

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Arranjo espacial de mudas na restauração florestal e dinâmica da paisagem em
áreas no contexto da mineração de bauxita na Zona da Mata mineira**

Fagner Darlan Dias Corrêa
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

FAGNER DARLAN DIAS CORRÊA

Arranjo espacial de mudas na restauração florestal e dinâmica da paisagem em áreas no contexto da mineração de bauxita na Zona da Mata mineira

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Sebastiao Venancio Martins

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

T

C824a
2026

Correa, Fagner Darlan Dias, 1997-

Arranjo espacial de mudas na restauração florestal e
dinâmica da paisagem em áreas no contexto da mineração de
bauxita na Zona da Mata Mineira / Fagner Darlan Dias Correa. –
Viçosa, MG, 2026.

1 dissertação eletrônica (77 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexo.

Orientador: Sebastião Venâncio Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.267>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Plantio de florestas. 2. Paisagens florestais - Medição.
3. Bauxita - Minas e mineração. 4. Florestas sustentáveis.
I. Martins, Sebastião Venâncio, 1965-. II. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.92324

FAGNER DARLAN DIAS CORRÊA

Arranjo espacial de mudas na restauração florestal e dinâmica da paisagem em áreas no contexto da mineração de bauxita na Zona da Mata mineira

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Fagner Darlan Dias Corrêa
Autor

Sebastiao Venancio Martins
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 26/05/2026 às 14:16:37 e pelo orientador em 01/06/2026 às 16:20:18. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **JOEV.3Q79.Z2FL** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação simboliza o encerramento de um ciclo marcado pelo aprendizado e pelo apoio de pessoas que contribuíram de forma decisiva ao longo dessa caminhada.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter me guiado até este momento. Agradeço aos meus pais, Walci Luciano Corrêa e Geni das Dores Dias Corrêa, que nunca mediram esforços em prol da minha formação e sempre me apoiaram ao longo de toda a minha trajetória. Agradeço também ao meu irmão, Wagner Darlon Dias Corrêa, pelo incentivo constante e por acompanhar de perto grande parte do meu percurso acadêmico e pessoal.

À minha namorada, deixo meu agradecimento pelo apoio, incentivo e conforto nos momentos mais difíceis desta caminhada.

Agradeço, em especial, ao professor e amigo Sebastião Venâncio Martins pelas oportunidades concedidas desde a graduação e pelo apoio e orientação ao longo de todo o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) pela parceria e pelo financiamento do projeto.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Restauração Florestal da Universidade Federal de Viçosa (LARF/UFV), em especial Wesley, Laily, Adriely, Enzo e Yasmim, agradeço pelas contribuições significativas nas atividades de campo e no desenvolvimento desta pesquisa. E em especial ao pesquisador e pós-doutorando João Flávio Costa dos Santos pelo auxílio no mapeamento por fotointerpretação de imagens de satélite.

Por fim, agradeço a todos os demais amigos que a Universidade Federal de Viçosa me proporcionou ao longo dessa trajetória.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

CORRÊA, Fagner Darlan Dias, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Arranjo espacial de mudas na restauração florestal e dinâmica da paisagem em áreas no contexto da mineração de bauxita na Zona da Mata mineira.** Orientador: Sebastiao Venancio Martins.

A restauração florestal associada à mineração de bauxita resulta de processos que se manifestam em diferentes escalas espaciais, desde respostas iniciais em sistemas de plantio até mudanças na cobertura florestal e na estrutura da paisagem ao longo do tempo, decorrentes de ações de restauração ativa e de regeneração natural. Nesse contexto, esta dissertação avaliou a restauração florestal na Mata Atlântica integrando análises de campo em escala local, voltadas ao desenvolvimento estrutural e funcional inicial de plantios compensatórios com espécies nativas, e análises espaciais em escala de paisagem, direcionadas à dinâmica espaço-temporal da cobertura florestal e à reorganização estrutural dos fragmentos florestais em uma região sob influência da mineração de bauxita. No primeiro capítulo, foram avaliados os efeitos de diferentes espaçamentos de plantio sobre o desenvolvimento estrutural e funcional inicial de sistemas de restauração florestal compensatória em área pertencente à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), no município de Descoberto, Minas Gerais. Três arranjos espaciais (2×2 m, 3×2 m e 3×3 m) foram comparados 52 meses após a implantação, considerando crescimento em diâmetro e altura, estrutura do dossel, produção de serapilheira e atributos químicos e físicos do solo. Os resultados indicaram que o espaçamento mais adensado promoveu maior incremento em altura e diâmetro, fechamento mais rápido do dossel e maior produção de serapilheira, refletindo consolidação estrutural e funcional mais acelerada. As análises multivariadas evidenciaram dissociação temporal entre as respostas da vegetação e do solo, com a vegetação apresentando respostas mais rápidas. Esses resultados demonstram que o arranjo espacial do plantio exerce forte influência sobre a ocupação do sítio e processos funcionais iniciais, como a ciclagem de matéria orgânica, contribuindo para o avanço da restauração em direção a condições mais próximas aos ecossistemas de referência. No segundo capítulo, avaliou-se a dinâmica espaço-temporal da cobertura florestal e da estrutura da paisagem ao longo de quatro décadas (1985–2025) nos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas, na Zona da Mata Mineira, com ênfase na comparação entre a paisagem regional e áreas de compensação ambiental associadas à mineração de bauxita. A análise foi realizada a partir da fotointerpretação de imagens Landsat e da aplicação de métricas

de paisagem relacionadas à cobertura florestal, fragmentação, borda e complexidade da forma dos fragmentos. Os resultados revelaram redução da cobertura florestal entre 1985 e 2005, decorrente de atividades agropecuárias, seguida por aumento expressivo em 2025, particularmente em fragmentos de grande extensão. As áreas sob compensação ambiental apresentaram maior proporção de cobertura florestal, menor incidência de perdas e maior continuidade espacial em relação à paisagem regional, evidenciando sua eficácia na conservação e reorganização estrutural da paisagem. A distribuição da cobertura florestal mostrou ainda associação com o gradiente topográfico, concentrando-se em áreas de maior altitude. De forma integrada, os resultados demonstram que a restauração florestal associada à mineração de bauxita resulta de processos complementares em diferentes escalas espaciais. Enquanto decisões locais, como o espaçamento de plantio, influenciam diretamente a velocidade de consolidação estrutural e funcional dos sistemas restaurados, os processos em escala de paisagem refletem reorganização estrutural mais lenta e heterogênea, marcada por ganhos de cobertura florestal concomitantes à persistência da fragmentação. Esses resultados reforçam a importância das ações de restauração florestal compensatória e da conservação dos remanescentes florestais para o aumento da conectividade da paisagem e a promoção de ecossistemas mais resilientes e funcionalmente integrados na Mata Atlântica.

Palavras-chave: Arranjo espacial de plantio; métricas de paisagem; mineração sustentável

ABSTRACT

CORRÊA, Fagner Darlan Dias, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Spatial arrangement of seedlings in forest restoration and landscape dynamics in areas influenced by bauxite mining in the Zona da Mata region of Minas Gerais.** Adviser: Sebastiao Venancio Martins.

Forest restoration associated with bauxite mining results from processes operating at different spatial scales, ranging from initial responses in planting systems to changes in forest cover and landscape structure over time, driven by both active restoration actions and natural regeneration processes. In this context, this dissertation evaluated forest restoration in the Atlantic Forest by integrating local-scale field analyses focused on the initial structural and functional development of compensatory native-species plantings, and landscape-scale spatial analyses addressing the spatiotemporal dynamics of forest cover and the structural reorganization of forest fragments in a region influenced by bauxite mining. In the first chapter, the effects of different planting spacings on the initial structural and functional development of compensatory forest restoration systems with native Atlantic Forest species were evaluated in an area belonging to the Brazilian Aluminum Company (CBA), in the municipality of Descoberto, Minas Gerais, Brazil. Three spatial planting arrangements (2×2 m, 3×2 m, and 3×3 m) were compared 52 months after establishment, considering diameter and height growth, canopy structure, litter production, and soil chemical and physical attributes. The results indicated that the denser spacing promoted greater increases in height and diameter, faster canopy closure, and higher litter production, reflecting more rapid structural and functional consolidation. Multivariate analyses revealed a temporal dissociation between vegetation and soil responses, with vegetation responding more rapidly than soil attributes. These findings demonstrate that planting spatial arrangement strongly influences site occupation and early functional processes such as organic matter cycling, contributing to restoration progress toward conditions closer to reference ecosystems. In the second chapter, the spatiotemporal dynamics of forest cover and landscape structure over four decades (1985–2025) were assessed in the municipalities of Descoberto and Itamarati de Minas, in the Zona da Mata region of Minas Gerais, with emphasis on comparing the regional landscape and areas of environmental compensation associated with bauxite mining. The analysis was based on the photointerpretation of Landsat imagery and the application of landscape metrics related to forest cover, fragmentation, edge effects, and patch shape complexity. The results revealed a

reduction in forest cover between 1985 and 2005, driven by agricultural activities, followed by a marked increase in 2025, particularly in large forest patches. Areas under mining compensation showed a higher proportion of forest cover, lower rates of loss, and greater spatial continuity compared to the regional landscape, demonstrating their effectiveness in conserving and reorganizing landscape structure. Forest cover distribution was also associated with the topographic gradient, concentrating in higher-altitude areas. Overall, the results demonstrate that forest restoration associated with bauxite mining emerges from complementary processes operating at different spatial scales. While local decisions, such as planting spacing, directly influence the speed of structural and functional consolidation in restored systems, landscape-scale processes reflect a slower and more heterogeneous structural reorganization, characterized by increases in forest cover alongside persistent fragmentation. These findings highlight the importance of compensatory restoration actions and the conservation of remaining forest fragments for enhancing landscape connectivity and promoting more resilient and functionally integrated ecosystems in the Atlantic Forest.

Keywords: planting spatial arrangement; landscape metrics; sustainable mining

SUMÁRIO

Sumário	
INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
CAPÍTULO I:	15
O arranjo espacial de plantio molda as respostas estruturais e funcionais iniciais na restauração florestal compensatória associada à mineração de bauxita	15
1 INTRODUÇÃO	18
2 MATERIAL E MÉTODOS	20
2.1 <i>Área de estudo</i>	20
2.2 <i>Procedimentos de campo</i>	22
2.3 <i>Avaliação das mudas em diferentes espaçamentos de plantio</i>	23
2.3.1 <i>Crescimento em altura e diâmetro</i>	23
2.3.2 <i>Fotos hemisféricas</i>	23
2.3.3 <i>Serapilheira</i>	23
2.3.4 <i>Amostragem de solo e análises químicas e físicas</i>	24
2.4 <i>Análise de dados</i>	24
3 RESULTADOS	26
3.1 <i>Incremento em diâmetro ao nível do solo (DNS) e em altura das espécies nativas em diferentes espaçamentos de plantio</i>	26
3.2 <i>Abertura do dossel estimada por fotografias hemisféricas em diferentes espaçamentos de plantio</i>	27
3.3 <i>Serapilheira acumulada em função do espaçamento de plantio</i>	28
3.4 <i>Parâmetros químicos e físicos do solo sob diferentes espaçamentos de plantio</i>	28
3.5 <i>Integração multivariada de respostas estruturais, funcionais e edáficas</i>	30
4 DISCUSSÃO	31
4.1 <i>Estrutura da vegetação em diferentes espaçamentos de plantio</i>	31
4.2 <i>Dinâmica funcional do sistema de restauração em função do espaçamento de plantio</i>	33
4.3 <i>Integração estrutural, funcional e edáfica do espaçamento de plantio: implicações ecológicas para a restauração florestal</i>	35
5 CONCLUSÃO	36
6 REFERÊNCIAS	37
CAPÍTULO II:	44
Dinâmica da cobertura florestal e estrutura da paisagem ao longo de 40 anos em uma região da Mata Atlântica associada à mineração de bauxita	44
7 INTRODUÇÃO	47

8	MATERIAL E MÉTODOS	48
8.1	<i>Área de estudo</i>	48
8.2	<i>Aquisição e pré-processamento dos dados.....</i>	50
8.3	<i>Análise de dados</i>	52
9	RESULTADOS.....	54
9.1	<i>Mudanças nas métricas da paisagem por classes de tamanho dos fragmentos.....</i>	55
9.2	<i>Variação temporal das métricas da paisagem no espaço multivariado</i>	57
9.3	<i>Dinâmica da cobertura florestal na paisagem regional e na área de compensação da CBA.....</i>	58
10	DISCUSSÃO.....	63
10.1	<i>Dinâmica estrutural da paisagem florestal ao longo de quatro décadas</i>	63
10.2	<i>Dinâmica da cobertura florestal na paisagem regional e na área de compensação: implicações estruturais</i>	65
11	CONCLUSÃO	68
12	REFERÊNCIAS	68
13	ANEXO I.....	75
13.1	<i>Avaliação da acurácia e confiabilidade da fotointerpretação da cobertura florestal nativa.....</i>	75
13.2	<i>Métricas de acurácia</i>	76
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77

INTRODUÇÃO GERAL

A mineração desempenha papel fundamental no desenvolvimento econômico global, ao fornecer matérias-primas essenciais para a produção industrial (Xu et al., 2025; Zhu et al., 2025). No Brasil, esse setor assume relevância estratégica, especialmente no que se refere à cadeia produtiva do alumínio. Em 2024, o setor apresentou superávit expressivo no comércio exterior brasileiro, impulsionado pelo crescimento das exportações e pela forte concentração na indústria de transformação mineral (ANM, 2025), evidenciando a importância da mineração de bauxita para a economia nacional. Diante desse cenário, torna-se fundamental compreender e mitigar os impactos ambientais associados à atividade minerária, particularmente por meio de mecanismos eficazes de compensação ambiental e restauração florestal.

Os depósitos de bauxita no Brasil distribuem-se predominantemente em regiões tropicais, associadas tanto a remanescentes florestais da Amazônia e da Mata Atlântica quanto a áreas com histórico prévio de conversão do uso da terra, como a agropecuária (Cosimo et al., 2021; Fonseca et al., 2024; Raahauge e Williams, 2022; Vilas Boas et al., 2018). Nesse contexto, a conciliação entre conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico depende de uma gestão estruturada dos impactos ambientais, baseada nas etapas de evitação, minimização e compensação, sendo esta última frequentemente materializada por ganhos ecológicos associados à restauração florestal (Gastauer et al., 2024; Moilanen & Kotiaho, 2018).

A restauração ecológica é definida como o processo de facilitação da recuperação de ecossistemas degradados, danificados ou destruídos, com o objetivo de restabelecer sua integridade estrutural, os processos funcionais e a biodiversidade (Su, 2025; Zhao et al., 2024). No contexto da restauração florestal, esse processo visa reconstituir florestas ecologicamente viáveis, capazes de se autoperpetuar e independentes de intervenções humanas constantes, aproximando áreas degradadas de uma condição estrutural e funcional semelhante à de ecossistemas florestais de referência (Andrade et al., 2023).

Entre as diferentes estratégias de restauração ecológica, o plantio de mudas destaca-se como o método mais utilizado (Brasil Neto et al., 2025; Fonseca et al., 2024; Martins et al., 2022a, 2020b). O sucesso da restauração ecológica é comumente avaliado por meio de indicadores como cobertura vegetal, riqueza de espécies, condições do solo e função ecossistêmica, os quais, em conjunto, refletem o progresso do ecossistema restaurado em direção ao equilíbrio ecológico (Martins et al., 2020; Zhu et al., 2025). Contudo, um dos

principais desafios é o monitoramento de longo prazo, especialmente no que se refere à capacidade desses ecossistemas de se tornarem autossustentáveis e resilientes (Zhu et al., 2025).

Apesar dos avanços no campo da restauração florestal, ainda persistem lacunas importantes relacionadas às decisões silviculturais adotadas em plantios de restauração. Embora o efeito do espaçamento de plantio sobre a dinâmica de crescimento de espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* seja amplamente documentado (Chane et al., 2022; Erasmus et al., 2018; Hechter et al., 2026; Kearney et al., 2007; Resquin et al., 2020; Sharapov et al., 2024), evidências equivalentes para espécies arbóreas nativas ainda permanecem escassas, limitando a compreensão sobre como diferentes arranjos espaciais influenciam os componentes estruturais, funcionais e edáficos de ecossistemas florestais em restauração.

Para além da escala local, compreender as relações entre as mudanças na cobertura florestal e a estrutura da paisagem é fundamental para avaliar os efeitos espaciais e temporais dos processos de restauração florestal (Zhang et al., 2020). As métricas de paisagem constituem ferramentas fundamentais nesse contexto, ao quantificar atributos relacionados à área, forma, borda, conectividade e configuração espacial dos remanescentes florestais (Lima et al., 2017; Ribeiro et al., 2009). Ao permitir a quantificação simultânea de múltiplos componentes dos padrões espaciais, essas métricas possibilitam avaliar a reorganização estrutural da cobertura florestal ao longo do tempo (Oliveira & Barbosa, 2020; Peng et al., 2010).

Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo analisar diferentes dimensões da restauração florestal e da dinâmica da cobertura florestal nativa na Mata Atlântica, integrando abordagens de campo e análises espaciais em escala de paisagem. Inicialmente, o estudo avaliou os efeitos de diferentes espaçamentos de plantio em sistemas de restauração florestal com espécies nativas, com ênfase no crescimento inicial, na estrutura do dossel, na produção de serapilheira e nos atributos químicos e físicos do solo, buscando compreender como distintos arranjos espaciais influenciam os componentes estruturais, funcionais e edáficos do ecossistema em fase inicial de restauração. Além disso, também foi analisado a dinâmica espaço-temporal da cobertura florestal nativa em dois municípios da Zona da Mata Mineira, Descoberto e Itamarati de Minas, ao longo de quatro décadas (1985–2025), a partir de imagens do Landsat. Teve como foco a reorganização estrutural da paisagem e as diferenças espaciais associadas a diferentes regimes de uso e gestão do território, incluindo a comparação entre a paisagem regional e áreas de compensação ambiental vinculadas à mineração de bauxita. Foram avaliados padrões de perda e ganho de vegetação, mudanças na configuração espacial dos

fragmentos florestais por meio de métricas de paisagem relacionadas ao tamanho, à forma e à borda, bem como a influência do gradiente topográfico na distribuição da cobertura florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, A., Bargos, D. C., Fialho, T. M., & Cristofaro, S. (2023). Desafios da cadeia da restauração florestal no Vale do Paraíba Paulista. *Sociedade & Natureza*, 30, 257–277.
- ANM. (2025). *Sumário Mineral Brasileiro 2025*. Agência Nacional de Mineração. <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2025/sumario-2025.pdf>
- Brasil Neto, A. B., Schwartz, G., Noronha, N. C., Gama, M. A. P., Ferreira, G. C., Carvalho, E. J. M., & Brasil, N. M. de Q. X. (2025). Seedling planting to restore ecosystems after bauxite mining in Brazilian amazon: the need of monitoring and reviewing techniques and procedures. *Plant Ecology*, 1–14.
- Chane, A., Belay, T., & Tesfaye, Y. (2022). The effect of spacing and high planting density on yield of Eucalyptus globulus. *Journal of Innovative Agriculture*, 9(1), 40–48.
- Cosimo, L. H. E., Martins, S. V., & Gleriani, J. M. (2021). Suggesting priority areas in the buffer zone of Serra do Brigadeiro State Park for forest restoration compensatory to bauxite mining in Southeast Brazil. *Ecological Engineering*, 170, 106322.
- Erasmus, J., Kunneke, A., Drew, D. M., & Wessels, C. B. (2018). The effect of planting spacing on Pinus patula stem straightness, microfibril angle and wood density. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 91(3), 247–258.
- Fonseca, W. da S., Martins, S. V., Fioresi, E. M., & Villa, P. M. (2024). Complementing seedling planting with nucleation techniques increases forest restoration potential in areas around bauxite mining. *Land Degradation & Development*, 35(9), 3075–3089.
- Gastauer, M., Pinheiro, T., Caldeira, C. F., Ramos, S. J., Coelho, R. R., Fonseca, D. S., Tyski, L., de Rezende Cardoso, A. L., Neto, C. de S. C., & Guimarães, L. (2024). Large-scale forest restoration generates comprehensive biodiversity gains in an Amazonian mining site. *Journal of Cleaner Production*, 443, 140959.
- Hechter, U., Little, K. M., Chan, J. M., & Crous, J. (2026). The impact of planting density and mortality on Eucalyptus growth and profitability at rotation-end in South Africa. *New Forests*, 57(1), 2.
- Kearney, D., James, R., Montagu, K., & Smith, R. G. B. (2007). The effect of initial planting density on branching characteristics of Eucalyptus pilularis and E. grandis. *Australian Forestry*, 70(4), 262–268.
- Lima, B. C., Francisco, C. N., & Bohrer, C. B. de A. (2017). Landslides and forest fragmentation in the mountain range region of rio de janeiro state. *Ciencia Florestal*, 27(4), 1283–1295.

- Martins, S. V., Fonseca, W. da S., Andrade, C. F. de, Barros, R. da S., Paiva, J. M. de, Silva, C. H. da, & Brito, M. A. F. (2022a). Reflorestamento com mudas altas: uma inovação da restauração florestal na mineração de bauxita em Minas Gerais. *Engenharia Florestal: Contribuições, Análises e Práticas Em Pesquisa*. Guarujá: Editora Científica Digital.
- Martins, W. B. R., Lima, M. D. R., Junior, U. de O. B., Amorim, L. S. V.-B., de Assis Oliveira, F., & Schwartz, G. (2020b). Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review. *Ecological Engineering*, 145, 105707.
- Moilanen, A., & Kotiaho, J. S. (2018). Fifteen operationally important decisions in the planning of biodiversity offsets. *Biological Conservation*, 227, 112–120.
- Oliveira, B., & Barbosa, P. (2020). Rio Doce State Park buffer zone: forest fragmentation and land use dynamics. *Environmental Development and Sustainability*.
- Peng, J., Wang, Y., Zhang, Y., Wu, J., Li, W., & Li, Y. (2010). Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns. *Ecological Indicators*, 10(2), 217–223.
- Raahauge, B. E., & Williams, F. S. (2022). *Smelter grade alumina from bauxite: History, best practices, and future challenges*.
- Resquin, F., Navarro-Cerrillo, R. M., Carrasco-Letelier, L., & Rachid-Casnati, C. (2020). Influence of age and planting density on the energy content of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunni* and *Eucalyptus grandis* planted in Uruguay. *New Forests*, 51(4), 631–655.
- 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. *Biological Conservation*, 142(6), 1141–1153.
- Sharapov, E., Demakov, Y., & Korolev, A. (2024). Effect of plantation density on some physical and technological parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forests*, 15(2), 233.
- Su, R. (2025). The Importance, Strategies, and Future Prospects of Mine Ecological Restoration. In *Resources* (Vol. 14, Number 7, p. 105). MDPI.
- Vilas Boas, H. F., Almeida, L. F. J., Teixeira, R. S., Souza, I. F., & Silva, I. R. (2018). Soil organic carbon recovery and coffee bean yield following bauxite mining. *Land Degradation & Development*, 29(6), 1565–1573.
- Xu, H., Xu, Q., Gao, G., Dou, H., Waheed, A., & Aili, A. (2025). Advances in Ecological Restoration of Mining-Impacted Landscapes: Techniques, Case Studies, and Key Challenges. *Environmental Research*, 123485.
- Zhang, Y., Shen, W., Li, M., & Lv, Y. (2020). Integrating landsat time series observations and corona images to characterize forest change patterns in a mining region of Nanjing, Eastern China from 1967 to 2019. *Remote Sensing*, 12(19), 3191.
- Zhao, Y., Liu, S., Liu, H., Wang, F., Dong, Y., Wu, G., Li, Y., Wang, W., Tran, L.-S. P., & Li, W. (2024). Multi-objective ecological restoration priority in China: Cost-benefit optimization in different ecological performance regimes based on planetary boundaries. *Journal of Environmental Management*, 356, 120701.

Zhu, W., Kong, D., Ye, Q., Zhang, X., Tian, D., & Solangi, Y. A. (2025). Enhancing Environmental Sustainability in the Mining Industry: Circular Economy Strategies for Resource Management and Digital Integration. *Land Degradation & Development*, 36(9), 2887–2901.

CAPÍTULO I:

O arranjo espacial de plantio molda as respostas estruturais e funcionais iniciais na restauração florestal compensatória associada à mineração de bauxita

Submetido para publicação

O arranjo espacial do plantio molda as respostas estruturais e funcionais iniciais na restauração florestal compensatória associada à mineração de bauxita

Resumo

Compreender como o espaçamento de plantio influencia o desenvolvimento estrutural e funcional inicial de sistemas de restauração é essencial para otimizar estratégias de restauração florestal. Este estudo avaliou três espaçamentos de plantio ($T1 = 2 \times 2$ m, $T2 = 3 \times 2$ m e $T3 = 3 \times 3$ m) em um plantio de restauração florestal compensatória utilizando espécies nativas da Mata Atlântica, pertencente à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), localizado em Descoberto, Minas Gerais, sudeste do Brasil. O crescimento em diâmetro e altura das mudas, a estrutura do dossel, a produção de serapilheira e os atributos físico-químicos do solo foram avaliados 52 meses após o plantio. Para integrar essas respostas, foram aplicadas análises multivariadas, incluindo análise de componentes principais (PCA) e análise de variância multivariada permutacional (PERMANOVA). O espaçamento mais adensado (2×2 m) promoveu maiores incrementos em altura e diâmetro, fechamento mais rápido do dossel e maior produção de serapilheira, apresentando uma consolidação estrutural e funcional mais acelerada. Espaçamentos intermediários e mais amplos (3×2 m e 3×3 m) exibiram respostas mais moderadas, sugerindo limiares de densidade funcional que limitam ganhos adicionais a curto prazo. Análises multivariadas revelaram uma dissociação temporal entre as respostas da vegetação e do solo, com os atributos estruturais e funcionais da vegetação evoluindo mais rapidamente do que os atributos do solo. Esses resultados indicam que o espaçamento de plantio influencia o desempenho inicial da vegetação, a ocupação do sítio e processos funcionais essenciais, como a ciclagem da matéria orgânica. A integração do arranjo espacial, do crescimento e da produção de serapilheira fornece uma base sólida para promover sistemas restaurados mais resilientes, multifuncionais e mais próximos das condições de referência.

Palavras-chave: Atributos físicos e químicos do solo; Crescimento; Espaçamento de plantio; Estrutura do dossel; Mata Atlântica; Produção de serapilheira.

The spatial arrangement of planting shapes the initial structural and functional responses in compensatory forest restoration associated with bauxite mining

Abstract

Understanding how planting spacing influences the initial structural and functional development of restoration systems is essential for optimizing forest restoration strategies. This study evaluated three planting spacings ($T1 = 2 \times 2$ m, $T2 = 3 \times 2$ m, and $T3 = 3 \times 3$ m) in a compensatory forest restoration plantation using native Atlantic Forest species belonging to Companhia Brasileira de Alumínio, located in Descoberto, southeastern Brazil. Seedling diameter and height growth, canopy structure, litter production, and soil physicochemical attributes were assessed 52 months after planting. To integrate these responses, multivariate analyses were applied, including principal component analysis (PCA) and permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA). The densest spacing (2×2 m) promoted greater increases in height and diameter, faster canopy closure, and higher litter production, resulting in more accelerated structural and functional consolidation. Intermediate and wider spacings (3×2 m and 3×3 m) exhibited more moderate responses, suggesting functional density thresholds that limit additional short-term gains. Multivariate analyses revealed a temporal dissociation between vegetation and soil responses, with vegetation structural and functional attributes evolving more rapidly than soil attributes. These results indicate that planting spacing influences early vegetation performance, site occupation, and key functional processes, such as organic matter cycling. The integration of spatial arrangement, growth, and litter production provides a robust basis for promoting restored systems that are more resilient, multifunctional, and closer to reference conditions.

Keywords: Soil physicochemical attributes; Growth; Planting spacing; Canopy structure; Atlantic Forest; Litter production.

1 INTRODUÇÃO

Governos e setores industriais têm recorrido cada vez mais a mecanismos de compensação ambiental para mitigar os impactos residuais associados a projetos de desenvolvimento (Gardner et al., 2013; Sonter et al., 2014; Ten Kate et al., 2004), expandindo assim o papel do setor privado na implementação de ações de restauração florestal, particularmente no setor de mineração (Sonter et al., 2014). Evidências recentes da Mata Atlântica brasileira indicam que a integração da restauração florestal com a compensação ambiental pode contribuir efetivamente para o alcance de metas de conservação, especialmente em paisagens altamente fragmentadas (Borges-Matos et al., 2025; Mello et al., 2021; Fonseca et al., 2024; Toto et al., 2025). No entanto, os altos custos associados ao reflorestamento ativo continuam sendo uma barreira para o alcance das metas globais de restauração florestal, ressaltando a necessidade de estratégias que aprimorem a eficiência ecológica das intervenções de restauração (Crouzeilles et al., 2020).

Na região conhecida como Zona da Mata, no estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil, as atividades de mineração associadas à extração de bauxita ocorrem predominantemente em áreas já convertidas para usos antropogênicos da terra, como pastagens e sistemas agrícolas, onde a cobertura florestal é fragmentada (Cosimo et al., 2021; Procknow et al., 2025). Nessas paisagens antropizadas, em alguns casos, é necessário a remoção seletiva de árvores isoladas para viabilizar a extração mineral. Nessas situações, a autorização ambiental para remoção de árvores geralmente está condicionada à implementação de medidas de compensação florestal, que são definidas de acordo com o número de indivíduos removidos e cumpridas por meio do plantio compensatório de espécies nativas, conforme estabelecido no marco de licenciamento ambiental do Estado de Minas Gerais (Minas Gerais, 2019). Esse arranjo regulatório constitui um importante mecanismo institucional para a promoção da restauração da paisagem florestal dentro do bioma Mata Atlântica.

Considerando a crescente adoção da compensação florestal como instrumento de restauração da paisagem, a avaliação do progresso e da eficácia em projetos de restauração florestal tem se baseado amplamente no uso de indicadores estruturais e funcionais (Fonseca et al., 2024; Martins et al., 2020a). Os indicadores estruturais estão associados a respostas quantitativas da vegetação e da floresta, incluindo atributos como altura, diâmetro, biomassa e área basal, que refletem o desenvolvimento físico e a ocupação do sítio pelas espécies arbóreas (Barbosa et al., 2022; Prach & Walker, 2019). Em contrapartida, os indicadores funcionais representam processos e serviços ecossistêmicos, como ciclagem de nutrientes, dinâmica da

serapilheira e propriedades físico-químicas do solo, e estão relacionados ao funcionamento e à sustentabilidade a longo prazo dos ecossistemas restaurados (Barbosa et al., 2022; Muñoz-Rojas et al., 2016). A combinação de diferentes tipos de indicadores é fundamental para captar adequadamente as trajetórias de restauração, uma vez que os atributos estruturais e os processos funcionais respondem em diferentes escalas temporais (Barbosa et al., 2022; Dorrough et al., 2023; Giles et al., 2024).

Apesar dos avanços na pesquisa em restauração florestal da Mata Atlântica, muitos estudos empíricos ainda se baseiam em espaçamentos de plantio considerados convencionais, com ênfase no arranjo de 3×3 m, que é frequentemente adotado como padrão operacional em projetos de restauração (Brasil Neto et al., 2025; Barbosa et al., 2022; Souza et al., 2020; Martins et al., 2021). Essa padronização metodológica limita a compreensão de como a densidade de plantio afeta a dinâmica inicial de crescimento das espécies arbóreas e a ocupação do sítio, especialmente em contextos de restauração compensatória, onde a eficiência ecológica e o uso otimizado de recursos são considerações centrais (Beltrán et al., 2022; Forrester, 2019; Kremer et al., 2025; Müller et al., 2023). Nesse sentido, a avaliação de espaçamentos alternativos, incluindo arranjos de plantio mais densos, permite avaliar como as variações na densidade de plantio influenciam o fechamento do dossel, o desempenho estrutural inicial e os processos funcionais associados em sistemas florestais nos estágios iniciais de restauração.

Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar os efeitos de diferentes espaçamentos de plantio no crescimento inicial, na estrutura do dossel, na produção de serapilheira e nos atributos químicos e físicos do solo em um sistema de restauração florestal utilizando espécies nativas da Mata Atlântica. Especificamente, o estudo visou: (i) quantificar e comparar o incremento em diâmetro ao nível do solo e o crescimento em altura de espécies nativas submetidas a diferentes espaçamentos de plantio; (ii) analisar a influência do espaçamento de plantio na estrutura do dossel; (iii) avaliar a influência do espaçamento de plantio na produção de serapilheira como indicador funcional do desenvolvimento inicial do sistema; (iv) examinar se diferentes espaçamentos de plantio promovem alterações nos atributos químicos do solo durante a fase inicial da restauração florestal; e (v) integrar as respostas estruturais, funcionais e edáficas, a fim de identificar os principais gradientes ecológicos associados a diferentes espaçamentos de plantio e subsidiar o desenvolvimento de estratégias de restauração florestal mais eficientes.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 *Área de estudo*

O estudo foi conduzido no município de Descoberto, estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil, em uma área de restauração florestal com extensão total de 2.700 m², centrada em 21°27'29,66" S e 42°53'15,05" O (Figura 1A). A área experimental pertence à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) e integra um projeto de compensação ambiental voltado à restauração da paisagem e ao aumento da conectividade florestal na região. O projeto está inserido em uma paisagem composta por remanescentes florestais e áreas protegidas privadas, incluindo as Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs) São Lourenço e Boa Esperança, ambas administradas pela empresa.

A fitofisionomia da região corresponde à Floresta Estacional Semidecídua, dentro do domínio da Mata Atlântica (IBGE, 2012). Os solos da área de estudo são classificados como Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos (Santos et al., 2025). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima regional é classificado como Cwa, caracterizado como subtropical úmido com invernos secos e verões quentes (Alvares et al., 2013). A região apresenta topografia acidentada, com uma ampla variação de altitude, variando de aproximadamente 200 m a mais de 1.300 m (Martins et al., 2022a; Pereira et al., 2021). As temperaturas médias anuais são em torno de 21 °C e a precipitação média anual é de aproximadamente 1.628 mm (Pereira et al., 2021).

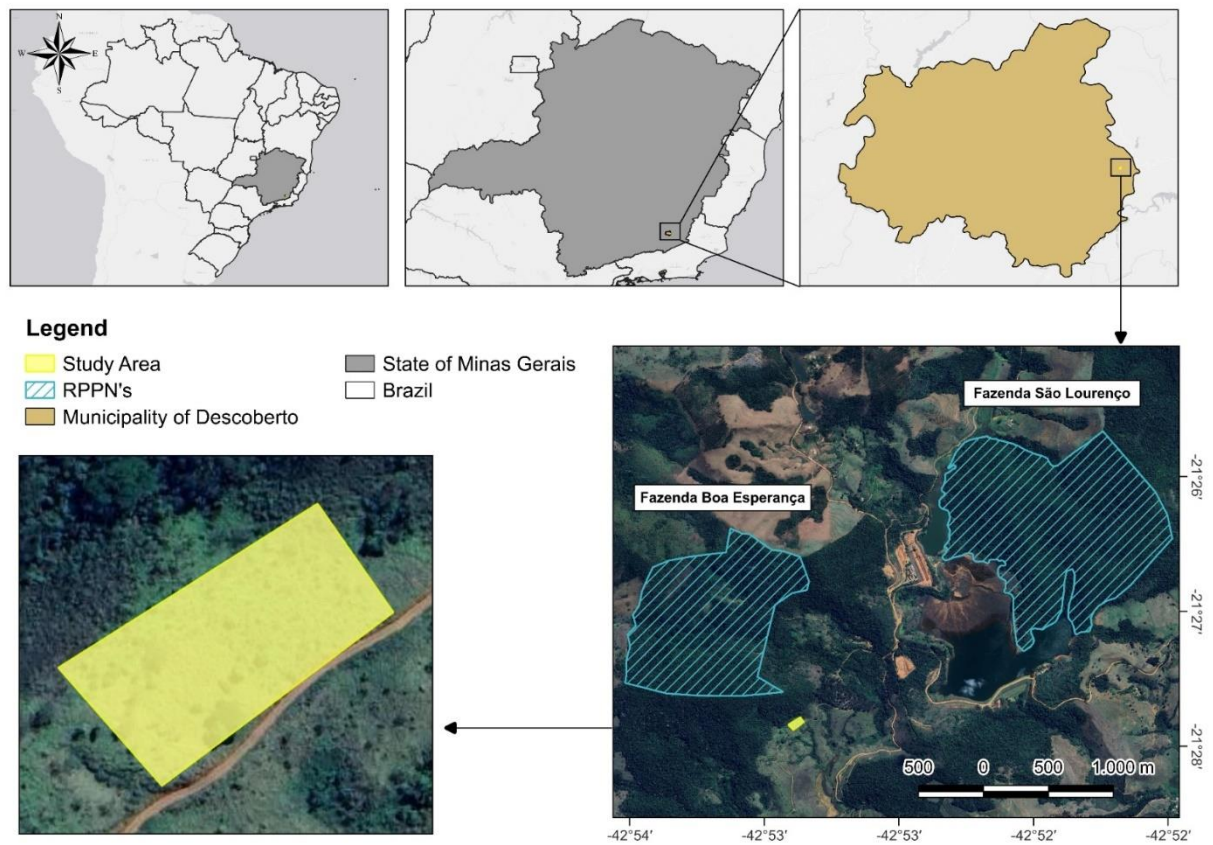


Figura. 1A Área de estudo localizada no município de Descoberto, Minas Gerais, Brasil.

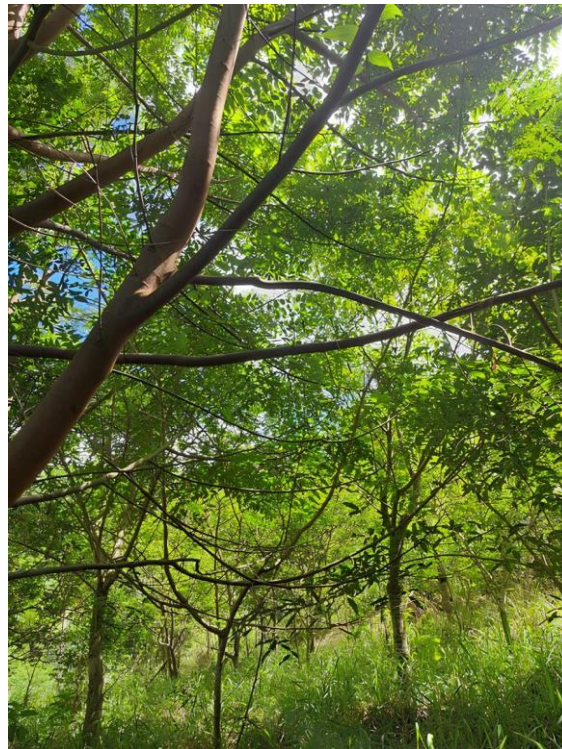


Figura. 1B Vista parcial do experimento de restauração florestal aos 52 meses após o plantio.

2.2 Procedimentos de campo

O experimento foi instalado em janeiro de 2021 em uma área anteriormente coberta por braquiária (*Urochloa decumbens* Stapf.). O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), contemplando os princípios de repetição, casualização e controle local. Três tratamentos correspondentes a diferentes espaçamentos de plantio foram avaliados: T1 = 2,0 × 2,0 m; T2 = 3,0 × 2,0 m; e T3 = 3,0 × 3,0 m.

Os três tratamentos foram distribuídos aleatoriamente em quatro blocos, resultando em quatro repetições por tratamento e um total de 12 parcelas experimentais, cada uma medindo 15 × 15 m. As parcelas foram estabelecidas com mudas de espécies arbóreas, todas nativas do bioma Mata Atlântica e com altura superior a 1,0 m no momento do plantio.

As espécies foram classificadas de acordo com o sistema do Grupo de Filogenia das Angiospermas (APG IV et al., 2016), com a nomenclatura botânica padronizada seguindo o banco de dados Flora e Funga do Brasil (Reflora, 2026). A lista de espécies utilizadas e suas respectivas famílias botânicas, síndromes de dispersão e categorias sucessionais estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Espécies arbóreas utilizadas no experimento de restauração florestal, incluindo famílias botânicas, síndromes de dispersão e categorias sucessionais.

Espécies	Família Botânica	Síndrome de Dispersão	Categoria Sucessional
<i>Anadenanthera peregrina</i> (Griseb.) Altschul	Fabaceae	Autocoria	Secundária inicial
<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S.Irwin & Barneby	Fabaceae	Autocoria	Pioneira
<i>Clitoria fairchildiana</i> R.A.Howard	Fabaceae	Autocoria	Secundária inicial
<i>Schizolobium Parahyba</i> (Vell.) Blake	Fabaceae	Anemocoria	Pioneira
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	Anacardiaceae	Zoocoria	Pioneira
<i>Trema micranthum</i> (L.) Blume	Cannabaceae	Zoocoria	Pioneira
<i>Cecropia hololeuca</i> Miq.	Urticaceae	Zoocoria	Pioneira
<i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	Bignonaceae	Anemocoria	Secundária inicial
<i>Handroanthus chrysotrichus</i> (Mart. Ex DC.) Mattos	Bignonaceae	Anemocoria	Secundária inicial

<i>Jacaranda micrantha</i> Cham.	Bignoniaceae	Anemocoria	Secundária inicial
<i>Triplaris americana</i> L.	Polygonaceae	Anemocoria	Pioneira
<i>Croton urucurana</i> Baill.	Euphorbiaceae	Autocoria	Pioneira

2.3 Avaliação das mudas em diferentes espaçamentos de plantio

2.3.1 Crescimento em altura e diâmetro

Os indivíduos foram identificados e avaliados quanto à altura total e ao diâmetro ao nível do solo (DNS) em dois momentos: imediatamente após o plantio, em janeiro de 2021, e 52 meses após o estabelecimento, em maio de 2025. A altura total das mudas foi medida em metros utilizando uma vara graduada e uma trena a laser, enquanto o DNS foi medido em milímetros utilizando um paquímetro digital. Com essas medidas, os incrementos em altura e diâmetro foram calculados ao longo do período de 52 meses.

2.3.2 Fotos hemisféricas

A estrutura do dossel foi avaliada por meio da estimativa da abertura do dossel (%) utilizando fotografias hemisféricas. As imagens foram adquiridas no centro de cada parcela com uma câmera Nikon DX equipada com lente hemisférica Nikon 0.21x. As fotografias foram obtidas a 1,5 m acima do nível do solo, sob condições de céu nublado, de modo a garantir iluminação difusa e minimizar interferências na captura das imagens. O procedimento seguiu a abordagem metodológica descrita por Worthy et al. (2020), especialmente quanto às condições de aquisição das imagens e ao uso de fotografias hemisféricas para a estimativa da estrutura do dossel. As imagens foram analisadas no software *Gap Light Analyzer* (GLA), que permitiu a quantificação da abertura do dossel. As coletas foram realizadas em maio de 2025, aos 52 meses após o plantio.

2.3.3 Serapilheira

A serapilheira acumulada foi avaliada 52 meses após o plantio das mudas. Em cada parcela, todo o material orgânico depositado na superfície do solo foi coletado em duas subparcelas de $0,5 \times 0,5$ m ($0,25$ m²), delimitadas por uma moldura e posicionadas em dois pontos centrais da parcela, distantes 1 m entre si. O material coletado foi acondicionado em

sacos plásticos e posteriormente transportado para o Laboratório de Restauração Florestal da Universidade Federal de Viçosa (LARF/UFV).

No laboratório, as amostras foram secas em estufa a 60 °C até atingirem massa constante, como descrito por Perez-Harguindeguy et al., (2016). Após a secagem, o material foi pesado em balança analítica de alta precisão para determinar a massa seca. Os valores foram posteriormente extrapolados para Mg ha⁻¹, e a média aritmética das duas subparcelas de amostragem foi utilizada para representar cada parcela.

2.3.4 *Amostragem de solo e análises químicas e físicas*

As amostras de solo foram coletadas 52 meses após o plantio nos diferentes tratamentos. Em cada parcela, cinco subamostras foram coletadas aleatoriamente da camada de solo de 0–20 cm e posteriormente homogeneizadas para formar uma amostra composta por parcela, resultando em um total de 12 amostras compostas correspondentes às 12 parcelas experimentais.

As amostras foram enviadas ao Laboratório de Análise de Solos do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, onde foram realizadas análises químicas de rotina, incluindo pH, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (H + Al), fósforo remanescente (P-rem), matéria orgânica (MO), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica efetiva (t), saturação de bases (V), saturação de alumínio (m) e nitrogênio (N). Além disso, foram realizadas análises físicas do solo, incluindo a quantificação das frações granulométricas, com determinação dos teores de areia grossa e argila.

2.4 *Análise de dados*

Todas as análises foram realizadas utilizando o *software R* (versão 4.5.2; R Core Team, 2025). A normalidade dos dados foi avaliada utilizando o teste de Shapiro-Wilk e gráficos Q-Q (Crawley, 2013), e a homogeneidade das variâncias foi avaliada utilizando o teste de Levene, adotando um nível de significância de $p < 0,05$.

As variáveis referentes à estrutura inicial da vegetação, incluindo incremento em diâmetro ao nível do solo (DNS), incremento em altura e abertura do dossel (%), foram comparadas entre os espaçamentos de plantio utilizando o teste não paramétrico de Kruskal-

Wallis. Quando diferenças significativas foram detectadas, comparações múltiplas aos pares foram realizadas utilizando o teste post hoc de Dunn com correção de Holm.

A abertura do dossel foi estimada a partir de fotografias hemisféricas obtidas no centro de cada parcela. Além das análises estatísticas, fotografias hemisféricas representativas para cada espaçamento de plantio foram incluídas nas figuras, permitindo a interpretação visual da estrutura do dossel em relação aos padrões quantitativos de abertura do dossel observados em campo. Os resultados das análises estruturais foram representados graficamente usando boxplots gerados com a função '*geom_boxplot*' do pacote *ggplot2* (Wickham & Wickham, 2016).

A serapilheira acumulada (Mg ha^{-1}) foi comparada entre os espaçamentos de plantio por meio de análise de variância (ANOVA *one-way*), seguida pelo teste post-hoc de Tukey HSD. As médias e os desvios-padrão foram calculados para cada tratamento, e os resultados foram visualizados por meio de boxplots elaborados com a função *geom_boxplot* do pacote *ggplot2* (Wickham, 2016).

As propriedades químicas do solo (pH, P, K, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H + Al, SB, t, V, m, MO, P-rem e N) e os atributos físicos do solo (teores de areia grossa e argila) foram comparados entre os espaçamentos de plantio usando o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste post hoc de Dunn com correção de Bonferroni para comparações múltiplas, visto que os dados não atenderam às premissas de normalidade ou homocedasticidade.

A análise de componentes principais (PCA) foi usada como uma abordagem exploratória para avaliar a organização conjunta de variáveis estruturais, funcionais e edáficas em relação aos espaçamentos de plantio. A análise foi realizada usando uma matriz de dados padronizada e a interpretação foi baseada na proporção da variância explicada por cada componente. Os escores dos dois primeiros componentes principais foram usados em análises subsequentes. Os efeitos do espaçamento de plantio nas pontuações de PC1 e PC2 foram avaliados usando análise de variância (ANOVA), considerando o espaçamento de plantio como um fator fixo e o bloco como um efeito aleatório, como uma abordagem complementar à análise multivariada.

As diferenças multivariadas entre os espaçamentos de plantio foram testadas por meio de uma análise de variância multivariada permutacional (PERMANOVA), baseada em distâncias euclidianas calculadas a partir dos dados padronizados, utilizando 999 permutações. O efeito do espaçamento foi quantificado pela proporção da variância explicada (R^2), com

controle para o efeito de bloco. A homogeneidade das dispersões multivariadas entre os tratamentos foi avaliada por meio do teste de dispersão multivariada permutacional (PERMDISP), a fim de verificar se as diferenças observadas refletiam deslocamentos nos centróides multivariados e não variações na dispersão interna dos grupos. Os padrões multivariados foram visualizados por meio das ordenações da PCA.

3 RESULTADOS

3.1 Incremento em diâmetro ao nível do solo (DNS) e em altura das espécies nativas em diferentes espaçamentos de plantio

O incremento em DNS variou significativamente entre os diferentes espaçamentos de plantio (Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 7.42$, $p < 0,05$). O teste post-hoc de Dunn com correção de Holm indicou que o espaçamento 2 x 2 m apresentou incremento significativamente maior do que os espaçamentos 3 x 2 m e 3 x 3 m, enquanto não houve diferença significativa entre os espaçamentos 3 x 2 m e 3 x 3 m ($p = 0,422$) (Figura 2a). Comportamento similar foi observado para o incremento em altura, que variou significativamente entre os diferentes espaçamentos de plantio (Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 7.38$, $p < 0,05$). O teste post-hoc de Dunn com correção de Holm indicou que o espaçamento 2 x 2 m apresentou incremento significativamente maior do que os espaçamentos 3 x 2 m e 3 x 3 m, enquanto não houve diferença significativa entre os espaçamentos 3 x 2 m e 3x 3m ($p = 0,500$) (Figura 2b).

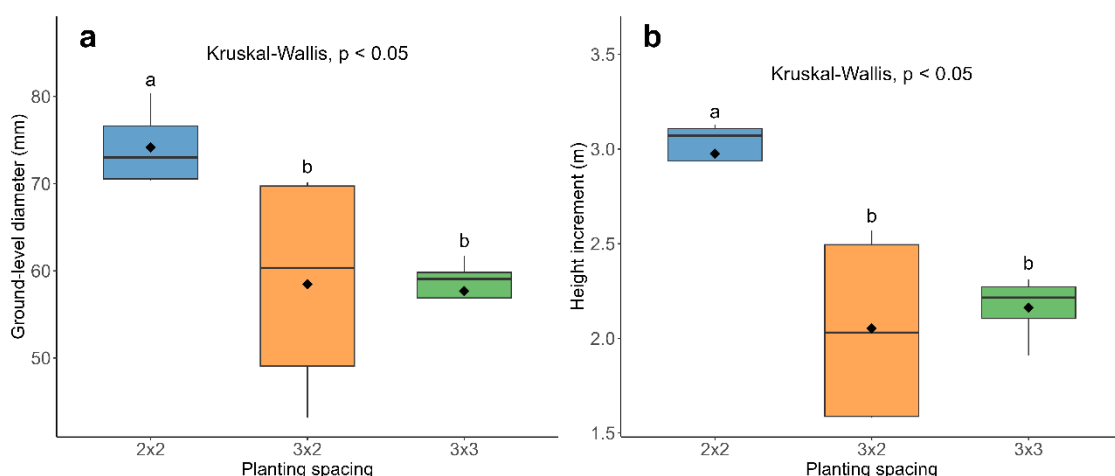


Figura. 2 Incremento em diâmetro ao nível do solo (a) e incremento em altura (b) de mudas de espécies nativas da Mata Atlântica em diferentes espaçamentos de plantio (2 × 2, 3 × 2 e 3 × 3 m). Os termos em inglês correspondem a: *Ground-level diameter* = diâmetro ao nível do solo;

Height increment = incremento em altura; *Planting spacing* = espaçamento de plantio. As barras representam o intervalo interquartil, as linhas centrais representam a mediana e os losangos pretos (♦) indicam a média. Letras diferentes acima dos boxplots indicam diferenças significativas entre os tratamentos (Kruskal-Wallis, $p < 0,05$).

3.2 Abertura do dossel estimada por fotografias hemisféricas em diferentes espaçamentos de plantio

A abertura do dossel variou significativamente entre os diferentes espaçamentos de plantio (teste de Kruskal–Wallis, $p < 0,05$; Figura 3). O espaçamento mais adensado (2×2 m) apresentou os menores valores de abertura do dossel (24,23%), indicando maior fechamento da copa, enquanto os espaçamentos 3×2 m (56,33%) e 3×3 m (56,64%) apresentaram valores mais elevados de abertura do dossel, sem diferença significativa entre si.

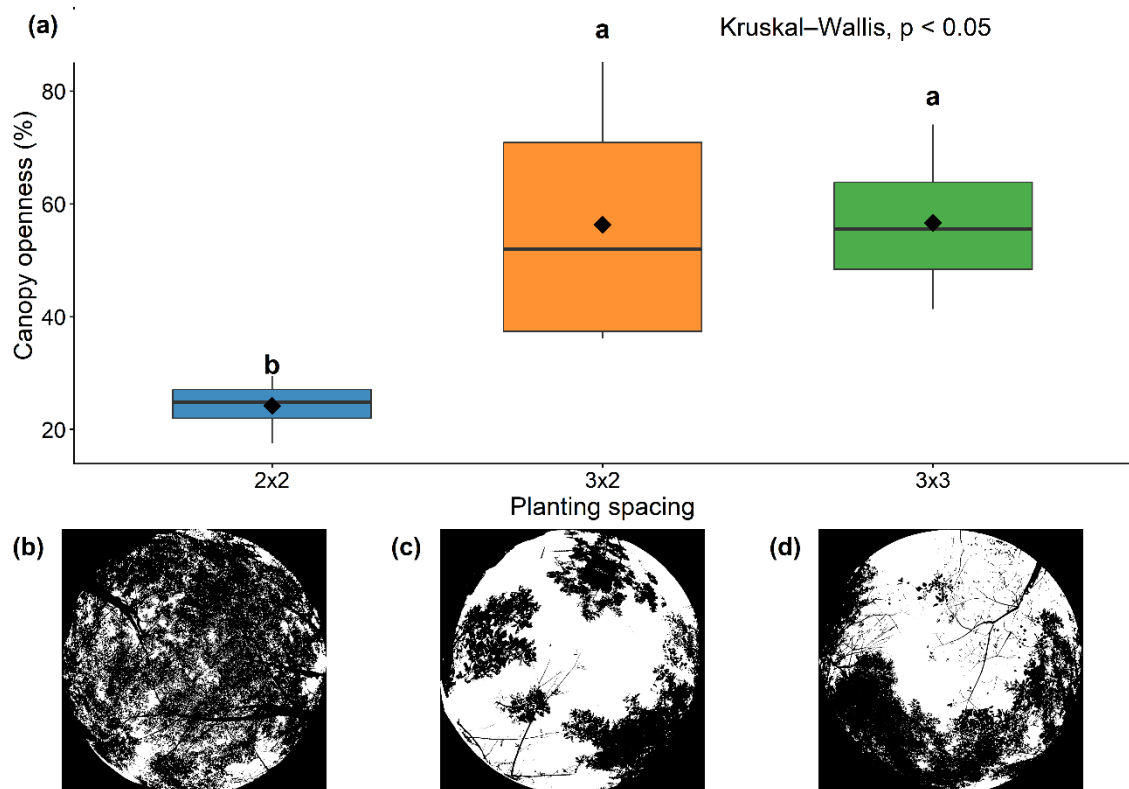


Figura. 3 Abertura do dossel (%) em diferentes espaçamentos de plantio em um sistema de restauração florestal com espécies nativas da Mata Atlântica. Os termos em inglês correspondem a: *Canopy openness* = abertura do dossel; *Planting spacing* = espaçamento de plantio. (a) Boxplot da distribuição da abertura do dossel nos diferentes espaçamentos de plantio (linha central = mediana; losangos pretos (♦) = valores médios). Diferenças entre os

espaçamentos foram avaliadas pelo teste de Kruskal–Wallis ($p < 0,05$). Fotografias hemisféricas representativas dos diferentes espaçamentos de plantio, ilustrando contrastes na estrutura do dossel: (b) 2×2 m; (c) 3×2 m; (d) 3×3 m.

3.3 Serapilheira acumulada em função do espaçamento de plantio

A produção de serapilheira variou significativamente entre os diferentes espaçamentos (*one-way* ANOVA, $F = 13,78$; $p < 0,05$). O teste post-hoc de Tukey indicou que o espaçamento 2×2 m apresentou maior produção de serapilheira ($9,80 \pm 2,60 \text{ Mg ha}^{-1}$), em relação aos espaçamentos 3×2 m ($3,13 \pm 1,34 \text{ Mg ha}^{-1}$) e 3×3 m ($2,74 \pm 2,27 \text{ Mg ha}^{-1}$), que não diferiram significativamente entre si.

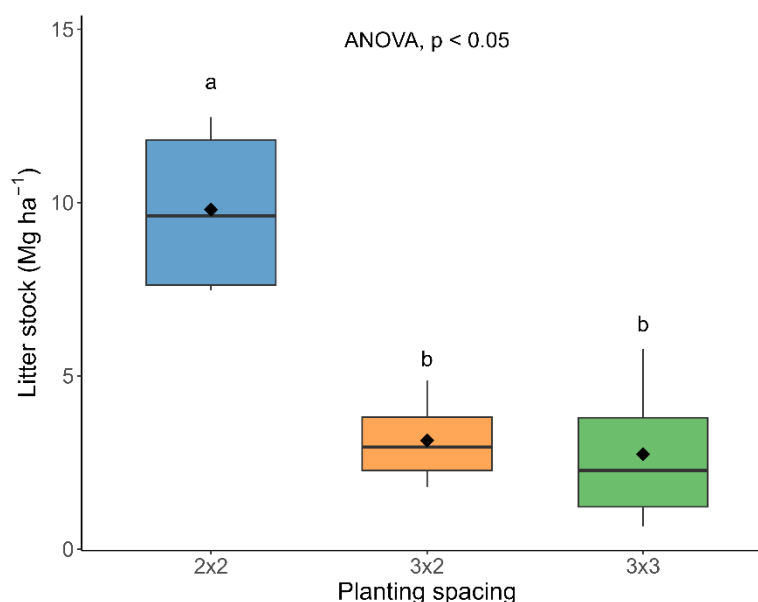


Figura. 4 Serapilheira acumulada (Mg ha^{-1}) em diferentes espaçamentos de plantio. Os termos em inglês correspondem a: *Litter stock* = serapilheira acumulada; *Planting spacing* = espaçamento de plantio. As barras representam o intervalo interquartil, as linhas centrais representam a mediana e os losangos pretos (♦) indicam a média. Letras diferentes acima dos boxplots indicam diferenças significativas entre os tratamentos segundo o teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.4 Parâmetros químicos e físicos do solo sob diferentes espaçamentos de plantio

As análises químicas do solo não indicaram diferenças significativas entre os espaçamentos de plantio (2×2 m, 3×2 m e 3×3 m) para nenhuma das variáveis analisadas,

incluindo pH, P, K, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H + Al, soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica efetiva (t), saturação de bases (V), saturação de alumínio (m), matéria orgânica (MO), fósforo remanescente (P-rem) e nitrogênio (N). Da mesma forma, não foram detectadas diferenças significativas para os atributos físicos do solo, incluindo os teores de areia grossa e argila ($p > 0,05$; Tabela 2). Os valores médios e seus respectivos desvios padrão são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação das propriedades químicas e físicas do solo entre diferentes espaçamentos de plantio (2×2 m, 3×2 m e 3×3 m). Os valores são apresentados como média $\pm$ desvio padrão (DP). Letras idênticas indicam ausência de diferenças significativas entre os tratamentos (teste de Kruskal-Wallis seguido pelo teste post hoc de Dunn, $p > 0,05$).

Atributos químicos e físicos do solo	Espaçamento de plantio		
	2 x 2 m	3 x 2 m	3 x 3 m
pH	5.13 ± 0.07 a	5.17 ± 0.07 a	5.22 ± 0.12 a
P	0.58 ± 0.17 a	0.68 ± 0.55 a	0.42 ± 0.13 a
K	34.00 ± 3.16 a	39.75 ± 4.72 a	40.75 ± 5.74 a
Ca^{2+}	0.93 ± 0.39 a	0.92 ± 0.59 a	1.23 ± 0.43 a
Mg^{2+}	0.69 ± 0.37 a	0.37 ± 0.20 a	0.64 ± 0.23 a
Al^{3+}	0.38 ± 0.15 a	0.44 ± 0.19 a	0.28 ± 0.09 a
H+Al	5.83 ± 0.28 a	5.55 ± 0.19 a	5.40 ± 0.28 a
SB	1.71 ± 0.75 a	1.39 ± 0.77 a	1.98 ± 0.49 a
t	2.09 ± 0.62 a	1.82 ± 0.59 a	2.26 ± 0.41 a
V	22.15 ± 8.11 a	19.15 ± 8.68 a	26.55 ± 5.05 a
m	21.03 ± 13.55 a	28.78 ± 20.35 a	13.48 ± 7.30 a
MO	3.95 ± 0.27 a	4.03 ± 0.46 a	4.10 ± 0.17 a
P-Rem	14.78 ± 1.71 a	14.55 ± 1.59 a	15.73 ± 2.36 a
N	0.20 ± 0.01 a	0.19 ± 0.02 a	0.19 ± 0.01 a
Clay (argila)	0.49 ± 0.03 a	0.52 ± 0.04 a	0.53 ± 0.02 a
Coarse sand (areia-grossa)	0.20 ± 0.01 a	0.18 ± 0.02 a	0.17 ± 0.01 a

3.5 Integração multivariada de respostas estruturais, funcionais e edáficas

A análise de componentes principais (PCA) foi aplicada como uma abordagem exploratória para avaliar a organização conjunta de variáveis estruturais, funcionais e edáficas. Os dois primeiros componentes principais explicaram 74,0% da variação total dos dados, com 49,4% atribuídos ao primeiro componente (PC1) e 24,6% ao segundo componente (PC2).

O primeiro componente principal (PC1) apresentou forte associação com variáveis relacionadas ao crescimento e à estrutura da vegetação, incluindo incremento em altura (*Height*), incremento em diâmetro ao nível do solo (DNS), densidade (*Density*) e estoque de serapilheira (*Litter.stock*), e mostrou uma relação inversa com a abertura do dossel (*Canopy openness*). Esse padrão caracteriza um gradiente estrutural associado à ocupação inicial do sítio. O segundo componente principal (PC2) esteve predominantemente associado a atributos químicos do solo, como pH, fósforo (P), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CEC) e matéria orgânica (MO), representando um gradiente edáfico-químico. A análise de variância dos escores dos componentes principais não indicou diferenças estatisticamente significativas entre os espaçamentos de plantio para PC1 ou PC2 ($p > 0,05$).

No entanto, quando todas as variáveis avaliadas foram consideradas simultaneamente, a análise multivariada baseada em distâncias euclidianas (PERMANOVA) revelou diferenças significativas na estrutura multivariada entre os espaçamentos de plantio ($R^2 = 0,36$, $p < 0,05$), independentemente dos efeitos de bloco. O teste de homogeneidade das dispersões multivariadas não indicou diferenças significativas entre os espaçamentos (PERMDISP, $p > 0,05$), indicando que as diferenças detectadas refletem mudanças nos centroides multivariados em vez de variações na dispersão dentro do grupo (Figura 5).

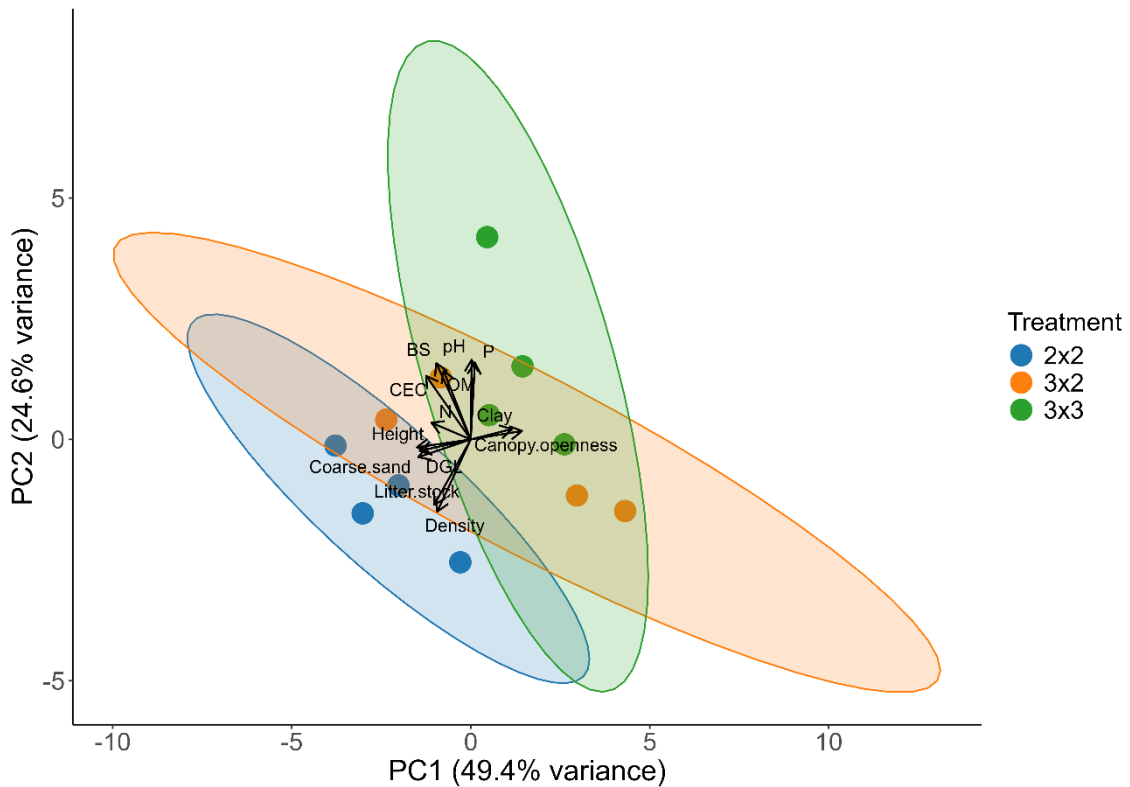


Figura. 5 Análise de Componentes Principais (PCA) das propriedades físico-químicas do solo, atributos estruturais da vegetação, estoque de serapilheira e abertura do dossel em diferentes espaçamentos de plantio (2×2 m, 3×2 m e 3×3 m). Os pontos representam parcelas individuais, coloridas de acordo com os tratamentos, enquanto as elipses sombreadas correspondem aos intervalos de confiança de 95% da dispersão multivariada de cada tratamento. As setas representam as variáveis originais, cujo comprimento e direção indicam sua contribuição para os eixos de ordenação. Os termos em inglês correspondem a: *Height* = incremento em altura; *Density* = densidade; *Litter.stock* = estoque de serapilheira; *Canopy.openness* = abertura do dossel; *Clay* = argila; *Coarse.sand* = areia grossa; *CEC* = capacidade de troca catiônica; *OM* = matéria orgânica; *SB* = soma de bases. As variáveis químicas do solo incluem pH, fósforo (P) e nitrogênio (N). Os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) explicaram 49,4% e 24,6% da variância total, respectivamente.

4 DISCUSSÃO

4.1 Estrutura da vegetação em diferentes espaçamentos de plantio

As interações entre espécies e a dinâmica dos processos ecossistêmicos são moduladas pelo arranjo espacial das espécies arbóreas (Fichtner et al., 2020; Yu et al., 2024). Nesse

contexto, o espaçamento de plantio desempenha um papel decisivo na formação da estrutura inicial da vegetação, influenciando diretamente o crescimento em diâmetro e altura das espécies arbóreas (Liu et al., 2022; Postma et al., 2021). À medida que a densidade de plantio aumenta, a redução da distância entre os indivíduos associada a uma oferta relativamente constante de recursos por unidade de área, tende a intensificar a competição (Postma et al., 2021). No entanto, no estágio inicial de restauração florestal avaliado neste estudo, 52 meses após o plantio, não foram detectados sinais indiretos de competição que limitam o crescimento. Na qual o espaçamento mais denso (2×2 m) apresentou maiores incrementos em altura e diâmetro em comparação com os espaçamentos menos densos (3×2 m e 3×3 m).

Em estágios iniciais de restauração, a redução da exposição direta à radiação, o aumento da retenção de umidade e a atenuação dos extremos térmicos tendem a criar um ambiente mais favorável ao desempenho das mudas, resultando em taxas de crescimento mais elevadas (Kothari et al., 2021). Esse mecanismo pode explicar os maiores incrementos observados no espaçamento de 2×2 m, que foi associado ao fechamento mais rápido do dossel e à modificação microclimática precoce. Resultados convergentes foram relatados por Macedo et al., (2005), que avaliaram o crescimento inicial de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos de plantio e encontraram maiores incrementos em altura e diâmetro em arranjos mais densos, sem evidências de competição intraespecífica até 36 meses após o plantio. Esses autores destacam que, nesse estágio inicial, o crescimento foi condicionado principalmente por fatores edáficos e hídricos, e não pela densidade de plantio, reforçando a interpretação de que a competição por recursos pode ainda não ser limitante em fases iniciais de desenvolvimento florestal.

Por outro lado, a ausência de diferenças significativas entre os espaçamentos intermediários e mais amplos no presente estudo sugere a existência de um limiar de densidade funcional, além do qual o aumento do espaço disponível não se traduz em ganhos adicionais no crescimento individual das plantas (Poorter et al., 2015; Pretzsch, 2009). Esse padrão indica que, dentro da faixa de espaçamentos avaliados, o crescimento inicial responde de forma não linear à densidade de plantio, corroborando o conceito de um limiar funcional acima do qual uma maior disponibilidade de espaço não resulta em aumentos adicionais no desempenho de crescimento individual (Poorter et al., 2016; Weiner, 1990). Resultados distintos, porém, complementares, foram relatados por Nascimento et al. (2012), que avaliaram o crescimento inicial de seis espécies arbóreas em plantios de restauração florestal e, de modo geral, observaram maior crescimento em altura, diâmetro ao nível do solo e largura da copa em espaçamentos mais amplos, aos 22 meses após o plantio. Esses autores enfatizaram que as

respostas ao espaçamento foram espécie-específicas, destacando que os efeitos da densidade de plantio no crescimento inicial dependem da composição das espécies, do estágio de desenvolvimento e das condições ambientais locais. Este contexto ajuda a explicar as diferenças observadas entre as suas descobertas e os resultados do presente estudo.

À medida que as mudas arbóreas se desenvolvem e o dossel se estabelece, o aumento do sombreamento contribui para a atenuação de filtros ambientais severos (Guerin et al., 2021), como a elevada exposição à radiação e as altas temperaturas (Stahl et al., 2025). A luz é um recurso indispensável ao crescimento vegetal, mas também pode atuar como fator de estresse (Kothari et al., 2021). Nesse sentido, considerando que a exposição excessiva à radiação luminosa pode induzir estresse fisiológico, é possível que uma espécie vegetal beneficie outra por meio do sombreamento, caracterizando interações interespecíficas de facilitação (Kothari et al., 2021).

As interações interespecíficas mediadas pelo sombreamento podem desempenhar um papel central na explicação dos resultados de experimentos que avaliam os efeitos da biodiversidade, incluindo aqueles relacionados à diversidade de espécies arbóreas (Kothari et al., 2021). À medida que as plantas se estabelecem e promovem o fechamento do dossel, a vegetação competitiva, especialmente gramíneas como a braquiária (*Urochloa decumbens* Stapf.), é reduzida, devido a modificações nas condições microclimáticas, com destaque para a menor disponibilidade de luz (Castro et al., 2021). Consequentemente, plantios mais densos tendem a acelerar a ocupação do local, reduzir a interferência de gramíneas invasoras e favorecer a consolidação estrutural precoce dos sistemas de restauração.

4.2 Dinâmica funcional do sistema de restauração em função do espaçamento de plantio

A produção de serapilheira e seus processos de decomposição são componentes centrais da dinâmica de nutrientes e dos ciclos biogeoquímicos, desempenhando um papel fundamental no funcionamento dos ecossistemas de florestas tropicais (Giweta, 2020). Em sistemas florestais, a serapilheira contribui diretamente para a ciclagem de nutrientes, regulando o acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS), controlando as entradas e saídas de nutrientes e sustentando funções ecossistêmicas essenciais, como retenção de umidade, proteção da superfície do solo e suporte à atividade microbiana (Giweta, 2020).

A deposição de serapilheira em florestas é influenciada por fatores climáticos e pela fisionomia da floresta, bem como por atributos da vegetação, como idade da floresta,

composição de espécies e estrutura do povoamento (Machado et al., 2021; Martinelli et al., 2017). Em sistemas de restauração, a organização espacial das espécies arbóreas desempenha um papel determinante, uma vez que a heterogeneidade estrutural afeta diretamente a produção de biomassa, a deposição de serapilheira e os processos de decomposição, com implicações diretas para os ciclos de carbono e nitrogênio (Beugnon et al., 2025). Nesse contexto, a serapilheira serve como um indicador funcional sensível do progresso inicial da restauração, refletindo diretamente a densidade de árvores e a proximidade espacial entre os indivíduos, fatores que condicionam a deposição de serapilheira em ecossistemas florestais (Villa et al., 2016).

Estudos anteriores indicam que a deposição de serapilheira tende a diminuir à medida que a distância entre as árvores aumenta, devido à menor sobreposição da copa e à menor biomassa acima do solo por unidade de área (Beugnon et al., 2023, 2025; Chandler et al., 2008; Villa et al., 2016). Resultados reportados na literatura são consistentes com os relatados por Villa et al. (2016), que observaram, em áreas de restauração florestal em estágio inicial, uma diminuição na deposição de serapilheira de arranjos mais densos para menos densos, variando de 6,93 a 3,71 Mg ha⁻¹, com uma correlação positiva entre a deposição de serapilheira e a cobertura da copa. No presente estudo, o espaçamento mais denso (2 × 2 m) também promoveu maior produção de serapilheira, associada a um fechamento mais rápido da copa, enquanto os espaçamentos intermediário e mais amplo apresentaram valores significativamente menores e semelhantes. Esse padrão sugere que a produção de serapilheira responde de forma não linear ao espaçamento de plantio, indicando a existência de um limiar de densidade funcional ligado à organização estrutural inicial do sistema de restauração.

A maior deposição de serapilheira observada no espaçamento mais denso reflete a alta densidade de indivíduos e a renovação mais intensa da biomassa aérea, associada à rápida formação do dossel, resultando em maior eficiência funcional do arranjo de plantio (Giweta, 2020; Vitousek, 1982). Apesar dessas diferenças funcionais entre os espaçamentos de plantio, não foram detectadas diferenças nos atributos químicos ou físicos do solo durante o período avaliado, sugerindo uma dissociação temporal entre a reorganização estrutural da vegetação e as respostas edáficas. Esse padrão indica que os efeitos do aumento da deposição de serapilheira sobre as propriedades do solo dependem do acúmulo progressivo de resíduos, sua decomposição e processos de imobilização microbiana e estabilização da matéria orgânica, que tipicamente ocorrem em escalas temporais mais longas (Andrade et al., 2023; Six et al., 2002). No entanto, quando comparados com os valores de referência obtidos em uma área adjacente

sem intervenção de restauração, caracterizada por cobertura de pastagem persistente dominada por *Urochloa decumbens* e baixo teor de matéria orgânica no solo ($2,96 \text{ dag kg}^{-1}$), os solos em restauração apresentaram uma melhoria geral nas condições edáficas, incluindo níveis mais elevados de matéria orgânica.

4.3 Integração estrutural, funcional e edáfica do espaçamento de plantio: implicações ecológicas para a restauração florestal

A análise multivariada revelou gradientes claros de respostas estruturais e funcionais da vegetação a diferentes espaçamentos de plantio, distintos da variação edáfica, indicando que os componentes bióticos e abióticos do ecossistema podem responder em ritmos diferentes durante os estágios iniciais da restauração. O primeiro gradiente destacou o papel da ocupação do sítio e do fechamento do dossel, refletido no crescimento em altura e diâmetro das mudas, na densidade e na produção de serapilheira, demonstrando que arranjos mais densos aceleram a consolidação estrutural inicial do sistema. Em contraste, o segundo gradiente, associado a atributos químicos e físicos do solo, permaneceu relativamente estável, reforçando a dissociação temporal entre a reorganização da vegetação e as respostas edáficas (Brouwer et al., 2025; Pantaleão et al., 2024). Esses padrões sugerem que o espaçamento de plantio atua como um fator chave na restauração florestal, modulando principalmente o desenvolvimento inicial e a eficiência funcional do sistema, enquanto as respostas do solo tendem a surgir em uma escala temporal mais longa (Borcard et al., 2018; Legendre & Legendre, 2012).

A integração de resultados estruturais, funcionais e edáficos demonstra que o espaçamento de plantio desempenha um papel central na consolidação inicial de sistemas de restauração florestal, modulando o crescimento, a densidade, o fechamento do dossel e a produção de serapilheira. Arranjos mais densos aceleram a ocupação do sítio, promovendo maior eficiência funcional e facilitando interações interespecíficas, além de contribuírem para a supressão de vegetação competidora, como gramíneas, em contextos de compensação ambiental (Castro et al., 2021). Em contrapartida, os atributos químicos e físicos do solo permanecem relativamente estáveis a curto prazo, sugerindo que os efeitos da reorganização estrutural sobre a ciclagem de nutrientes e a dinâmica do carbono provavelmente se manifestarão em escalas temporais mais longas (Andrade et al., 2023; Six et al., 2002). Essas descobertas reforçam a importância do planejamento do espaçamento de plantio como uma ferramenta estratégica para maximizar o avanço estrutural e funcional em sistemas restaurados,

fomentando, desde os estágios iniciais, a consolidação de ecossistemas mais resilientes e multifuncionais, alinhados aos objetivos de restauração florestal compensatória.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa demonstrou que o espaçamento de plantio desempenha um papel decisivo na dinâmica estrutural e funcional de sistemas de restauração florestal compensatória em áreas de Mata Atlântica. Espaçamentos mais densos (2×2 m) promoveram maiores incrementos em altura e diâmetro das mudas, fechamento mais rápido do dossel e maior produção de serapilheira, indicando consolidação estrutural e funcional acelerada do sistema durante os estágios iniciais. Em contraste, espaçamentos intermediários e mais amplos (3×2 m e 3×3 m) apresentaram respostas mais moderadas, sugerindo a existência de limiares de densidade funcional que limitam ganhos adicionais a curto prazo.

A análise multivariada revelou gradientes claros nas respostas da vegetação, com atributos estruturais e funcionais respondendo mais rapidamente do que atributos edáficos, evidenciando uma dissociação temporal entre componentes bióticos e abióticos. Esses resultados indicam que o espaçamento de plantio influencia tanto o crescimento de espécies individuais quanto processos funcionais essenciais, como a ciclagem de nutrientes e a ocupação do sítio, que são importantes para a multifuncionalidade na restauração florestal compensatória.

Os resultados fornecem orientações importantes para o planejamento de projetos de restauração florestal compensatória, demonstrando que o ajuste do espaçamento de plantio é uma estratégia eficaz para otimizar o desempenho inicial da vegetação, promover interações interespecíficas positivas e reduzir a interferência de espécies competidoras. A integração do arranjo espacial, do crescimento vegetativo e da produção de serapilheira contribui para o desenvolvimento de ecossistemas multifuncionais mais resilientes e próximos às condições de referência. Recomenda-se o monitoramento a longo prazo para avaliar a consolidação das propriedades do solo, a estabilidade da serapilheira e a ciclagem de nutrientes, garantindo a sustentabilidade ecológica e a eficácia das intervenções de restauração no contexto de compensação ambiental.

6 REFERÊNCIAS

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JL de M, & Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6):711–728
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Andrade A, Bargas DC, Fialho, TM, & Cristofaro S (2023) Desafios da cadeia da restauração florestal no Vale do Paraíba Paulista. *Sociedade & Natureza* 30:257–277
<https://doi.org/10.14393/SN-v30n3-2018-13>
- Angiosperm Phylogeny Group (APG IV) (2016) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society* 181(1):1–20
- Barbosa RS, do Vale RS, Schwartz G, Martins WBR, Ribeiro SS, de Matos Rodrigues JI, Ferreira GC, & Barbosa VM (2022) Restoration of degraded areas after bauxite mining in the eastern Amazon: Which method to apply? *Ecological Engineering* 180:106639
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106639>
- Bastos MT, Mantega G, Silva M, Costa ÁAR, & Silva L IL da (2006) Lei Federal n.º 11.428 de 22 de dezembro de 2006
- Beltrán LC, Martínez-Garza C, & Howe HF (2022) Return of forest structure and diversity in tropical restoration plantings *Ecosphere* 13(5):e4099 <https://doi.org/10.1002/ecs2.4099>
- Beugnon R, Albert G, Hähn G, Yu W, Haider S, Hättenschwiler S, Davrinche A, Rosenbaum B, Gauzens B, & Eisenhauer N (2025) Improving forest ecosystem functions by optimizing tree species spatial arrangement. *Nature Communications*, 16(1):6286
- Beugnon R, Eisenhauer N, Bruehlheide H, Davrinche A, Du J, Haider, Hähn G, Saadani M, Singavarapu B, & Sünemann M (2023) Tree diversity effects on litter decomposition are mediated by litterfall and microbial processes *Oikos* 2023(10): e09751
<https://doi.org/10.1111/oik.09751>
- Borcard D, Gillet F, & Legendre P (2018) Spatial analysis of ecological data. In *Numerical ecology with R* (pp. 299–367) Springer
- Borges-Matos C, d'Albertas F, Mendes ME, Loyola R, & Metzger J P (2025) Combining protection and restoration strategies enables cost-effective compensation with ecological equivalence in

Brazil. Environmental Impact Assessment Review 114: 107922
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107922>

Brasil Neto AB, Schwartz G, Noronha NC, Gama MAP, Ferreira GC, Carvalho EJM, & Brasil NM de QX (2025) Seedling planting to restore ecosystems after bauxite mining in Brazilian amazon: the need of monitoring and reviewing techniques and procedures. *Plant Ecology* 1–14.

Brouwer R, Peña-Claros M, Bongers F, Poorter L, Guillemot J, Almeida DR, & Brancalion PH (2025) Functional recovery of tropical forests: The role of restoration methods and environmental conditions. *Biological Conservation* 309:111269.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111269>

Castro J, Morales-Rueda F, Navarro FB, Löf M, Vacchiano G, & Alcaraz-Segura D (2021) Precision restoration: A necessary approach to foster forest recovery in the 21st century. *Restoration Ecology* 29(7):e13421 <https://doi.org/10.1111/rec.13421>

Chandler JR, Schmidt MG, & Dragicevic S (2008) Spatial patterns of forest floor properties and litterfall amounts associated with bigleaf maple in conifer forest of southwestern British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science* 88(3):295–313
<https://doi.org/10.4141/CJSS07040>

Cosimo LHE, Martins SV, & Gleriani JM (2021) Suggesting priority areas in the buffer zone of Serra do Brigadeiro State Park for forest restoration compensatory to bauxite mining in Southeast Brazil *Ecological Engineering* 170:106322 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106322>

Crawley MJ (2013) *The R book*, (John Wiley & Sons Ltd: Chichester UK)

Crouzeilles R, Beyer HL, Monteiro LM, Feltran-Barbieri R, Pessôa ACM, Barros FSM, Lindenmayer DB, Lino EDSM, Grelle CEV & Chazdon RL (2020) Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration *Conservation Letters* 13(3):e12709 <https://doi.org/10.1111/conl.12709>

Dorrough J, Val J, Travers SK, Wilson B, Eldridge DJ, Carrillo Y, Nielsen UN, Powell J R, Wilks G, & McPherson P (2023) Integrated analysis of aboveground and belowground indicators support a comprehensive evaluation of ecosystem recovery *Restoration Ecology* 31(8):e13987
<https://doi.org/10.1111/rec.13987>

- Fichtner A, Schnabel F, Bruelheide H, Kunz M, Mausolf K, Schuldt A, Härdtle W, & von Oheimb G (2020) Neighbourhood diversity mitigates drought impacts on tree growth *Journal of Ecology* 108(3):865–875 <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13353>
- Fonseca WS, Martins SV, Fioresi EM, & Villa PM (2024). Complementing seedling planting with nucleation techniques increases forest restoration potential in areas around bauxite mining *Land Degradation & Development* 35(9):3075–3089 <https://doi.org/10.1002/ldr.5118>
- Forrester DI (2019) Linking forest growth with stand structure: Tree size inequality, tree growth or resource partitioning and the asymmetry of competition *Forest Ecology and Management* 447:139–157 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.053>
- Gardner TA, Von Hase A, Brownlie S, Ekstrom JMM, Pilgrim JD, Savy CE, Stephens R TT, Treweek JO, Ussher GT & Ward G (2013) Biodiversity offsets and the challenge of achieving no net loss. *Conservation Biology* 27(6):1254–1264 <https://doi.org/10.1111/cobi.12118>
- Giles AL, Schietti J, Rosenfield MF, Mesquita RC, Vieira DL M, Vieira ICG, Poorter L, Brancalion PHS, Peña-Claros M, & Siqueira J (2024) Simple ecological indicators benchmark regeneration success of Amazonian forests. *Communications Earth & Environment* 5(1):780.
- Giweta M (2020) Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review. *Journal of Ecology and Environment* 44(1):11
- Guerin N, Mendes FBG, Cianciaruso MV, Sughanuma MS & Durigan G (2021) Pure or mixed plantings equally enhance the recovery of the Atlantic forest. *Forest Ecology and Management* 484:118932 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118932>
- IBGE R (2012) Manual técnico da vegetação brasileira. Consultado Em 5(11):2020
- Kothari S, Montgomery RA, & Cavender-Bares J (2021) Physiological responses to light explain competition and facilitation in a tree diversity experiment. *Journal of Ecology* 109(5):2000–2018 <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13637>
- Kremer K, Jonsson B, Tavares MF & Bauhus J (2025) Effects of planting density on the performance of reforestation and afforestation plantings in temperate and boreal forests: a systematic review. *Restoration Ecology* 33(5):e70103 <https://doi.org/10.1111/rec.70103>
- Legendre P & Legendre L (2012) *Numerical ecology* (Vol 24). Elsevier

- Liu D, Zhou C, He X, Zhang X, Feng L & Zhang H (2022) The effect of stand density, biodiversity, and spatial structure on stand basal area increment in natural spruce-fir-broadleaf mixed forests. *Forests* 13(2):162 <https://doi.org/10.3390/f13020162>
- Macedo RLG, Gomes JE, Venturin N & Salgado BG (2005) Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* Lf (teca) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. *Cerne* 11(1):61–69
- Machado DL, Engel VL, Podadera DS, Sato LM, de Goede RGM, de Moraes LFD, Parrotta JA (2021) Site and plant community parameters drive the effect of vegetation on litterfall and nutrient inputs in restored tropical forests. *Plant and Soil* 464(1):405–421
- Martinelli LA, Lins SRM, dos Santos-Silva JC (2017) Fine litterfall in the Brazilian Atlantic Forest. *Biotropica* 49(4):443–451 <https://doi.org/10.1111/btp.12448>
- Martins SV, Fonseca WS, Andrade CF, Barros RS, Paiva JM, Silva CH, Brito MAF (2022) Reflorestamento com mudas altas: uma inovação da restauração florestal na mineração de bauxita em Minas Gerais. In: Oliveira RJ (ed) *Engenharia Florestal: Contribuições, Análises e Práticas em Pesquisa*, 1st ed. Editora Científica Digital, pp 213-231. <https://doi.org/10.37885/220308108>
- Martins, W. B. R., Lima, M. D. R., Junior, U. de O. B., Amorim, L. S. V.-B., de Assis Oliveira, F., & Schwartz, G. (2020a). Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review. *Ecological Engineering*, 145, 105707. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105707>
- Martins WBR, Schwartz G, Ribeiro SS, Ferreira GC, Barbosa RS, Paula MT, Barbosa VM, Oliveira FA (2021) Ecosystem restoration after bauxite mining: favorable indicators for Technosols construction and soil management using liming and subsoiling. *New Forests* 52(6):971–994
- Mello K, Fendrich AN, Sparovek G, Simmonds JS, Maron M, Tavares PA, Brites AD, Rodrigues RR, Joly CA, Metzger JP (2021) Achieving private conservation targets in Brazil through restoration and compensation schemes without impairing productive lands. *Environmental Science & Policy* 120:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.02.014>
- Minas Gerais (2019) Decreto no 47.749, de 11 de novembro de 2019 Dispõe sobre os processos de autorização para intervenção ambiental e sobre a produção florestal no âmbito do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado Minas Gerais Belo Horizonte MG*

- Müller J, Mitesser O, Cadotte MW, van der Plas F, Mori AS, Ammer C, Chao A, Scherer-Lorenzen M, Baldrian P, Bässler C (2023) Enhancing the structural diversity between forest patches - A concept and real-world experiment to study biodiversity, multifunctionality and forest resilience across spatial scales. *Global Change Biology* 29(6):1437–1450 <https://doi.org/10.1111/gcb.16564>
- Muñoz-Rojas M, Erickson TE, Dixon KW, Merritt DJ (2016) Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. *Restoration Ecology* 24:S43–S52 <https://doi.org/10.1111/rec.12368>
- Nascimento DF, Leles PSS, Oliveira Neto SN, Moreira RTS, Alonso JM (2012) Crescimento inicial de seis espécies florestais em diferentes espaçamentos *Cerne* 18: 159–165 <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000100019>
- Oksanen J, Simpson GL, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, Weedon, J (2022) *vegan: Community ecology package (2.6-4)* CRAN
- Pantaleão LC, Moraes LFD, Cesario FV, Moser P, Dias ATC, Amorim T A, Sansevero JBB (2024) Linking plant functional traits to soil properties in tropical forest restoration *Forest Ecology and Management* 563:121976 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121976>
- Pereira LC, Barbosa DEF, Chautems AP, Menini-Neto L (2021) Gesneriaceae da Serra do Relógio, Descoberto, Estado de Minas Gerais, Brasil. *Hoehnea*, 48:e832019 <https://doi.org/10.1590/2236-8906-83/2019>
- Perez-Harguindeguy N, Diaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Bret-Harte MS, Cornwell WK, Craine JM, Gurvich DE (2016) Corrigendum to: New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 64(8):715–716 https://doi.org/10.1071/BT12225_CO
- Poorter L, Bongers F, Aide TM, Zambrano AMA, Balvanera P, Becknell JM, Boukili V, Brancalion PHS, Broadbent EN, Chazdon RL (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589):211–214
- Poorter L, van der Sande MT, Thompson J, Arets EJMM, Alarcón A, Álvarez-Sánchez J, Ascarrunz N, Balvanera P, Barajas-Guzmán G, Boit A (2015) Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Global Ecology and Biogeography*, 24(11):1314–1328 <https://doi.org/10.1111/geb.12364>

- Postma JA, Hecht VL, Hikosaka K, Nord EA, Pons TL, Poorter H (2021) Dividing the pie: A quantitative review on plant density responses. *Plant, Cell & Environment*, 44(4):1072–1094 <https://doi.org/10.1111/pce.13968>
- Prach K, Walker LR (2019) Differences between primary and secondary plant succession among biomes of the world. *Journal of Ecology*, 107(2):510–516 <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13078>
- Pretzsch H. (2009). *Forest dynamics, growth and yield* (Vol. 684). Springer
- Procknow D, Rovedder AP, Piaia BB, Camargo B, Stefanello MM, Silva MPKL, Silva PS, Croda JP, Fochink GD (2025) Temporal monitoring of ecological restoration by applied nucleation: A case study in the Pampa, southern Brazil. *Ecological Engineering*, 212:e107490 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107490>
- R-Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>
- Reflora (2026) *Flora e Funga do Brasil*. <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/>
- Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumberras JF, Coelho MR, Almeida JA, Araujo-Filho JC, Lima HN, Marques FA, Oliveira JB, Cunha TJF (2025) *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (6. ed. rev. e ampl., Ed.). Embrapa <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1176834>
- Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K (2002) Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241(2):155–176 <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Sonter LJ, Barrett DJ, Soares-Filho BS (2014) Offsetting the impacts of mining to achieve no net loss of native vegetation. *Conservation Biology*, 28(4):1068–1076 <https://doi.org/10.1111/cobi.12260>
- Souza JD, Aguiar BAS, Santos DM, Araujo VKR, Simões JA, Andrade JR, Araújo EL (2020) Dynamics in the emergence of dormant and non-dormant herbaceous species from the soil seed bank from a Brazilian dry forest. *Journal of Plant Ecology*, 13(3):256–265
- Stahl JL, Araujo MM, Griebeler AM, Turchetto F, Galvan CF, Aimi SC, Costella C, Barbosa FM, Berghetti ÁLP, Costa EC (2025) Restoration effectiveness in pure and mixed plantings in the

- southern Atlantic forest Biome, Brazil. *Journal for Nature Conservation*, 127037 <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.127037>
- Ten Kate K, Bishop J, Bayon R (2004) Biodiversity offsets: Views, experience, and the business case. IUCN--The World Conservation Union
- Toto R, Alix-García J, Sims KRE, Coutinho B, Muñoz-Brenes C, Pugliese L, Mendes AF (2025) Evidence on scaling forest restoration from the Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil. *Nature Communications* 16(1):e4715.
- Villa EB, Pereira MG, Alonso JM, Beutler SJ, Leles PSS (2016) Aporte de serapilheira e nutrientes em área de restauração florestal com diferentes espaçamentos de plantio. *Floresta e Ambiente* 23(1):90–99 <https://doi.org/10.1590/2179-8087.067513>
- Vitousek P (1982) Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *The American Naturalist*, 119(4):553–572.
- Weiner J (1990) Asymmetric competition in plant populations. *Trends in Ecology & Evolution*, 5(11):360–364
- Wickham H, Wickham H (2016) Programming with ggplot2. *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*, 241–253 https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4_12
- Worthy SJ, Laughlin DC, Zambrano J, Umaña MN, Zhang C, Lin L, Cao M, Swenson NG (2020) Alternative designs and tropical tree seedling growth performance landscapes. *Ecology* 101(6):e03007 <https://doi.org/10.1002/ecy.3007>
- Yu W, Albert G, Rosenbaum B, Schnabel F, Bruelheide H, Connolly J, Härdtle W, von Oheimb G, Trogisch S, Rüger N (2024) Systematic distributions of interaction strengths across tree interaction networks yield positive diversity–productivity relationships. *Ecology Letters* 27(1):e14338 <https://doi.org/10.1111/ele.14338>

CAPÍTULO II:

Dinâmica da cobertura florestal e estrutura da paisagem ao longo de 40 anos em uma região da Mata Atlântica associada à mineração de bauxita

Dinâmica da cobertura florestal e estrutura da paisagem ao longo de 40 anos em uma região da Mata Atlântica associada à mineração de bauxita

Resumo

A compreensão da dinâmica espaço-temporal da perda e do ganho de floresta nativa é fundamental para avaliar seus efeitos sobre a conservação da biodiversidade e a organização estrutural da paisagem em regiões submetidas a intensas transformações antrópicas, como a Mata Atlântica brasileira. Este estudo analisou as mudanças na cobertura florestal nativa e na estrutura da paisagem ao longo de quatro décadas (1985–2025) nos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas, Zona da Mata de Minas Gerais, com ênfase na reorganização estrutural dos fragmentos florestais e na comparação entre a paisagem regional e áreas de compensação ambiental associadas à mineração de bauxita. A cobertura florestal foi mapeada por fotointerpretação de imagens Landsat (TM, ETM+ e OLI), validada por métricas de acurácia, e analisada por meio de métricas de paisagem relacionadas à quantidade, fragmentação, borda e forma dos fragmentos, por classes de tamanho. Os resultados indicam redução histórica da cobertura florestal entre 1985 e 2005, por atividades agropecuárias, seguida por aumento significativo (2025), especialmente em fragmentos de grande extensão (>100 ha). Apesar do ganho líquido de área florestal, observou-se aumento relevante do número de pequenos fragmentos (<5 ha), evidenciando elevada fragmentação estrutural da paisagem. As áreas sob compensação ambiental apresentaram maior proporção de cobertura florestal, menor incidência de perda e maior continuidade espacial em comparação à paisagem regional. A distribuição da cobertura florestal mostrou forte associação com o gradiente topográfico concentrando-se em áreas de maior altitude. Os resultados demonstram que os ganhos recentes de cobertura florestal refletem um processo de reorganização estrutural heterogêneo, no qual apesar da fragmentação a conectividade da paisagem vem aumentando, destacando a importância das ações de restauração florestal compensatória e de conservação dos remanescentes florestais nas áreas de influência da Companhia Brasileira de Alumínio.

Palavras-chave: Análise espaço-temporal; Compensação ambiental; Fragmentação florestal; Métricas de paisagem; Mineração sustentável; Sensoriamento remoto.

Forest cover dynamics and landscape structure over 40 years in an Atlantic Forest region associated with bauxite mining

Abstract

Understanding the spatiotemporal dynamics of native forest loss and gain is essential for assessing their effects on biodiversity conservation and landscape structural organization in regions subjected to intense anthropogenic transformations, such as the Brazilian Atlantic Forest. This study analyzed changes in native forest cover and landscape structure over four decades (1985–2025) in the municipalities of Descoberto and Itamarati de Minas, located in the Zona da Mata region of Minas Gerais State, with emphasis on the structural reorganization of forest fragments and the comparison between the regional landscape and environmental compensation areas associated with bauxite mining. Forest cover was mapped through photointerpretation of Landsat images (TM, ETM+, and OLI), validated using accuracy metrics, and analyzed using landscape metrics related to fragment amount, fragmentation, edge, and shape across size classes. The results indicate a historical reduction in forest cover between 1985 and 2005, due to agricultural and livestock activities, followed by a significant increase by 2025, especially in large fragments (>100 ha). Despite the net gain in forest area, a substantial increase in the number of small fragments (<5 ha) was observed, indicating high structural fragmentation of the landscape. Areas under environmental compensation exhibited a higher proportion of forest cover, lower incidence of forest loss, and greater spatial continuity compared with the regional landscape. Forest cover distribution showed a strong association with the topographic gradient, concentrating mainly in higher-altitude areas. The results demonstrate that recent forest cover gains reflect a heterogeneous process of structural reorganization in which, despite fragmentation, landscape connectivity has increased, highlighting the importance of compensatory forest restoration actions and the conservation of forest remnants within areas managed by Companhia Brasileira de Alumínio.

Keywords: Spatiotemporal analysis; Environmental compensation; Forest fragmentation; Landscape metrics; Sustainable mining; Remote sensing.

7 INTRODUÇÃO

A compreensão da dinâmica espaço-temporal da perda e do ganho de floresta nativa é fundamental para avaliar seus efeitos sobre a conservação da biodiversidade e a provisão de serviços ecossistêmicos, especialmente em regiões marcadas por intensas transformações antrópicas (Rosa et al., 2021). A redução da vegetação nativa conduz à configuração de paisagens altamente fragmentadas, caracterizadas por manchas florestais heterogêneas quanto ao tamanho, à forma e ao grau de isolamento (Oliveira & Barbosa, 2020), com implicações diretas para a integridade ecológica dos ecossistemas.

Em paisagens fragmentadas, a configuração espacial da cobertura florestal assume papel central. Paisagens com maior grau de fragmentação tendem a apresentar proporções mais elevadas de bordas em relação à área total de habitat, intensificando os efeitos de borda e alterando processos ecológicos fundamentais (Fahrig, 2024). Nesse contexto, as métricas de paisagem constituem ferramentas essenciais para a avaliação da fragmentação florestal, ao quantificar atributos espaciais associados ao tamanho, à forma e ao isolamento dos fragmentos (Lima et al., 2017; Oliveira & Barbosa, 2020; Santos et al., 2017), permitindo uma análise mais abrangente da estrutura da paisagem, para além de simples balanços de perda ou ganho de área.

A Mata Atlântica brasileira exemplifica de forma emblemática esses processos. Reconhecida como um *hotspot* global de biodiversidade, o bioma tem seus ecossistemas e espécies crescentemente ameaçados pela perda histórica de cobertura florestal e pela fragmentação extrema dos habitats (Cunha et al., 2024; Siqueira et al., 2021; Santos et al., 2017). Atualmente, mais de 80% dos fragmentos florestais remanescentes apresentam área inferior a 50 ha, o que amplia a exposição aos efeitos de borda e limita a conectividade entre os remanescentes (Lira et al., 2012; Pimentel et al., 2025; Pizo & Tonetti, 2020; Ribeiro et al., 2009).

Apesar desse histórico de degradação, evidências recentes indicam que determinadas regiões da Mata Atlântica têm passado por um processo de transição florestal, caracterizado pela recuperação parcial da cobertura nativa após períodos prolongados de desmatamento (Silva et al., 2020). Esses ganhos, no entanto, frequentemente ocorrem de forma espacialmente heterogênea e nem sempre resultam em uma reorganização estrutural da paisagem capaz de reduzir os efeitos do isolamento, reforçando a necessidade de análises integradas que considerem tanto a quantidade quanto a configuração espacial da floresta.

Paralelamente aos processos de regeneração natural, mecanismos de governança ambiental tornaram-se vitais para a conservação. No Brasil, a compensação ambiental, instituída pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), configura-se como um dos principais instrumentos legais e financeiros voltados à viabilização de áreas protegidas (Sánchez, 2020; Jesus et al., 2025). Teoricamente, a eficácia deste mecanismo depende de sua capacidade de gerar adicionalidade ecológica, ou seja, de promover ganhos de conservação superiores aos que ocorreriam na ausência do projeto (Maron et al., 2012; Bull et al., 2013). Nesse contexto, as áreas de compensação assumem relevância estratégica ao contribuir para a conservação e a ampliação de remanescentes florestais e para a redução da fragmentação da paisagem, especialmente em regiões dominadas por matrizes agrícolas (Geldmann et al., 2013; Ribeiro et al., 2009). Contudo, a maioria das avaliações foca apenas no balanço de área, negligenciando se essas áreas estão efetivamente promovendo uma reorganização estrutural da paisagem a longo prazo.

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal da cobertura florestal nativa em dois municípios da Zona da Mata Mineira, Descoberto e Itamarati de Minas, ao longo de quatro décadas (1985–2025), com ênfase na reorganização estrutural da paisagem e nas diferenças espaciais associadas a diferentes regimes de uso e gestão do território. Especificamente, buscou-se: (i) quantificar a dinâmica da cobertura florestal nativa, identificando padrões de perda e ganho de vegetação em escala municipal; (ii) avaliar as mudanças na configuração espacial dos fragmentos florestais; (iii) examinar se os incrementos de área estiveram associados a alterações nos níveis de fragmentação; (iv) comparar as trajetórias de mudança da cobertura florestal entre a paisagem regional e as áreas de compensação ambiental associadas à mineração de bauxita realizada pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), caracterizando diferenças nos padrões espaciais de recuperação; e (v) analisar a influência do gradiente topográfico na distribuição da cobertura florestal, investigando o papel dos condicionantes físicos na persistência e reorganização da vegetação nativa.

8 MATERIAL E MÉTODOS

8.1 *Área de estudo*

O estudo foi realizado nos municípios de Descoberto (213.168 km²) e Itamarati de Minas (94.568 km²) (IBGE, 2022), localizados na Zona da Mata do estado de Minas Gerais,

Sudeste do Brasil (Figura 1). Ambos os municípios estão inseridos no domínio da Mata Atlântica, com predominância de Floresta Estacional Semidecidual como formação vegetal natural (IBGE, 2012). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, caracterizado por condições subtropicais e úmidas, com verões quentes e invernos secos (Alvares et al., 2013). Os solos predominantes são classificados como Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2025). A região apresenta relevo acidentado, com altitude variando de aproximadamente 200 m a mais de 1.300 m (Martins et al., 2022; Pereira et al., 2021).

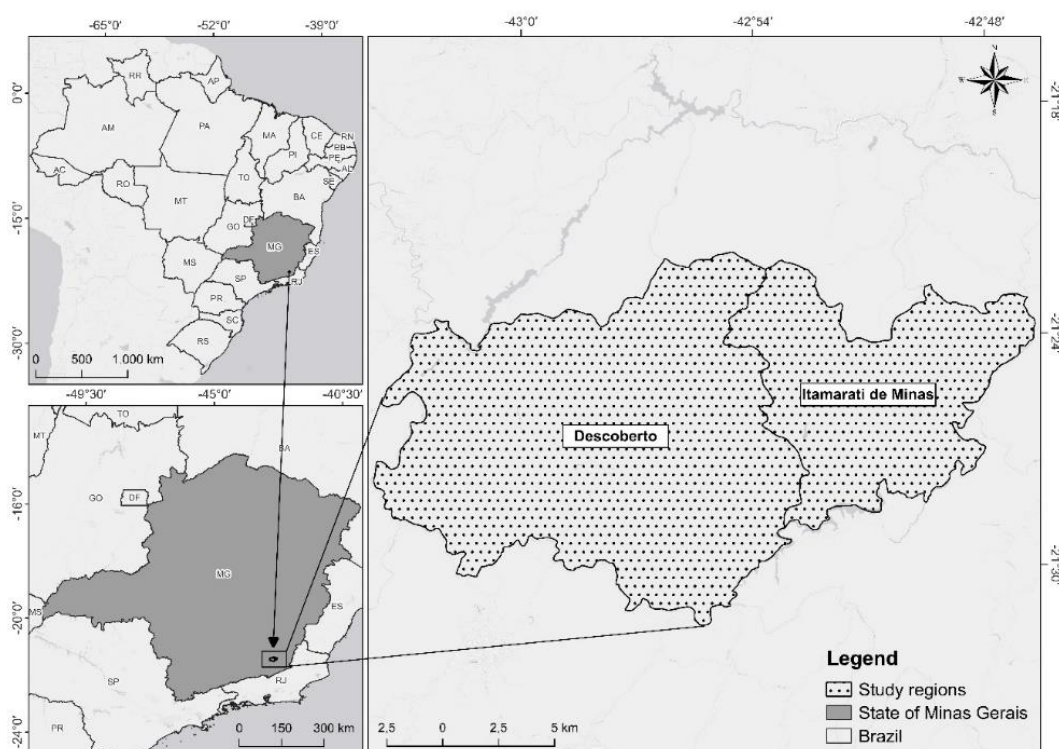


Figura 1. Localização dos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas, situados na Zona da Mata mineira, Sudeste do Brasil.

Os municípios têm baixa densidade populacional, com 3.690 habitantes em Itamarati de Minas e 4.928 habitantes em Descoberto (IBGE, 2022). A economia local está principalmente associada ao uso agropecuário da terra, caracterizando-se pela predominância de áreas de pastagem e cultivos agrícolas, além da expressiva presença da silvicultura, sobretudo de plantios de eucalipto, configuração amplamente recorrente na Zona da Mata Mineira (Cosimo et al., 2021; Gomes et al., 2020).

Esse padrão de ocupação reflete a histórica conversão da cobertura florestal para atividades produtivas rurais, resultando em uma paisagem composta majoritariamente por

mosaicos agropecuários e remanescentes florestais secundários (Diniz et al., 2024; Santos et al., 2020). Além disso, na área de estudo está inserida uma unidade de produção de bauxita da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), atividade que também integra a dinâmica econômica regional e influencia o uso e a gestão do território.

De acordo com a plataforma do Cadastro Nacional de Unidades de Conservação do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2026), nos dois municípios ocorrem exclusivamente unidades de conservação da categoria Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN), totalizando cinco áreas protegidas de domínio privado. Destas, duas pertencem à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA): a RPPN Fazenda Boa Esperança e a RPPN Fazenda São Lourenço.

Dentro da área de estudo, foi dada atenção especial às áreas sob gestão da CBA, que desenvolve projetos de restauração florestal em parceria com o Laboratório de Restauração Florestal (LARF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

8.2 Aquisição e pré-processamento dos dados

As imagens orbitais utilizadas neste estudo foram obtidas a partir do programa Landsat, mantido pelo *United States Geological Survey* (USGS). Foram selecionadas imagens correspondentes aos anos de 1985, 2005 e 2025, de modo a representar um intervalo temporal de 40 anos, permitindo a análise da dinâmica da cobertura florestal nativa nos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas, Minas Gerais, Brasil.

Para o ano de 1985, foram utilizadas imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM), a bordo do satélite Landsat 5, adquiridas em 4 de agosto de 1985. Para 2005, as imagens correspondem ao sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), do Landsat 7, com data de aquisição em 28 de agosto de 2005. Para 2025, foram utilizadas imagens do sensor *Operational Land Imager* (OLI), do Landsat 8, adquiridas em 16 de junho de 2025. Todas as cenas correspondem à órbita/ponto 217/075, cobrindo integralmente a área de estudo.

As imagens foram selecionadas com datas próximas entre si no calendário anual, com o objetivo de minimizar efeitos associados à sazonalidade da vegetação e garantir maior comparabilidade temporal entre os períodos analisados. O critério de seleção priorizou cenas com baixa cobertura de nuvens sobre a área de estudo. Todas as imagens foram obtidas com

correção geométrica e atmosférica em nível padrão (Nível 2), adequadas para análises espaciais em ambiente de Sistema de Informação Geográfica.

Após o download, as imagens foram importadas para o software QGIS (Versão 3.34.4), onde foram submetidas a recorte espacial com base nos limites municipais de Descoberto e Itamarati de Minas.

Para subsidiar a etapa de mapeamento, foram geradas composições coloridas específicas para cada sensor, incluindo composição natural (3R–2G–1B para TM e ETM+, e 4R–3G–2B para OLI), composição falsa cor (4R–3G–2B para TM e ETM+, e 5R–4G–3B para OLI) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1974), calculado conforme a Equação 1.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Em que NIR corresponde à banda do infravermelho próximo (*Near Infrared*) e RED corresponde à banda do vermelho do espectro visível.

A identificação da cobertura florestal nativa foi realizada por fotointerpretação utilizando a vetorização em tela dos fragmentos florestais, considerando atributos espectrais, texturais e contextuais da vegetação florestal nos diferentes anos analisados (1985, 2005 e 2025). Buscou-se delimitar os fragmentos florestais o mais próximo da realidade, utilizando a demarcação com alvos contrastantes nas diferentes composições e no NDVI. Fragmentos de cobertura florestal nativa que se estendiam além dos limites administrativos dos municípios foram integralmente considerados e mapeados, de modo a evitar a fragmentação artificial das unidades florestais.

Os dados fotointerpretados passaram por um processo de validação por meio do cálculo dos erros de omissão (falsos negativos: áreas que deveriam ter sido classificadas como fragmento florestal, mas não foram), erros de comissão (falsos positivos: áreas classificadas como fragmento florestal que na realidade pertencem à classe “outros”), da exatidão global e do Índice Kappa.

A validação foi realizada a partir de pontos aleatórios (n =2000). Esses pontos foram avaliados comparando-se a classe atribuída na fotointerpretação (fragmento florestal ou outras classes de cobertura) com um valor de referência.

Como dado de referência, foi utilizado o plano de informação derivado do NDVI. Foram considerados como vegetação os pixels com valores de NDVI acima de um limiar específico para a data. Embora essa abordagem apresente limitações, como a influência de sombras de relevo, a presença de pixels mistos e variações sazonais nos valores do índice, ela se mostrou especialmente útil para o ano de 1985, período para o qual não há disponibilidade de imagens de maior resolução espacial ou registros de campo.

Para os anos mais recentes, a validação incluiu também a interpretação visual de imagens de alta resolução disponíveis no *Google Earth* e verificações em campo. Ressalta-se que plantios de eucalipto não estavam presentes na área em 1985, mas foram identificados nos anos de 2005 e 2025 com base na textura homogênea dos talhões, nos valores elevados e relativamente uniformes de NDVI e nas informações obtidas em campo, assim os plantios de eucalipto foram mapeados separadamente e não considerados no cálculo do ganho de cobertura florestal.

8.3 *Análise de dados*

As mudanças na estrutura da paisagem florestal ao longo do tempo foram avaliadas por meio da comparação de métricas de paisagem entre as diferentes datas analisadas. O cálculo das métricas foi realizado por meio da extensão *Patch Analyst* (versão 5.2), integrada ao ArcGIS, utilizando o módulo de análise espacial aplicado a dados vetoriais (Rempel et al., 2012). A fim de facilitar as análises e comparação com outros trabalhos, os fragmentos foram classificados em cinco classes de área, representando gradientes crescentes de dimensão espacial: muito pequenos (< 5 ha), pequenos ($5 < 10$ ha), médios ($10 < 50$ ha), grandes ($50 < 100$ ha) e muito grandes (≥ 100 ha).

Para cada classe de tamanho e para cada ano analisado (1985, 2005 e 2025), foram calculadas métricas representativas da quantidade, fragmentação e configuração da paisagem florestal, incluindo número de fragmentos (NumP), área total por classe (CA), tamanho médio dos fragmentos (MPS), densidade de borda (ED) e índice médio ponderado pela área da forma dos fragmentos (AWMSI) (Tabela 1). Essas métricas permitem caracterizar simultaneamente a extensão do habitat, o grau de fragmentação estrutural e a complexidade geométrica dos fragmentos.

Tabela 1. Métricas da paisagem utilizadas para quantificar a estrutura e a configuração espacial da cobertura florestal, calculadas por classes de tamanho dos fragmentos, em que, j varia de 1 a n e representa o número de fragmentos; n_i corresponde ao número de fragmentos da classe i ; a_{ij} refere-se à área do fragmento j na classe i ; p_{ij} representa o perímetro do fragmento j na classe i ; TB é o total de bordas na classe analisada; AT corresponde à área total da paisagem.

Grupo	Abreviação	Nome da métrica	Fórmula
Densidade	NumP	Número de fragmentos	$NumP = \sum_{i=1}^n n_i$
Área	CA	Área da classe (ha)	$CA = \sum_{i=1}^n a_{ij}$
Densidade	MPS	Tamanho médio dos fragmentos (m ²)	$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i}$
Borda	ED	Densidade de borda (m/ha)	$ED = \frac{TB}{AT}$
Forma	AWMSI	Índice médio de forma ponderado pela área	$AWMSI = \sum_{j=1}^n \left(\frac{0,25\rho_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right) \times \left(\frac{a_{ij}}{AT} \right)$

Fonte: Adaptado de Santos et al (2017) e Schumacher (2023).

As variações temporais das métricas foram quantificadas por meio da diferença absoluta entre períodos consecutivos (1985–2005 e 2005–2025), obtida pela subtração dos valores observados no ano inicial em relação ao ano final de cada intervalo, possibilitando a identificação de tendências de ganho, perda ou reorganização estrutural da paisagem. A dinâmica da paisagem foi explorada por meio de representações gráficas, utilizadas para sintetizar e comparar as variações das métricas de paisagem entre classes de tamanho e períodos temporais analisados.

Em função das diferentes escalas e unidades das métricas avaliadas, todas as variáveis foram padronizadas por meio da transformação *z-score*. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada com base na matriz de correlação das variáveis padronizadas, com o objetivo de sintetizar a variação conjunta das métricas de paisagem e identificar os principais gradientes

estruturais e configuracionais associados às classes de tamanho dos fragmentos ao longo do tempo. As interpretações tiveram caráter exploratório e descritivo.

A dinâmica da cobertura florestal da paisagem regional e a área de compensação ambiental da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) foi avaliada a partir da proporção relativa de floresta nos anos de 1985, 2005 e 2025.

A altitude do relevo foi obtida a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) derivado dos dados altimétricos do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 m, acessados por meio da plataforma *Google Earth Engine* e processados no ambiente R. Com base na distribuição dos valores de altitude, o relevo foi classificado em três categorias altimétricas definidas a partir dos quantis de 33% e 66%, correspondendo aos terços inferior, médio e superior do relevo. As estatísticas zonais foram calculadas no ArcGIS 10.8 por meio da sobreposição do mapa de cobertura florestal referente ao ano de 2025, permitindo a estimativa da área e da proporção de cobertura vegetal em cada classe altimétrica.

Para a elaboração dos mapas, a dinâmica da cobertura florestal foi avaliada por meio da quantificação de acréscimos e decréscimos entre os períodos analisados, obtidos a partir de operações algébricas simples aplicadas aos mapas de cobertura da terra. A confecção dos mapas foi realizada no software ArcGIS 10.8.

Todo o processamento dos dados, a organização das informações e a elaboração de todas as representações gráficas foram realizados no ambiente estatístico R (versão 4.5.2), utilizando os pacotes *readr* e *dplyr* para leitura e manipulação dos dados, e *ggplot2* para a construção dos gráficos.

9 RESULTADOS

Os dados de validação indicam a concordância da fotointerpretação com valores de exatidão global acima de 80% e Índices Kappa indicando concordância substancial na análise de confiabilidade interavaliadores (Landis & Koch, 1977). Os dados da validação são apresentados em Anexo (Anexo I).

9.1 Mudanças nas métricas da paisagem por classes de tamanho dos fragmentos

As métricas da paisagem florestal, analisadas por classes de tamanho dos fragmentos, evidenciaram mudanças estruturais ao longo do período avaliado (1985–2005–2025), com padrões distintos entre os intervalos temporais e entre as classes de tamanho.

Entre 1985 e 2005, observou-se perda de área florestal nas classes de fragmentos médios, grandes e muito grandes (classes 3, 4 e 5) e houve aumento da área nas classes menores (classes 1 e 2). Nesse mesmo período, o número de fragmentos aumentou principalmente nas classes menores, indicando maior subdivisão da cobertura florestal. As variações na borda total permaneceram próximas de zero em todas as classes, sugerindo estabilidade relativa dessa métrica no intervalo analisado (Figura 2). No período de 2005 a 2025, foi registrado ganho líquido de área florestal, concentrado sobretudo na classe de fragmentos muito grandes (classe 5). O número de fragmentos continuou aumentando, com destaque para a classe de menor tamanho (< 5 ha), enquanto as variações na borda total permaneceram pouco expressivas entre as classes (Figura 2).

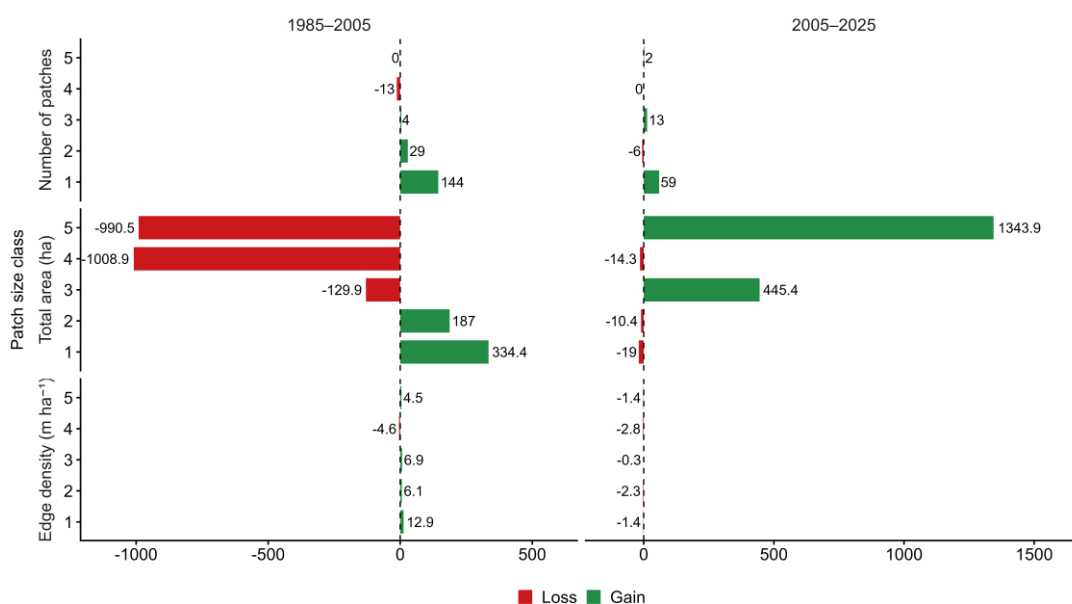


Figura 2. Mudanças na estrutura da paisagem por classes de tamanho dos fragmentos nos períodos de 1985–2005 e 2005–2025. Os termos em inglês correspondem a: *Number of patches* = número de fragmentos; *Patch size class* = classe de tamanho dos fragmentos; *Total area* = área total; *Edge density* = densidade de borda; *Loss* = perda; *Gain* = ganho. As barras horizontais representam ganhos (valores positivos, em verde) e perdas (valores negativos, em vermelho) na área total (ha), densidade de borda (m ha⁻¹) e número de fragmentos em cada classe de tamanho.

A análise conjunta da área total da classe (CA) e do número de fragmentos (NumP) revela dinâmicas opostas dependendo da classe de tamanho (Figura 3). Em termos de área, a classe de maior tamanho (>100 ha) apresentou um crescimento expressivo entre 2005 e 2025, recuperando as perdas de cobertura registradas no período anterior. Em contraste, a métrica de fragmentação (Figura 3B) foi impulsionada exclusivamente pelas classes menores, o número de manchas da Classe 1 (<5 ha) triplicou ao longo da série temporal (1985-2025), evidenciando a formação de novos fragmentos em uma matriz antropizada.

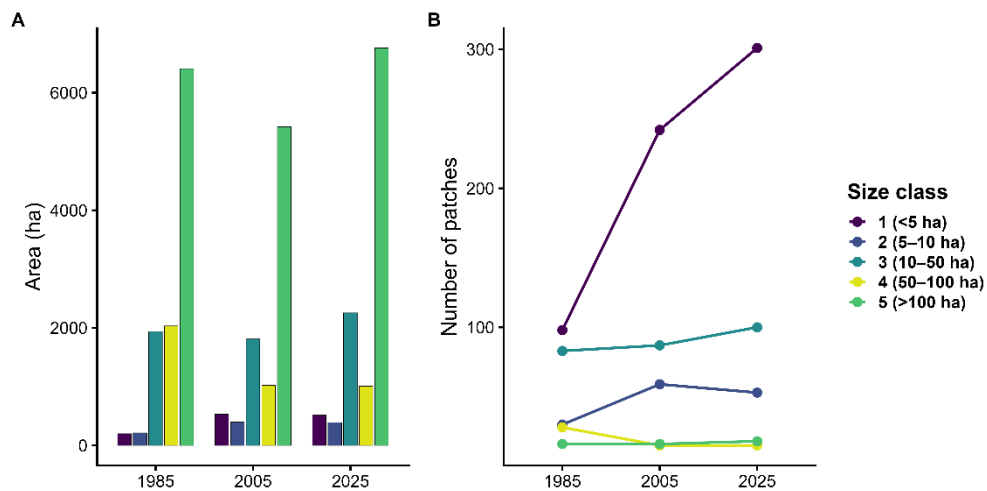


Figura 3. Dinâmica espaço-temporal da estrutura da paisagem. (A) Variação da cobertura florestal total (CA) por classe de tamanho dos fragmentos. (B) Evolução do número de fragmentos (NumP). Os termos em inglês correspondem a: *Area* = área; *Number of patches* = número de fragmentos; *Size class* = classe de tamanho.

A análise das métricas de paisagem para o cenário de 2025 evidenciou variações consistentes na densidade de borda e na complexidade de forma entre as classes de tamanho dos fragmentos (Figura 4). A densidade de borda (ED) apresentou um padrão não linear, com picos expressivos nas classes 3 (10–50 ha) e 5 (>100 ha), contrastando com os valores mais baixos observados nas classes 2 (5–10 ha) e 4 (50–100 ha) (Figura 4A). O índice de forma médio ponderado pela área (AWMSI) aumentou progressivamente conforme o tamanho dos fragmentos, com valores mais baixos nas classes menores e máximos na classe 5 (>100 ha), indicando maior complexidade geométrica nos fragmentos de maior extensão (Figura 4B). Esses padrões demonstram que, em 2025, a estrutura espacial da paisagem florestal varia de forma sistemática entre as classes de tamanho, tanto em termos de exposição à borda quanto de complexidade de forma.

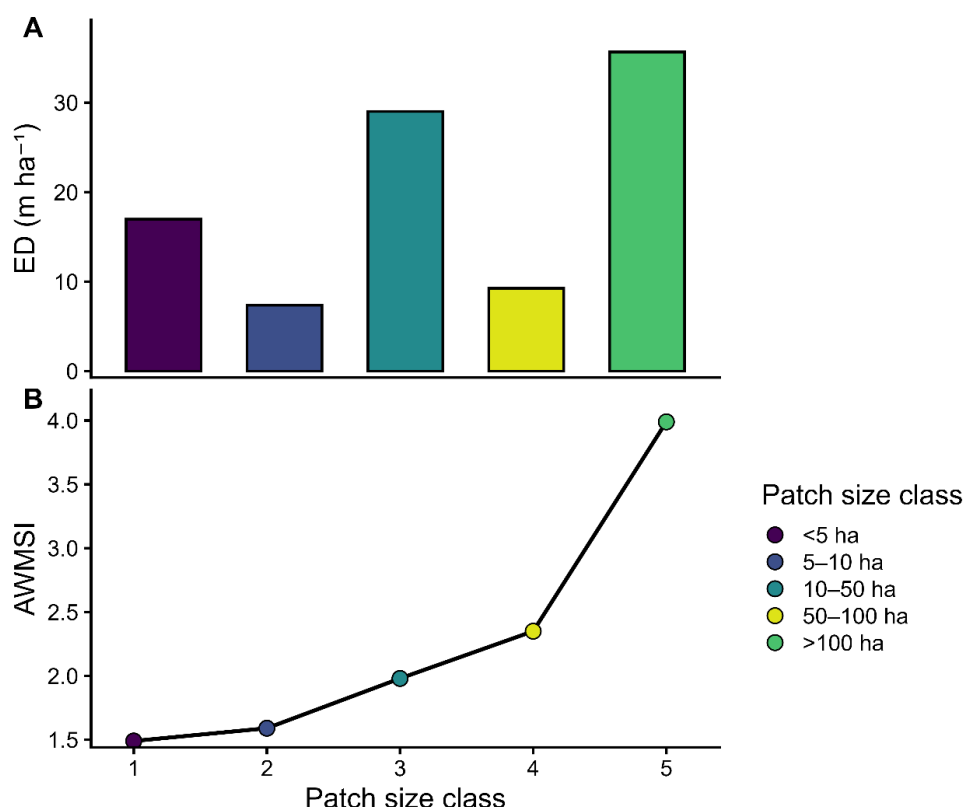


Figura 4. Métricas da paisagem dos fragmentos florestais no cenário de 2025. (A) Densidade de borda (ED; m ha^{-1}), expressa como a quantidade de borda florestal por hectare da paisagem para cada classe de tamanho dos fragmentos. (B) Índice de forma médio ponderado pela área (AWMSI), utilizado para descrever a complexidade geométrica dos fragmentos florestais, em que valores mais elevados indicam formas mais irregulares e recortadas. Os termos em inglês correspondem a: *Patch size class* = classe de tamanho dos fragmentos.

9.2 Variação temporal das métricas da paisagem no espaço multivariado

A análise multivariada por meio da Análise de Componentes Principais (PCA) sintetizou a variação conjunta das métricas estruturais da paisagem e evidenciou padrões consistentes ao longo de tempo analisado (Figura 5). O primeiro eixo (PC1), responsável por 76% da variância total, esteve associado principalmente às métricas relacionadas à área, ao tamanho médio e à complexidade da forma dos fragmentos (CA, MPS e AWMSI), promovendo a separação entre classes dominadas por fragmentos maiores e aquelas caracterizadas por fragmentos menores. O segundo eixo (PC2), que explicou 18,9% da variância, foi influenciado principalmente pelo número de fragmentos (NumP), refletindo um gradiente de fragmentação associado à

subdivisão da cobertura florestal. A disposição relativa das classes no espaço multivariado manteve-se consistente entre 1985, 2005 e 2025, permitindo a comparação direta das trajetórias estruturais da paisagem ao longo do tempo.

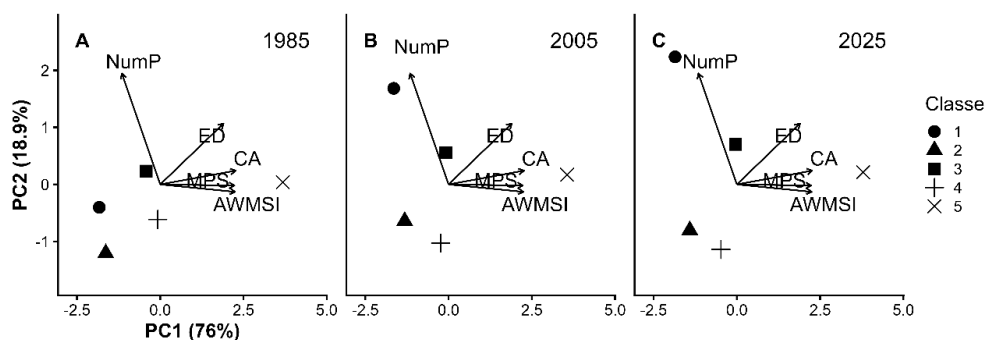


Figura 5. Análise de Componentes Principais (PCA) das métricas estruturais da paisagem florestal nos anos de 1985 (A), 2005 (B) e 2025 (C). Os painéis compartilham a mesma escala nos eixos, permitindo a comparação direta entre os períodos. Os pontos representam as classes de tamanho dos fragmentos, diferenciadas por símbolos, enquanto as setas indicam os vetores de carga das métricas analisadas: AWMSI (índice médio ponderado pela área da forma), ED (densidade de borda), MPS (tamanho médio dos fragmentos), NumP (número de fragmentos) e CA (área total da classe). O primeiro eixo (PC1) está associado principalmente às métricas relacionadas à área, ao tamanho médio e à complexidade de forma, enquanto o segundo eixo (PC2) reflete um gradiente de fragmentação associado principalmente ao número de fragmentos. As porcentagens indicam a proporção da variância total explicada por cada componente principal.

9.3 Dinâmica da cobertura florestal na paisagem regional e na área de compensação da CBA

A análise da cobertura florestal relativa indicou que a paisagem regional e a área de compensação ambiental da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) apresentaram tendências temporais semelhantes, embora com diferenças marcantes na magnitude das variações. Em ambas as áreas, observou-se redução da cobertura florestal entre 1985 e 2005, seguida por aumento em 2025 (Figura 6). Ressalta-se, contudo, que a redução da cobertura florestal observada na área atualmente sob compensação da CBA ocorreu em um período anterior à sua incorporação à gestão da empresa, ou seja, não tem relação com a atividade minerária. Ao longo

do período subsequente, a área manteve valores mais elevados de cobertura florestal e apresentou recuperação mais acentuada no intervalo mais recente.

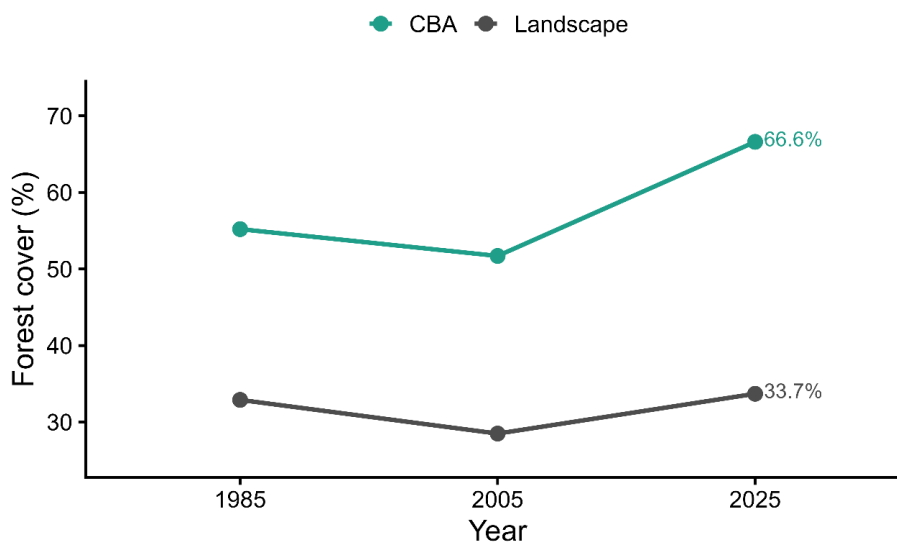


Figura 6. Variação da porcentagem de cobertura florestal ao longo de 40 anos. Comparação entre a área da CBA e a paisagem regional composta pelos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas. Os termos em inglês correspondem a: *Forest cover* = cobertura florestal; *Year* = ano; *Landscape* = paisagem regional.

A dinâmica espaço-temporal da cobertura florestal é evidenciada pela comparação dos mapas dos anos de 1985, 2005 e 2025 (Figura 7). Observa-se um aumento progressivo da presença de áreas de florestas nativas, particularmente no interior e no entorno das áreas de compensação ambiental da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). Em contraste, a paisagem regional, fora das áreas de influência da mineração, em escala mais ampla é caracterizada por uma matriz predominantemente não florestal, na qual a cobertura florestal ocorre de forma descontínua, distribuída em fragmentos de diferentes tamanhos ao longo do período analisado.

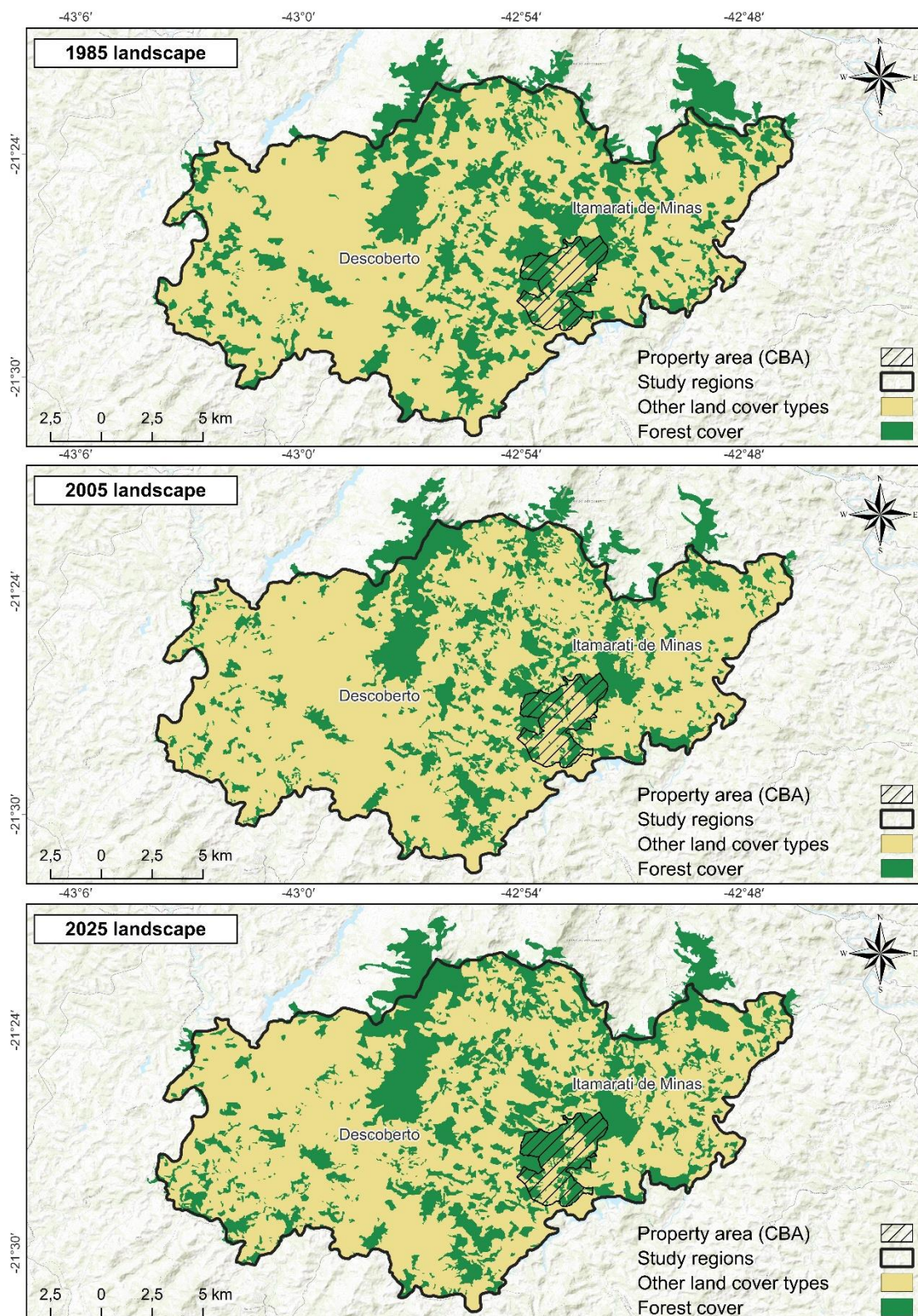


Figura 7. Evolução temporal da cobertura florestal nos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas, Zona da Mata de Minas Gerais, nos anos de 1985, 2005 e 2025.

A distribuição espacial da cobertura florestal revelou-se fortemente condicionada pela topografia, evidenciando um gradiente positivo entre altitude e persistência da vegetação (Figura 8). As zonas de maior altitude (*Upper elevation zone*, 746–1405 m) atuam como os principais refúgios da paisagem, concentrando 50,2% de toda a cobertura florestal remanescente. Em contraste, as terras baixas (*Lower elevation zone*, 185–422 m), historicamente mais aptas ao uso agrícola, sustentam a menor proporção de florestas (20,79%), indicando uma pressão antrópica seletiva que confinou os fragmentos florestais às áreas de relevo mais acidentado (Figura 8).

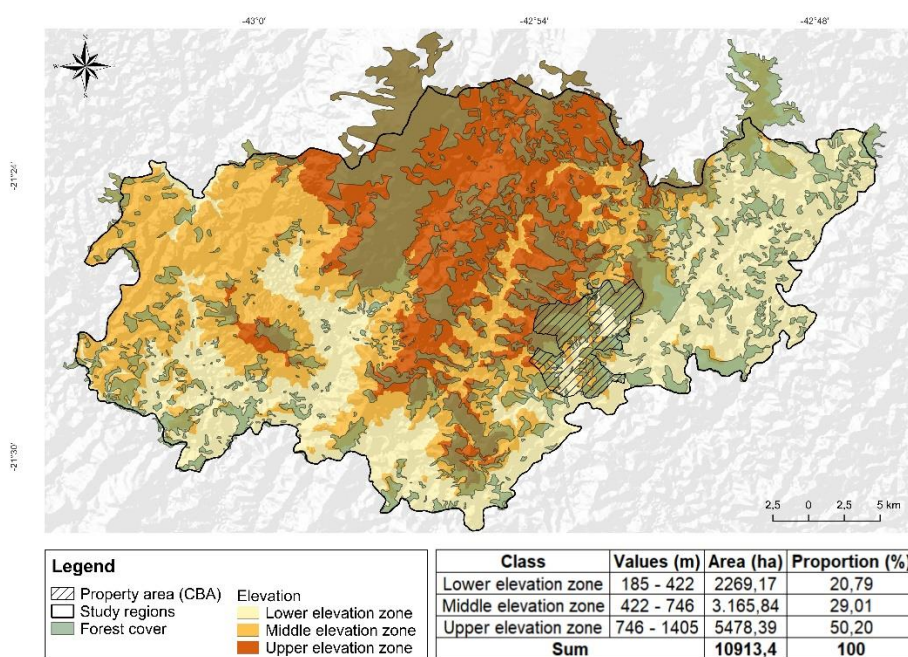


Figure 8. Distribuição da cobertura florestal em 2025 em relação às classes altimétricas nos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas, MG. O mapa apresenta as zonas altimétricas baixa, média e alta, a distribuição da cobertura florestal e os limites da área de estudo e da propriedade da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), bem como a proporção de área ocupada por cada classe de altitude. Os termos em inglês correspondem a: *Legend* = legenda; *Property area (CBA)* = área da propriedade (CBA); *Study region* = região de estudo; *Forest cover* = cobertura florestal; *Elevation* = elevação; *Lower elevation zone* = zona de baixa altitude; *Middle elevation zone* = zona de média altitude; *Upper elevation zone* = zona de alta altitude; *Class* = classe; *Values (m)* = valores (m); *Area (ha)* = área (ha); *Proportion (%)* = proporção (%); *Sum* = soma.

A comparação da configuração espacial da cobertura florestal entre 1985 e 2025 nas áreas sob gestão da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) evidencia alterações na

distribuição e no arranjo espacial dos fragmentos florestais ao longo do período analisado (Figura 9). Em 2025, observa-se maior continuidade espacial da cobertura florestal no interior das áreas protegidas, em comparação ao padrão observado em 1985. Em escala regional, a distribuição espacial da dinâmica florestal ao longo do período analisado indica que os incrementos florestais ocorreram predominantemente adjacentes a fragmentos previamente existentes, resultando na expansão espacial dessas áreas e em alterações na configuração da cobertura florestal ao longo da paisagem (Figura 10).

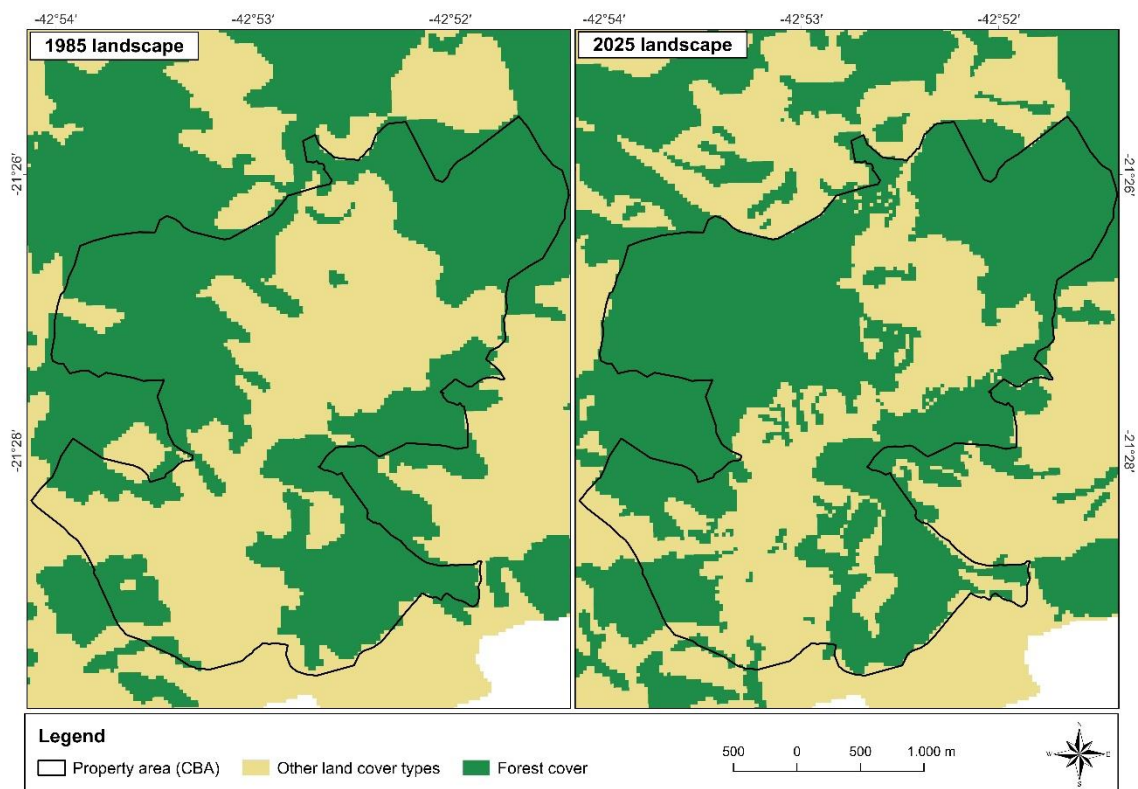


Figura 9. Comparação da configuração espacial da cobertura florestal nos anos de 1985 e 2025 em área sob gestão da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), nos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas, Zona da Mata de Minas Gerais.

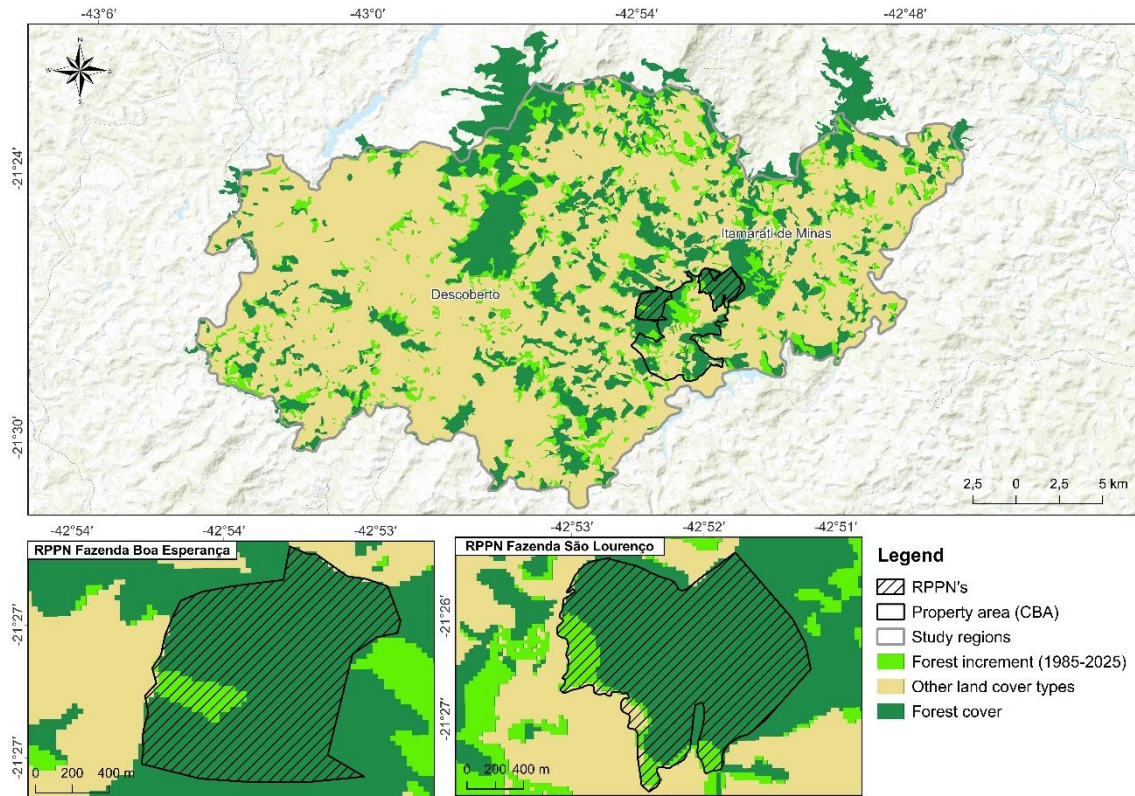


Figura 10. Distribuição espacial da dinâmica florestal nos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas no período de 1985 a 2025. O mapa apresenta a cobertura florestal remanescente (verde escuro) e as áreas de incremento florestal no período analisado (verde claro), bem como as áreas não vegetadas. As áreas em destaque correspondem às Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs) sob gestão da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), permitindo a visualização da distribuição espacial do incremento florestal no interior e no entorno das áreas protegidas.

10 DISCUSSÃO

10.1 Dinâmica estrutural da paisagem florestal ao longo de quatro décadas

A análise integrada das métricas de paisagem ao longo de quatro décadas indica que as mudanças observadas na paisagem florestal não se restringiram a variações na quantidade de cobertura, mas refletiram um processo mais amplo de reorganização estrutural. Ao longo do período avaliado, diferentes dimensões da estrutura espacial, incluindo área, fragmentação, forma e borda, responderam de maneira não homogênea no tempo e entre classes de tamanho, evidenciando trajetórias distintas de transformação da paisagem em um contexto antropizado.

Esse padrão é consistente com a trajetória histórica da Mata Atlântica, que figurou entre as maiores florestas tropicais das Américas, ocupando originalmente cerca de 150 milhões de hectares, mas que atualmente mantém entre 28 e 30 milhões de hectares de cobertura florestal nativa (Ribeiro et al., 2009; Rosa et al., 2021). A estabilidade relativa da área total, contudo, não implica a manutenção da estrutura espacial, uma vez que a fragmentação está associada principalmente à configuração do habitat, e não à sua quantidade absoluta (Riva et al., 2024).

Nesse contexto, o aumento do número de fragmentos observado, especialmente nas classes de menor tamanho, reforça a caracterização da Mata Atlântica como uma paisagem altamente fragmentada, marcada pela predominância de pequenos remanescentes florestais inseridos em matrizes antrópicas (Lira et al., 2012; Ribeiro et al., 2009; Rosa et al., 2021; Siqueira et al., 2021; Pimentel et al., 2025). A ocorrência frequente de fragmentos inferiores a 1 ha, árvores dispersas em pastagens, faixas arbóreas associadas a cercas e remanescentes de mata ciliar, amplamente descrita para o bioma, evidencia um elevado grau de subdivisão espacial da cobertura florestal (Joly et al., 2014; Siqueira et al., 2021), padrão que se reflete nos resultados deste estudo, especialmente no aumento do número de fragmentos da classe 1 (< 5 ha). Semelhante ao que ocorreu em outras regiões da Mata Atlântica, nesta região da Zona da Mata a fragmentação florestal também resulta de um histórico de conversão de florestas para áreas de agricultura e pecuária.

Embora a fragmentação seja frequentemente associada à perda de habitat, estudos recentes destacam que conjuntos de pequenos fragmentos, quando considerados de forma integrada, podem representar uma área total relevante e desempenhar papel importante na conservação da biodiversidade em paisagens fragmentadas (Fahrig et al., 2019; Arroyo-Rodríguez et al., 2020; Beard et al., 2025; Beltrão et al., 2024; Oliveira & Barbosa, 2020). Assim, o aumento no número de pequenos fragmentos ao longo do período analisado pode refletir processos de regeneração ou rearranjo espacial da cobertura florestal, podendo ainda resultar, em algum grau conectividade estrutural da paisagem. Pequenos fragmentos florestais na paisagem podem servir de trampolins ecológicos para conexão entre áreas maiores, como já constatado em outras regiões da Mata Atlântica (Juvanhol et al., 2011).

Por outro lado, o ganho de área concentrado na classe de fragmentos de maior tamanho sugere um processo de consolidação estrutural da paisagem, caracterizado pela expansão de remanescentes já estabelecidos, em detrimento da formação de novas manchas florestais extensas. Resultados semelhantes, com elevada fragmentação mesmo em cenários de recuperação parcial da cobertura florestal, foram reportados por Dias et al. (2023) no Centro de

Endemismo de Pernambuco, e nos Parques Estaduais do Forno Grande e da Pedra Azul, no Espírito Santo, reforçando que a fragmentação estrutural permanece como uma característica dominante em diferentes regiões da Mata Atlântica.

As métricas associadas à borda e à forma dos fragmentos também refletem essa reorganização estrutural. Paisagens mais fragmentadas tendem a apresentar maior proporção de bordas (Fahrig, 2024), enquanto fragmentos de maior extensão frequentemente exibem formas mais complexas (Pimentel et al., 2025), como evidenciado pelos padrões de densidade de borda e complexidade geométrica entre as classes de tamanho. Esses atributos reforçam que a estrutura da paisagem resulta da interação entre área, forma e configuração espacial, e não apenas da quantidade total de habitat (Turner, 2005).

De modo geral, a capacidade dos remanescentes florestais de sustentar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos depende da combinação entre quantidade de habitat, qualidade estrutural dos fragmentos, conectividade e pressões antrópicas adicionais (Haddad et al., 2015). Nesse contexto, a proteção de fragmentos de pequena extensão assume papel relevante na manutenção da biodiversidade em paisagens altamente fragmentadas (Riva & Fahrig, 2023), complementando a importância dos grandes remanescentes para a consolidação estrutural da paisagem.

Por fim, a análise multivariada por meio da PCA corroborou os padrões estruturais identificados nas análises univariadas, evidenciando gradientes consistentes associados às classes de tamanho ao longo do período avaliado. Essa síntese reforça que a reorganização da paisagem florestal resulta da interação entre múltiplas dimensões estruturais, cuja interpretação integrada é fundamental para compreender sua dinâmica em contextos antropizados.

10.2 Dinâmica da cobertura florestal na paisagem regional e na área de compensação: implicações estruturais

A cobertura florestal observada neste estudo reflete o histórico de ocupação e uso do solo da Mata Atlântica, bioma profundamente transformado por processos de urbanização e expansão agropecuária (Diniz et al., 2024; Santos et al., 2020). Esse processo resultou em uma paisagem estruturalmente fragmentada, na qual os remanescentes florestais persistem majoritariamente como elementos isolados inseridos em matrizes antrópicas (Beltrão et al., 2024; Diniz et al., 2024; Fahrig, 2003).

Nesse contexto, os resultados evidenciam trajetórias contrastantes entre a paisagem regional e as áreas sob gestão da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). Enquanto a paisagem regional manteve-se marcada por uma matriz predominantemente não florestal, com perdas e ganhos dispersos de vegetação, as áreas associadas à empresa apresentaram maior continuidade espacial e ganho de cobertura florestal e menor incidência de perda de vegetação, sugerindo que diferentes regimes de uso e gestão do território influenciam a configuração espacial da cobertura, mesmo em um mesmo contexto regional.

A concentração dos incrementos florestais em áreas adjacentes a fragmentos preexistentes, observada tanto em escala regional quanto nas áreas da CBA, é compatível com processos de transição florestal descritos para a Mata Atlântica, nos quais o ganho líquido de cobertura decorre principalmente da expansão de florestas mais jovens, que compensam, em termos de área, a perda no passado de remanescentes mais antigos (Rosa et al., 2021; Silva et al., 2020).

A predominância da vegetação nativa em classes topográficas de topos de morro, reforça esse quadro, uma vez que áreas de relevo mais íngreme e menor acessibilidade histórica sofreram menor pressão antrópica, favorecendo tanto a persistência de fragmentos antigos quanto a recuperação recente da vegetação (Rosa et al., 2021; Silva et al., 2020). Em contraste, áreas de topografia mais plana nas baixadas permaneceram com menores proporções de cobertura florestal, indicando limitações estruturais à recuperação nesses ambientes.

No interior das áreas sob gestão da CBA, a distribuição espacial das “manchas verdes” é compatível com a implementação de plantios de mudas altas de espécies nativas voltados à compensação ambiental e condução da regeneração natural, promovendo a expansão e o adensamento de fragmentos existentes e a aproximação espacial entre remanescentes florestais protegidos, incluindo as duas Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs) da área de estudo (Balestrin et al., 2019; Dueñez et al., 2025; Fonseca et al., 2024; Martins et al., 2022; Miranda et al., 2017; Silva et al., 2016). Embora a conectividade funcional não tenha sido avaliada, a configuração espacial observada é consistente com estratégias de restauração orientadas à conectividade estrutural da paisagem (Barzan et al., 2015; Pimentel et al., 2025), sendo este um importante objetivo da empresa, a formação de um corredor ecológico entre as duas RPPNs e outros fragmentos florestais, para criação do maior maciço de Floresta Estacional Semidecidual da região. Em contraste com as áreas sob gestão direta da empresa, a dinâmica da cobertura florestal na região revelou maior pressão antrópica, expressa pela maior frequência de perdas florestais e pela menor consolidação dos incrementos observados, padrão

amplamente descrito para o bioma em paisagens dominadas por usos agropecuários (Joly et al., 2014; Lorenzon et al., 2023 Diniz et al., 2024).

Parte das mudanças recentes na cobertura florestal pode ser atribuída ao fortalecimento dos mecanismos legais e institucionais de governança ambiental no Brasil. A partir de 2006, a promulgação da Lei da Mata Atlântica e do Novo Código Florestal (2012) introduziu ferramentas de monitoramento e regularização ambiental, como o Cadastro Ambiental Rural (CAR), um registro obrigatório para propriedades rurais privadas que requer a declaração de informações ambientais e atua como instrumento central para o monitoramento, a regularização e o direcionamento de ações de preservação, restauração e compensação da vegetação nativa (Broggio et al., 2024; Silva et al., 2023). No caso específico da área de influência da mineradora, além dos aspectos legais, existe também uma preocupação constante por parte da empresa na melhoria constante de seus processos produtivos, visando sempre a sustentabilidade ambiental e social da atividade, o que está sendo refletido no aumento da cobertura florestal.

Em síntese, a dinâmica da cobertura florestal na área de estudo reflete a interação entre condicionantes físicos, históricos e institucionais, resultando em padrões estruturais contrastantes entre a paisagem regional e áreas sob regimes diferenciados de gestão. A compreensão dessas implicações estruturais é central para avaliar o papel relativo de estratégias de conservação, restauração e compensação ambiental em paisagens submetidas a elevada pressão antrópica.

Neste cenário, é importante ressaltar que a atividade de mineração de bauxita, tem contribuído mais para a preservação dos fragmentos florestais já existentes bem como para o aumento da cobertura florestal através dos projetos de restauração, do que as áreas em seu entorno, destinadas as atividades agropecuárias.

11 CONCLUSÃO

Houve aumento da cobertura florestal nativa nos municípios de Descoberto e Itamarati de Minas entre 1985 e 2025, refletindo um processo de reorganização estrutural da paisagem ao longo do período. Esse aumento ocorreu de forma espacialmente heterogênea, com incremento mais pronunciado nas áreas de compensação ambiental associadas à mineração de bauxita, em comparação à paisagem regional mais ampla.

Em conjunto, os resultados indicam que a evolução recente da cobertura florestal resulta da interação entre processos de recuperação da vegetação nativa e condicionantes físicos da paisagem, ressaltando a importância de abordagens espaciais de longo prazo para a avaliação da dinâmica florestal em paisagens antropizadas da Mata Atlântica.

12 REFERÊNCIAS

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. de M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728.
- Arroyo-Rodríguez, V., Fahrig, L., Tabarelli, M., Watling, J. I., Tischendorf, L., Benchimol, M., Cazetta, E., Faria, D., Leal, I. R., & Melo, F. P. L. (2020). Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation. *Ecology Letters*, 23(9), 1404–1420. <https://doi.org/10.1111/ele.13535>
- Balestrin, D., Martins, S. V., Schoorl, J. M., Lopes, A. T., & de Andrade, C. F. (2019). Phytosociological study to define restoration measures in a mined area in Minas Gerais, Brazil. *Ecological Engineering*, 135, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.023>
- Barzan, F. R., Baigorria, J. M. E., & Bó, R. F. (2015). Bird community diversity in three habitat types in an ecological corridor in the Atlantic Forest of Misiones province, Argentina. *Tropical Conservation Science*, 8(4), 955–974. <https://doi.org/10.1177/194008291500800406>
- Beard, T., Riva, F., Fahrig, L., & Galán-Acedo, C. (2025). Small patches have high conservation value for primates. *Biological Conservation*, 311, 111463. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111463>
- Beltrão, M. G., Gonçalves, C. F., Brancalion, P. H. S., Carmignotto, A. P., Silveira, L. F., Galetti Jr, P. M., & Galetti, M. (2024). Priority areas and implementation of ecological

corridor through forest restoration to safeguard biodiversity. *Scientific Reports*, 14(1), 30837. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81483-y>

Broggio, I. S., Silva-Junior, C. H. L., Nascimento, M. T., Villela, D. M., & Aragao, L. E. O. C. (2024). Quantifying landscape fragmentation and forest carbon dynamics over 35 years in the Brazilian Atlantic Forest. *Environmental Research Letters*, 19(3), 034047. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad281c>

Bull, J. W., Suttle, K. B., Gordon, A., Singh, N. J., & Milner-Gulland, E. J. (2013). Biodiversity offsets in theory and practice. *Oryx*, 47(3), 369–380. <https://doi.org/10.1017/S003060531200172X>

Cosimo, L. H. E., Martins, S. V., & Gleriani, J. M. (2021). Suggesting priority areas in the buffer zone of Serra do Brigadeiro State Park for forest restoration compensatory to bauxite mining in Southeast Brazil. *Ecological Engineering*, 170, 106322. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106322>

Cunha, J. S. A., Fonsêca, N. C., de Lima, C. R. V., dos Santos, J. G., de Tejo Pereira, H., Bezerra, B. M., & Lins-e-Silva, A. C. B. (2024). Minor loss or huge threat? Assessment of potential infrastructure projects reveals drastic landscape degradation in the Atlantic forest. *Journal for Nature Conservation*, 81, 126662. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2024.126662>

Dias, T. da C., Silveira, L. F., & Francisco, M. R. (2023). Spatiotemporal dynamics reveals forest rejuvenation, fragmentation, and edge effects in an Atlantic Forest hotspot, the Pernambuco Endemism Center, northeastern Brazil. *Plos One*, 18(9), e0291234. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291234>

Diniz, É. S., Mota, P. H. S., Reis, J. P., da Silva Costa, W., de Paiva, E. V., de Lana, J. M., Lage, G. B., & do Amaral, C. H. (2024). Connectivity value of Atlantic forest fragments: pathways towards enhancing biodiversity conservation. *Brazilian Journal of Botany*, 47(1), 249–259. <https://doi.org/10.1007/s40415-023-00970-0>

Dueñez, L. K. S., Martins, S. V., da Silva Fonseca, W., Corrêa, F. D. D., Abreu, A. Y. N., & da Cruz, Y. G. (2025). Soil seed bank as a bioindicator of compensatory forest restoration to bauxite mining, Southeast Brazil. *REVISTA DELOS*, 18(66), e4910–e4910. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n66-149>

Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1), 487–515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>

Fahrig, L. (2024). Patch-scale edge effects do not indicate landscape-scale fragmentation effects. *Conservation Letters*, 17(1), e12992. <https://doi.org/10.1111/conl.12992>

Fahrig, L., Arroyo-Rodríguez, V., Bennett, J. R., Boucher-Lalonde, V., Cazetta, E., Currie, D. J., Eigenbrod, F., Ford, A. T., Harrison, S. P., & Jaeger, J. A. G. (2019). Is habitat fragmentation bad for biodiversity? *Biological Conservation*, 230, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.12.026>

Fonseca, W. S., Martins, S. V., Dueñez, L. K. S., & Corrêa, F. D. D. (2024). Understanding the seasonal growth patterns of seedlings in forest restoration of post-bauxite mining area: insights for monitoring in the Atlantic Forest. *REVISTA DELOS*, 17(58), e1606–e1606. <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n58-005>

Geldmann, J., Barnes, M., Coad, L., Craigie, I. D., Hockings, M., & Burgess, N. D. (2013). Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines. *Biological Conservation*, 161, 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.02.018>

Gomes, L. C., Bianchi, F. J. J. A., Cardoso, I. M., Fernandes Filho, E. I., & Schulte, R. P. O. (2020). Land use change drives the spatio-temporal variation of ecosystem services and their interactions along an altitudinal gradient in Brazil. *Landscape Ecology*, 35(7), 1571–1586. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01037-1>

Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Lovejoy, T. E., Sexton, J. O., Austin, M. P., & Collins, C. D. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>

IBGE. (2022). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/itamarati-de-minas.html>

IBGE, R. (2012). Manual técnico da vegetação brasileira. *Consultado Em*, 5(11), 2020.

Jesus, E. T. S., de Melo Bernardo, N., & da Silva Viana, R. (2025). A compensação ambiental no contexto do licenciamento: instrumento estruturante para a implementação do SNUC. *Revista Políticas Públicas & Cidades*, 14(10), e2968–e2968.

Joly, C. A., Metzger, J. P., & Tabarelli, M. (2014). Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. *New Phytologist*, 204(3), 459–473. <https://doi.org/10.1111/nph.12989>

Juvenhol, R. S., Fiedler, N. C., Santos, A. R. dos, Pirovani, D. B., Louzada, F. L. R. de O., Dias, H. M., & Tebaldi, A. L. C. (2011). Análise espacial de fragmentos florestais: caso dos Parques Estaduais de Forno Grande e Pedra Azul, estado do Espírito Santo. *Floresta e Ambiente*, 18(4), 353–364. <https://doi.org/10.4322/floram.2011.055>

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/843571/> <https://doi.org/10.2307/2529310>

Lima, B. C., Francisco, C. N., & Bohrer, C. B. de A. (2017). Landslides and forest fragmentation in the mountain range region of rio de janeiro state. *Ciencia Florestal*, 27(4), 1283–1295.

Lira, P. K., Tambosi, L. R., Ewers, R. M., & Metzger, J. P. (2012). Land-use and land-cover change in Atlantic Forest landscapes. *Forest Ecology and Management*, 278, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.008>

Lorenzon, P. C., & Massi, K. G. (2023). The influence of size and distance of Atlantic forest patches on seed rain over tropical pasture. *Tropical Ecology*, 64(1), 193–197. <https://doi.org/10.1007/s42965-022-00266-6>

Maron, M., Hobbs, R. J., Moilanen, A., Matthews, J. W., Christie, K., Gardner, T. A., Keith, D. A., Lindenmayer, D. B., & McAlpine, C. A. (2012). Faustian bargains? Restoration realities in the context of biodiversity offset policies. *Biological Conservation*, 155, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.06.003>

Martins, S. V., Fonseca, W. da S., Andrade, C. F. de, Barros, R. da S., Paiva, J. M. de, Silva, C. H. da, & Brito, M. A. F. (2022). Reflorestamento com mudas altas: uma inovação da restauração florestal na mineração de bauxita em Minas Gerais. *Engenharia Florestal: Contribuições, Análises e Práticas Em Pesquisa*. Guarujá: Editora Científica Digital. <https://doi.org/10.37885/220308108>

Miranda, A., Martins, S. V., Silva, K. de A., Lopes, A. T., & Demolinari, R. de A. (2017). Banco de sementes em mina de bauxita restaurada no Sudeste do Brasil. *Floresta e Ambiente*, 24(00), e00125414. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.125414>

MMA. (2026). *Plataforma CNUC: Cadastro Nacional de Unidades de Conservação*. <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/areas-protegidas/plataforma-cnuc-1>

Oliveira, B., & Barbosa, P. (2020). Rio Doce State Park buffer zone: forest fragmentation and land use dynamics. *Environmental Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00969-7>

Pereira, L. C., Barbosa, D. E. F., Chautems, A. P., & Menini Neto, L. (2021). Gesneriaceae da Serra do Relógio, Descoberto, Estado de Minas Gerais, Brasil. *Hoehnea*, 48, e832019. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-83/2019>

Pimentel, D. J. O., Feliciano, A. L. P., Marangon, L. C., Pessoa, M., Da Silva, M. I. O., Leite, A. P., & Silva, E. A. (2025). Can the dynamics of forest restoration reduce landscape fragmentation in the Atlantic forest? *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 18(2), 61. <https://doi.org/10.3832/ifor4639-018>

Pizo, M. A., & Tonetti, V. R. (2020). Living in a fragmented world: Birds in the Atlantic Forest. *The Condor*, 122(3), duaa023. <https://doi.org/10.1093/condor/duaa023>

Rempel, R. S., Kaukinen, D., & Carr, A. P. (2012). Patch analyst and patch grid. *Ontario Ministry of Natural Resources. Centre for Northern Forest Ecosystem Research, Thunder Bay, Ontario*.

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. *Biological Conservation*, 142(6), 1141–1153. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>

Riva, F., & Fahrig, L. (2023). Landscape-scale habitat fragmentation is positively related to biodiversity, despite patch-scale ecosystem decay. *Ecology Letters*, 26(2), 268–277. <https://doi.org/10.1111/ele.14145>

Riva, F., Koper, N., & Fahrig, L. (2024). Overcoming confusion and stigma in habitat fragmentation research. *Biological Reviews*, 99(4), 1411–1424. <https://doi.org/10.1111/brv.13073>

Leivas, J. F., Teixeira, A. H. C., Takemura, C. M., & Garçon, E. A. (2022). Análise da dinâmica temporal de índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e IRECI através de imagens

Sentinel-2A e MODIS. *Ciências agrárias: o avanço da ciência no Brasil*. São Paulo: Editora Científica Digital. <https://doi.org/10.37885/220709585>

Rosa, M. R., Brancalion, P. H. S., Crouzeilles, R., Tambosi, L. R., Piffer, P. R., Lenti, F. E. B., Hirota, M., Santiami, E., & Metzger, J. P. (2021). Hidden destruction of older forests threatens Brazil's Atlantic Forest and challenges restoration programs. *Science Advances*, 7(4), eabc4547. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc4547>

Sánchez, L. E. (2020). *Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos*. Oficina de textos.

Santos, A. R., Araújo, E. F., Barros, Q. S., Fernandes, M. M., de Moura Fernandes, M. R., Moreira, T. R., de Souza, K. B., da Silva, E. F., Silva, J. P. M., & Santos, J. S. (2020). Fuzzy concept applied in determining potential forest fragments for deployment of a network of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest. *Ecological Indicators*, 115, 106423. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106423>

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araujo Filho, J. C., Lima, H. N., Marques, F. A., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2025). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (6. ed. rev. e ampl., Ed.). Embrapa. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1176834>

Santos, J. F. C., Mendonça, B. A. F., de Araújo, E. J. G., & De Andrade, C. F. (2017). Fragmentação florestal na Mata Atlântica: o caso do município de Paraíba do Sul, RJ, Brasil. *Revista Brasileira de Biociências*, 15(3).

Schumacher, U. (2023). Analysis options for urban green spaces based on unified urban masks: selected results for European cities. *Land*, 13(1), 27. <https://doi.org/10.3390/land13010027>

Silva, K. de A., Martins, S. V., Miranda Neto, A., Demolinari, R. de A., & Lopes, A. T. (2016). Forest restoration after bauxite mining: assessment of planted tree species. *Floresta e Ambiente*, 23, 309–319. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.142515>

Silva, R. F. B., de Castro Victoria, D., Nossack, F. Á., Viña, A., Millington, J. D. A., Vieira, S. A., Batistella, M., Moran, E., & Liu, J. (2023). Slow-down of deforestation following a Brazilian forest policy was less effective on private lands than in all conservation areas. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 111. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00783-9>

Siqueira, F. F., De Carvalho, D., Rhodes, J., Archibald, C. L., Rezende, V. L., & Van den Berg, E. (2021). Small landscape elements double connectivity in highly fragmented areas of the Brazilian Atlantic Forest. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 614362. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.614362>

Turner, M. G. (2005). Landscape ecology: what is the state of the science? *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 36(1), 319–344. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.152614>

13 ANEXO I

13.1 Avaliação da acurácia e confiabilidade da fotointerpretação da cobertura florestal nativa

Tabela A1. Matriz de confusão da classificação da cobertura florestal nativa para o ano de 1985.

	Fragmento florestal	Outro	Total
Fragmento florestal	446	149	595
Outro	97	1308	1405
Total	543	1457	2000

Tabela A2. Matriz de confusão da classificação da cobertura florestal nativa para o ano de 2005.

	Fragmento florestal	Outro	Total
Fragmento florestal	413	138	551
Outro	73	1376	1459
Total	486	1514	2000

Tabela A3 Matriz de confusão da classificação da cobertura florestal nativa para o ano de 2025.

	Fragmento florestal	Outro	Total
Fragmento florestal	493	161	654
Outro	159	1187	1346
Total	652	1348	2000

13.2 Métricas de acurácia

Tabela A4. Métricas de acurácia da fotointerpretação da cobertura florestal nativa para o ano de 1985.

Acurácia global (%)	87.7
Índice Kappa	0.698
Acurácia do produtor (%)	82,14
Acurácia do usuário (%)	74.96
Erro de omissão (falso negativo, %)	17.86
Erro de comissão (falso positivo, %)	25.04

Tabela A5. Métricas de acurácia da fotointerpretação da cobertura florestal nativa para o ano de 2005.

Acurácia global (%):	89.45
Índice Kappa	0.73
Acurácia do produtor (%)	84.98
Acurácia do usuário (%)	74.95
Erro de omissão (falso negativo, %)	15.02
Erro de comissão (falso positivo, %)	25.05

Tabela A6. Métricas de acurácia da fotointerpretação da cobertura florestal nativa para o ano de 2025.

Acurácia global (%)	84.00
Índice Kappa	0.636
Acurácia do produtor (%)	75.61
Acurácia do usuário (%)	75.38
Erro de omissão (falso negativo, %)	24.39
Erro de comissão (falso positivo, %)	24.62

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa demonstrou que a restauração florestal associada à mineração de bauxita apresenta respostas complementares em diferentes escalas espaciais. Em escala local, o desempenho inicial dos plantios compensatórios com espécies nativas foi influenciado pelo espaçamento de plantio, evidenciando a importância das decisões silviculturais para a trajetória inicial da restauração. Em escala de paisagem, a análise espaço-temporal da cobertura florestal revelou padrões de perda, ganho e reorganização estrutural dos fragmentos ao longo de quatro décadas. Ficou evidente a contribuição das ações de compensação ambiental e conservação de remanescentes de florestas nativas por parte da mineradora, para esse aumento da cobertura florestal.

A integração dos dois capítulos indica que os efeitos positivos observados nos plantios compensatórios podem contribuir, ao longo do tempo, para mudanças na estrutura da paisagem, especialmente quando inseridos em áreas sob regimes específicos de gestão. Os resultados reforçam a necessidade de abordagens multiescalares para avaliar a efetividade da compensação ambiental e oferecem subsídios para o planejamento e o monitoramento da restauração florestal em paisagens antropizadas da Mata Atlântica.