes e nas frações de fósforo do solo.** Orientador: Nairam Félix de Barros. Coorientador: Ivo Ribeiro da Silva

Os plantios de eucalipto no Brasil apresentam as mais altas produtividades do mundo, mesmo sendo cultivados em solos de baixa fertilidade natural. Nessas áreas a fertilização se torna imprescindível para a garantia do crescimento dessas florestas. Este trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar o efeito de práticas de fertilização e de manejo de resíduos sobre o crescimento, produtividade e eficiência de uso nutrientes pelo eucalipto. Foi conduzido um estudo no município de Peçanha– MG em área previamente cultivada com eucalipto. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos, distribuídos em parcelas subdivididas, consistiram de quatro níveis de resíduos de colheita (Ra) (todos os resíduos vegetais mantidos na área; todos os resíduos deixados na área com exceção da casca (R-C); remoção de todos os resíduos vegetais com exceção da serapilheira (Ser) e remoção de todos os resíduos vegetais (Teste) combinado com três níveis de fertilização (AR: adubação de reposição, AP: adubação potencial e controle (AS: sem fertilização). Previamente à instalação dos experimentos, foi realizada amostragem de solo até a profundidade de 40 cm, para caracterização química e física das áreas. Além disso, amostras de solo foram coletadas no primeiro ano de condução do experimento para a avaliação da dinâmica das frações de fósforo (P) nos tratamentos que envolviam os RC. Aos 32 meses após o plantio procedeu-se à colheita das árvores para obtenção da produtividade e conteúdo de nutrientes nas plantas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Duncan a 10 % de probabilidade. Os tratamentos que envolviam a combinação de resíduos e fertilização alteraram o crescimento, a produtividade e a eficiência de uso de nutrientes das plantas, evidenciando a importância do resíduo na melhoria das respostas do eucalipto à fertilização. De maneira geral, a presença dos RC condicionou o aumento da disponibilidade das formas lábeis de P a curto prazo, indicando que o manejo

adequado dos RC nos sítios é uma alternativa importante para a otimização do manejo de P no solo.

Palavras-chave: Resíduos florestais. Eficiência nutricional. Fertilização mineral. Fracionamento sequencial de P.

ABSTRACT

FERREIRA, Anna Carolyna Fernandes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2021. **Effect of harvest residue management and fertilization on *Eucalyptus* growth, nutrient uptake and soil phosphorus fractions.** Adviser: Nairam Félix de Barros. Co-adviser: Ivo Ribeiro da Silva

Eucalyptus plantations in Brazil have the highest yields in the world, even though they are cultivated in soils with low natural fertility. In these areas, fertilization becomes essential to guarantee the growth of these forests. This work was carried out with the objective of evaluating the effect of fertilization practices and residue management on the growth, productivity and efficiency of nutrient use by *Eucalyptus*. The study was conducted in the country of Peçanha-MG in an area previously cultivated with *Eucalyptus*. The soil of the area was classified as Oxisol. The experimental design was in randomized blocks, with four replications. The treatments distributed in split plots consisted of four levels of harvest residues (HR) (all harvest residues kept in the area; all harvest residues left in the area except bark; removal of all harvest residues except litter and removal of all harvest residues) combined with three levels of fertilization (replacement fertilization, potential fertilization and control (without fertilization)). Prior to the installation of the experiments, soil sampling was carried out to a depth of 40 cm, for chemical and physical characterization. In addition, soil samples were collected in the first year of the experiment to evaluate the dynamics of phosphorus (P) fractions in treatments involving the HR. At 36 months after planting, the trees were harvested to obtain informations on productivity and nutrient content in the plants. The data obtained were subjected to analysis of variance (ANOVA). Treatment averages were compared by Duncan test at 10% probability. Treatments that involved the combination of harvest residues and fertilization influenced plant growth, productivity and nutrient use efficiency, highlighting the importance of the slash in improving *Eucalyptus* responses to fertilization. In general, the presence of HR conditioned the increase in the availability of labile forms of P in the short term, indicating that the proper management of HR in the sites is an important alternative for optimizing the management of P in the soil.

Keywords: Forest residues. Nutritional efficiency. Mineral fertilization. P Sequential fractionation.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS	13
CAPÍTULO 1	16
O MANEJO DOS RESÍDUOS FLORESTAIS COMBINADO COM A FERTILIZAÇÃO AFETA A PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO EM SEGUNDO CICLO	16
1. INTRODUÇÃO	17
2. MATERIAL E MÉTODOS	18
2.1 Área de estudo e caracterização do solo e dos resíduos	18
2.2 AVALIAÇÃO DO EXPERIMENTO	21
2.2.3 Conteúdo e eficiência de uso dos nutrientes	23
2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	24
3. RESULTADOS	24
3.1 Fertilidade do solo	24
3.2 Crescimento e produtividade do eucalipto e partição de biomassa	27
3.2.1 Dinâmica do crescimento da segunda rotação de cultivo	27
3.2.2 Produtividade do eucalipto	29
3.2.3 Produção de biomassa da parte aérea e conteúdo de nutrientes	29
3.2.4 Eficiência de uso de nutrientes	33
4. DISCUSSÃO	35
4.1 Efeito dos tratamentos nas propriedades químicas do solo	35
4.2 Influência dos tratamentos na produtividade, produção de biomassa e conteúdo de nutrientes do eucalipto	36
4.3 Coeficiente de utilização biológica e índice de eficiência de utilização de nutrientes do eucalipto com manutenção de resíduos da colheita e fertilização mineral	38
5. CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	40
UNDERSTANDING CHANGES IN THE DISTRIBUTION OF SOIL PHOSPHORUS FRACTIONS AS A FUNCTION OF INTEGRATED MANAGEMENT PRACTICES IN EUCALYPTUS PLANTATIONS	44
1. INTRODUCTION	45
2. MATERIAL AND METHODS	46
2.1 Study site and soil characterization	46
2.2 Phosphorus extractions	48
2.3 Data analysis	49
3. RESULTS	49
3.1 Anion exchange resin and NaHCO ₃ (0.5 M) extracted P - Labile P	49
3.2 NaOH.1 (0.1 M) and HCl (1 M) extracted P	51
3.3 NaOH.2 (0.5 M) extracted	52
3.4 Plant yield, leaf P content and relationship between soil P fractions and plant variables	54
4. DISCUSSION	57
5. CONCLUSIONS	59
REFERENCES	60

CAPÍTULO 3	65
COMO O TEMPO DE CULTIVO AFETA AS FRAÇÕES DE FÓSFORO NO SOLO EM PLANTIOS DE EUCALIPTO?	65
RESUMO.....	65
1. INTRODUÇÃO	66
2. MATERIAL E MÉTODOS	67
2.1 Área de estudo e caracterização do solo	67
Região	69
2.3 Análises estatísticas	70
3. RESULTADOS	70
3.1 P extraído com resina extratora de ânions e NaHCO ₃ (0,5 mol L ⁻¹)	70
3.2 P extraído com NaOH.1 (0,1 mol L ⁻¹) e HCl (1,0 mol L ⁻¹)	72
3.3 P extraído com NaOH.2 (0,5 mol L ⁻¹)	73
4. DISCUSSÃO.....	75
5. CONCLUSÃO.....	77
REFERÊNCIAS.....	77

INTRODUÇÃO GERAL

A indústria florestal brasileira é considerada uma das mais expressivas do mundo, tendo grande importância no cenário econômico e social do país e significativa participação no PIB nacional, na geração de tributos e nas exportações, promovendo superávit na balança comercial (Fischer e Zylbersztajn, 2012). Atualmente, as florestas plantadas no Brasil ocupam cerca de 5,7 Mg ha⁻¹, dos quais o eucalipto (*Eucalyptus* spp.) representa cerca de 75%, estando presente em todas as regiões do país, sendo a produtividade média de aproximadamente 40 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (IBÁ, 2016). Para isso, contribuem ainda, a utilização de materiais genéticos mais eficientes na aquisição e utilização dos recursos de crescimento, controle de pragas e doenças, e maior utilização de insumos químicos (Gonçalves et al., 2008).

A utilização de clones com maior potencial produtivo, resulta em maiores demandas nutricionais, e é um fator acelerador de degradação química dos solos, especialmente da fertilidade do solo, uma vez que há estreita relação entre o teor de nutrientes da planta e a produção de biomassa (Leite et al., 2010).

A maior demanda nutricional dos plantios de eucalipto com elevadas produtividades tem sido compensada pela utilização de corretivos e fertilizantes minerais, uma vez que a grande maioria das florestas plantadas estão estabelecidas em regiões de solos de baixa fertilidade natural e com poucas reservas minerais (Rocha, 2014; Stape et al., 2010).

O consumo crescente de fertilizantes tem concorrido para o aumento dos custos da atividade florestal, fazendo com que muitas empresas do setor busquem aumentar sua receita por meio de outros produtos além da madeira e celulose (Tiwari et al., 2018), tornando frequente a utilização de resíduos de colheita (RC) para geração de energia. Na época da colheita, os resíduos florestais acumulados na superfície do solo apresentam quantidades da ordem de 10 a

120 Mg ha⁻¹, dependendo da região, idade, espaçamento e sistema de colheita utilizado (Du Toit et al., 2008).

A remoção de resíduos florestais (serapilheira e RC) diminui a quantidade de material orgânico aportado ao solo e os teores de matéria orgânica do solo (MOS) e, conseqüentemente, a disponibilidade de nutrientes, podendo afetar a sustentabilidade a longo prazo da produção florestal (Toselli, 2014). Nesse sentido, a permanência dos RC contribui para a manutenção da produção e melhoria da fertilidade do solo. O descascamento dos troncos e manutenção da casca no campo contribuem para menor exportação de nutrientes (Laclau et al., 2010; Santana et al., 2008; Hernández et al., 2009). A manutenção da capacidade produtiva do sítio depende do balanço positivo de nutrientes (Paes et al., 2013) fato que normalmente só é observado com a eventual aplicação de fertilizantes (Zaia et al., 2004).

Trabalhos, como o de Mendham et al. (2003), mostram que a manutenção de aproximadamente 30 Mg ha⁻¹ de RC em plantios de eucalipto em áreas de baixa e alta fertilidade, resultou em melhor desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, maiores produtividades. Deleporte et al. (2008) observaram que a remoção dos resíduos florestais e da serapilheira reduziu o IMA aos 11 e 84 meses de idade, respectivamente. A produtividade média na parcela onde todos os resíduos foram removidos foi de 13,7 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, de 20 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ no tratamento em que todos os resíduos foram mantidos e 23,4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ na parcela que recebeu o dobro de resíduos.

Além disso, práticas de manejo que promovam o aporte de MOS ao solo contribuem para a alteração da dinâmica da labilidade das formas de fósforo (P), com diminuição da adsorção e conseqüente aumento da disponibilidade de formas mais lábeis para as plantas (Andrade et al. 2003; Pereira et al. 2010). O P é um dos nutrientes mais limitantes da produção florestal em ecossistemas tropicais (Darch et al., 2016; Rocha et al., 2016; Rodrigues et al., 2016; Mao et al., 2017) e sua aplicação é indispensável, gerando ganhos de 30 a 50 % na

produção madeireira (Bazani et al., 2014; Maranguit et al, 2017). Contudo, poucos estudos focam os mecanismos envolvidos nas alterações e interações entre diferentes formas P com a manutenção dos RC no solo para um aumento na produção florestal.

A manutenção de resíduos de colheita na superfície do solo pode promover aumentos na MOS (Maranguit et al., 2017; Souza et al., 2020; Barros et al., 2021) além de aumentar os estoques de formas lábeis de P e contribui para aumentar da eficiência da adubação fosfatada (Rocha et al., 2019; Costa et al, 2016). Desse modo, é relevante avaliar os efeitos do manejo dos RC sobre os teores de nutrientes, na eficiência da adubação e melhoria da nutrição florestal, assim como avaliar a dinâmica da labilidade das frações de P no solo nessas diferentes condições.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, F. V. et al. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Rev Bras Ciência do Solo*, 27:1003–1011.
- BARROS, I. B. et al. Integrating forest residue and mineral fertilization: effects on nutrient acquisition, nutrient use efficiency and growth of eucalypt plants. *Forest Ecology and Management*, 496: 119461, 2021.
- BAZANI, J. H. 2014. Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto. In: *Ciências Florestais*. USP, Piracicaba - SP, pp. 129.
- COSTA, M. G. et al. Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. *Forests*, 7, 2016.
- DARCH, T. et al. Assessment of bioavailable organic phosphorus in tropical forest soils by organic acid extraction and phosphatase hydrolysis. *Geoderma*, 284, 93-102, 2016.
- DELEPORTE P. et al. Effects of slash and litter management practices on soil chemical properties and growth of second rotation Eucalypts in the Congo. In: NAMBIAR, E.K.S. *Site management and productivity in tropical plantation forests.*, Bogor Indonésia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 2008. p.5-22.
- Du TOIT, B.; DOVEY, S.B.; SMITH, C.W. Effects of Slash and Site Management Treatments on Soil Properties, Nutrition and Growth of a *Eucalyptus grandis* Plantation in South Africa In.: NAMBIAR, E.K.S. *Site management and productivity in tropical plantation forests*. Bogor, Indonésia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 2008, p. 63-78.
- FERREIRA, G. W. D. Harvest residues management and silvicultural operations impact on soil physical and organic matter quality of eucalypt plantations. Tese. Universidade Federal de Viçosa. 2017, 81 p.
- FISCHER, A.; ZYLBERSZTAJN, D. O fomento florestal como alternativa de suprimento de matéria-prima na indústria brasileira de celulose. *Rev Eletrônica Adm*, 494–520, 2012.
- GONÇALVES, J. L. M. et al. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: The Brazilian experience. *South For*. 2008;70:105–118.
- HERNANDEZ, J. et al. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 258, 92-99, 2009.

- IBÁ 2016. Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores - ano base 2015, São Paulo.
- LACLAU, J. P. et al. Organic residue mass at planting is an excellent predictor of tree growth in Eucalyptus plantations established on a sandy tropical soil. *Forest Ecology and Management*, 260: 2148-2159, 15 2010.
- LEITE, F. P., et al. Alterations of soil chemical properties by eucalyptus cultivation in five regions in the Rio Doce Valley. *Rev Bras Ciência do Solo*, 2010; 34:821–831.
- MAO, Q. et al. Effects of long term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in a N-rich tropical forest. *Geoderma*, 285, 57-63, 2017.
- MARANGUIT, D.; GUILLAUME, T.; KUZYAKOV, Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *Catena*, 149: 385-393, 2017.
- MENDHAM, D.S. et al. Residue management effects on soil carbon and nutrient contents and growth of second rotation eucalypts. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 181, n. 3, p. 357-372, 2003.
- PAES, F. A. S. V. et al. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de Eucalipto. *Rev Bras Cienc do Solo*, 37:1081–1090, 2013.
- PEREIRA, M. G. et al. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 45:508–514, 2010.
- ROCHA, J. H. T. Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de *Eucalyptus grandis*. Dissertação. Universidade de São Paulo. 2014, 123p.
- ROCHA, J.H.T. et al. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a *Eucalyptus* plantation over two short rotations. *Forest Ecology and Management*, 379, 1-10, 2016.
- RODRIGUES, M. et al. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Science of the Total Environment*, 542, 1050-1061, 2016.
- STAPE, J. L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, 259, 1684-1694, 2010.
- SANTANA, R. C. et al. Nutrient allocation in eucalypt plantations in Brazil. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 32, 2723-2733, 2008.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Nutrient cycling and balance in eucalypt plantation systems in north of Rio de Janeiro state, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28, 843-852, 2004.

CAPÍTULO 1

O MANEJO DOS RESÍDUOS FLORESTAIS E A FERTILIZAÇÃO MINERAL AFETAM A PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO EM SEGUNDO CICLO

RESUMO

Os plantios de eucalipto em regiões tropicais se destacam como importantes fontes de produtos e serviços florestais. Nestes sistemas, a gestão adequada de nutrientes se torna fundamental para a manutenção da produção das florestas. Neste trabalho, avaliamos os efeitos das práticas de manejo de nutrientes (fertilização e manejo de resíduos de colheita florestal-RC) e suas interações na produtividade, partição de nutrientes e eficiência do uso de nutrientes em plantios de eucalipto. Este estudo foi conduzido por três anos em condições de campo, em área representativa de produção de eucalipto no estado de Minas Gerais, Brasil. Os tratamentos consistiram em quatro manejos de resíduo da colheita (todos os resíduos vegetais mantidos na área; todos os resíduos deixados na área com exceção da casca; remoção de todos os resíduos vegetais com exceção da serapilheira e remoção de todos os resíduos vegetais) combinado com três níveis de fertilização (adubação de reposição, adubação potencial e sem fertilização)) em blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com quatro repetições. A manutenção de resíduos da colheita combinada com a fertilização aumentou a biomassa de parte aérea e o volume de madeira produzido, contudo, na presença de fertilização, esse efeito foi ainda mais evidente. Nos tratamentos em que os resíduos da colheita foram mantidos, a produtividade foi até 25 % maior do que na ausência de resíduos e neste mesmo tratamento o incremento nutricional via fertilização resultou em incrementos de 50 % em produção de tronco a partir dos 25 meses. Nossos resultados adicionam evidências de que a quantidade de fertilizante aplicada não pode ser reduzida deliberadamente e que a manutenção de resíduos da colheita associada a fertilização é estratégia importante para substituir de forma sustentável os nutrientes nestes sistemas.

Palavras-chave: *Eucalyptus* spp. Partição de nutrientes. Eficiência de uso de nutrientes. Manejo nutricional.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as florestas plantadas se expandiram globalmente em taxas expressivas, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais (Oliveira et al., 2021; Payn et al., 2015). Espécies do gênero *Eucalyptus* se destacam nesse cenário, estando presentes em mais de 90 países ao redor do mundo, com aproximadamente 20 Mha plantados (Zhou et al., 2020, Masullo et al., 2020). Deste total, cerca de 25 % estão localizado no Brasil, com aproximadamente 5,7 Mg ha⁻¹ (IBÁ, 2019) distribuídos em todas as regiões do país.

A produtividade das plantações de eucalipto no Brasil é uma das mais altas do mundo, tornando a indústria florestal brasileira altamente competitiva no mercado internacional (Fischer e Zylbersztajn, 2012). O sucesso da eucaliptocultura brasileira é resultante, dentre outros fatores, das condições edafoclimáticas favoráveis, da seleção de materiais genéticos cada vez mais específicos para cada região do país, da aplicação de corretivos e fertilizantes e, principalmente, do manejo silvicultural apropriado, uma vez que os plantios são majoritariamente estabelecidos em solos de baixa fertilidade natural (Rocha et al., 2016).

Plantios de eucalipto com elevada produtividade geram quantidades consideráveis de serapilheira e resíduos de colheita (RC). A quantidade de resíduos gerada depende, dentre outros fatores, do sistema de colheita adotado (Gatto et al., 2010), pois, quando as árvores são cortadas e processadas no interior do talhão, ocorre maior aporte de resíduos sobre o solo. Os RC possuem quantidade considerável de nutrientes, principalmente nos componentes folhas e casca, que podem retornar ao solo por meio da mineralização, tornando-se disponíveis para as plantas em rotações futuras (Adamczyk et al., 2016). Contudo, em determinadas situações, além da remoção dos troncos, os RC são utilizados para outros fins tais como a produção de energia. Esse tipo de destinação dos resíduos aumenta a exportação de nutrientes dos sítios e favorece a ocorrência de impactos negativos no solo (Paes et al., 2013; Bellote et al.; 2008, Cardoso, 2020). Se mantidos na área colhida, os RC, juntamente com a suplementação de nutrientes via

fertilização mineral, contribuem para que se mantenha ou aumente o estoque de nutrientes no sítio explorado (Rocha et al, 2018).

A quantidade de RC depositados sobre o solo pode chegar a até 120 Mg ha⁻¹, dependendo da região, idade e espaçamento do povoamento (Du Toit et al., 2008). Sankaran et al. (2008) verificaram ganhos em produtividade de até 250 % decorrentes da manutenção de resíduos do ciclo anterior em plantios de eucalipto na Índia. No Congo, Deleporte et al. (2008) observaram que as retiradas de RC reduziram em até 43 % o incremento médio anual (IMA) em volume do tronco de eucalipto. No Brasil, Rocha et al. (2016) verificaram redução de 40 % no volume de madeira decorrente da remoção dos RC em regiões com baixos investimentos em fertilização.

Neste cenário, torna-se evidente que o manejo adequado de RC nos sítios constitui-se numa importante ferramenta para a melhoria da nutrição florestal e que o conhecimento sobre a dinâmica de nutrientes em plantios florestais contribui para o desenvolvimento e aprimoramento de modelos quantitativos e conceituais de práticas de manejo (Barros et al., 2021). Portanto, o efeito conjunto do adequado manejo dos resíduos florestais e da adubação pode constituir-se numa importante ferramenta para a otimização da nutrição e produtividade florestal, apresentando grande relevância para a sustentabilidade florestal (Barros et al., 2021).

Neste trabalho, são mostrados resultados de um experimento de campo realizado em uma área representativa da produção de eucalipto no Brasil. Nele são fornecidos dados de solo e de crescimento da parte aérea de florestas plantadas de eucalipto em função de fertilização e manejo de RC. Sendo assim, os objetivos deste trabalho visam avaliar a fertilidade do solo e o crescimento inicial de uma plantação de *Eucalyptus grandis* em resposta ao manejo de resíduos da colheita florestal e intensidades de fertilização mineral.

2.MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e caracterização do solo e dos resíduos

O estudo foi realizado no município de Peçanha- MG (18°32' S e 42°33' O), pertencente ao Bioma Mata Atlântica. A posição topográfica é de topo de morro com relevo suave e 930 m de altitude. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho de textura argilosa. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.200 mm, com as chuvas concentradas entre outubro e março, e a temperatura média anual é de 20,5° C (Souza, 2012). A área é cultivada com eucalipto há aproximadamente 45 anos e a ocupação anterior do solo era de floresta nativa pertencente ao bioma Mata Atlântica.

O experimento foi instalado em julho de 2017, seis meses após a colheita de um plantio de *E. grandis*. O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso, com os tratamentos distribuídos em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta por 64 árvores (8 x 8) com espaçamento de 3 x 3 m entre si. As parcelas úteis foram formadas pelas 36 árvores (6 x 6) centrais de cada parcela.

Previamente à colheita dos povoamentos de eucalipto em alto fuste, no ano de 2017, foram realizadas amostragens de solo para a caracterização física e química. As amostras foram coletadas de forma estratificada, dentro de cada um dos blocos da área experimental onde, posteriormente, foram aplicados os tratamentos. Para tanto, cinco subamostras simples de solo foram coletadas nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. As subamostras foram homogeneizadas, constituindo uma amostra composta por profundidade, por parcela. As amostras foram secas a 45° C, peneiradas (2 mm) e submetidas a análises químicas (Tabela 1). Após a colheita do ciclo anterior, amostras compostas de cada componente (folhas, galhos, casca e litter) dos resíduos remanescentes também foram coletadas, secas em estufa de circulação forçada de ar a 70° C até massa constante para determinação dos teores de macronutrientes (EMBRAPA, 2011) (Tabela 2).

Tabela 1 - Atributos químicos e teor de argila de amostras do solo coletadas nas profundidades de 0- 0,10; 0,10- 0,20 e 0,20- 0,40 m na área experimental localizada em Peçanha- MG

Prof.	pH ^a	P ^b	K ^b	Na	Ca ^c	Mg ^c	H+ Al ^d	C ^e	T ^f	V ^g
m		- mg dm ⁻³ -		----- cmol _c dm ⁻³ -----			dag kg ¹	cmol _c dm ³	%	
0 - 0,10	4,54	2,76	36,68	0,02	2,04	0,38	8,98	3,03	12,07	17,66
0,10 - 0,20	4,36	2,08	21,54	0,01	0,41	0,13	8,81	2,04	7,84	5,97
0,20 - 0,40	4,62	1,04	10,19	0,00	0,13	0,06	7,16	1,30	6,33	2,47

^a pH em água (relação 1: 2.5). ^b Extrator Mehlich-1. ^c CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹. ^d Oxidação via úmida. ^e Extrator Ca (CH₃CO₂)₂ 0.5 mol L⁻¹. ^f CTC potencial. ^g Saturação de bases. ^h Método da pipeta (EMBRAPA, 2011).

Tabela 2 – Caracterização química e quantidade de resíduos de colheita usados no experimento

Nutriente	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn	B	RC
	----- g kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----				Mg ha ⁻¹
Litter	5,63	0,27	1,65	9,81	1,05	0,47	5,32	221,37	15,39	17,48	3,51
Folhas	18,40	1,06	9,28	5,45	1,62	0,42	6,82	205,83	13,21	32,88	5,15
Casca	3,60	0,31	3,23	18,88	1,95	0,15	3,65	110,19	8,87	13,56	33,85
Galhos	3,27	0,56	4,73	7,65	1,05	0,10	4,46	165,65	8,70	9,36	11,59

O preparo do solo para plantio das mudas consistiu de subsolagem a 0,6 m de profundidade na linha de plantio. Os resíduos de colheita do plantio anterior foram mantidos em campo e distribuídos de forma homogênea nas parcelas de acordo com cada tratamento. Esses resíduos foram tratados de acordo com seus respectivos tratamentos, da seguinte forma:

- 1) todos os resíduos vegetais deixados na área (Ra);
- 2) todos os resíduos vegetais deixados na área, exceto cascas (R-C);
- 3) remoção de todos os resíduos vegetais, exceto serapilheira (Ser);
- 4) remoção de todos os resíduos vegetais (Teste).

Nas sub-parcelas, os tratamentos consistiram em níveis de fertilizantes e corretivos, conforme descrição a seguir: 1) não houve aplicação de fertilizantes e corretivos; 2) adubação de reposição e aplicação de 1750 kg/ha de calcário (40 % CaO / 11 % MgO) em faixas contínuas (0,5 m de largura) ao longo da linha de plantio e 3) aplicação da adubação de reposição com uma dose adicional com 50 % a mais de fertilizante e aplicação de 1750 kg/ha de calcário (40 % CaO / 11 % MgO) em faixas contínuas (0,5 m de largura) ao longo da linha de plantio .

Na subsolagem foram aplicados 400 kg/ha de NPK 06-10-29 + 0,8% B + 0,5% Zn + 0,5% Cu (pré-plantio). No plantio, a adubação de reposição consistiu em 100 g por planta de NPK 06-30-06 + 0,25% B + 1,0% Zn + 1,0% Cu. O fertilizante foi aplicado em duas covas laterais a 0,15 m das mudas. Uma segunda fertilização (12 meses após o plantio) foi realizada nos tratamentos com AR e AP consistindo em 400 kg/ha de NPK 06-10-29 + 0,8% B + 0,5% Zn + 0,5% Cu.

2.2 AVALIAÇÃO DO EXPERIMENTO

2.2.1 Amostragem e caracterização química do solo

Amostras de solo foram coletadas aos 32 meses de condução do experimento (fevereiro/2020) em todas as parcelas nas profundidades 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Para tanto, em cada parcela foram coletadas cinco amostras simples nas linhas e nas entrelinhas de plantio para constituição de uma amostra composta.

As amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de malha 2 mm e submetidas a análises químicas. Foram determinados pH em água, acidez potencial (H+Al) em acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0, acidez trocável (Al³⁺), Ca e Mg em KCl 1 mol L⁻¹. Para a determinação de P, K, Zn, Cu, Fe e Mn a extração foi realizada em Mehlich-1 (Defelipo e Ribeiro, 1997), sendo o P determinado por colorimetria (Braga e Defelipo, 1974), K por fotometria de chama e os micronutrientes por espectrometria de absorção atômica (AOAC, 1975). A extração do B foi realizada em água quente, com determinação por colorimetria (método da Azometina-H) e o S com extração por Ca(H₂PO₄)₂ 500 mg L⁻¹, em HOAc 2 mol L⁻¹ e quantificação por turbidimetria (Alvarez V. et al., 2001).

2.2.2 Crescimento das árvores

Aos 12, 24 e 30 meses após a instalação dos tratamentos, foram realizadas medições do diâmetro à altura de 1,30 m (DAP) e altura total (AT) de todas as árvores para obtenção da curva de produção volumétrica.

Com os dados de volume de tronco e volume por hectare ao longo dos três anos de idade, ajustaram-se modelos de regressão não linear para a obtenção da curva de produção da floresta. Os modelos aos quais os dados de volume de tronco melhor se ajustaram foram Richards (Eq. 1) e Gompertz (Eq. 2):

$$\hat{y} = \frac{a}{(1+e^{(b-cx)})^{\frac{1}{d}}} \quad (1)$$

$$\hat{y} = ae^{-e^{(b-cx)}} \quad (2)$$

Em que: \hat{y} : volume estimado; a, b, c e d : coeficientes gerados pelo modelo estudado; x : idade em meses.

Para a escolha de um dos modelos, as equações de ajuste foram testadas usando os seguintes parâmetros: coeficiente de correlação linear entre produções estimadas e observadas ($r_{y\hat{y}}$ - Eq. 3), raiz quadrada do erro quadrático médio (RQUEM- Eq. 4), desvio sistemático (BIAS- Eq. 5) e erro relativo percentual (ER % médio- Eq. 6):

$$r_{y\hat{y}} = \frac{\text{cov}(V_o - V_e)}{\sqrt{s^2(V_o)s^2(V_e)}} \quad (3)$$

$$RQUEM = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_e - V_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$BIAS = \frac{\sum_i^n (V_e - V_o)}{n} \quad (5)$$

$$ER \% = 1 - \frac{\sum_i^n (V_e - V_o)^2}{\sum_i^n (V_o - V_e)^2} \quad (6)$$

Em que: V_o : volume observado; V_e : volume estimado; n : número de observações; cov : covariância; s^2 : variância.

A partir dos dados do inventário florestal do terceiro ano, uma árvore média em cada parcela foi selecionada e cubada rigorosamente pelo método de Smalian (Scolforo e Thiersch, 2004) para determinação do volume de madeira e da biomassa dos componentes da parte aérea da árvore.

Os componentes - folhas, galhos, casca e lenho, foram separados e pesados em campo. Foi retirada uma sub- amostra de cada componente e essa amostra foi seca em estufa de circulação forçada de ar a 70° C até peso constante para determinação da massa da matéria seca (Johnson e Ulrich, 1959) e teores de macronutrientes (EMBRAPA, 2011). A biomassa de tronco do povoamento foi estimada por meio da equação proposta por Schumacher e Hall (1933) utilizando como variáveis independentes o diâmetro a altura do peito (DAP) e a altura total (H) das árvores. A biomassa dos demais componentes (folhas, galhos e casca) foi obtida multiplicando os teores de nutrientes de cada componente pela sua massa e extrapolada pelo número total de árvores por hectare.

2.2.3 Conteúdo e eficiência de uso dos nutrientes

A partir da análise química de cada componente da parte aérea, foi calculado o conteúdo de nutrientes nas plantas multiplicando-se o teor obtido em cada compartimento pelo peso de matéria seca do componente em questão. A eficiência de utilização dos nutrientes absorvidos

pelas plantas foi obtida por meio do coeficiente de utilização biológica (CUB; Eq. 7), conforme segue (Barros et al., 1986):

$$cubNu_C = mMS_C / cNu_C \quad (7)$$

Em que: $cubNu_C$ (kg kg⁻¹): coeficiente de utilização biológica do nutriente no componente da planta; mMS_C (kg ha⁻¹): massa da matéria seca do componente e cNu_C (kg ha⁻¹ ou g ha⁻¹): conteúdo do nutriente no componente.

2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para testar os pressupostos da análise de variância, os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Barlett. Quando necessário, foi realizada a transformação logarítmica dos dados para cumprir as suposições paramétricas. Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Duncan ($p < 0,1$). Todas as análises estatísticas foram realizadas com o software estatístico R versão 4.0.0 (R Core 2020).

3. RESULTADOS

3.1 Fertilidade do solo

Os teores de K, Mg e P foram influenciados pela manutenção dos RC e pela fertilização, enquanto os valores de pH e acidez potencial foram afetados pela fertilização aos 32 meses após a instalação dos tratamentos (Tabela 3).

Os tratamentos com RC (R+C e R-C) conduziram a maiores valores de K no tratamento com AR nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Já a fertilização reduziu a acidez do solo, refletida pelos menores teores de H+Al e maiores valores de pH nos tratamentos AR e AP em

comparação aos tratamentos que não receberam fertilização (SA) (Tabela 3). A redução da acidez do solo nesses tratamentos pode, também, ser resultante da calagem aplicada.

Tabela 3- Médias dos teores de matéria orgânica, acidez e teor de macronutrientes (P, K, Ca, Mg) no solo nos tratamentos nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem nos níveis de resíduos e minúscula não diferem nos níveis de adubação pelo teste Duncan ($p > 0,10$)

Trat. ¹		R+C	R-C	Ser	Test	R+C	R-C	Ser	Test	R+C	R-C	Ser	Test
Prof. ²		----- 0- 0,10 m -----				----- 0,10- 0,20 m -----				----- 0,20- 0,40 m-----			
COT dag kg ⁻¹	SA	6,61 ns	6,30 ns	6,20 ns	6,30 ns	4,81 Aa	4,54 Aa	4,44 Aa	4,86 Aa	3,16 Aa	3,22 Aa	3,10 Aa	3,30 Ab
	AR	7,25 ns	5,64 ns	5,75 ns	6,76 ns	4,23Ba	4,48Ba	3,86 Ba	5,95 Aa	3,40 Ba	3,09 Ba	2,86 Ba	4,23 Aa
	AP	6,37 ns	6,51 ns	6,13 ns	7,17 ns	4,18 Aa	5,14 Aa	4,74 Aa	5,31 Aa	2,94 Aa	3,52 Aa	3,47 Aa	3,37 Ab
pH	SA	4,00 Ab	4,18 Ab	4,27 Aa	4,16 Ab	4,27 ns	4,09 ns	4,38 ns	3,98 ns	4,41 ns	4,33 ns	4,29 ns	4,11 ns
	AR	4,55 Aa	4,89 Aa	4,17 Aa	4,40 Ab	4,57 ns	4,53 ns	4,40 ns	4,50 ns	4,38 ns	4,24 ns	4,59 ns	4,49 ns
	AP	4,93 Aa	4,32 Ab	4,62 Aa	4,95 Aa	4,59 ns	4,34 ns	4,32 ns	4,42 ns	4,30 ns	4,33 ns	4,24 ns	4,56 ns
H + Al cmol _c dm ⁻³	SA	14,01 Aa	13,45 Aa	10,53 Aa	13,34 Aa	11,20 ns	9,77 ns	10,82 ns	10,26 ns	7,78 ABa	9,64 Aa	6,80 Ba	8,39ABa
	AR	9,41 Ab	10,22Aab	11,20 Aa	10,18Aab	9,93 ns	9,93 ns	9,53 ns	9,24 ns	7,00 Ba	7,13 Bb	6,77 Ba	9,46 Aa
	AP	7,73 Ab	8,82 Ab	10,67 Aa	9,23 Ab	9,55 ns	9,74 ns	9,72 ns	9,46 ns	5,95 Ba	6,90ABb	6,97ABa	8,52 Aa
Ca cmol _c dm ⁻³	SA	0,23 Aa	0,28 Ab	0,98 Aa	0,17 Ab	0,14 ns	0,10 ns	0,28 ns	0,07 ns	0,08 Aa	0,11 Aa	0,10 Aa	0,04Ab
	AR	1,97 Aa	2,03 Aab	0,33 Aa	1,61 Aab	0,56 ns	0,53 ns	0,13 ns	0,90 ns	0,49 ABa	0,13ABa	0,09 Ba	0,58 Aa
	AP	0,70 Aa	3,02 Aa	1,49 Aa	2,85 Aa	1,18 ns	0,72 ns	0,52 ns	0,76 ns	0,47 Aa	0,38 Aa	0,22 Aa	0,35 Aab
Mg cmol _c dm ⁻³	SA	0,20 ns	0,13 ns	0,23 ns	0,09 ns	0,14 ns	0,09 ns	0,13 ns	0,07 ns	0,09 Ab	0,07 Aa	0,06 Aa	0,05 Ab
	AR	0,56 ns	0,51 ns	0,16 ns	0,28 ns	0,24 ns	0,20 ns	0,08 ns	0,22 ns	0,20 Aa	0,09ABa	0,06 Ba	0,16ABa
	AP	0,71 ns	1,03 ns	0,38 ns	0,59 ns	0,38 ns	0,22 ns	0,19 ns	0,22 ns	0,19 Aab	0,12 Aa	0,09 Aa	0,11 Aab
K mg dm ⁻³	SA	0,06 Aa	0,06 Ab	0,07 Aa	0,05 Aa	0,06 Aa	0,05 Aa	0,05 Aa	0,05 Aa	0,06 ns	0,05 ns	0,05 ns	0,05 ns
	AR	0,09 Aa	0,07 Aba	0,06ABa	0,05 Ba	0,07 Aa	0,06Ba	0,04 Ba	0,05 Ba	0,07 ns	0,06 ns	0,04 ns	0,05 ns
	AP	0,06 Aa	0,06 Ab	0,06 Aa	0,05 Aa	0,06 Aa	0,06 Aa	0,06 Aa	0,05 Aa	0,06 ns	0,06 ns	0,06 ns	0,05 ns
P mg dm ⁻³	SA	4,81 Ab	4,29 Aa	4,81 Aa	4,20 Aa	4,39 ns	3,46 ns	3,62 ns	3,40 ns	1,32 Ab	1,67 Aa	1,32 Aa	1,32 Ab
	AR	5,65 Aa	3,86 Ba	3,52 Ba	3,7 Ba	3,98 ns	2,76 ns	2,50 ns	3,60 ns	2,10 Aa	1,53ABa	0,99 B	2,11 Aab
	AP	4,97 Aab	3,77 Aa	4,30 Aa	5,24 Aa	3,47 ns	3,94 ns	3,09 ns	4,51 ns	1,29 Ab	1,95 Aa	1,72 Aa	1,63 Aa

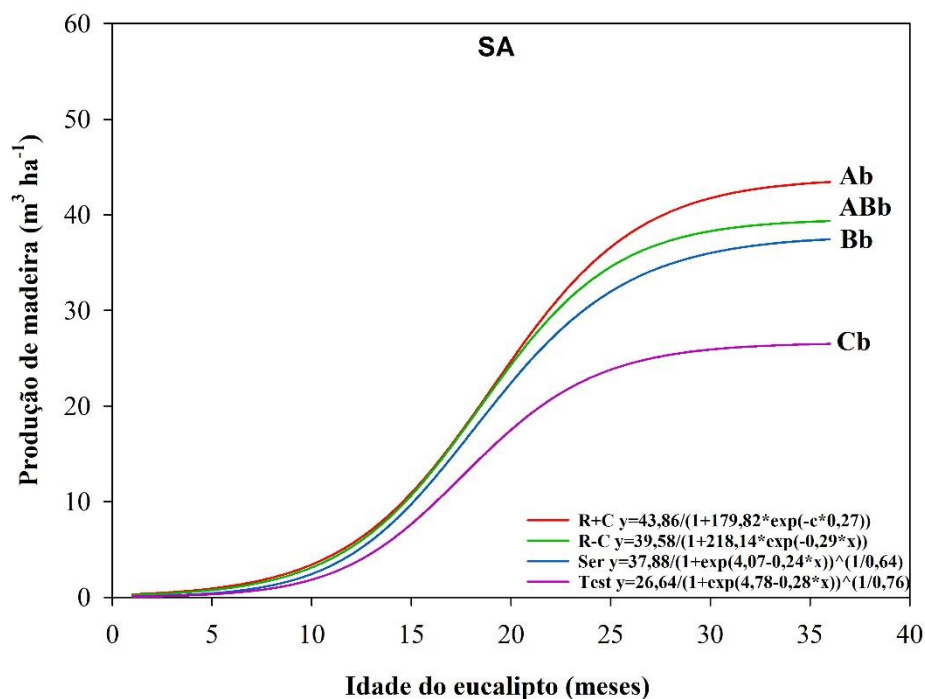
Todos os resíduos vegetais mantidos na área (R+C); todos os resíduos deixados na área com exceção da casca (R-C); remoção de todos os resíduos vegetais com exceção da serapilheira (Ser); remoção de todos os resíduos vegetais (Test); nos tratamentos não adubados (SA), com adubação de reposição (AR) e adubação potencial (AP).

3.2 Crescimento e produtividade do eucalipto e partição de biomassa

3.2.1 Dinâmica do crescimento da segunda rotação de cultivo

As curvas de produção de volume de tronco (casca + lenho) do eucalipto indicam efeito dos RC, em que as árvores dos tratamentos com maior aporte de resíduos (R+C e R-C) produziram mais (46,4 e 39,3 m³ ha⁻¹) do que as dos tratamentos Ser e Test (37,4 e 26,5 m³ ha⁻¹) Figura 1A.

O efeito da fertilização também foi positivo na produtividade das árvores em todos os tratamentos, ocorrendo incrementos de 21, 29 e 26 e 54 % em volume de tronco no R+C, R-C, Ser e Test, respectivamente, quando aplicada a adubação de reposição (Figura 1B). No tratamento Test com AR e AP (Figuras 1B e 1C), a produção de tronco foi 50 % maior a partir dos 25 meses quando comparado ao SA (Figura 1A).



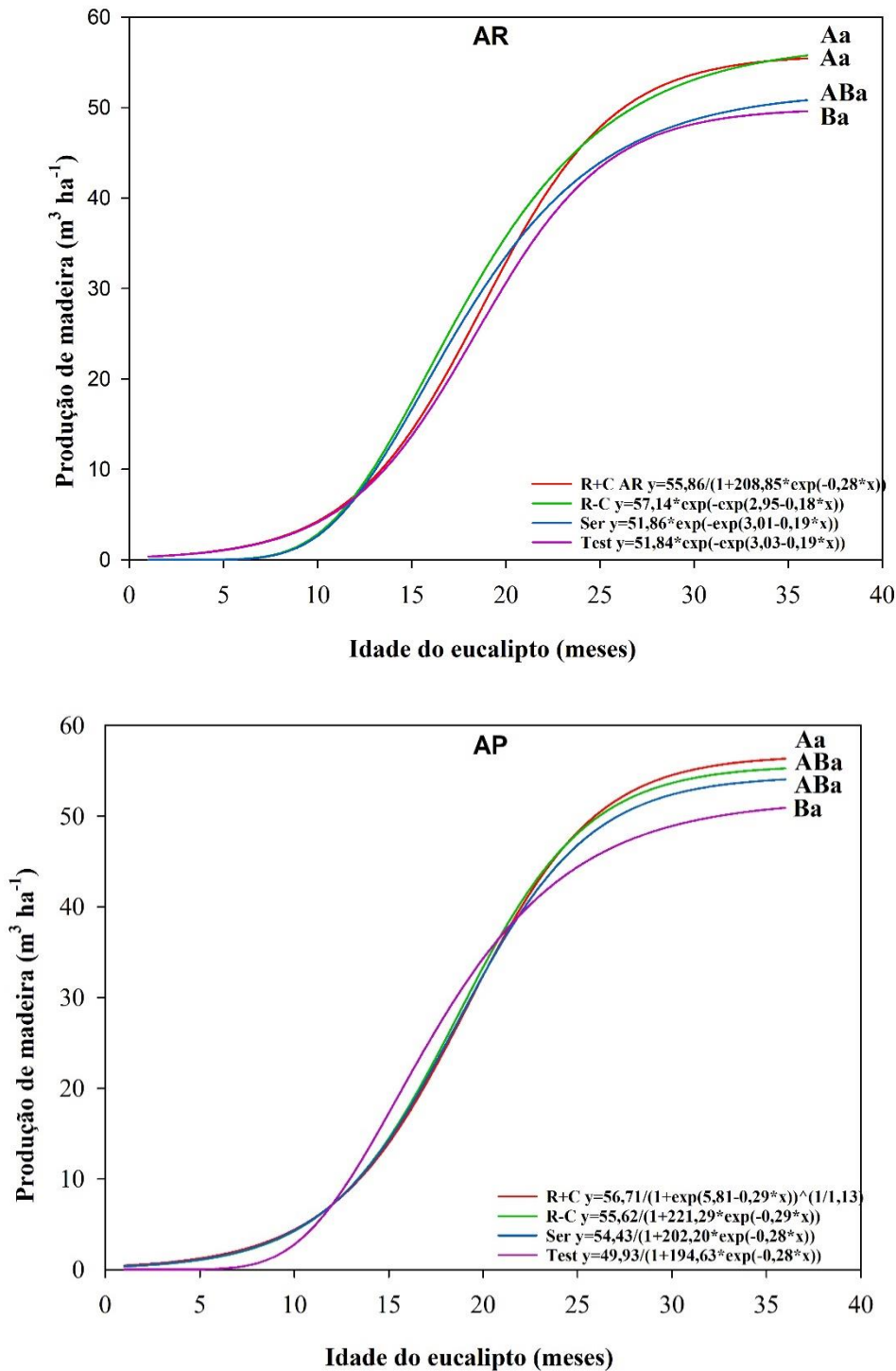


Figura 1- Curva de produção de lenho do eucalipto nos tratamentos com todos os resíduos vegetais mantidos na área (R+C); todos os resíduos deixados na área com exceção da casca (R-C); remoção de todos os resíduos vegetais com exceção da serapilheira (Ser); remoção de todos os resíduos vegetais (Test) sob distintos regimes de fertilização (SA: sem adubação; AR: adubação de reposição; AP: adubação potencial) para o período de 32 meses. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem nos níveis de resíduos e minúscula não diferem nos níveis de adubação pelo teste Duncan ($p > 0,10$).

3.2.2 Produtividade do eucalipto

Os RC influenciaram os volumes com e sem casca da árvore média em todos os níveis de adubação, em que os tratamentos com aporte de resíduos (R+C, R-C e Ser), apresentaram maiores volumes de tronco, lenho e casca que o Test aos 32 meses de avaliação (Figura 2).

Onde a adubação foi aplicada (AR e AP), houve efeito positivo da presença dos resíduos se comparado ao tratamento controle (Test), indicando a ocorrência da ação conjugada dos dois fatores (resíduos e adubação), refletindo em maior crescimento das árvores. Além disso, houve efeito da fertilização sobre os volumes com e sem casca (Figura 2). As árvores referentes aos tratamentos que receberam a fertilização (AP e AR) apresentaram maiores volumes que as dos tratamentos onde a fertilização foi omitida (SA) em todos os níveis de resíduos.

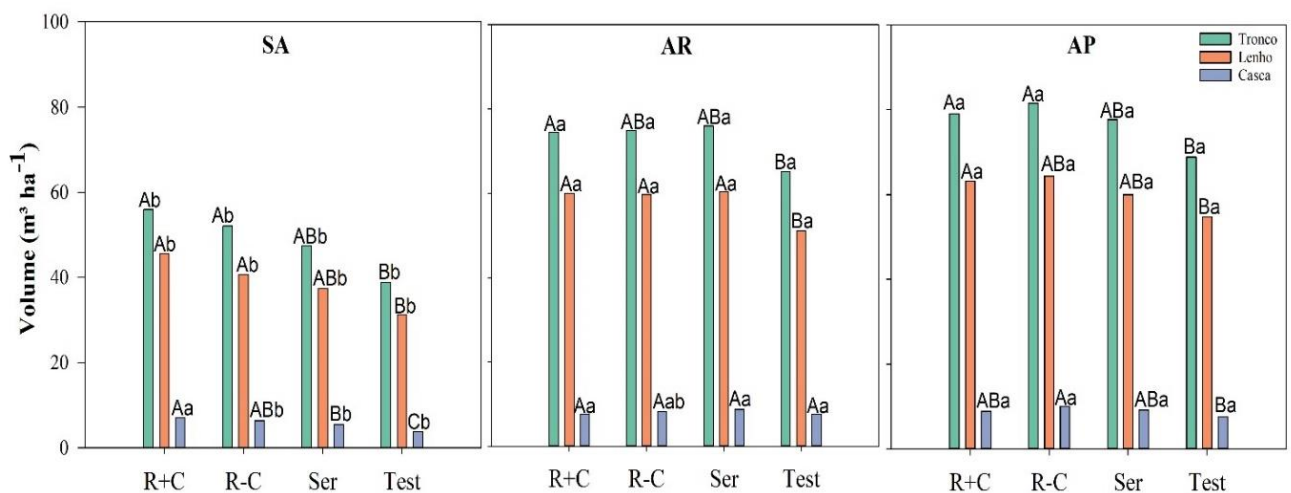


Figura 2- Volume por hectare dos componentes tronco, lenho e casca do eucalipto nos tratamentos com todos os resíduos vegetais mantidos na área (R+C); todos os resíduos deixados na área com exceção da casca (R-C); remoção de todos os resíduos vegetais com exceção da serapilheira (Ser); remoção de todos os resíduos vegetais (Test); nos tratamentos não adubados (SA), com adubação de reposição (AR) e adubação potencial (AP). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem nos níveis de resíduos e minúscula não diferem nos níveis de adubação pelo teste Duncan ($p > 0,10$).

3.2.3 Produção de biomassa da parte aérea e conteúdo de nutrientes

Houve efeito dos RC na produção total de matéria seca da parte aérea. Da mesma forma que para a variável volume por hectare, os tratamentos que envolviam resíduos produziram mais matéria seca dos componentes folhas, galhos, lenho e casca (Figura 3).

Houve também o efeito da fertilização, visto que as árvores que receberam adubação (AR e AP) produziram maior biomassa do que aquelas dos tratamentos não adubados (SA), na ordem de 11 %, 49 %, 53 % e 55 % a mais no R+C, R-C, Ser e Test, respectivamente. (Figura 3).

Na distribuição de massa entre os componentes (folhas, galhos, casca e lenho) das árvores, a maior alocação foi observada no lenho, seguido pelos galhos, casca e folhas (Figura 3).

Aos 32 meses de idade, onde a adubação não foi aplicada (SA), árvores plantadas em ambiente com R+C produziram 35,3 Mg ha⁻¹ de biomassa. Em comparação com o R+C, a biomassa acumulada nos tratamentos R-C, Ser e Test foi inferior em 11 %, 13 % e 28 %, respectivamente (Figura 3).

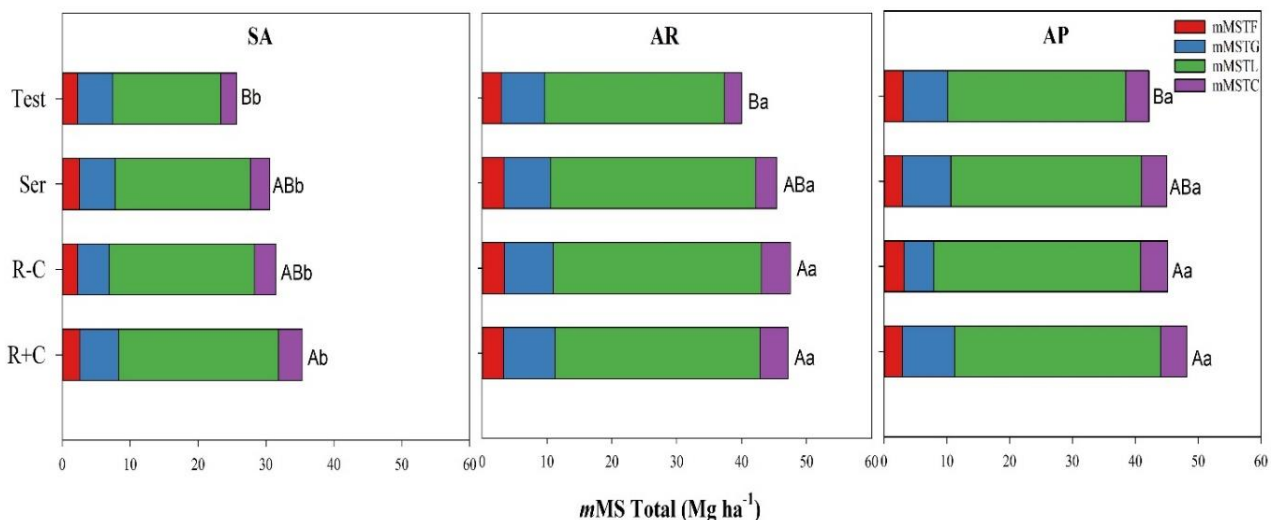


Figura 3- Massa seca dos componentes da biomassa do eucalipto nos tratamentos com todos os resíduos vegetais mantidos na área (R+C); todos os resíduos deixados na área com exceção da casca (R-C); remoção de todos os resíduos vegetais com exceção da serapilheira (Ser); remoção de todos os resíduos vegetais (Test); nos tratamentos não adubados (SA), com adubação de reposição (AR) e adubação potencial (AP). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem nos níveis de resíduos e minúscula não diferem nos níveis de adubação pelo teste Duncan ($p > 0,10$).

Houve efeito dos RC no conteúdo total de K, Ca e Mg das árvores (Figuras 4 e 5). Para esses nutrientes, o tratamento sem nenhum tipo de resíduo (Test) apresentou menores médias onde foi aplicada a AR.

O efeito da fertilização foi verificado para todos os nutrientes com exceção do Mg em todos os níveis de RC, em que as médias dos tratamentos adubados (AR e AP) foram superiores às dos tratamentos onde a adubação foi omitida (SA) (Figuras 4 e 5).

Em todos os tratamentos, para o N e P, os maiores teores foram verificados nas folhas. Para K e S, o lenho foi o compartimento que mais acumulou esses nutrientes e para Ca e Mg, foi a casca (Figuras 4 e 5).

A ordem de acumulação de nutrientes nas árvores foi: $Ca > K > N > Mg > S > P$ em todos os níveis de fertilização.

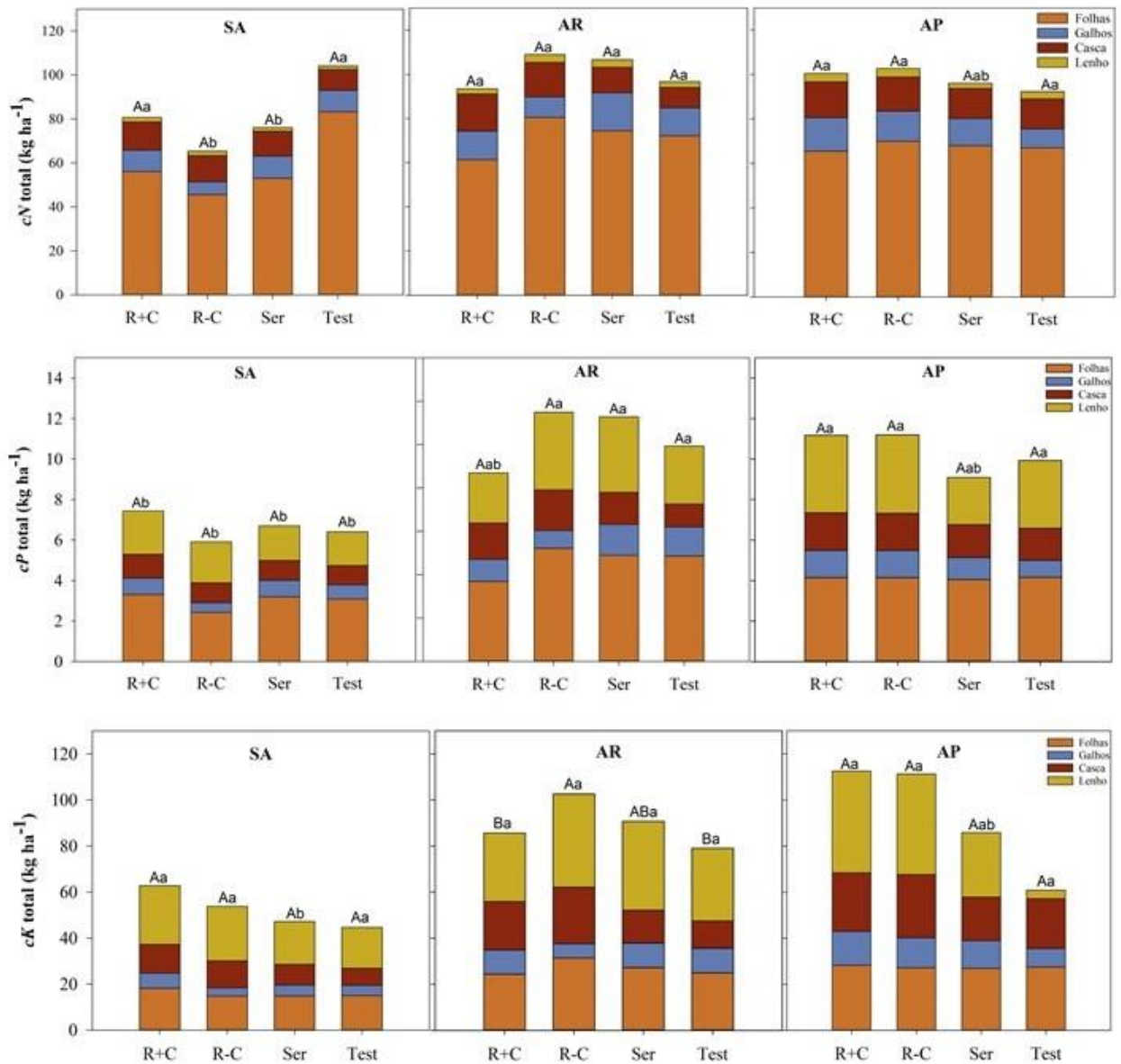


Figura 4- Conteúdo de N, P e K nos componentes da biomassa do eucalipto nos tratamentos com todos os resíduos vegetais mantidos na área (R+C); todos os resíduos deixados na área com exceção da casca (R-C); remoção de todos os resíduos vegetais com exceção da serapilheira (Ser); remoção de todos os resíduos vegetais (Test); nos tratamentos não adubados (SA), com adubação de reposição (AR) e adubação potencial (AP). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem nos níveis de resíduos e minúscula não diferem nos níveis de adubação pelo teste Duncan ($p > 0,10$).

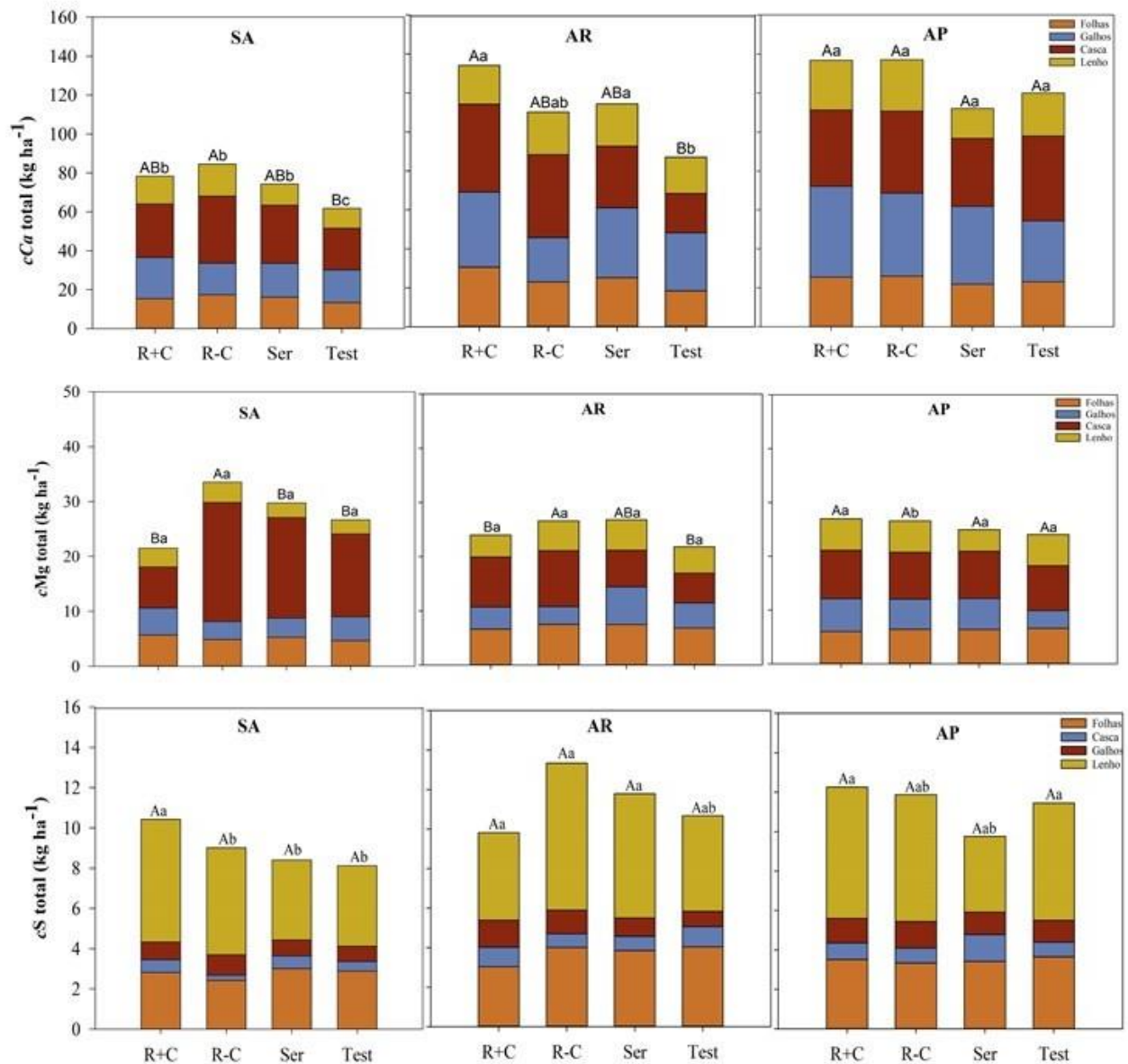


Figura 5- Conteúdo de Ca, Mg e S nos componentes da biomassa do eucalipto nos tratamentos com todos os resíduos vegetais mantidos na área (R+C); todos os resíduos deixados na área com exceção da casca (R-C); remoção de todos os resíduos vegetais com exceção da serapilheira (Ser); remoção de todos os resíduos vegetais (Test); nos tratamentos não adubados (SA), com adubação de reposição (AR) e adubação potencial (AP). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem nos níveis de resíduos e minúscula não diferem nos níveis de adubação pelo teste Duncan ($p > 0,10$).

3.2.4 Eficiência de uso de nutrientes

Houve efeito dos tratamentos nos coeficientes de utilização biológica (CUB) de N, K, Ca e Mg (Figura 6), sendo os valores dos CUB's maiores nos tratamentos onde a adubação não foi aplicada (SA) (Figura 6).

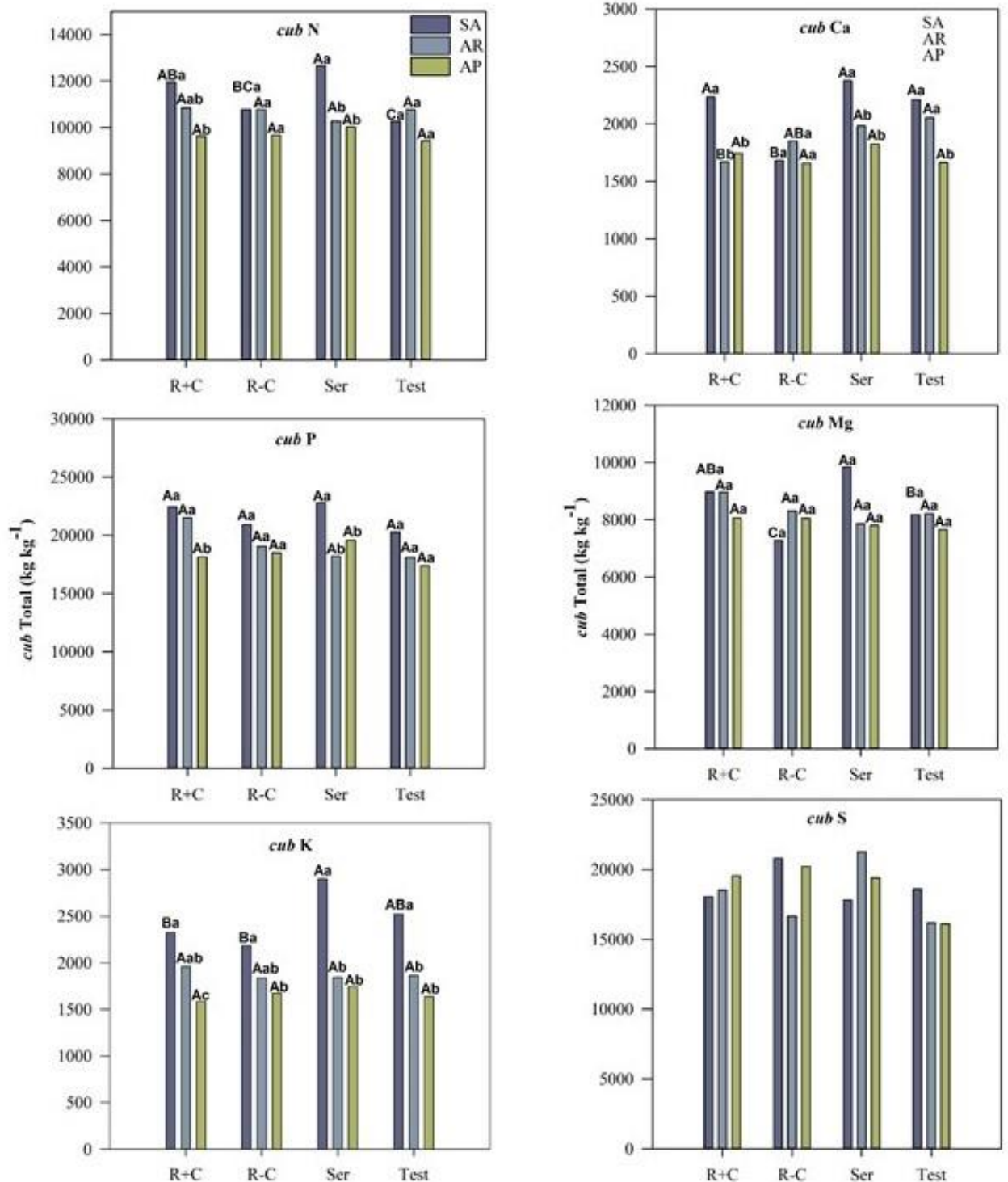


Figura 6- Coeficientes de utilização biológica (CUB) dos macronutrientes nos tratamentos com todos os resíduos vegetais mantidos na área (R+C); todos os resíduos deixados na área com exceção da casca (R-C); remoção de todos os resíduos vegetais com exceção da serapilheira (Ser); remoção de todos os resíduos vegetais (Test); nos tratamentos não adubados (SA), com adubação de reposição (AR) e adubação potencial (AP). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem nos níveis de resíduos e minúscula não diferem nos níveis de adubação pelo teste Duncan ($p > 0,10$). A ausência de letras sobre as médias indica não diferença pelo teste F ($p > 0,10$).

Para o K, Ca e Mg, os tratamentos com menor aporte de resíduos (Ser e Test) apresentaram maiores CUB no SA. O CUB de P foi influenciado apenas pela fertilização, sendo ele mais elevado quando se omitiu a adubação (SA) (Figura 6).

4. DISCUSSÃO

4.1 Efeito dos tratamentos nas propriedades químicas do solo

Aumentos nos teores de nutrientes resultantes da manutenção dos RC no solo são comumente encontrados em solos de regiões tropicais (Rocha et al., 2016; Laclau et al., 2010; Mendham et al., 2003; Kumaraswamy et al., 2014). Contudo, os resultados deste trabalho não nos mostraram grandes diferenças nos teores dos macronutrientes no solo sob os diferentes níveis de RC, onde diferenças foram verificadas apenas nos teores de K e Mg do solo (Tabela 3). Trabalhos como os de Du Toit (2008); Nambiar e Harwood (2014); Laclau et al. (2010); Mendham et al. (2014); Huang et al. (2013); Kumaraswamy et al. (2014) evidenciam resultados semelhantes, em que mesmo em situações em que se esperava intensa alteração nos teores de nutrientes do solo como resultado da exportação de nutrientes pela colheita, essas alterações não foram percebidas.

Esperávamos que nos tratamentos que envolviam os RC, a mineralização dos resíduos e liberação dos nutrientes ocorreria de forma mais intensa. Contudo, o tempo de coleta do solo para a realização das análises deste estudo (32 meses após a instalação dos tratamentos) pode ter sido insuficiente para captar as alterações nos teores de nutrientes. Os resultados verificados por Ferreira et al. (2016), também estudando a fertilidade do solo sob manejos de resíduos de colheita, corroboram essa hipótese e descrevem que o tempo de meia-vida para disponibilização de macronutrientes foi de 2,92 anos para o cálcio, seguido pelo S (2,75 anos), N (2,35 anos), Mg (1,56 anos), P (1,00 ano) e K (0,27 ano). Além disso, em solos de baixa fertilidade natural, os nutrientes mineralizados podem ser absorvidos rapidamente pelas árvores

após sua liberação dos RC e nem mesmo chegar ao solo, tendo em vista a grande densidade radicular na interface resíduos-solo.

O conteúdo de nutrientes na biomassa indica que houve grande liberação de nutrientes (Figuras 4 e 5), mas estes não foram detectados no solo (Tabela 3). Rocha et al. (2018) afirmam que o manejo dos RC pode afetar o estoque de nutrientes de solos com baixa fertilidade natural somente a longo prazo, sugerindo que o balanço nutricional deva ser estudado ao longo de diferentes rotações de cultivo. Mendham et al. (2014), em estudo semelhante, não verificaram efeitos dos RC na fertilidade do solo após a manutenção dos resíduos do plantio anterior e afirmam ser necessária mais de uma rotação com a manutenção contínua de RC para alterações significativas no teor de nutrientes do solo. Zerpa et al. (2010) também não encontraram nenhum efeito significativo da manutenção de RC nos teores de nutrientes no solo após 10 anos de cultivo com *Pinus taeda*.

4.2 Influência dos tratamentos na produtividade, produção de biomassa e conteúdo de nutrientes do eucalipto

Nos tratamentos sem nenhuma suplementação de nutrientes via fertilização mineral (SA), o crescimento das árvores foi significativamente menor (Figuras 1 e 2). Em SA (Figura 1A), houve o efeito dos RC, que quando foram mantidos (R+C, R-C e Ser), contribuíram para a maior produção de lenho em comparação com os tratamentos onde os resíduos foram retirados (Test). Esses resultados indicam que na ausência de suplementação mineral, os RC foram eficientes, mas não suficientes, em fornecer nutrientes para as plantas, gerando ganhos em produtividade de até 57 % ao final do terceiro ano (32 meses). Além disso, mesmo onde a adubação foi aplicada (AR e AP), a produtividade foi maior na presença dos resíduos florestais, evidenciando o efeito combinado positivo desses dois fatores.

Estudos recentes (Achat et al., 2015; Rocha et al., 2016; Rocha et al., 2018 e São José et al., 2020) apontam aumentos de produtividade na ordem de até 62 % nos tratamentos com

máximo aporte de RC, evidenciando o importante papel da manutenção dos mesmos no crescimento inicial do eucalipto. Soares et al. (2002), comparando tratamentos com diferentes níveis de RC do eucalipto, verificaram crescimento inicial mais acelerado quando todos os resíduos foram mantidos na área dos talhões.

O mecanismo responsável pelo aumento da produtividade de florestas em decorrência da presença dos RC é a redução da exportação de nutrientes da área de cultivo (Santana et al., 2008; Paes et al., 2013; Rocha et al., 2016, 2018). Com a remoção dos resíduos, a exportação de nutrientes pode ser até 5 vezes maior em relação a áreas onde os RC foram mantidos dependendo do nutriente e do sistema de colheita adotado (Achat et al., 2015; Hernandez et al., 2009). Além disso, a manutenção dos resíduos na superfície do solo influencia a disponibilidade de água (Mendham et al., 2011), a quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo, e melhora as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Nambiar e Harwood, 2014; Mathers et al., 2003).

Onde a fertilização foi aplicada (AR e AP), o crescimento das árvores e a produtividade foram semelhantes, independentemente da quantidade de RC deixados na área (Figuras 1 e 2). Esse resultado indica que a suplementação nutricional baseada na reposição de nutrientes promoveu a maior absorção de nutrientes pelas árvores (Cardoso, 2020). A análise conjunta desses resultados permite inferir que a exportação de nutrientes pela colheita florestal foi compensada pela aplicação de fertilizantes, implicando nenhuma perda de produtividade. Sendo assim, a adubação adotada foi suficiente para suprir a demanda da floresta.

O efeito da fertilização também foi verificado na biomassa seca dos componentes aéreos do eucalipto (Figura 3) e no conteúdo de nutrientes na biomassa desses componentes (Figuras 4 e 5). Nesses tratamentos, onde a adubação de reposição (AR) foi aplicada, houveram incrementos de até 55% de massa quando comparado ao tratamento não adubado (SA) (Figura 3). Resultado semelhante foi encontrado em relação ao conteúdo de nutrientes, em que para

todos os nutrientes estudados com exceção do Mg, as médias dos tratamentos adubados (AR e AP) foram maiores que as médias dos tratamentos não adubados, independentemente do nível de RC adotado (Figuras 4 e 5). Esse resultado é esperado, uma vez que a maior disponibilidade de nutrientes no solo condiciona a maior absorção e produção de biomassa pelas plantas (Menegale et al., 2016).

Nesse sentido, os resultados deste trabalho suportam que a associação da adubação com a manutenção de resíduos de colheita pode resultar em ganhos adicionais de produtividade em florestas de eucalipto, e que a fertilização florestal se torna importante, sobretudo, para manutenção da produtividade florestal a longo prazo (Barros, 2021).

4.3 Coeficiente de utilização biológica e índice de eficiência de utilização de nutrientes do eucalipto com manutenção de resíduos da colheita e fertilização mineral

Os resultados indicam que as plantas que não receberam adubação (SA) foram mais eficientes na conversão dos nutrientes absorvidos N, P, K, Ca e Mg em biomassa de lenho (Figura 6). Já as plantas que receberam AR e AP apresentaram menores CUB's para os mesmos nutrientes. Isto significa que, comparativamente às demais fertilizações, as plantas em SA requererão menores doses desses nutrientes para uma dada produtividade e, após a colheita, a remoção do lenho exportará a menor quantidade desses nutrientes do sítio florestal (Cardoso, 2020). Contudo, como a produção foi inferior, pode-se inferir que a deficiência nutricional levou ao maior coeficiente de utilização.

Os resultados de IEN seguiram essa mesma tendência, onde menor disponibilidade de nutrientes proporcionou maior eficiência de uso dos mesmos (Tabela 5). Esses resultados estão alinhados a observações de trabalhos clássicos da área florestal, que indicam maior eficiência de uso de nutrientes em condições de menor disponibilidade para as plantas (Barros et al., 1986; Santana et al., 2000). O estudo realizado por Souza (2015) corrobora os deste trabalho e

evidencia que no estágio inicial do desenvolvimento de florestas de eucalipto, as plantas são altamente eficientes na utilização de nutrientes por meio dos ciclos biogeoquímicos.

Nesse sentido, os dados quantitativos sobre IEN fornecidos neste trabalho, podem ajudar os modeladores a melhorar os modelos empíricos e mecanísticos da dinâmica dos nutrientes em plantações florestais. Com esses dados por exemplo, é possível calcular a demanda em nutrientes das árvores, bem como projetar modelos de simulação para fins práticos e científicos (Comerford et al., 2006; Valadares et al., 2020). Esses dados são de grande relevância para melhor descrever e prever melhorias quanto à ciclagem de nutrientes em sistemas florestais, bem como reduzir as incertezas relacionadas aos resultados das práticas de manejo florestal (Barros et al., 2021).

5. CONCLUSÃO

Os principais resultados deste trabalho mostram que as respostas do eucalipto à manutenção dos resíduos da colheita florestal pode ser significativamente altas em solos tropicais, mas que, mesmo nessas condições, a quantidade de fertilizante aplicada não pode ser reduzida deliberadamente. Além disso, a combinação de RC com a fertilização é uma estratégia importante para ganhos adicionais em produtividade e substituição de nutrientes de forma sustentável nesses sistemas. Os dados fornecidos podem contribuir para o entendimento da dinâmica de nutrientes em plantios florestais e subsidiar a calibração de modelos de recomendações de fertilizantes e resíduos orgânicos, aumentando a confiabilidade dos resultados de crescimento das árvores e sustentabilidade da produção florestal.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001 e pelo grupo NUTREE-

UFV. Agradecemos à equipe de tecnologia e inovação da CENIBRA- Celulose Nipo-Brasileira por todo o apoio ao longo do experimento.

REFERÊNCIAS

- ACHAT, D. L. et al. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth - A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 348, 124-141, 2015.
- ADAMCZYK, S. et al. Soil carbon and nitrogen cycling processes and composition of terpenes five years after clearcutting a norway spruce stand: Effects of logging residues. *For. Ecol. Manag.* 381, 318–326, 2016.
- ALVAREZ, V. H. V.; Novais, R. F.; Dias, L. E.; Oliveira, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim Informativo da SBCS*, 25: 27-32, 2000.
- ASSOCIATIONS OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS – AOAC. Official methods of analysis of the Associations of Official Analytical Chemists. 12. ed. Washington: D. C; 1975.
- BARROS, N. F. et al. Classificação nutricional de sítios florestais: descrição de uma metodologia. *Rev. Árvore*, 10:112-120, 1986.
- BARROS, I. B. et al. Integrating forest residue and mineral fertilization: effects on nutrient acquisition, nutrient use efficiency and growth of eucalypt plants. *Forest Ecology and Management* 496, 119461, 2021.
- BELLOTE, A.F.J.; DEDECEK, R.A.; SILVA, H.D. Nutrientes minerais, biomassa e deposição de serapilheira em plantio de Eucalyptus com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, n. 56, p. 31-41, 2008.
- BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofométrica de fósforo em extratos de solo e planta. *R. Ceres*, 21:73-85, 1974.
- COMERFORD, N.B., et al. Soil supply and nutrient demand (SSAND): a general nutrient uptake model and an example of its application to forest management. *Can. J. Soil Sci.* 86, 655–673, 2006.
- DELEPORTE, P. et al. Effects of slash and litter management practices on soil chemical properties and growth of second rotation Eucalypts in the Congo. In: Nambiar, E.K.S. Site management and productivity in tropical plantation forests., Bogor Indonésia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 2008. p.5-22.

- DU TOIT, B. Effects of site management on growth, biomass partitioning and light use efficiency in a young stand of *Eucalyptus grandis* in South Africa. *Forest Ecology and Management*, 255, 2324-2336, 2008.
- EMBRAPA, 2011. Manual de métodos de análise de solo. Embrapa, Rio de Janeiro, Brazil.
- FERREIRA, G. W. D. et al. Nutrient release from decomposing *Eucalyptus* harvest residues following simulated management practices in multiple sites in Brazil. *Forest Ecology and Management* 370, 1–11, 2016.
- FISCHER, A.; Zylbersztajn, D. O fomento florestal como alternativa de suprimento de matéria-prima na indústria brasileira de celulose. *Rev Eletrônica Adm.*;494–520, 2012.
- GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. *Rev.Bras. Ciencia do Solo* 34, 1069–1079, 2010.
- HERNANDEZ, J. et al. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 258, 92-99, 2009.
- HUANG, Z. et al. Harvest residue management effects on tree growth and ecosystem carbon in a Chinese fir plantation in subtropical China. *Plant and Soil*, 364, 303-314, 2013.
- IBÁ 2019. Anuário estatístico da indústria brasileira de árvores - ano base 2018, São Paulo.
- JOHNSON, C. M.; ULRICH, A. Analytical methods for use in plants analyses. Los Angeles: University of California, 766: 32-33, 1959.
- KUMARASWAMY, S et al. Harvest residue effects on soil organic matter, nutrients and microbial biomass in eucalypt plantations in Kerala, India. *Forest Ecology and Management*, 328, 140-149, 2014.
- LACLAU, J. P. et al. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *For. Ecol. Manage*, 259:1771-1785, 2010.
- MASULLO, L. M. et al. Relationship between forest residue management and micronutrient fertilization with eucalyptus rust severity in *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest ecology and management*, v. 475, p. 118443, 2020.
- MALINOVSKI, J.R.; CAMARGO, C.M.S.; MALINOVSKI, R.A. Sistemas. In: Machado, C.C. *Colheita florestal*. Viçosa: UFV, 2002. p. 145-164.

- MATHERS, N. J. et al. How does residue management impact soil organic matter composition and quality under *Eucalyptus globulus* plantations in Southwestern, Australia? *Forest Ecology and Management*, 179, 253-267, 2013.
- MENDHAM, D. S. et al. Residue management effects on soil carbon and nutrient contents and growth of second rotation eucalypts. *Forest Ecology and Management*, 181, 357-372, 2003.
- MENDHAM, D. S. et al. Soil water depletion and replenishment during first- and early second-rotation *Eucalyptus globulus* plantations with deep soil profiles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12): 1568-1579, 2011.
- MENDHAM, D. S. et al. Repeated harvest residue removal reduces *E. globulus* productivity in the 3rd rotation in south-western Australia. *Forest Ecology and Management*, 329, 279-286, 2014.
- MENEGALE M. L.C. et al. Effect of timber harvest intensities and fertilizer application on stocks of soil C, N, P, and S. *Forests*, 7: 319-333, 2016.
- NAMBIAR, E. K. S.; Harwood, C. E. Productivity of acacia and eucalypt plantations in Southeast Asia. 1. Bio-physical determinants of production: opportunities and challenges. *International Forestry Review*, 16, 225-248, 2014.
- OLIVEIRA, F. C. C. et al. Eucalypt harvest residue management influences microbial Community structure and soil organic matter fractions in an afforested grassland. *Soil & Tillage Research* 205 (2021) 104787.
- PAES, F. A. S. V. et al. Impacto do manejo de resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. *R. Bras. Ci. Solo*. 2013; 37:1081-1090.
- PAYN, T.; Carnus, J. M.; Freer-Smith, P.; Kimberley, M.; Kollert, W.; Liu, S.; Orazio, C.; Rodriguez, L.; Silva, L. N.; Wingfield, M. J. Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management*, v. 352, p. 57–67, 2015.
- ROCHA, J. H. T., et al. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a *Eucalyptus* plantation over two short rotations. *Forest Ecology and Management*, 379, 1-10 2016.
- ROCHA, J.H.T et al. Forest residue removal decreases soil quality and affects wood productivity even with high rates of fertilizer application. *For. Ecol. Manage.* 430, 188–195, 2019.
- SANTANA, R. C. et al. Nutrient allocation in eucalypt plantations in Brazil. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 32, 2723-2733, 2008.

- SANKARAN, K.V. et al. Impact of Site Management Practices on Growth of Eucalypt Plantations in the Monsoonal Tropics in Kerala, India. In.: NAMBIAR, E.K.S. Site management and productivity in tropical plantation forests. Bogor, Indonésia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 2008. p. 23-38.
- SANTANA RC, Barros NF, Comerford NB. Aboveground biomass, nutrient content, and use efficiency of eucalypt plantations growing in different sites in Brazil. N. Z. J. For. Sci. 2000; 30:225-236.
- SÃO JOSÉ JKB et al. 2020. Initial Growth and Nutrition of Eucalyptus Under Different Management of Harvest Residues. *Floresta e Ambiente* 2020; 27(4): e20180161
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.D.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, Washington, v. 47, p. 719-734, Jul-Dec 1933.
- SCOLFORO JRS, THIERSCH CR. *Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria*. Lavras: UFLA; 2004.
- SIDDIQUI MY, GLASS ADM. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *J. Plant Nutr.* 1981; 4: 289-302.
- SOARES H, et al. Efeitos da gestão de resíduos de abate no crescimento inicial de *Eucalyptus globulus* Labill.: resultados de um estudo lisimétrico. *Revista de Ciências Agrárias* 2002; 25(3): 394-410.
- SOUZA, A. H. B. N. Ciclagem de nutrientes e produtividade de madeira em povoamento de *Eucalyptus grandis* sob diferentes manejos de resíduos florestais e fertilização mineral. In: *Ciências Florestais*. USP, Piracicaba - SP, pp. 110, 2015
- SOUZA, I.F. Decomposição de resíduos da colheita e transferência de carbono para o solo em plantações de eucalipto. *Tese Mestado, Univ Fed Viçosa*. 2012;70p.
- VALADARES, S.V. et al. Predicting phosphorus use efficiency and allocation in eucalypt plantations. *For. Ecol. Manag.* 460, 1–5, 2020.
- ZERPA, J. et al. Influence of variable organic matter retention on nutrient availability in a 10-year-old loblolly pine plantation. *Forest Ecol. Manag.* 259, 1480–1489, 2010.
- ZHOU, X. et al. Intensivo manejo e declínios nos nutrientes do solo levam a sérias invasões de plantas exóticas em

CAPÍTULO 2

UNDERSTANDING CHANGES IN THE DISTRIBUTION OF SOIL PHOSPHORUS FRACTIONS AS A FUNCTION OF INTEGRATED MANAGEMENT PRACTICES IN EUCALYPT PLANTATIONS

ABSTRACT

Low phosphorus (P) availability is a key constraint for eucalyptus growth in tropical soils. In some of eucalypt forest plantations, positive P budgets have contributed to gradually increase soil P stocks. However, studies on the modified distribution and composition of inorganic and organic P fractions as influenced by current management practices are still scarce. Here, we evaluated the distribution of different labile and non-labile organic (Po) and inorganic (Pi) fractions in of total P stocks in a tropical soil (Oxisol) under eucalyptus plantation, and whether each of them is affected by harvest residue management and fertilization. An additional goal of this research was evaluating the appropriateness of associating results of P fractionation with P availability to eucalypt. Our study was conducted in a representative soil of a major eucalypt-producing region in the Atlantic Forest biome, in Brazil, where a previous study indicated that soil P stocks have increased through time. Our main findings indicate that a substantial part of soil P stocks are available to plants in the first months after planting, notably when a higher quantity of harvest residues remains in the forest floor. We also found that the expected differentiation in recalcitrance for some P pools assumed in some sequential fractionation protocols do not necessarily reflect P bioavailability to eucalypt and that separating organic P forms during fractionation help to better predict the P acquisition by this tree crop, although underestimations of organic P are expected in fractionation studies. Phosphorus additions may be reduced, after additional studies, in some tropical eucalypt plantations, but modifications in soil testing are required to improve P management in these forests.

Keywords: *Eucalyptus* spp. Phosphorus management. Forest harvest residues. Hedley fractionation.

1. INTRODUCTION

Low phosphorus (P) availability is one of the most limiting constraints for production of eucalypt and other fast-growing forest species in tropical soils (Darch et al., 2016; Rodrigues et al., 2016; Mao et al., 2017). These soils are generally highly weathered, rich in iron and aluminum oxides, and highly buffered for P (Novais and Smith, 1999). Therefore, the application of P fertilizers is a key practice in tropical forestry (Bazani et al., 2014; Maranguit et al., 2017).

Positive P budgets have contributed to gradually increase soil P stocks in some intensively managed tropical eucalypt plantations (Fernández et al., 2000; McMahon et al., 2019). Continuous efforts are also needed to improve and broaden the best management practices for increasing P use efficiency in these areas (Stauffer et al., 2019; Rocha et al., 2019; Foltran et al., 2019).

Integrating forest harvest residues (FHR) with mineral fertilization can be a useful strategy to replace P and other nutrients in forest plantations (Santana et al., 2008; Barros et al., 2021). In addition to their effect as a nutrient source, the organic compounds from FHR can help to reduce the sorption and increase the desorption of P in the soil solid phase (Havlin et al., 2014). Maintaining organic residues on the forest soil also contributes to increase soil organic matter, reduce soil compaction, minimize water losses, lessen temperature extremes, and increase the activity of organisms in the soil (Xu et al., 2012; Damon et al., 2014). These effects can contribute to optimize P fertilization, although the addition of organic residues can also negatively influence, at least temporarily, the uptake of P and other nutrients by plants (e.g.: due to nutrient immobilization after the addition of nutrient poor residues) (Barros et al., 2021).

In this study we applied a sequential fractionation method (Hedley et al., 1982 modified by Condon et al., 1985) to evaluate how P availability changed through time depending on

fertilization and FHR management. Considering the caveats and usefulness of sequential chemical fractionation methods (Gu and Margenot, [2020](#); Guppy, 2021; Gatiboni and Condrón, 2021) an additional goal of this research was evaluating the appropriateness of associating results of P fractionation with P availability to eucalypt. We also add pieces of evidence to support the exchange of the soil P extractants currently used in routine soil P analysis with better predictors of soil P bioavailability for eucalypt.

2.MATERIAL AND METHODS

2.1 Study site and soil characterization

The experimental area was located in the country of Peçanha, Minas Gerais State (18°40' S and 42°57' W), in the Atlantic Forest biome of Brazil. The topographic position is at the top of a hill with a gentle slope at 930 m altitude. The local soil is an Oxisol, with clayey texture (72 % of clay). Average annual rainfall is 1200 mm, concentrated between October and March, and the average annual temperature is 20.5 °C (Souza, 2012). The area has been cultivated with eucalypts (*Eucalyptus grandis*) for approximately 20 years, and its previous soil use was a native forest.

The experiment started in July 2017 with *E. grandis*, approximately six months after harvesting previous plantation. The experimental design was in randomized blocks and treatments were distributed in a split-plot arrangement, with four replicates. Four FHR treatments were applied in the plots with and without fertilization in subplots as follows: 1) all plant residues left in the area (Ra); 2) all plant residues left in the area but barks (R-C); 3) removal of all plant residues but litter (Ser); 4) removal of all plant residues (Test). In the subplots, treatments with FHR were combined or not with fertilization. In fertilized subplots, limestone and fertilizers were applied as follows: 1.750 kg/ha of limestone (40% CaO / 11% MgO), which was applied in continuous strips (0.5 m wide) along the planting line. In the

subsoiling was applied 400 kg/ha of NPK 06-10-29 + 0.8% B + 0.5% Zn + 0.5% Cu (pre-planting). At the planting time, 100 g of NPK 06-30-06 + 0.25% B + 1.0% Zn + 1.0% Cu were applied per plant. Fertilizer was applied in two lateral holes 0.15 m from the seedlings. And twelve months after planting, a topdressing fertilization was applied, consisting of 400 kg/ha of NPK 06-10-29 + 0.8% B + 0.5% Zn + 0.5% Cu. Each experimental unit was composed of 64 plants spaced 3 x 3 m apart.

The soil was subsoiled to a 0.6-m depth in the planting row. FHR were characterized (Table 2) and maintained in the field and distributed homogeneously throughout the plots according to each treatment.

Before the experiment installation, for soil chemical characterization (Table 1), five soil sub-samples were collected from each plot at 50 cm from the eucalypt trunk and at the soil depth layer of 0.00-0.10 m. This superficial soil layer was considered because it is high relative contribution to nutrient cycling during the early development of the plants. These sub-samples were mixed and constituted a composite sample per plot. The samples were dried at 45 °C and sieved (2 mm).

Table 1. Chemical attributes and clay content of the soil collected at a depth of 0.00-0.10 m in the experimental area

pH ^a	P ^b	K ^b	Na	Ca ^c	Mg ^c	H+ Al ^d	C ^e	T ^f	V ^g	Clay ^h
	-- mg dm ⁻³ --			----- cmol _c dm ⁻³ -----			dag kg ¹	cmol _c dm ³	%	%
4.72	3.72	36.92	4.98	1.67	0.38	11.80	6.81	13.96	15.51	72.00

^a pH in water (ratio 1: 2.5). ^b Mehlich-1 extractant. ^c CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹, soil to solution ratio 1:2.5. ^d Wet oxidation. ^e Ca (CH₃CO₂)₂ 0.5 mol L⁻¹ extractant. ^f Potential CTC. ^g Base saturation. ^h Pipette method (EMBRAPA, 2011).

Table 2. Chemical characterization and quantity of harvest residues used in the experiment

Nutrient	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn	B	HR
	-----g kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----				t ha ⁻¹

Litterfall	5.63	0.27	1.65	9.81	1.05	0.47	5.32	221.37	15.39	17.48	3.51
Leaf	18.40	1.06	9.28	5.45	1.62	0.42	6.82	205.83	13.21	32.88	5.15
Bark	3.60	0.31	3.23	18.88	1.95	0.15	3.65	110.19	8.87	13.56	33.85
Branch	3.27	0.56	4.73	7.65	1.05	0.10	4.46	165.65	8.70	9.36	11.59

For P fractionation, five sub-samples (line and between-line) were collected in the subplots at two periods of the year. The first collection was carried out in the rainy season, six months after the installation of the experiment (January 2018), whereas the second collection was carried out in the dry period, twelve months after the installation of the experiment (July 2018). The samples were also dried at 45° C and sieved (2 mm).

To quantify tree productivity, a forest inventory was carried out based on measurements of trunk diameter and the total height of all plants. To quantify leaf P content, composite samples were prepared using leaves from the middle third of trees in each plot and subjected to nitro-perchloric digestion (Sarruge and Haag, 1974) to determine P contents by colorimetry.

2.2 Phosphorus extractions

We used the method of sequential P extraction proposed by Hedley et al. (1982), with modifications proposed by Condron et al. (1985).

Each soil sample was subjected to a series of extractants for 16 h: (a) anion exchange resin, (b) NaHCO₃ (0.5 mol L⁻¹), (c) NaOH (0.1 mol L⁻¹), (d) HCl (1.0 mol L⁻¹), and (e) NaOH (0.5 mol L⁻¹). The total P (Pt) in these extracts was determined after digestion in an autoclave using ammonium persulfate (Ebina et al., 1983). Organic P (Po) was assessed by the difference between inorganic P (Pi) and Pt. In all cases, P concentration was determined calorimetrically following the method proposed by Murphy and Riley (1962) and modified by Braga and DeFelipo (1974).

According to these procedures, P forms are sequentially extracted from greater to lesser lability. Labile P forms: extracted by anion exchange resin (P-Res), and by NaHCO₃ which extracts inorganic (Pi-Bic) and organic (Po-Bic) forms. Moderately labile P forms: extracted by 0.1 and 0.5 mol L⁻¹ NaOH (Pi-NaOH.1; Pi-NaOH.2, respectively), which extracts inorganic and organic (Po-NaOH.1; Po-NaOH.2) including P forms bound to Fe- and Al-oxides. Non-labile forms: extracted by HCl, which extracts inorganic (Pi-HCl) and organic (Po-HCl) forms, including P forms bound to Ca.

2.3 Data analysis

All data were subjected to analysis of variance ($p < 0.05$) and averages were compared by the Tukey's test ($p < 0.05$). Pearson's correlations were used to relate each P fraction and tree productivity and leaf P content in all treatments ($p < 0.05$). To test the assumptions of the analysis of variance, the Shapiro–Wilk and Barlett were used. When needed, log transformation was performed to attain parametric assumptions. All statistical analyses were performed using the statistical software R version 4.0.0 (R Core 2020).

3. RESULTS

3.1 Anion exchange resin and NaHCO₃ (0.5 M) extracted P - Labile P

Labile P increased within the first six months after planting in the plots where forest residues remained in the area (Figure 2). Po-Bic contents were higher in Ra than were in R-C and Ser. Ra also presented higher Pi-Res contents than did R-C.

The maintenance of all residues in the area (Ra and R-C) also contributed to higher contents of Pi-Bic as compared to their removal (Test) (Figure 3).

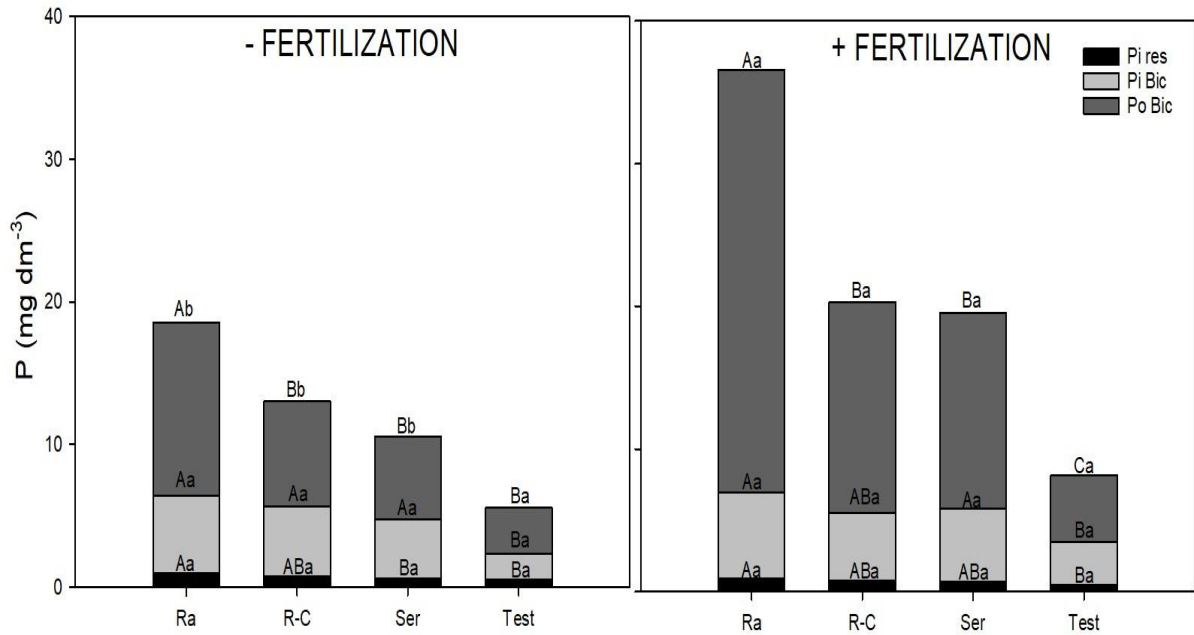


Figure 2. Anion exchange resin extracted P and NaHCO₃ (0.5 M) extracted inorganic (Pi) and organic P (Po) as a function of different treatments Ra) all plant residues left in the area; R-C) all plant residues left in the area but barks; Ser) removal of all plant residues but litter and Test) removal of all plant residues; with and without fertilization, 6 months after the installation of the experiment. Averages followed by the same capital letter (plant residues) and lower cases letters (fertilization) do not differ statistically from each other by the Tukey test at 5% probability level.

The effect of fertilization was detected on the bicarbonate fraction mainly in the first evaluation period (Figure 2) but reduced markedly in the second one (Figure 3). Higher Po-Bic contents were found in fertilized treatments combined with R-C and Ra managements in both evaluated periods (Figures 1 and 2).

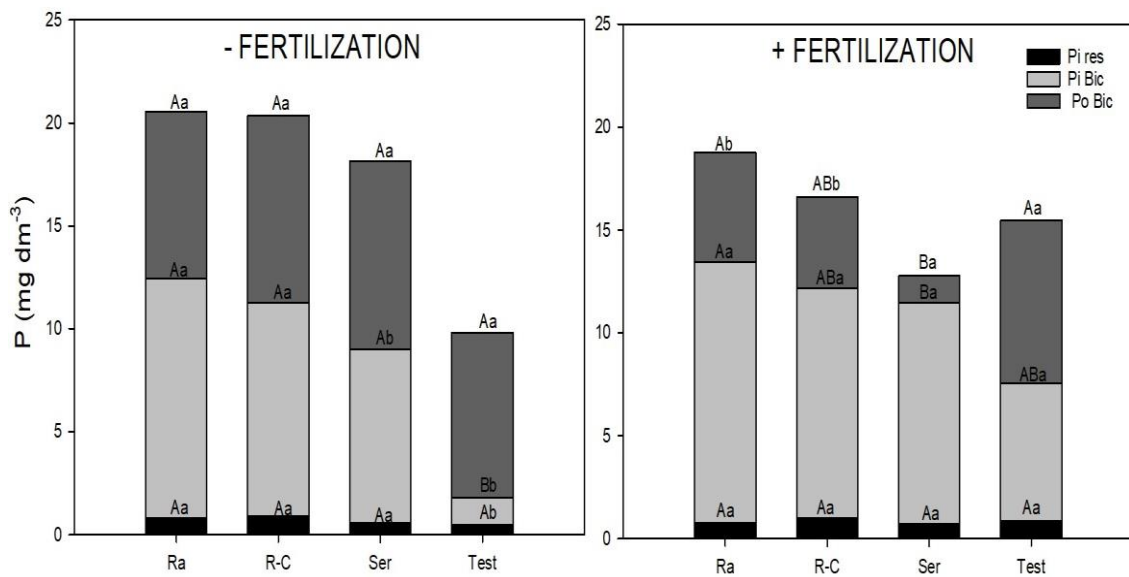


Figure 3. Anion exchange resin extracted P and NaHCO₃ (0.5 M) extracted inorganic (Pi) and organic P (Po) as a function of different treatments Ra) all plant residues left in the area; R-C) all plant residues left in the area but barks; Ser) removal of all plant residues but litter and Test) removal of all plant residues; with and without fertilization, 12 months after the installation of the experiment. Averages followed by the same capital letter (plant residues) and lower cases letters (fertilization) do not differ statistically from each other by the Tukey test at 5% probability level.

3.2 NaOH.1 (0.1 M) and HCl (1 M) extracted P

Neither fertilization nor FHR had effects on values of Pi after NaOH (0.1 M) extraction (Pi-NaOH.1) in the first evaluation period (Figure 4); however, higher values NaOH.1 extracted organic P (Po-NaOH.1) were found in treatments with more HR.

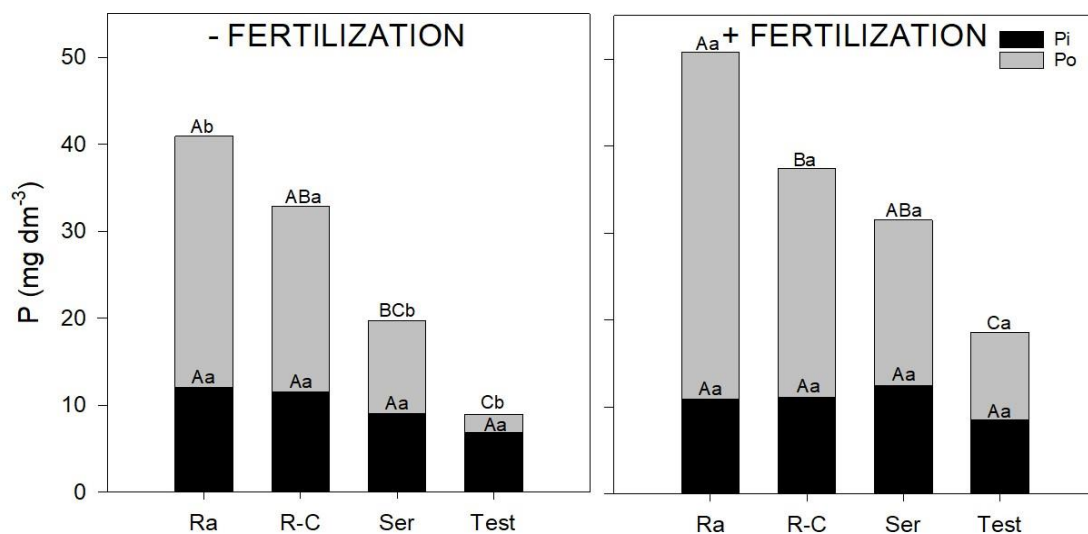


Figure 4. NaOH.1 (0.1 M) extracted P (Pi-inorganic P and Po-organic P) contents in treatments Ra) all plant residues left in the area; R-C) all plant residues left in the area but barks; Ser) removal of all plant residues but litter and Test) removal of all plant residues; with and without fertilization at 6 months after treatment distribution. Averages followed by the same capital letter (residues) and lower cases letters (fertilization) do not differ statistically from each other by the Tukey test at 5% probability level.

In the second period, we found significant effects on the NaOH.1(Pi) fraction was different only between Ra and Test in treatments without fertilization (Figure 5). NaOH.1 (Po) contents were higher than Pi contents in all treatments (Figure 5). In this study, P HCl values were not detected.

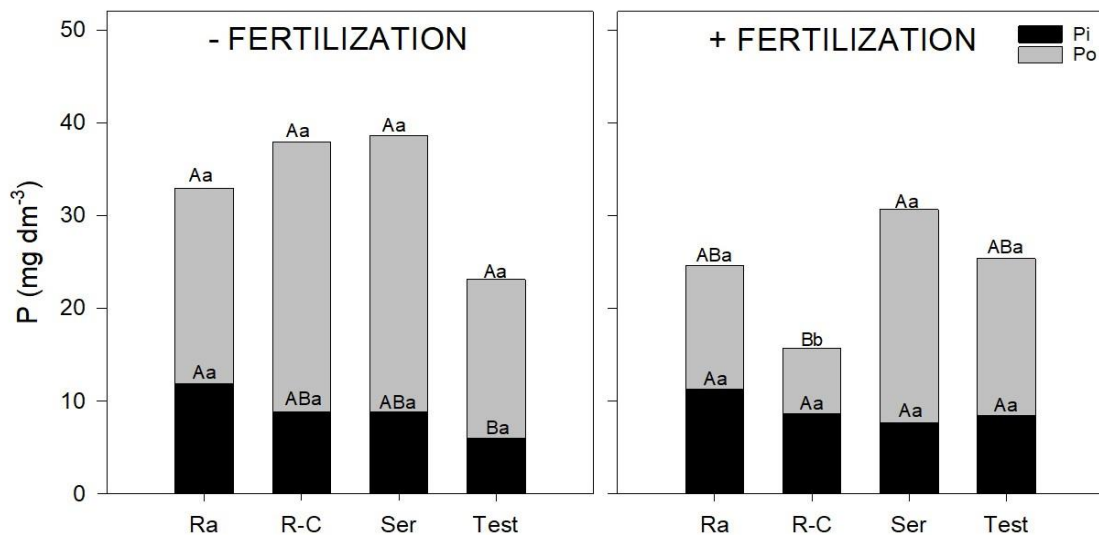


Figure 5. NaOH.1 (0.1 M) extracted P (Pi-inorganic P and Po-organic P) contents obtained after chemical extraction of the soil in treatments Ra) all plant residues left in the area; R-C) all plant residues left in the area but barks; Ser) removal of all plant residues but litter and Test) removal of all plant residues; with and without fertilization, at 12 months after treatment distribution. Averages followed by the same capital letter (residues) and lower cases letters (fertilization) do not differ statistically from each other by the Tukey test at 5% probability level.

3.3 NaOH.2 (0.5 M) extracted

The addition of FHR increased Po after NaOH (0.5 M) extraction (Po-NaOH.2) in both evaluation periods, with and without fertilization. This addition also increased contents of the Pi-NaOH.2 fraction in fertilized treatments. The effect of fertilization was only verified in Ra

in the first evaluation period (Figure 6). In this management, Po contents exceeded those of Pi by almost 50% when fertilizers were applied.

In the second evaluation period, the most evident differences in Po-NaOH.2 contents were found in the absence of fertilization. Treatments in which all residues remained (Ra and R-C) showed higher Po- NaOH.2 contents. In the presence of fertilization, only the Test differed from the other treatments, with a lower average value.

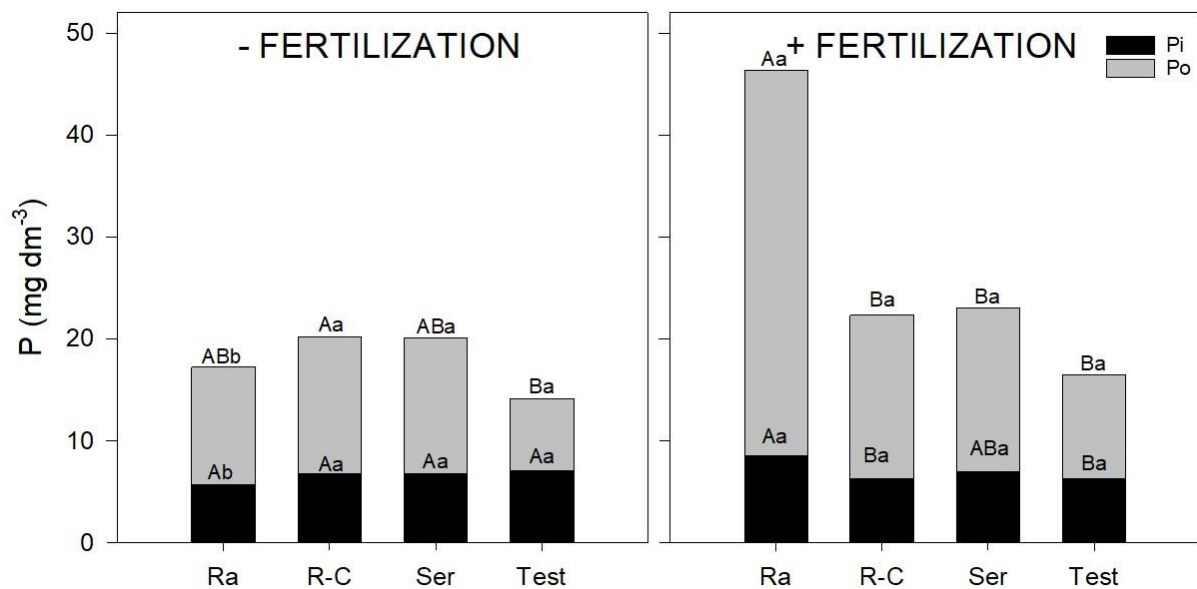


Figure 6. NaOH.2 (0.5 M) extracted P (Pi-inorganic P and Po-organic P) contents obtained after chemical extraction of the soil in treatments Ra) all plant residues left in the area; R-C) all plant residues left in the area but barks; Ser) removal of all plant residues but litter and Test) removal of all plant residues; with and without fertilization, at 6 months after treatment distribution. Averages followed by the same capital letter (residues) and lower cases letters (fertilization) do not differ statistically from each other by the Tukey test at 5% probability level.

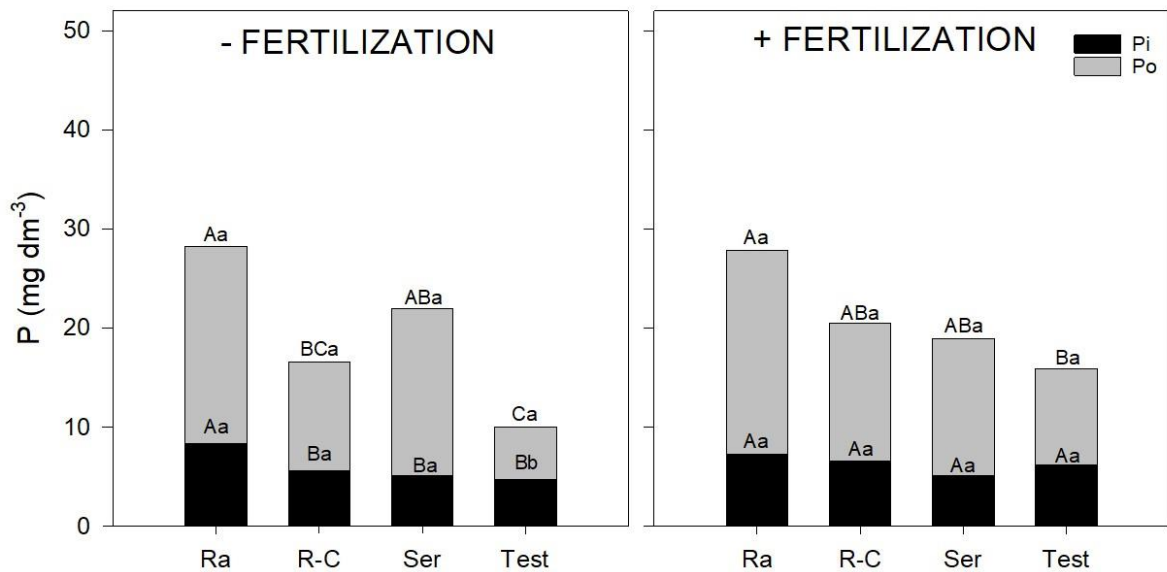


Figure 7. NaOH.2 (0.5 M) extracted P (Pi-inorganic P and Po-organic P) contents obtained after chemical extraction of the soil in treatments Ra) all plant residues left in the area; R-C) all plant residues left in the area but barks; Ser) removal of all plant residues but litter and Test) removal of all plant residues; with and without fertilization, at 12 months after treatment distribution. Averages followed by the same capital letter (residues) and lower cases letters (fertilization) do not differ statistically from each other by the Tukey test at 5% probability level.

P-res fraction showed the highest P content when compared to the other fractions (Table 1, supplementary material), varying between 25 and 60% of the total P. Both FHR management and fertilization, as well as soil sampling collection time, influenced P-res contents.

3.4 Plant yield, leaf P content and relationship between soil P fractions and plant variables

Both FHR management and fertilization positively influenced eucalypt yields (Table 3). The lowest yields were observed in treatments without fertilization and FHR management (Ser and test), the highest yields were obtained in fertilized treatments. The maintenance of higher FHR amounts on the forest area highly reduced the negative effects of mineral fertilization suppression.

Leaf P content increased with fertilization, but no effect was found for HR, although results for leaf P content and tree yield had similar trends (Table 3).

Table 3. Effects of treatments on productivity and leaf P content

	Fertilization	Ra	R-C	Ser	Test
Wood	- F	5,6 Ab	5,3 Ab	4,5 ABb	3,5 Bb
Volume	+ F	7,1 Aa	7,2 Aa	6,8 Aa	6,8 Aa
Leaf P	- F	0,9 Ab	0,8 Ab	0,9 Aa	0,8 Ab
	+ F	1,1 Aa	1,1 Aa	1,0 Aa	1,0 Aa

Ra: plant residues left in the area; R-C: all plant residues left in the area, except barks; Ser: removal of all plant residues, except litter; Test: removal of all plant residues; -F: absence of fertilization; +F: fertilization. Averages followed by the same capital letter (residues) and lower cases letters (fertilization) do not differ statistically from each other by the Tukey test at 5% probability level.

We found positive correlations between wood volume and P content in the eucalypt leaves (leaf P) in the first evaluation period (Figure 8). Highly positive correlations were also found between soil Po fractions and leaf P contents, as well as between these fractions and wood volume. However, we did not find significant correlations between leaf P content and soil Pi fractions. Other highly significant correlations were found between Po fractions (Po-L, Po-ML, and Po-LR) and leaf P contents (Po fractions and Pi-Bic).

In the second evaluation period (Figure 9), we observed a negative correlation between Po fractions (Po-L, Po-ML, and Po-LR) and leaf P content, as well as between Po fractions and wood volume.

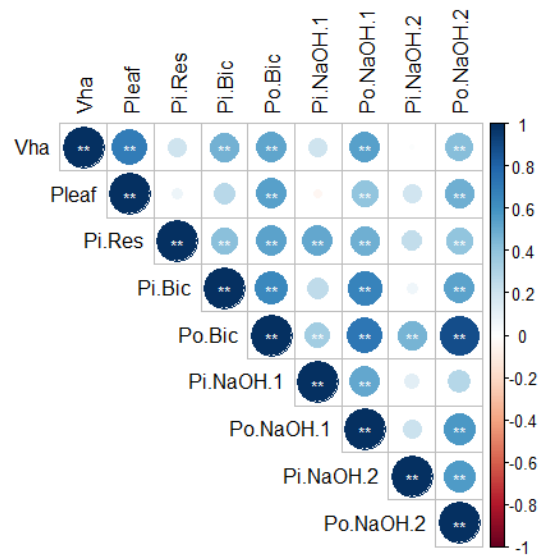


Figure 8. Pearson's correlation between growth variable (wood.volume), P content in leaf (Pleaf) and P fractions in the first evaluated period (6 months). Significant correlations ** ($p < 0.01$) and * ($p < 0.05$).

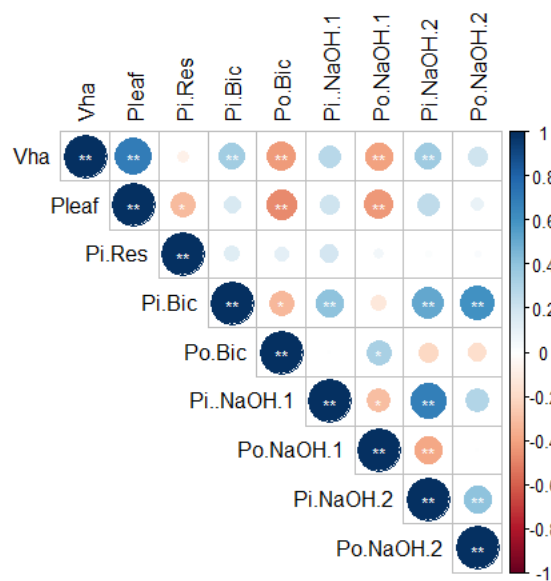


Figure 9. Pearson's correlation between growth variable (wood.volume), P content in leaf (Pleaf) and P fractions in the second evaluated period (12 months). Significant correlations ** ($p < 0.01$) and * ($p < 0.05$).

4.DISCUSSION

Sequential chemical extractions (SCE) are widely used to assess modifications in soil P bioavailability in different environments (Tiessen and Moir, 1993; Condrón and Newman, 2011). Chemical extractants of increasing strength are sequentially applied to differentiate P pools of variable lability (Gatiboni et al., 2007). However, some P fractions obtained in SCE methods can't be used to infer mechanisms related to soil P supply and the uptake of this nutrient by plants (Klotzbücher et al., 2019) and do not necessarily contribute to predict soil P availability to plants.

Labile P represents a *continuum* of P forms in immediate equilibrium with the soil solution (i.e.: Labile P is the immediate source of P in the soil solid phase that readily exchanges with the soil solution P) (Spain et al., 2018). In the fractionation scheme we adopted in this study (Hedley et al., 1982 modified by Condrón et al., 1985), this pool is assumed to be mostly extracted in the first extracting steps, by Resin (P-Resin) and Bicarbonate (P-Bic) (Gonçalves and Meurer, 2009; Tokura et al., 2011). In fact, these extractions mimic underlying processes related to soil P supply as well as P uptake by plants (Klotzbücher et al., 2019; Gu and Margenot, 2020) and these P fractions are generally good indexes of soil P availability for most plant species, although plants can also modify the stability of more recalcitrant (non-labile) P forms that can significantly contribute to their P acquisition.

We found that soil PL (mainly P-Bic) increased with fertilization and with FHR maintenance, notably in the first evaluation period. This effect was more evident for the Po-Bic fraction in the treatment where all residues remained in the area (Ra) (Figure 2). These results indicate that a great part of total P released from fertilizers and the eucalypt residues remained labile during the first months after planting, when P is more demanded by plants (Bielecki,

1973; Valadares et al., 2014) and may be related, at least in part, to a lower soil P fixation due to the application of organic residues (Rocha et al., 2019).

We found good correlations between P–Bic and plant growth, as well as between P–Bic and P content in the plant (leaf P) in our first evaluation period, mainly due to the Po–Bic fraction. Such results were expected, as P availability is generally highly related to the cycling of organic P forms in tropical forest soils (Vincent et al., 2010; Menegale, 2016; Foltran et al., 2019). Nonetheless, most of the soil P tests currently used as P availability indexes for tropical tree plantations (e.g., ion exchange resin and Mehlich-1) are still based on the extraction of Pi forms. In this sense, our findings reinforce results of previous studies (Leite, 2001; Rocha et al., 2019) that indicated the need for more appropriate soil P availability indexes for tropical tree plantations.

Underestimations of organic P are expected in fractionation studies and can limit conclusions about changes in soil organic P (Guppy, 2021), but the separation of organic P during fractionation help to better assess P availability to eucalypt.

Differently from the first evaluation period (Figure 4), we found higher contents of Pi–L than those of Po–L 12 months after planting (Figure 5). This result may be attributed to organic P mineralization (Gatiboni et al., 2005; Foltran et al., 2019).

Recently, McMahon et al. (2019) found that soil P stocks are increasing in some tropical eucalypt plantations in the region of our study. Our results indicate that these increases may result substantially from the adoption of more conservative management strategies in areas where current harvesting systems allow greater FHR return. Our findings also suggest that, when higher amounts of FHR remain in the area, a substantial part of the P added via FHR and fertilizers remains labile during the period of higher P requirement by plants.

NaOH.1 and NaOH.2 organic and inorganic P (NaOH.1 Pi and Po) were the most abundant fractions in our study. We also noticed that Po– NaOH.1 contents were higher than

those of P_i - NaOH.1 in both evaluation periods (Figure 4). Similar results were also reported in other studies in forest soils (Rocha et al., 2016; Costa et al., 2016; Foltran et al., 2019). Higher P_o - NaOH.1 levels were also reported by Leite (2001) when studying changes in P fractions in commercial eucalypt plantations in the same region of our study. This fraction can be sensitive to changes in management practices when compared to NaOH.2 (Leite, 2001), as also observed in our study.

Some studies also associate NaOH.2 extracted P with more recalcitrant P pools when compared to P - NaOH.1, P -Bic and P -Res, what was not observed in our study. However, although there is not a known mechanism to relate P - NaOH (0.1 M and 0.5 M) to P bioavailability to plants (Klotzbücher et al., 2019), our correlation analyses indicates that both NaOH (0.1 and 0.5 M) extracted P_o can be good indexes of P availability to eucalypt.

HCl-P was not detected in our study. This fraction is often not detected in highly weathered tropical soils (Cross and Schlesinger, 1995; Yang and Post, 2011; Hu et al., 2016, Costa, 2019; Rocha et al., 2019) and generally associated with Ca-P forms. However, it is worth mentioning that such inferences from fractionation studies are associated misquantification and false detection (Gu et al., 2020).

5. CONCLUSIONS

This study indicated that a substantial part of the total P added through fertilization and forest residues can be maintained in the labile pool during the period that this nutrient is highly demanded by plants, notably when a higher quantity of harvest residues is maintained in the forest floor. We also found that the expected differentiation in recalcitrance for some P pools assumed in the sequential fractionation method used in this study do not necessarily reflect P bioavailability to eucalypt.

The separation of organic P during fractionation help to better assess P availability to eucalypt, although underestimations of organic P are expected in fractionation studies. These findings also add evidence that soil organic P forms, generally not considered in soil testing, can be better predictors of soil P bioavailability for eucalypt.

Phosphorus fertilization may be reduced, after additional studies, in some tropical eucalypt plantations, but modifications in soil testing are required to improve P management in these forests.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. We also thank to CENIBRA- Celulose Nipo- Brasileira for their technical and financial support that were fundamental in this work.

REFERENCES

- BARROS IB, et al (2021) Integrating forest residue and mineral fertilization: effects on nutrient acquisition, nutrient use efficiency and growth of eucalypt plants. *For Ecol Manage* 496:119461.
- BAZANI JH, et al (2014) Nutrição fosfatada em plantações de Eucalipto. *Informações agronômicas*, 148: 9- 11.
- BIELESKI RL. (1973) Phosphate pools, phosphate transport and phosphate availability. *Annual Review of Plant Physiology*, 24: 225-252. doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.001301
- BRAGA JM, DEFELIPO BV. (1974) Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. *Revista Ceres*, 21: 73-85.

- CONDON LM; GOH KM, NEWMAN RH. (1985) NATURE AND DISTRIBUTION OF SOIL PHOSPHORUS as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. *Journal of Soil Science*, 36: 199–207. doi.org/10.1111/j.1365-2389.1985.tb00324.x
- CONDON LM, NEWMAN S. (2011) Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. *J. Soils Sediments*. 11, 830–840.
- COSTA MG, et al (2016) Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under Eucalyptus plantations, Brazil. *Forests*, 7:15. doi.org/10.3390/f7010015
- CROSS AF, SCHLESINGER WH. (1995) A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, Amsterdam 64: 97-214. doi.org/10.1016/0016-7061(94)00023-4
- DAMON PM, BOWDEN B, ROSE T, RENGEL Z. (2014) Crop residual contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil Biology and Biochemistry* 74: 127–137. doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.003
- DARCH T, et al. (2016) Assessment of bioavailable organic phosphorus in tropical forest soils by organic acid extraction and phosphatase hydrolysis. *Geoderma*, 284: 93-102. doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.018
- EMBRAPA, 2011. Manual de métodos de análise de solo. Embrapa, Rio de Janeiro, Brazil.
- FERNÁNDEZ RIE. (2008) Reversibilidade de Fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química. II – Extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 2319-2330. doi.org/10.1590/s0100-06832008000600011
- FOLTRAN EC, et al (2019) Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. *Forest ecology and management*, 435: 170-179. doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.053
- GATIBONI LC, CONDRON LM. (2021) A rapid fractionation method for assessing key soil phosphorus parameters in agroecosystems. *Geoderma*, 385: 114893. doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114893
- GATIBONI LC, et al. (2007) Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31: 691-699. doi.org/10.1590/s0100-06832007000400010
- GATIBONI LC, et al (2005) CHEMICAL FRACTIONATION OF soil phosphorus forms: uses and limitations. *Tópicos Ci Solo* 8:221–278

- GONÇALVES GK, MEURER EJ. (2009) Frações de fósforo no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33: 357-362. doi.org/10.1590/s0100-06832009000200013
- GU C, MARGENOT AJ. (2020) Navigating limitations and opportunities of soil phosphorus fractionation. *Plant Soil*. doi.org/10.1007/s11104-020-04552-x
- GU C, et al (2020a) Quantifying uncertainties in sequential chemical extraction of soil phosphorus using XANES spectroscopy. *Environ Sci Technol* 54:22572267. doi.org/10.1021/acs.est.9b05278
- GUPPY, C. (2021) Is soil phosphorus fractionation as valuable as we think? *Plant Soil* 459, 19–21. doi.org/10.1007/s11104-020-04817-5
- HAVLIN JL, et al (2014) *Soil Fertility and Fertilizers*, 8th Edition. Pearson.
- HEDLEY MJ, STEWART JWB, CHAUHAN BS. (1982) Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46: 970-976. doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x
- KLOTZBÜCHER A. et al (2019) Testing mechanisms underlying the Hedley sequential phosphorus extraction of soils. *J Soil Sci Plant Nutr* 182:570–577. doi.org/10.1002/jpln.201800652
- LEITE FP. (2001) *Relações nutricionais e alterações de características químicas de solos da região do vale do rio doce pelo cultivo do eucalipto*. Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa.
- MCMAHON DE, et al. (2019) Soil nutrient stocks are maintained over multiple rotations in Brazilian Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management* 448: 364-375. doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.027
- MAO Q, et al (2017) Effects of longterm nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in a N-rich tropical forest. *Geoderma*, 285: 57-63. doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.017
- MARANGUIT D, GUILLAUME T, KUZYAKOV Y. (2017) Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. 149: 385-393. *Catena*, doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.010
- MURPHY J, RILEY JP. (1962) A modified single solution method for the determinant of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 31 (27), 31–36. doi.org/10.1016/s0003-2670(00)88444-5

- NOVAIS RF, SMYTH TJ. (1999) Fósforo em solo e planta em condições tropicais (No. 631.422 N934). Universidade Federal de Vicosa, Vicosa, MG (Brasil). Dept. de Solos.
- R CORE T (2020) R: A Language and Environment for Statistical Computing
- ROCHA JHT, et al (2016) Forest residual maintenance increased the wood productivity of a Eucalyptus plantation over two short rotations. *Forest Ecology and Management*, 379, 1-10. doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.042
- ROCHA JHT, et al (2019) Impacts of timber harvest intensity and P fertilizer application on soil P fractions. *Forest ecology and management*, 437: 295-303. doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.051
- RODRIGUES M, et al. (2016) Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Science of the Total Environment*, 542: 1050-1061. doi.org/10.11606/t.11.2018.tde-29062018-091614
- SANTANA RC, et al (2008) Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. *Rev Bras Ciência do Solo* 32:2723–2733.
- SOUZA IF. (2012) Decomposição de resíduos da colheita e transferência de carbono para o solo em plantações de eucalipto. Tese Mestrado, Universidade Federal de Viçosa. 70p.
- SPAIN AV, et al (2017) Phosphorus dynamics in a tropical forest soil restored after strip mining. *Plant Soil*, 427: 105- 123.
- STAUFFER E, et al. (2019) Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox. *Australian Journal of crop science*, 13: 61-98. doi.org/10.1071/sr19233
- TIESSEN H, MOIR J. (1993) *Soil Sampling and Methods of Analysis* (ed. Carter, M.R) 75–86.
- TOKURA AM. (2011). Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. *Acta Scientiarum. Agronomy* 33: 171-179. doi.org/10.4025/actasciagron.v33i1.1435
- VALADARES SV, et al (2014) Yield gains of coffee plants from phosphorus fertilization may not be generalized for high density planting. *R. Bras. Ci. Solo*. 38: 905. doi.org/10.1590/s0100-06832014000300022
- VALADARES SV, et al (2017). Pedotransfer Functions to Estimate Parameters for Soil Phosphorus Models. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 81:210–213. doi.org/10.1016/s0166-2481(04)30011-5

VINCENT AG, TURNER BL, TANNER EVJ. (2010) Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical forest. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 48–57.

XU X, LUO Y, ZHOU J. (2012) Carbon quality and the temperature sensitivity of soil organic carbon in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 50, 142-148. doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.03.007

CAPÍTULO 3

COMO O TEMPO DE CULTIVO AFETA AS FRAÇÕES DE FÓSFORO NO SOLO EM PLANTIOS DE EUCALIPTO?

RESUMO

Em regiões tropicais, pouco se sabe sobre as modificações nas formas de fósforo (P) do solo e suas consequências na sustentabilidade da produção ao longo de ciclos sucessivos de cultivo do eucalipto. Os objetivos deste trabalho foram investigar alterações nas frações de P do solo em plantios de eucalipto, em duas épocas espaçadas de 20 anos de cultivo e a participação de diferentes formas de P que constituem o P total do solo. O trabalho foi conduzido em sítios representativos da região do estado de Minas Gerais, Brasil, onde foram selecionadas áreas em cinco locais onde o eucalipto havia sido cultivado por mais de 40 anos. Amostras de solo foram coletadas em um intervalo de aproximadamente 20 anos e analisadas pelo método de fracionamento sequencial das formas de P proposto por Hedley et al. (1982). Os teores de P obtidos pelo fracionamento sequencial mostraram que ao longo do tempo o cultivo o eucalipto se mostrou capaz de conservar os estoques de P do solo, principalmente as formas orgânicas (Po). Esse resultado evidencia que solos florestais tendem a ciclar essas frações, conservando no solo formas de P que podem se tornar disponíveis às plantas de forma gradual ao longo dos ciclos de cultivo, se destacando no âmbito da sustentabilidade nutricional dos sítios.

Palavras-chave: Fósforo orgânico. Fracionamento sequencial. Ciclagem de nutrientes.

1. INTRODUÇÃO

A nutrição insuficiente em fósforo (P) é um dos fatores mais limitantes à produtividade florestal em regiões tropicais (Rodrigues et al., 2016; Mao et al., 2017). Mesmo em solos com elevados teores de P total, a deficiência desse nutriente ainda é comum, já que o P é o nutriente que apresenta maiores restrições quanto à solubilidade em solos altamente intemperizados como os das regiões tropicais (Rocha et al., 2016).

No Brasil, as espécies do gênero *Eucalyptus* são cultivadas extensivamente desde a década de 70, sendo uma porção substancial dessas florestas manejadas de forma intensiva. Nesses casos, são comuns aplicações de P em doses superiores às exportadas pela colheita, resultando em aumento dos estoques do nutriente no solo ao longo do tempo de cultivo (Mógollon et al., 2018; McMahon et al., 2019).

O fracionamento sequencial de P, permite quantificar formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi) desse nutriente no solo, permitindo assim comparar alterações nessas frações decorrentes de práticas de uso e manejo do solo ao longo do tempo de cultivo (Guerra et al., 1996; Costa et al., 2016; Ferreira et al., 2021). Em sistemas florestais ou em solos que receberam baixas doses de P, a disponibilidade desse nutriente está diretamente relacionada à ciclagem de Po (Cunha et al., 2007). Rocha et al. (2019), estudando a distribuição das formas de P em solos sob eucalipto, relataram mais de 80 % do total de P composto por Po, que se tornaria disponível para as plantas via mineralização (Huang et al., 2015).

Esses resultados indicam que as formas de Po são essenciais para a nutrição da floresta em P (Vincent et al., 2010), contribuindo para a sustentabilidade nutricional dos plantios florestais (Huang et al., 2017). Contudo, estudos mais aprofundados são necessários dada a grande complexidade da dinâmica do P em diferentes usos, ambientes e tempo, principalmente em sítios nos quais a produtividade florestal é elevada. O entendimento da distribuição das

frações de P também é fundamental para melhorar os modelos empíricos e mecanísticos relacionados ao seu ciclo biogeoquímico.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações nas frações de P em solos sob eucalipto em diferentes condições de clima e solo após aproximadamente vinte anos de cultivo. Para tanto, usamos o método de fracionamento sequencial proposto por Hedley et al. (1982), com modificações realizadas por Condon et al. (1985). Este método tem sido amplamente utilizado em estudos ao redor do mundo para avaliar a distribuição das frações de Pi e Po no solo em diferentes usos (Negassa and Leinweber, 2009; Gu and Margenot, 2020; Guppy, 2021; Gatiboni and Condon, 2021).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e caracterização do solo

Os plantios florestais avaliados neste estudo estão localizados no estado de Minas Gerais, o estado brasileiro com maior área plantada com *Eucalyptus* (Ibá, 2017) (Quadro 1). Esses sítios estão inseridos majoritariamente no Bioma Mata Atlântica (IBGE, 2004; Oliveira-Filho e Fontes, 2000), bioma que foi amplamente convertido em agricultura e pastagem ao longo dos anos (Ribeiro et al., 2009). Cada sítio avaliado nesse estudo foi cultivado com eucalipto por aproximadamente 45 anos.

Tabela 1. Localização e características dos municípios cultivados com eucalipto no estado de Minas Gerais

Região	Solo ⁽¹⁾	Lat.(W)	Long.(S)	Altitude	Clima	Tempo sob cultivo de eucalipto até 2020 *
				m		anos
Ferros	LVA	42°48´	19°22´	930	Cwb	44
Belo Oriente	LV	42°24´	19°14´	280	Aw	41
Guanhães	LVA	42°57´	18°40´	850	Cwa	41
Santa Bárbara	CX	43°23´	19°59´	750	Cwa	51

Virginópolis LV 42°41' 18°42' 870 Cwa 43

LVA – Latossolo Vermelho amarelo; LV – Latossolo Vermelho; CX – Cambissolo, * Produtividade do eucalipto aos 7 anos variando entre 26 a 42 m³ha⁻¹ano⁻¹. Dados extraídos de Leite (2001).

Em 1998, em trabalho realizado por Leite (2001), nos cinco sítios avaliados, foram coletadas quatro amostras compostas de solo (baseadas em quatro amostras simples) nas profundidades 0- 0,10 e 0,10- 0,20 m para a caracterização química e extrações sequenciais de fósforo. Nessa época os sítios haviam sido cultivados com eucalipto por aproximadamente 21 anos.

No ano de 2020, com cada sítio sendo cultivado por aproximadamente mais 3 ciclos em relação a 1998 (totalizando em média 45 anos de cultivo), foi refeita a amostragem do solo nos mesmos sítios, profundidades e sistemas de uso para a realização de novas extrações sequenciais de fósforo. Esse intervalo de tempo entre as amostragens foi considerado para tornar possível captar alterações nas formas de P do solo decorrente de ciclos sucessivos de plantio de eucalipto. Além disso, a amostragem das camadas superficiais foi considerada pela maior contribuição relativa das mesmas na ciclagem de nutrientes no solo.

Nas áreas cultivadas com eucalipto, o preparo do solo normalmente consiste de subsolagem na profundidade de 0,60 m com adição de 1.750 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico (40% CaO /11% MgO), aplicado em faixas contínuas (0,5 m de largura) na linha de plantio. A fertilização de plantio consistiu em 100 g por planta de NPK 05-25-10 aplicado em covetas laterais e 167 kg ha⁻¹ de NPK 15-05-15 aos 12 e 24 meses após o plantio.

As amostras coletadas em 1998 para caracterização química e extração sequencial de fósforo foram secas a 45°, passadas em peneira de malha de 2 mm para as posteriores análises químicas e físicas e os resultados se encontram na Tabela 2

Tabela 2. Caracterização química e física das amostras de solo coletadas em diferentes profundidades nas áreas cultivadas com eucalipto em cinco sítios do estado de Minas Gerais

Região	Prof. m	pH^(a)	C^(b) g kg⁻¹	P-rem^(c) mg L⁻¹	Argila^(d)	P^(e) mg dm⁻³	K^(e) mg dm⁻³	Ca^(f) cmol_c dm⁻³	Mg^(f) cmol_c dm⁻³
Ferros	0-0,10	4,86	34,5	5,6	576	2,25	23,2	0,09	0,07
	0,10-0,20	4,83	26,0	5,0	626	1,64	17,5	0,04	0,05
Belo Oriente	0-0,10	4,56	20,0	17,9	650	2,73	14,5	0,80	0,07
	0,10-0,20	4,46	16,9	13,0	700	1,32	10,2	0,24	0,03
Guanhães	0-0,10	4,45	55,9	5,6	786	2,86	33,9	0,11	0,11
	0,10-0,20	4,57	41,7	4,4	774	1,87	27,7	0,04	0,07
Santa Bárbara	0-0,10	4,46	28,3	15,9	491	3,58	32,6	0,09	0,08
	0,10-0,20	4,48	19,5	13,9	498	1,83	20,1	0,04	0,05
Virginópolis	0-0,10	4,89	52,1	7,5	621	2,40	24,1	0,73	0,24
	0,10-0,20	4,77	45,2	5,7	708	1,88	19,9	0,25	0,13

^(a) pH em água (1: 2.5). ^(b) Walkley-Black (Embrapa, 1979). ^(c) (Alvarez V. et al., 2000). ^(d) (EMBRAPA, 2013). ^(e) Mehlich-1. ^(f) trocável extraído com KCl 1 mol L⁻¹. Dados extraídos de Leite (2001).

2.2 Extrações de fósforo

Neste trabalho foi utilizado o método de extração sequencial proposto por Hedley et al. (1982). As amostras de solo foram submetidas a uma série de extrações químicas por 16 h: (a) resina extratora de ânions, (b) NaHCO_3 ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$; P Bic), (c) NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$; P NaOH.1), (d) HCl ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$) e (e) NaOH ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$; P NaOH.2). O P_o foi determinado pela diferença entre P_i e P total (P_t). O P_t nos extratos foi determinado após a digestão em autoclave usando persulfato de amônio (Ebina et al., 1983). Em todos os casos, a concentração de P foi determinada colorimetricamente seguindo o método de Braga e DeFelipo (1974).

2.3 Análises estatísticas

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com os cinco sítios no estado de Minas Gerais sendo consideradas como blocos e o tempo de avaliação como os tratamentos. Para testar os pressupostos da análise de variância, os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Barlett. Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando as diferenças entre as médias foram significativas, essas foram comparadas pelo teste de Duncan ($p < 0,1$). Todas as análises estatísticas foram realizadas com o software estatístico R versão 4.0.0 (R Core 2020).

3. RESULTADOS

3.1 P extraído com resina extratora de ânions e NaHCO_3 ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$)

Para P_i extraído com bicarbonato (Pi Bic) na profundidade de 0- 0,10 m, houve efeito do tempo de avaliação, em que no ano de 2020 as médias de Pi Bic foram maiores que as de 1998, indicando incrementos positivos nessa fração de P ao longo do tempo de cultivo (Figura

1). Para Po Bic houve o mesmo padrão de Pi Bic, em que o eucalipto apresentou teores mais elevados de Po em 2020 que em 1998 (Figura 1).

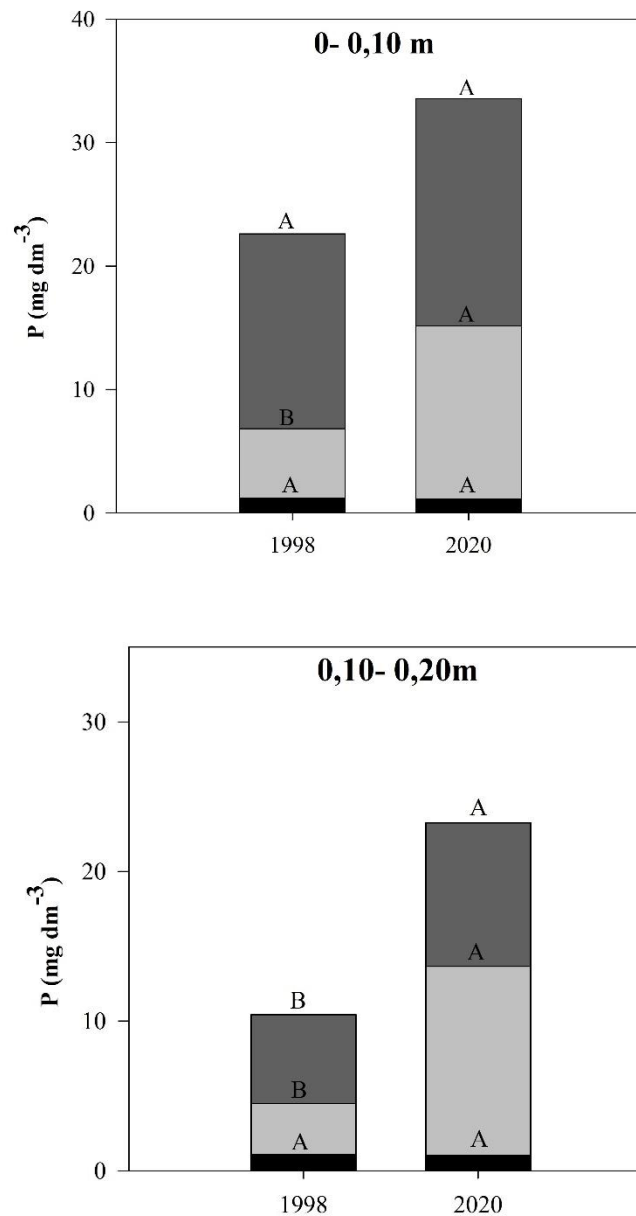


Figura 1- Teores de P extraído com resina trocadora de ânions e P inorgânico (Pi) e orgânico (Po) extraído com NaHCO_3 (0,5 M) nas camadas de 0-0,10 e 0,10- 0,20 m de profundidade nos dois tempos de avaliação (1998 e 2020). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Duncan a 10 % de probabilidade.

Para Pi Bic na profundidade de 0-10, 0,20 m houve o efeito significativo do tempo de avaliação, com maiores teores médios no ano de 2020. Para Po Bic, também no ano de 2020, os teores médios foram maiores em relação a 1998 (Figura 1).

3.2 P extraído com NaOH.1 (0,1 mol L⁻¹) e HCl (1,0 mol L⁻¹)

Houve efeito do tempo de avaliação apenas nos teores de Po NaOH.1 nas duas profundidades avaliadas, indicando aumento nos teores de Po no solo ao longo do tempo de cultivo com eucalipto (Figura 2). Para Po, na profundidade de 0,10- 0,20 m, os teores verificados em 2020 foram aproximadamente 50 % maior que os teores verificados em 1998.

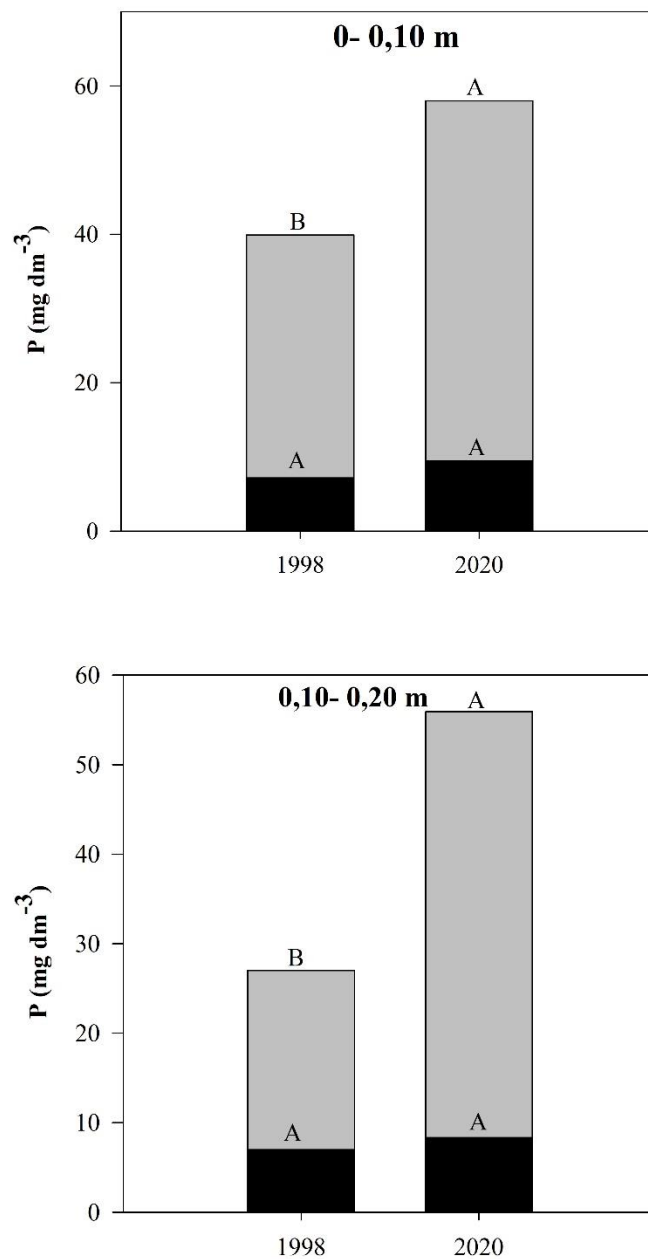
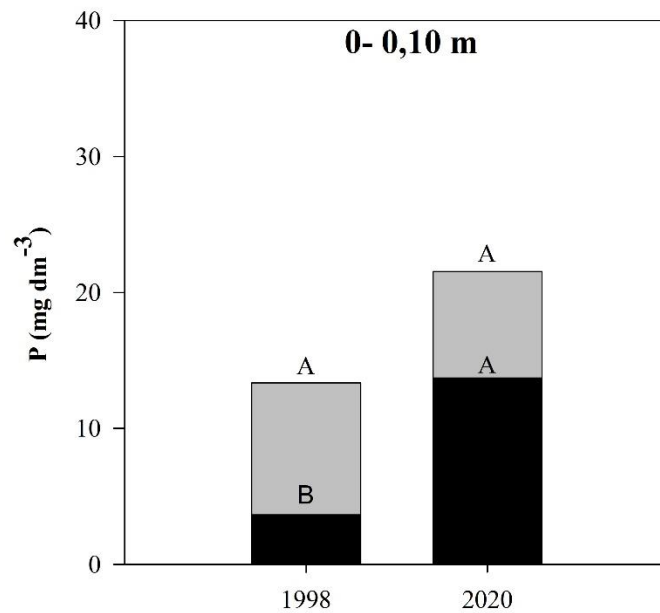


Figura 2- Teores de P inorgânico (Pi) e orgânico (Po) extraído com NaOH (0,1 M) nas camadas de 0-0,10 e 0,10- 0,20 m de profundidade nos dois tempos de avaliação (1998 e 2020). Médias

seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Duncan a 10 % de probabilidade.

3.3 P extraído com NaOH.2 (0,5 mol L⁻¹)

Houve efeito apenas do tempo de avaliação para Pi NaOH.2 na profundidade de 0- 0,10 m, em que as médias do ano de 2020 foram expressivamente superiores às do ano de 1998 (Figura 3). Entretanto, na profundidade de 0,10-0,20 m, não foi verificado o efeito do tempo de avaliação.



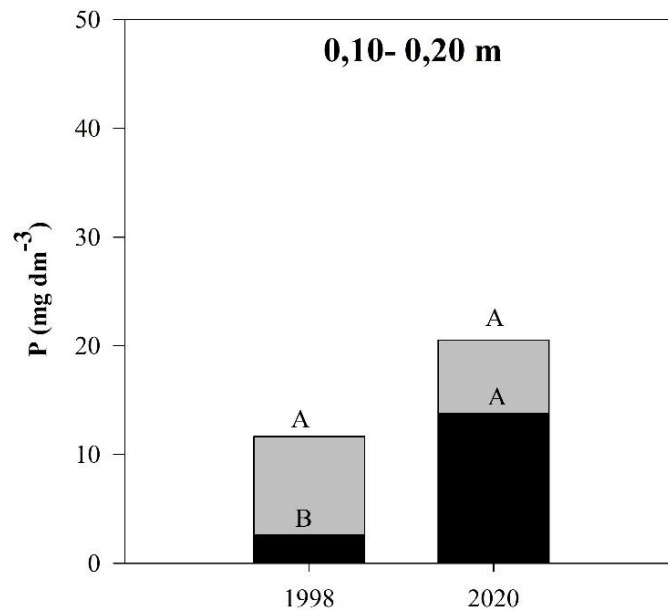


Figura 3- Teores de P inorgânico (Pi) e orgânico (Po) extraído com NaOH.2 (0,5 M) nas camadas de 0-0,10 e 0,10- 0,20 m de profundidade nos dois tempos de avaliação (1998 e 2020). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Duncan a 10 % de probabilidade.

3.4 Contribuição relativa das frações de P no solo ao longo do tempo de cultivo

Ao longo dos anos de cultivo com eucalipto, houve alteração de participação das formas orgânicas e inorgânicas de P em relação ao P total (Tabela 3). Houve aumento da participação das frações Pi Bic, Po NaOH.1 e Pi NaOH.2 nas duas profundidades, em que em 2020 essas frações tiveram maior participação no PT que em 1998 .

Além disso, a profundidade de 0,10- 0,20 m mostrou-se mais sensível em detectar as alterações nas formas de P, em que para todas as frações nessa profundidade, com exceção do Pi res, a contribuição foi maior em 2020 que em 1998

Tabela3- Contribuição relativa de cada fração de P em relação ao P total (PT) nas profundidades de 0- 0,10 e 0,10- 0,20 m nos dois tempos de avaliação.

	Frações de P							P residual	PT
	Pi res	Pi Bic	Po Bic	Pi NaOH.1	Po NaOH.1	Pi NaOH.2	Po NaOH.2		
1998									
0- 0,10 m	0,75	3,08	8,29	6,07	20,34	2,25	6,03	53,62	161,0
0,10- 0,20 m	0,70	2,98	3,83	4,50	12,94	1,68	4,25	69,08	154,9
2020									
0- 0,10 m	0,52	5,91	7,68	4,36	24,91	7,21	8,16	10,63	191,0
0,10- 0,20 m	0,75	8,51	11,07	6,29	35,91	10,39	11,76	15,32	132,51

4. DISCUSSÃO

Para as frações lábeis de P extraídas, houve o efeito positivo do tempo de cultivo do solo com eucalipto tanto para Pi Bic quanto para Po Bic, em que maiores médias foram verificadas em 2020 em relação a 1998 nas duas profundidades avaliadas (Figura 1). Esse resultado indica que durante o tempo de cultivo com eucalipto, houve incremento positivo de P no sistema, que pode ser atribuído tanto à adubação de reposição nos plantios ou, em relação ao Po, à ciclagem de nutrientes proveniente do material orgânico depositado ao solo. Ferreira et al. (2021), estudando a dinâmica das frações de P em diferentes usos do solo, verificaram teores semelhantes de Po Bic entre o eucalipto e a floresta nativa, indicando que a ciclagem de P em ecossistemas florestais pode ser tão eficaz quanto em sistemas conservacionistas tido como referência.

Incrementos em Po lábil nas áreas de eucalipto também podem indicar imobilização de P por microrganismos e aumento da atividade da microbiota edáfica. Novais e Smyth (1999) consideram uma concentração de 0,2% do P total nos resíduos como o ponto onde os processos de mineralização e imobilização estão em equilíbrio onde a concentração está abaixo de 0,2%, o processo de imobilização do P é predominante. Nas áreas estudadas, a concentração de P no

solo da floresta encontra-se entre 0,050 e 0,025% conforme estudo prévio realizado por Leite (2001), portanto, a favor da imobilização do P.

Para o extrator NaOH.1, não ocorreram diferenças entre os tempos de avaliação para a fração Pi, as diferenças foram verificadas apenas na fração Po nas duas profundidades (Figura 2), com maiores médias verificadas em 2020. Rocha et al. (2019) afirmam que mesmo que em solos florestais de regiões tropicais com a predominância de baixos teores de Pi, é comum a presença de elevados teores de Po, que podem contribuir ativamente para a nutrição das árvores após hidrólise e ação enzimática de microrganismos edáficos sobre o Po (Huang et al., 2015). Esse processo é resultante de maiores conteúdos de MOS no sistema condicionado pela biomassa florestal, favorecendo a predominância das formas de Po, aumentando a disponibilidade de P no sistema solo- planta (Costa et al., 2016; Negassa e Leinweber, 2009; Rodrigues et al., 2016).

Nas frações de P extraídas com NaOH.2, ocorreram aumentos em Pi de baixa labilidade ao longo do nas duas profundidades (Figura 3). Contudo, o P extraído com NaOH.2 é considerada a fração de P mais recalcitrante no solo, ou seja, pouco expressiva no âmbito de nutrição de plantas, não interferindo de fato na disponibilidade de P (Maranguit et al., 2017; Ferreira, 2017; Rocha et al., 2019). Gattiboni et al. (2007) discutem que o P NaOH.2 somente pode contribuir para a nutrição das plantas em situações extremas de deficiência de P, por encontrar-se ligado aos coloides do solo com elevada energia de ligação.

Os teores de PT no solo no ano de 1998 foram de 75,39 e 43,23 mg dm⁻³ para as profundidades de 0-0,10 e 0,10- 0,20 m, respectivamente, e em 2020, esses teores foram de 124,97 e 112,20 mg dm⁻³ (Tabela 3). Desse total, cerca de 70 % estão na forma orgânica e 30 % na forma inorgânica. Foltran et al. (2019), estudando a dinâmica das frações de P em solos sob eucalipto, encontrou teores semelhantes de P e proporções Po/ Pi semelhantes aos deste estudo. Esses resultados indicam que para o eucalipto, ocorreram incrementos dos teores de P

em todas as frações e ao longo dos anos de cultivo (Figuras 1, 2 e 3). Isto evidencia a magnitude da ciclagem biogeoquímica nesse sistema, principalmente devido aos resultados de aumento nos teores de Po, indicando que esse sistema de uso do solo tende a conservar teores de P em formas potencialmente disponíveis às plantas.

5. CONCLUSÃO

Os principais resultados deste trabalho mostram que as formas orgânicas de P (Po) foram as mais sensíveis na diferenciação do efeito do tempo de cultivo com eucalipto dinâmica das frações de P. Ao longo dos anos de cultivo, os solos cultivados com eucalipto mais sustentáveis em relação à conservação dos teores de P, sendo portanto, sistemas mais eficientes em manter a qualidade nutricional do solo em relação à este nutriente.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001 e pelo grupo NUTREE-UFV. Agradecemos à equipe de tecnologia e inovação da CENIBRA- Celulose Nipo-Brasileira por todo o apoio ao longo do experimento.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V VH NOVAIS RF, DIAS, LE., OLIVEIRA JA. (2000). Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo da SBCS, 25: 27-32.
- BECK MA, SANCHEZ PA. (1994). Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. Soil Sci. Soc. Am. J. 34, 1424-1431.

- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofométrica de fósforo em extratos de solo e planta. *R. Ceres*, 21:73-85, 1974.
- COSTA MG, GAMA-RODRIGUES AC, GONCALVES JLD, GAMA-RODRIGUES EF, SALES MVD, ALEIXO S. (2016). Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under Eucalyptus plantations, Brazil.
- CUNHA GM, GAMA-RODRIGUES AC, COSTA GS, VELLOSO ACX. (2007) Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. *R. Bras. Ci. Solo*, 31: 667-672.
- EMBRAPA, 2011. Manual de métodos de análise de solo. Embrapa, Rio de Janeiro, Brazil.
- FERNANDEZ, J.Q.P., DIAS, L.E., BARROS, N.F., ET AL., 2000. Productivity of Eucalyptus camaldulensis affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian Oxisol. *For. Ecol. Manage.* 127, 93–102.
- FERREIRA, ACF. Impacto do uso do solo e altitude sob a dinâmica do carbono e fósforo no bioma Mata Atlântica. (2017). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- FOLTRAN EC, ROCHA JHT, BAZANI JH, GONCALVES JL, RODRIGUES M, PAVINATO P, GARCIA-MINA JM. (2019) Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. *Forest ecology and management*, 435: 170-179. doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.053
- GATIBONI LC, CONDRON LM. 2021. A rapid fractionation method for assessing key soil phosphorus parameters in agrossystems. *Geoderma*, 385.
- GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. (2007). Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob Sistema plantio direto [Bioavailability of soil phosphorus forms in no-tillage system]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 691–699.
- GU C, MARGENOT AJ. (2020) Navigating limitations and opportunities of soil phosphorus fractionation. *Plant Soil*. doi.org/10.1007/s11104-020-04552-x
- GUERRA JGM, ALMEIDA DL, SANTOS GA, FERNANDES MS. (1996) Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 31: 291-299.
- GUPPY, C. (2021) Is soil phosphorus fractionation as valuable as we think? *Plant Soil* 459, 19–21. doi.org/10.1007/s11104-020-04817-5
- HEDLEY, MJ, STEWART JWB, CHAUHAN BS. (1982) Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46: 970-976.

- HERBERT MA. (1996). Fertilizers and eucalypt plantations in South Africa. In: Attiwill, P.M., Adams, M.A., eds. Nutrition of eucalypts. Collingwood, CSIRO Publishing, p. 303-326.
- HUANG L, JIA X, ZHANG G. (2017). Soil organic phosphorus transformation during ecosystem development:
- HUANG LD, ZHANG YH, SHI YM, LIU YB, WANG L, YAN N. (2015). Comparison of phosphorus fractions and phosphatase activities in coastal wetland soils along vegetation zones of Yancheng National Nature Reserve, China. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 157, 93–98.
- IBÁ, 2017. Indústria Brasileira de Árvores (Brazilian Tree Industry) annual report 2017. São Paulo.
- LEITE FP. Relações nutricionais e características químicas de solos da região do Vale do Rio Doce pelo cultivo do eucalipto. Tese. Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- LEITE FP, SILVA IR, NOVAIS RF, BARROS NF, NEVES JCL. (2010) Alterations of soil chemical properties by eucalyptus cultivation in five regions in the Rio Doce Valley. *Rev Bras Ciência do Solo.* 2010; 34:821–831.
- MARANGUIT, D., GUILLAUME, T., KUZYAKOV, Y., 2017. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *Catena* 149, 385–393.
- MCMAHON DE, VERGÜTZ L, VALADARES SV, DA SILVA IR., JACKSON RB. (2019) Soil nutrient stocks are maintained over multiple rotations in Brazilian Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management* 448: 364-375.
- MAO, Q.; LU, X.; ZHOU, K.; CHEN, H; ZHU, X.; MORI, T.; MO, J. (2017). Effects of longterm nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in a N-rich tropical forest. *Geoderma*, 285, 57-63.
- NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. (2009). How does the Hedley sequential Phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil Phosphorus: a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 305-325.
- NOVAIS R.F, SMYTH TJ. (1999). Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 399p.
- OLIVEIRA-FILHO, A.T., FONTES, M.A.L., 2000. PATTERNS OF FLORISTIC DIFFERENTIATION AMONG Atlantic forests in southeastern Brazil and the influence of climate. *Biotropica* 32, 793–810.

- RIBEIRO, M.C., METZGER, J.P., MARTENSEN, A.C., PONZONI, F.J., HIROTA, M.M., 2009. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biol. Conserv.* 142, 1141–1153.
- ROCHA JHT, GONÇALVES JLM, GAVA JL, GODINHO TO, MELO ESAC, BAZANI JH, HUBNER A, WICHERT MP (2016). Forest residue maintenance increased the wood productivity of a Eucalyptus plantation over two short rotations. *Forest Ecology and Management*, 379, 1-10.
- ROCHA JHT, MENEGALE ML, RODRIGUES M, GONÇALVES JLDM, PAVINATO PS, FOLTRAN EC, JAMES JN. (2019). Impacts of timber harvest intensity and P fertilizer application on soil P fractions. *Forest ecology and management*, 437: 295-303.
- RODRIGUES M, PAVINATO PS, WITHERS PJA. (2016). Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. *Sci. Total Environ.* 542, 1050–1061.
- TURNER BL, ENGELBRECHT BMJ. (2011). Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. *Biogeochemistry* 103, 297–315.
- VINCENT, A.G., TURNER, B.L., TANNER, E.V.J., 2010. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical forest. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 48–57.