

**LAILY KATERIN SANCHEZ DUEÑEZ**

**ESTUDO SOBRE BANCO DE SEMENTES DO SOLO E BOLAS DE SEMENTES, PARA  
RESTAURAÇÃO FLORESTAL EM AMBIENTES DE MINERAÇÃO DE BAUXITA, NA  
ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

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: Sebastião Venâncio Martins

**VIÇOSA - MINAS GERAIS**

**2024**

**LAILY KATERIN SANCHEZ DUEÑEZ**

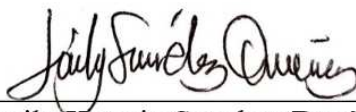
**ESTUDO SOBRE BANCO DE SEMENTES DO SOLO E BOLAS DE SEMENTES, PARA  
RESTAURAÇÃO FLORESTAL EM AMBIENTES DE MINERAÇÃO DE BAUXITA, NA  
ZONA DA MATA DE MINAS GERAIS**

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: Sebastião Venâncio Martins

APROVADA: 20 de agosto de 2024.

Assentimento:



---

Laily Katerin Sanchez Dueñez  
Autora



Documento assinado digitalmente  
SEBASTIAO VENANCIO MARTINS  
Data: 27/09/2024 16:46:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Sebastião Venâncio Martins  
Orientador

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

T

S211e  
2024

Sanchez Dueñez, Laily Katerin, 1995-

Estudo sobre banco de sementes do solo e bolas de sementes, para restauração florestal em ambientes de mineração de bauxita, na Zona da Mata de Minas Gerais / Laily Katerin Sanchez Dueñez. – Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (86 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Sebastião Venâncio Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.649>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Germinação - Testes. 2. Reflorestamento. 3. Bauxita - Minas e mineração. 4. Biodiversidade florestal. 5. Bancos de sementes. 6. Desenvolvimento sustentável. 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 634.9232318

Bibliotecário(a) responsável: Euzébio Luiz Pinto CRB-6/3317

*Dedico este trabalho à minha família.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela saúde e determinação que me permitiram chegar até aqui.

Aos meus pais, Blademir e Arnulfo, pelo apoio incondicional, a motivação, a confiança e o amor que me trouxeram até aqui. Sem vocês, nada disso seria possível.

À minha família, por todo o apoio, suporte e confiança, especialmente ao meu irmão Wbeimar Sanchez, que foi o primeiro a confiar e me motivar a alcançar este grande objetivo.

Ao meu namorado, Hiago, por todo o amor, carinho, apoio e motivação para alcançar minhas metas, e por me fazer feliz a cada dia.

Ao meu orientador, Professor Dr. Sebastião Venâncio Martins, pelos seus ensinamentos, conselhos, disponibilidade e cordialidade. Agradeço pela motivação e confiança depositadas em mim ao longo desses dois anos.

Aos meus amigos e colegas do laboratório (LARF), em especial, a Wesley Fonseca, William Alves e Fagner Darlan. Pela acolhida e apoio, é um prazer ter aprendido tantos ensinamentos de vocês. Agradeço também a toda a equipe do LARF por todo o apoio nas coletas de dados de campo e em laboratório e por todas as experiências compartilhadas.

A todos os meus amigos na Colômbia e no Brasil que sempre me acompanharam, mesmo à distância, nunca duvidaram das minhas capacidades e me motivam a ser melhor a cada dia.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realizar a pós-graduação e por toda infraestrutura disponibilizada.

Ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Ciência Florestal (PPGCF), pelo apoio institucional à pesquisa científica.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida. Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

À Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), agradeço pelo apoio logístico e financeiro para a realização desta pesquisa. O compromisso da CBA e seu apoio à pesquisa científica em prol de uma mineração de bauxita sustentável são um exemplo admirável.

A todas as demais pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e que, de alguma forma, estiveram presentes em minha vida durante os anos de mestrado, meu sincero agradecimento.

## RESUMO

DUEÑEZ, Laily Katerin Sanchez, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2024 **estudo sobre banco de sementes do solo e bolas de sementes, para restauração florestal em ambientes de mineração de bauxita, na Zona da Mata de Minas Gerais. Orientador.** Sebastião Venâncio Martins.

O presente estudo está organizado em dois capítulos. O primeiro capítulo teve como objetivo avaliar o uso de bolas de sementes com tecnosolo da mineração de bauxita como técnica complementar na restauração florestal. O experimento foi dividido em duas fases, sendo uma conduzida em ambiente controlado e outra em condições de campo. Na primeira fase, foi avaliado o uso de bolas de sementes com tecnosolo da mineração de bauxita, utilizando diferentes proporções de rejeito de bauxita e composto orgânico, além de combinações com e sem adubo NPK. Foram utilizados 6 tratamentos, com 6 bolas de sementes em cada um. Foram testadas quatro espécies arbóreas nativas regionais: duas classificadas como pioneiras (*Senna macranthera* e *Enterolobium contortisiliquum*) e duas como secundárias iniciais (*Anadenanthera peregrina* e *Pterogyne nitens*). As bolas de sementes foram mantidas no viveiro da Universidade Federal de Viçosa, onde foram monitoradas semanalmente quanto à germinação e ao crescimento até 190 dias após a implantação do experimento. Considerando os seis tratamentos, foram registradas 105 sementes germinadas o que representa 14,6% do total das sementes semeadas. Quanto às médias de germinação, os resultados revelaram diferenças significativas entre os tratamentos, indicando que os tratamentos T1 e T3 são estatisticamente superiores aos demais. A espécie *E. contortisiliquum* apresentou as melhores taxas de germinação e de crescimento. Além disso, as espécies pioneiras apresentaram médias de crescimento superiores nos tratamentos com adição de adubo. A segunda fase conduzida em condições de campo, onde avaliou-se a eficácia da técnica de bolas de sementes utilizando tecnosolo e sementes de diferentes tamanhos. Sendo os tratamentos: T1: Bolas de sementes grandes, T2: Bolas de sementes pequenas, T3: Semeadura direta com sementes grandes e o T4: semeadura direta com sementes pequenas. Foram consideradas como sementes pequenas aquelas com tamanho <0,5 cm (*Senna macranthera*, *Cecropia hololeuca* e *Schinus terebinthifolia*) e sementes grandes aquelas com tamanho > 0,5 cm, (*Enterolobium contortisiliquum*, *Peltophorum*

*dubium* e *Platypodium elegans*). O Experimento foi instalado em uma área pós-mineração de bauxita, onde foi feito o plantio homogêneo de angico vermelho (*Anadenanthera peregrina*). Foram registradas 176 sementes germinadas após 150 dias da montagem do experimento. Quanto às médias de germinação, a análise mostrou que a germinação foi significativamente menor no tratamento T3. A técnica de bolas de sementes mostrou-se mais eficiente na germinação tanto de sementes com tamanhos maiores (T1) quanto de sementes com tamanhos menores (T2). Em contraste, a semeadura direta mostrou-se ser mais eficiente para sementes menores. As espécies *E. contortisiliquum* e *S. terebinthifolia* se destacaram com maiores taxas de germinação. Nesse contexto, a técnica de bolas de sementes utilizando tecnosolo com rejeito de bauxita é uma alternativa inovadora e promissora para impulsionar os processos de restauração florestal, principalmente em projetos de enriquecimento, ao mesmo tempo em que possibilita o aproveitamento do material residual da atividade mineradora e contribui para a gestão sustentável dos rejeitos de mineração de bauxita. O segundo capítulo teve como objetivo comparar a composição florística do banco de sementes do solo de uma área de compensação à mineração de bauxita, em relação à uma mata nativa secundária adjacente, pertencentes à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em Itamarati de Minas - MG. Foram definidos dois ambientes o primeiro uma área em processo de restauração florestal, onde foi feito plantio de mudas altas (PMA) e o segundo um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual secundária, como ecossistema de Referência (ER). Em cada ambiente, foram coletadas 20 amostras de solo superficial (5cm), que foram transportadas para uma estufa (sombrite 50%), onde os indivíduos emergentes foram avaliados durante nove meses. No PMA foram registrados 1.404 indivíduos, 53 espécies e 23 famílias botânicas, com  $(H')=2,687$  e  $(J')=0,671$ . Na área ER foram registrados 1.056 indivíduos, 33 espécies e 22 famílias, com  $(H')=2,145$  e  $(J')=0,607$ . A composição florística dos bancos de semente do solo foi significativamente diferente, possivelmente devido aos diferentes estágios sucessionais das áreas. Em ambas áreas predominaram espécies pioneiras, herbáceas e de origem nativa. Foram registradas 5 espécies arbóreas em ER e 7 espécies arbóreas em PMA, das quais 3 espécies são compartilhadas nas áreas: *Cecropia glaziovii*, *Solanum mauritanum* e *Trema micrantha*. A presença dessas três espécies zoocóricas sugere que a fauna dispersora está contribuindo para a conectividade ecológica da paisagem por meio da dispersão de sementes. Tendo em vista que a restauração florestal é um processo dinâmico, sujeitos a alterações como mortalidade de mudas, invasão de espécies exóticas, entre outras, recomenda-se o monitoramento

contínuo das áreas. Espera-se que com o avanço do processo sucessional as diferenças na composição florística dos bancos de sementes entre as áreas diminuam.

**Palavras-chave:** Bioindicador; Enriquecimento; Sustentabilidade; Técnicas alternativas.

## ABSTRACT

DUEÑEZ, Laily Katerin Sanchez, M.Sc., Federal University of Viçosa, August 2024. **Study on soil seed bank and seed balls, for forest restoration in bauxite mining environments, in the Zona da Mata of Minas Gerais. Advisor:** Sebastião Venâncio Martins.

This study is organized into two chapters. The first chapter aimed to evaluate the use of seed balls with bauxite mining technosoil as a complementary technique in forest restoration. The experiment was divided into two phases: one conducted in a controlled environment and the other under field conditions. In the first phase, the use of seed balls with bauxite mining technosoil was assessed, using different proportions of bauxite waste and organic compost, as well as combinations with and without NPK fertilizer. Six treatments were used, with 6 seed balls in each. Four regional native tree species were tested: two classified as pioneer species (*Senna macranthera* and *Enterolobium contortisiliquum*) and two as early secondary species (*Anadenanthera peregrina* and *Pterogyne nitens*). The seed balls were maintained in the greenhouse at the Federal University of Viçosa, where they were monitored weekly for germination and growth up to 190 days after the experiment was set up. Across the six treatments, 105 germinated seeds were recorded, representing 14.6% of the total sown seeds. Germination rates showed significant differences between treatments, indicating that treatments T1 and T3 were statistically superior to the others. The species *E. contortisiliquum* exhibited the highest germination and growth rates. Additionally, pioneer species showed higher growth rates in treatments with added fertilizer. The second phase was conducted under field conditions, where the effectiveness of the seed ball technique using technosoil and seeds of different sizes was evaluated. The treatments were: T1: Large seed balls, T2: Small seed balls, T3: Direct sowing with large seeds, and T4: Direct sowing with small seeds. Small seeds were defined as those <0.5 cm (*Senna macranthera*, *Cecropia hololeuca*, and *Schinus terebinthifolia*) and large seeds as those >0.5 cm (*Enterolobium contortisiliquum*, *Peltophorum dubium*, and *Platypodium elegans*). The experiment was set up in a post-bauxite mining area, where homogeneous planting of *Anadenanthera peregrina* was carried out. A total of 176 germinated seeds were recorded across all treatments, 150 days after the experiment was set up. Germination rates showed that germination was significantly lower in treatment T3. The seed ball technique proved to be more efficient in germination for both larger (T1) and smaller seeds (T2). In contrast,

direct sowing was more effective for smaller seeds. The species *E. contortisiliquum* and *S. terebinthifolia* stood out with higher germination rates. In this context, the seed ball technique using technosoil with bauxite waste is an innovative and promising alternative to enhance forest restoration processes, particularly in enrichment projects, while also allowing the utilization of residual material from mining activities and contributing to the sustainable management of bauxite mining waste. The second chapter aimed to compare the floristic composition of the soil seed bank in a bauxite mining compensation area with that of an adjacent secondary native forest, belonging to the Brazilian Aluminum Company (BAC), in Itamarati de Minas - MG. Two environments were defined: the first, an area in the process of forest restoration, where high planting of seedlings (PMA) was carried out; and the second, a fragment of secondary Seasonal Semideciduous Forest, as a reference ecosystem (ER). In each environment, 20 samples of surface soil (5 cm) were collected and transported to a greenhouse (50% shade), where emerging individuals were evaluated over nine months. In the PMA, 1,404 individuals, 53 species, and 23 botanical families were recorded, with  $(H') = 2.687$  and  $(J') = 0.671$ . In the ER area, 1,056 individuals, 33 species, and 22 families were recorded, with  $(H') = 2.145$  and  $(J') = 0.607$ . The floristic composition of the soil seed banks was significantly different, likely due to the different successional stages of the areas. Both areas were dominated by pioneer, herbaceous, and native species. Five arboreal species were recorded in the ER and seven in the PMA, three of which are shared between the areas: *Cecropia glaziovii*, *Solanum mauritianum*, and *Trema micrantha*. The presence of these three zoochoric species suggests that the disperser fauna is contributing to the ecological connectivity of the landscape through seed dispersal. Considering that forest restoration is a dynamic process, subject to changes such as seedling mortality, invasion of exotic species, among others, continuous monitoring of the area is recommended. It is expected that as the successional process advances, the differences in floristic composition between the areas will decrease.

**Keywords:** Alternative techniques; Bioindicator; Enrichment; Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Confeção das bolas de sementes (a) Mensuração do diâmetro das bolas de sementes com paquímetro digital(b) ..... 32
- Figura 2.** Desenho do lineamento inteiramente casualizado (a) e detalhe da alocação das bandejas com as bolas de sementes nas bancadas da Casa de vegetação, viveiro UFV (b)..... 33
- Figura 3.** Localização da área do estudo, no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG, com destaque para a área de plantio. .... 37
- Figura 4.** Parcelas na área de plantio (a), Desenho do lineamento inteiramente casualizado do experimento (b)..... 38
- Figura 5.** Esquema de alocação das bolas de sementes e da semeadura direta em cada tratamento ..... 38
- Figura 6.** Médias de germinação por tratamento, **T1:** Rejeito puro, **T2:** 75% de rejeito + 25 % de composto orgânico, **T3:** 50% de rejeito+50 % de composto orgânico, **T4:** Rejeito puro + NPK, **T5:** 75% de rejeito + 25 % de composto orgânico + NPK, **T6:** 50% de rejeito + 50 % de composto orgânico + NPK. .... 41
- Figura 7.** Crescimento médio das espécies Pioneiras em resposta aos seis tratamentos (A) *Senna macranthera*, (B) *Enterolobium contortisiliquum*..... 42
- Figura 8.** Crescimento médio das espécies secundárias iniciais em resposta aos seis tratamentos, (A) *Anadenanthera peregrina*, (B) *Pterogyne nitens* ..... 43
- Figura 9.** Mudanças germinadas nas bolas de sementes após 190 dias da montagem do experimento, na casa de vegetação, Viveiro UFV. .... 44

<b>Figura 10.</b> Médias de Germinação por tratamento, T1: Bolas com sementes > 0,5 cm; T2: Bolas com sementes < 0,5 cm; T3: Semeadura direta com sementes > 0,5 cm e T4: Semeadura direta com sementes < 0,5 cm. ....	45
<b>Figura 11.</b> Médias de germinação de (A) <i>Enterolobium contortisiliquum</i> em relação aos tratamentos T1 e T3, (B) <i>Schinus terebinthifolia</i> em relação aos tratamentos T2 e T4 .....	46
<b>Figura 12.</b> Localização da área do estudo, no município de Itamarati, MG, com destaque para os dois ambientes analisados.....	60
<b>Figura 13.</b> Coleta do banco de sementes do solo em Itamarati, MG. Limpeza da área e retirada da serapilheira superficial existente (A); Gabarito de 27 x 20 cm utilizado para dimensionamento (B); Definição da profundidade do solo a coletar as amostras (C); Retirada das amostras de banco de sementes do solo (D). ....	61
<b>Figura 14.</b> Bandejas com amostras do solo do banco de sementes na casa de vegetação do Laboratório de Restauração Florestal, viveiro UFV.....	62
<b>Figura 15.</b> Diagrama de Venn apresentando o compartilhamento de espécies entre os ambientes e o número de suas respectivas espécies exclusivas. Em que: ER – Ecossistema de Referência; PMA – Plantio de mudas altas .....	69
<b>Figura 16.</b> Escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) da composição florística de espécies, baseado em dados de presença e ausência, entre os bancos de sementes do solo do Ecossistema de referência (ER) e o Plantio de mudas altas (PMA) em Itamarati de minas, MG. ....	70
<b>Figura 17.</b> Curvas de rarefação (linha contínua) e extrapolação (linha tracejada) da riqueza de espécies do banco de sementes do solo de acordo com o número de parcelas amostradas no Plantio de Mudas altas (PMA) e no Ecossistema de referência (ER) em Itamarati de minas, MG.....	71

**Figura 18.** Diferenças na riqueza de espécies média entre os bancos de sementes do Ecosistema de referência (ER) e o Plantio de mudas altas (PMA) em Itamarati de minas, MG..... 72

**Figura 19.** Diferenças na abundância de indivíduos por parcela entre os bancos de sementes do Ecosistema de referência (ER) e o Plantio de mudas altas (PMA) em Itamarati de minas, MG. 72

**Figura 20.** Distribuição da riqueza de espécies e abundancia de indivíduos, em relação a origem (A e B), Forma de vida (C e D), Categoria sucessional (E e F) e síndrome de dispersão (G e H), nos bancos de sementes do solo coletados nos dois ambientes, ER- Ecosistema de referência, PMA- Plantio de mudas altas ..... 73

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Florística e grupos funcionais das espécies identificadas no banco de sementes do solo do Ecossistema de Referência (ER) e do Plantio de mudas altas (PMA), no município de Itamarati, MG, Brasil. ....	65
--	----

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL .....	17
2. REFERÊNCIAS .....	21
<b>CAPÍTULO I: BOLAS DE SEMENTES COM TECNOSOLO DA MINERAÇÃO DE BAUXITA: UMA TÉCNICA ALTERNATIVA DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA .....</b>	<b>25</b>
1. INTRODUÇÃO .....	29
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	31
2.1. Etapa I: Bolas de sementes com tecnosolo em ambiente controlado.....	31
2.1.1. Análise dos dados.....	34
2.2. Etapa II: Bolas de semente com tecnosolo em condições de campo .....	35
2.2.1. Análise de dados.....	39
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
3.1. Etapa I: Bolas de sementes com tecnosolo em ambiente controlado.....	40
3.2. Etapa II: Bolas de semente com tecnosolo em condições de campo .....	44
4. CONCLUSÕES.....	48
5. REFERÊNCIAS .....	49
<b>CAPÍTULO II. BANCO DE SEMENTES DO SOLO COMO BIOINDICADOR DA RESTAURAÇÃO FLORESTAL COMPENSATÓRIA À MINERAÇÃO DE BAUXITA..</b>	<b>54</b>
1. INTRODUÇÃO .....	58
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	59
2.1. Área de estudo .....	59
2.2. Amostragem e condução do experimento.....	61
2.3. Avaliação do banco de sementes .....	63
2.4. Análise de dados .....	63

3. RESULTADOS.....	64
3.1. Composição florística, fitossociologia e diversidade do banco de semente do solo .....	64
3.2. Riqueza e abundancia do banco de semente do solo .....	70
3.3. Grupos funcionais do banco de semente do solo .....	73
4. DISCUSSÃO.....	75
5. CONCLUSÕES.....	79
6. REFERÊNCIAS .....	80
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	86

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos quarenta anos, houve um aumento no interesse pela conservação, restauração e uso sustentável dos recursos florestais (Bastin et al., 2019). Conforme dados da FAO (2022), as florestas ocupam cerca de 31% da superfície terrestre do planeta, totalizando 4,06 bilhões de hectares. Devido aos serviços ecossistêmicos e à biodiversidade que as florestas fornecem, é amplamente reconhecido que a restauração florestal pode contribuir significativamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e das iniciativas internacionais em prol da restauração florestal e mitigação das mudanças climáticas (Jacobs et al., 2015; FAO, 2022).

Neste contexto, os compromissos assumidos em acordos internacionais, como a Agenda 2030 e o Acordo de Paris (UNGA, 2019), enfatizam a importância de restaurar o equilíbrio ambiental e resgatar a trajetória histórica do meio ambiente. Isso implica o restabelecimento das relações entre fauna e flora, a consideração dos parâmetros socioeconômicos e a valorização dos serviços ecossistêmicos (Chazdon, 2008; Benayas et al., 2009; Cross et al., 2019b; Martins et al., 2020).

O Brasil é extremamente reconhecido por sua expressiva reserva de recursos minerais, sendo a mineração um setor fundamental para a economia e de grande importância para o desenvolvimento socioeconômico do país (USGS, 2024). A atividade mineradora gera empregos, influencia o PIB nacional, equilibra a economia, traz novas tecnologias industriais e é uma importante fonte de renda (ANM 2022). O Brasil possui em seu território a quarta maior reserva de bauxita, representando aproximadamente 9% dos depósitos do mundo, com um total de 2,7 bilhões de toneladas, o país também é o quarto maior produtor em nível mundial (USGS, 2024). A bauxita é matéria prima fundamental para a produção de alumínio. No cenário brasileiro, Minas Gerais é o segundo estado maior produtor de bauxita (ANM, 2022).

Assim, para garantir a sustentabilidade da mineração de bauxita, as empresas de mineração implementam ações de restauração florestal tanto nas áreas mineradas quanto em áreas de compensação ambiental (Cosimo et al., 2021; Fonseca et al., 2023; Fonseca et al., 2024). Frente a essa necessidade, em 2011, o Laboratório de Restauração Florestal (LARF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) estabeleceram uma

parceria. O objetivo dessa colaboração é conduzir pesquisas e fornecer orientação técnica sobre restauração florestal em áreas mineradas e em áreas destinadas à compensação ambiental, visando promover uma prática sustentável na mineração de bauxita (Martins et al., 2020).

A lavra da bauxita difere dos demais tipos de mineração por ser pontual, superficial e temporária (Komlóssy et al., 2022). Desse modo, a mineração de bauxita segue o método *strip mining*, no qual áreas pequenas são mineradas e recuperadas em sequência, possibilitando o retorno rápido à atividade produtiva (Neto et al., 2021; Yadav et al., 2022). “No entanto como qualquer outra atividade, provoca impactos ambientais devido à remoção da vegetação e à retirada das camadas superficiais do solo.”, o qual pode causar desequilíbrios no ambiente (Banning et al., 2008; Barros et al., 2012; Fengler et al., 2017). Assim sendo, as ações de restauração nas áreas mineradas e áreas de compensação ambiental desempenham um papel fundamental para recuperação da cobertura vegetal, da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos (Balestrin et al., 2020; Martins et al., 2020; Fonseca et al., 2024).

Nesse sentido, a restauração busca recuperar o ecossistema perturbado para que se aproxime o máximo possível das suas condições originais (Chazdon, 2008), sempre com base em um ecossistema de referência, parâmetros estruturais e uma diversidade mínima (Martins et al., 2015). É importante que as técnicas de restauração, além de recuperar a funcionalidade ecológica e diminuir os impactos nesses ambientes, também promovam a recuperação da cobertura vegetal de maneira economicamente viável e no menor tempo possível, de tal modo que a natureza se torne autossustentável, dispensando intervenções externas (Gann et al., 2019). Portanto, o desafio da restauração ecológica é escolher as técnicas mais adequadas para cada situação. (Martins, 2018; Rodríguez-Uña et al., 2020).

Apesar do plantio de mudas ser a técnica mais comumente utilizada em projetos de restauração, há diversas outras abordagens alternativas para a restauração ecológica (Holl, 2017). Técnicas alternativas como: transposição de galharias, bolas de sementes, regeneração natural, semeadura direta, núcleos de diversidade, poleiros artificiais e transposição de *topsoil*, podem ser utilizadas de forma complementar para recuperar algum ambiente perturbado ou degradado (Holl, 2017; Crouzeilles et al., 2017, Alves, 2023, Fonseca et al., 2024).

A eficácia na recuperação de um ambiente está intrinsecamente ligada à escolha de técnicas devidamente adequadas (Martins, 2018). Essas escolhas dependem de estudos que possam orientar

os profissionais envolvidos, fornecendo informações cruciais para a tomada de decisões em projetos de restauração (Rodríguez-Uña et al., 2020). Além disso, técnicas alternativas podem ser mais apropriadas para contextos ecológicos e sociais específicos, como em áreas com baixa fertilidade do solo, alta incidência de formigas cortadeiras, ou baixa disponibilidade de mudas nativas, entre outros cenários (Martins et al., 2015; Holbert et al., 2019).

A escolha de técnicas alternativas pode auxiliar para o aumento da biodiversidade e a manutenção das funções ecológicas, consequentemente aumentando a resiliência do ecossistema restaurado, tornando-o mais resistente a distúrbios futuros e aumentando sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos (Trentin et al., 2018). No entanto, é crucial ressaltar que a flexibilização das técnicas de restauração depende das potencialidades e condições específicas do ambiente (Reis et al 2014; Martins 2018). Portanto, durante a execução de projetos de restauração florestal é essencial realizar o monitoramento das áreas com a finalidade de avaliar o sucesso do projeto e inferir se a área em restauração está seguindo uma trajetória ecológica desejada (Martin & Lyons, 2018). Desta forma, a efetividade das técnicas implantadas pode ser avaliada mediante a aplicação de indicadores ecológicos tais como: parâmetros fitossociológicos das comunidades vegetais (diversidade, área basal, altura, densidade), banco de sementes do solo, banco de plântulas, regeneração natural, chuva de sementes, análise do dossel, presença de espécies invasoras e exóticas, entre outros (Martins, 2009, 2014; Weerasinghe et al., 2018; Fonseca et al., 2024).

Diante disso, a restauração florestal é uma ciência relativamente nova, mas que vem nas últimas décadas se tornando cada vez mais robusta e mostrando que é possível transformar uma área perturbada em um ecossistema resiliente e que apresente os processos ecológicos necessários à sua sustentabilidade no longo prazo (Martins, 2018). Desse modo, é muito importante que os estudos visando tornar esta ciência mais eficiente aumentem, e que a necessidade de aperfeiçoamento e criação de novas técnicas de restauração sejam os objetivos perseguidos pelos atores do desenvolvimento sustentável e pelas iniciativas internacionais (Martins, 2018).

O planejamento, a avaliação e o monitoramento da restauração florestal são de vital importância para apoiar a tomada de decisões em ambientes de mineração e são ferramentas potenciais para promover avanços na restauração de ecossistemas (Martins, 2018). Através do monitoramento é possível comparar diferentes áreas com ecossistemas de referência, verificar a necessidade de a área receber novas interferências, além de determinar o estágio em que a área se torna

autossustentável, ou seja, permite inferir sobre a trajetória sucessional e sobre a efetividade dos projetos de restauração ecológica (Martin & Lyons, 2018; Balestrin et al 2019; Rodríguez-Uña et al., 2020).

Portanto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o uso de bolas de sementes como técnica complementar na restauração florestal e monitorar o processo de restauração através de estudos de banco de sementes do solo, em uma área de compensação em ambiente de mineração de bauxita no estado de Minas Gerais. A dissertação está organizada em dois capítulos: o primeiro, intitulado 'Bolas de sementes com tecnosolo da mineração de bauxita: uma técnica alternativa de restauração florestal na Mata Atlântica brasileira', aborda a aplicação das bolas de sementes; e o segundo, 'Banco de sementes do solo como bioindicador da restauração florestal compensatória à mineração de bauxita', foca na utilização do banco de sementes do solo como ferramenta de monitoramento da restauração.

## 2. REFERÊNCIAS

- Alves, W. V. L. (2023). Restauração florestal em áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão, Minas Gerais, Brasil. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.690>.
- ANM. (2022). Anuário Mineral Brasileiro Principais Substâncias Metálicas 2022; Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022>. Pdf Acesso em 03 de outubro de 2023
- Balestrin, D., Martins, S. V., Schoorl, J., 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>
- Balestrin, D., Martins, S. V., Fonseca, C. A. (2020). Ecological restoration and forest coverage advancement in a region influenced by bauxite mining, Minas Gerais, Brazil. In: K., Vliieger (Ed.). *Recent advances in ecological restoration*. Nova Science Publishers, 143-154.
- Banning, N., Grant, C. D., Jones, D. L., & Murphy, D. V. (2008). Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence. *Soil Biology & Biochemistry*, 40(8), 2021-2031. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.04.010>
- Barros, D. A., Guimarães, J. C. C., Pereira, J. A. A., Borges, L. A. C., Silva, R. A., & Pereira, A. A. (2012). Characterization of the bauxite mining of the Poços de Caldas Alkaline Massif and its socio-environmental impacts. *REM. Revista Escola de Minas*, 65(1), 127-133. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672012000100018>
- Bastin, J. F., Finegold, Y., García, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76-79. <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>
- Benayas JMR., Newton AC., Díaz A., Bullock JM. Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis. *Science*. 2009;325(5944):1121-4. Doi: 10.1126/science.1172460.
- Chazdon, R. L. (2008). Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 320(5882), 1458-1460. <https://doi.org/10.1126/science.1155365>
- 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>

Crouzeilles, R., Ferreira, M. S., Chazdon, R. L., Lindenmayer, D. B., Sansevero, J. B. B., Monteiro, L. M., Iribarrem, Á., Latawiec, A. E., & Strassburg, B. B. N. (2017). Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science Advances*, 3(11). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701345>

Cross SL., Bateman PW., Cross AT. (2019). Restoration goals: Why are fauna still overlooked in the process of recovering functioning ecosystems and what can be done about it? *Ecological Management & Restoration*. 21(1):4-8. Doi: 10.1111/emr.12393.

Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Agard, J., Arneeth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., . . . Zayas, C. N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471). <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>

FAO. (2022). *The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies.* Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9360en>

Fengler, F. H., Bressane, A., Carvalho, M. M., Longo, R. M., De Medeiros, G. A., De Melo, W. J., Jakovac, C. C., & Ribeiro, A. (2017). Forest restoration assessment in Brazilian Amazonia: A new clustering-based methodology considering the reference ecosystem. *Ecological Engineering*, 108, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.008>

Fonseca, W. S., Martins, S. V., & Villa, P. M. (2023). Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. *Floresta e Ambiente*, 30(1), 1-14. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2023-0041>

Fonseca, W. 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*. <https://doi.org/10.1002/ldr.5118>

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E. K., Shaw, N. L., Decler, K., & Dixon, K. W. (2019). *International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration. Second edition.* *Restoration Ecology*, 27(S1). <https://doi.org/10.1111/rec.13035>

Holbert, J., Sudrajat, D. J., Nurhasybi, & Yulianti. (2019). Alternative methods for reforestation and land rehabilitation to reduce the plastics waste in forest areas. *IOP conference series*, 407(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/407/1/012007>

Holl, K. D. (2017). Research directions in tropical forest restoration. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 102(2), 237-250. <https://doi.org/10.3417/2016036>

- Jacobs, D. F., Oliet, J. A., Aronson, J., Bolte, A., Bullock, J. M., Donoso, P. J., Landhäuser, S. M., Madsen, P., Shaolin, P., Benayas, J. M. R., & Weber, J. C. (2015). Restoring forests: What constitutes success in the twenty-first century? *New Forests*, 46(5-6), 601-614. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9513-5>
- Komlóssy, G., van Deursen, C., & Raahauge, B. E. (2022). Bauxite: Geology, Mineralogy, Resources, Reserves and Beneficiation. In *Smelter Grade Alumina from Bauxite: History, Best Practices, and Future Challenges* (pp. 19-132). Cham: Springer International Publishing
- Martin, D. M., & Lyons, J. E. (2018). Monitoring the social benefits of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 26(6), 1045-1050. <https://doi.org/10.1111/rec.12888>
- Martins S.V. (2009). Soil seed bank as indicator of forest regeneration potential in canopy gaps of a semideciduous forest in Southeastern Brazil. In: Fournier, M. V. (org.). *Forest regeneration: ecology, management and economics*. New York: Nova Science Publishers, p.113-128.
- Martins S.V. (2014). *Recuperação de matas ciliares: no contexto do Novo Código Florestal*. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 3º Ed. 220p.
- Martins S.V., Miranda Neto A, & Ribeiro TM. (2015). Uma abordagem sobre diversidade e técnicas de restauração ecológica. In: Martins, S.V. (Ed.) *Restauração ecológica de ecossistemas degradados*. Viçosa: Editora UFV, 3ª Ed, p. 19-41.
- Martins, S. V. (2018). Alternative forest restoration techniques. En *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72908>
- Martins S.V., Cosimo LHE, Balestrin D, Fonseca WS, Andrade CF, Barros RS. (2020). Restoration of Tree and Shrub Diversity Post Bauxite Mining, in the Southeastern Region of Minas Gerais, Brazil. In: Kristian de Vlieger. (Org.). *Recent Advances in Ecological Restoration*. 1ed.Estados Unidos: Nova, 2020, v.1, p. 33-62.
- Neto, A. B. B., Schwartz, G., Noronha, N. C., Gama, M. A. P., & Ferreira, G. C. (2021). Natural regeneration for restoration of degraded areas after bauxite mining: A case study in the Eastern Amazon. *Ecological Engineering*, 171, 106392. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106392>
- Reis, A., Bechara, F. C., Tres, D. R., & Trentin, B. E. (2014). Nucleação: concepção biocêntrica para a restauração ecológica. *Ciencia Florestal*, 24(2), 509-519. <https://doi.org/10.5902/1980509814591>
- Rodríguez-Uña, A., Cruz-Alonso, V., Rohrer, Z., & Martínez-Baroja, L. (2020). Fresh perspectives for classic forest restoration challenges. *Restoration Ecology*, 28(1), 12-15. <https://doi.org/10.1111/rec.13093>
- Trentin, B. E., Estevan, D. A., Rossetto, E. F. S., Gorenstein, M. R., Brizola, G. P., & Bechara, F. C. (2018). Restauração Florestal Na Mata Atlântica: Passiva, Nucleação e plantio de alta diversidade. *Ciência Florestal*, 28(1), 160-174. <https://doi.org/10.5902/1980509831647>

UNGA (Assembléia Geral das Nações Unidas) (2019) Década das Nações Unidas sobre Restauração de Ecossistemas (2021-2030). Documento da ONU A / RES / 73/284

USGS (2024). Mineral commodity summaries 2024: United States Geological Survey, 212 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>

Weerasinghe, M., Ashton, M. S., Hooper, E. R., & Singhakumara, B. (2018). Floristics of soil seed banks on agricultural and disturbed land cleared of tropical forests. *Restoration Ecology*, 27(1), 138-147. <https://doi.org/10.1111/rec.12711>

Yadav, S. K., Banerjee, A., Jhariya, M. K., Meena, R. S., Khan, N., & Raj, A. (2022). Eco-restoration of bauxite mining: An ecological approach. In *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability* (pp. 173-193). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00028-4>

## **CAPÍTULO I: BOLAS DE SEMENTES COM TECNOSOLO DA MINERAÇÃO DE BAUXITA: UMA TÉCNICA ALTERNATIVA DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA**

### **Resumo**

O objetivo deste estudo foi avaliar o uso de bolas de sementes com tecnosolo da mineração de bauxita como técnica complementar na restauração florestal. O experimento foi dividido em duas fases, uma conduzida em ambiente controlado e outra em condições de campo. Na primeira fase, foi avaliado o uso de bolas de sementes com diferentes proporções de rejeito de bauxita e composto orgânico, além da aplicação de adubo. Foram utilizados 6 tratamentos, com 6 bolas de sementes em cada um. Foram testadas quatro espécies arbóreas nativas: duas classificadas como pioneiras (*Senna macranthera* e *Enterolobium contortisiliquum*) e duas como secundárias iniciais (*Anadenanthera peregrina* e *Pterogyne nitens*). No total dos seis tratamentos, foram registradas 105 sementes germinadas o que corresponde ao 14,6% das sementes semeadas. Quanto às médias de germinação, os resultados revelaram diferenças significativas entre os tratamentos, indicando que os tratamentos T1 e T3 são estatisticamente superiores aos demais. A espécie *E. contortisiliquum* apresentou as melhores taxas de germinação. Além disso, as espécies pioneiras apresentaram médias de crescimento superiores nos tratamentos com adição de adubo. A segunda fase conduzida em condições de campo, onde avaliou-se a eficácia da técnica de bolas de sementes utilizando tecnosolo e sementes de diferentes tamanhos de espécies nativas. Sendo os tratamentos: T1: Bolas de sementes grandes, T2: Bolas de sementes pequenas, T3: Semeadura direta com sementes grandes e o T4: semeadura direta com sementes pequenas. Foram consideradas como sementes pequenas aquelas com tamanho <0,5 cm (*Senna macranthera*, *Cecropia hololeuca* e *Schinus terebinthifolia*) e sementes grandes aquelas com tamanho > 0,5 cm, (*Enterolobium contortisiliquum*, *Peltophorum dubium* e *Platypodium elegans*). O experimento foi instalado em uma área pós-mineração de bauxita onde foi feito o plantio homogêneo da espécie *Anadenanthera peregrina*. Foram registradas 176 sementes germinadas considerando todos os tratamentos, após 150 dias da montagem do experimento. Quanto às médias de germinação, a análise mostrou que a germinação foi significativamente menor no tratamento T3. A técnica de bolas de sementes foi mais eficiente na germinação para os dois tamanhos de sementes avaliados. Em contraste, a semeadura direta mostrou-se ser mais eficiente para sementes menores. As espécies *E.*

*contortisiliquum* e *S. terebinthifolia* se destacaram com maiores taxas de germinação. Nesse contexto, a técnica de bolas de sementes utilizando tecnosolo com rejeito de bauxita é uma alternativa inovadora e promissora para impulsionar os processos de restauração florestal, principalmente em projetos de enriquecimento. Além disso, possibilita o aproveitamento do material residual da atividade mineradora e contribui para a gestão sustentável dos rejeitos de mineração de bauxita.

**Palavras chave:** Biodiversidade; Composto orgânico; Enriquecimento; Rejeito de bauxita.

## CHAPTER I: SEED BALLS WITH BAUXITE MINING TECHNOSOIL: AN ALTERNATIVE FOREST RESTORATION TECHNIQUE IN THE BRAZILIAN ATLANTIC FOREST.

### Abstract

The objective of this study was to evaluate the use of seed balls with bauxite mining technosoil as a complementary technique in forest restoration. The experiment was divided into two phases: one conducted in a controlled environment and the other under field conditions. In the first phase, the use of seed balls with different proportions of bauxite waste and organic compost, as well as the application of fertilizer, was assessed. Six treatments were used, with 6 seed balls in each. Four native tree species were tested: two classified as pioneer species (*Senna macranthera* and *Enterolobium contortisiliquum*) and two as early secondary species (*Anadenanthera peregrina* and *Pterogyne nitens*). Out of the six treatments, 105 germinated seeds were recorded, corresponding to 14.6% of the sown seeds. Regarding germination rates, the results revealed significant differences between treatments, indicating that treatments T1 and T3 were statistically superior to the others. The species *E. contortisiliquum* showed the highest germination rates. Additionally, pioneer species exhibited higher growth rates in treatments with added fertilizer. The second phase was conducted under field conditions, where the effectiveness of the seed ball technique using technosoil and seeds of different sizes from native species was evaluated. The treatments were: T1: Large seed balls, T2: Small seed balls, T3: Direct sowing with large seeds, and T4: Direct sowing with small seeds. Small seeds were defined as those <0.5 cm (*Senna macranthera*, *Cecropia hololeuca*, and *Schinus terebinthifolia*), and large seeds as those >0.5 cm (*Enterolobium contortisiliquum*, *Peltophorum dubium*, and *Platypodium elegans*). The experiment was set up in a post-bauxite mining area where homogeneous planting of *Anadenanthera peregrina* was carried out. A total of 176 germinated seeds were recorded across all treatments, 150 days after the setup of the experiment. Regarding germination rates, the analysis showed that germination was significantly lower in treatment T3. The seed ball technique was more effective in germination for both sizes of seeds evaluated. In contrast, direct sowing proved to be more efficient for smaller seeds. The species *E. contortisiliquum* and *S. terebinthifolia* stood out with higher germination rates. In this context, the seed ball technique using technosoil with bauxite waste is an innovative

and promising alternative to enhance forest restoration processes, particularly in enrichment projects. Moreover, it allows for the utilization of residual material from mining activities and contributes to the sustainable management of bauxite mining waste.

**Keywords:** Biodiversity; Bauxite waste; Enrichment; Organic compost.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui em seu território 9% dos depósitos de bauxita do mundo, ocupando o quarto lugar entre os países produtores, atrás de Guiné, Austrália e Vietnã (USGS, 2024). A bauxita é a matéria prima essencial para a cadeia produtiva da indústria do alumínio. No Brasil, o estado de Minas Gerais é o segundo maior produtor de bauxita (ANM, 2022). A extração de bauxita se destaca das demais formas de mineração por sua natureza localizada, superficial e temporária (Komlóssy et al., 2022; Yadav et al., 2022). Dado que a bauxita é frequentemente encontrada em afloramentos superficiais e camadas próximas à superfície do solo, os impactos associados podem ser mais facilmente identificados e mitigados (Balestrin et al., 2020). Como resultado, a recuperação das áreas mineradas e das regiões afetadas pela mineração de bauxita pode ocorrer de forma relativamente rápida (Martins et al., 2020).

Neste cenário, as empresas mineradoras realizam ações de restauração florestal nas áreas mineradas e em áreas de compensação ambiental para garantir a sustentabilidade da mineração de bauxita (Cosimo et al., 2021; Fonseca et al., 2023). É importante ressaltar que as empresas do setor de mineração figuram entre as principais investidoras em iniciativas ambientais, na restauração de áreas mineradas, na compensação ambiental e na conservação de áreas de Reserva Legal e APPs – Áreas de Preservação Permanente (Martins, 2016; Balestrin et al., 2019).

O plantio de mudas em áreas onde a restauração passiva através da regeneração natural é limitada é comumente referido como reflorestamento tradicional, uma abordagem amplamente adotada nos últimos anos para promover a restauração em larga escala (Martins, 2018). Contudo, há diversas técnicas alternativas de restauração ativa, como o transplante de plântulas, sistemas agroflorestais, a semeadura direta e a nucleação, que podem ser utilizadas conjuntamente favorecendo a resiliência ecológica a longo prazo (Oliveira & Engel, 2017; Martins, 2018; Martins et al., 2020; Fonseca et al., 2024).

Diante disso, o enriquecimento com semeadura direta emerge como uma abordagem promissora na restauração florestal de áreas perturbadas (Suganuma et al., 2008). Esta técnica envolve a distribuição direta de sementes de espécies nativas em áreas de recuperação, promovendo a regeneração natural e a diversidade biológica (Oliveira & Engel, 2017). Ao incorporar uma variedade de espécies adaptadas ao ecossistema local, o enriquecimento com semeadura direta

pode acelerar o processo de sucessão ecológica, restaurando a funcionalidade dos ecossistemas de forma eficiente e sustentável (Martins et al., 2020).

Nesse contexto, as bolas de sementes representam uma prática de semeadura direta que tem sido empregada especialmente em áreas de agricultura e jardinagem em várias regiões do mundo (Kannan et al., 2021). Essa técnica envolve o uso de um substrato que envolve as sementes, oferecendo proteção física e um ambiente propício para o seu desenvolvimento (Fukouoka, 2009). Contudo, no contexto da restauração florestal é uma técnica recente (Alves, 2023). Métodos de revestimento de sementes, exemplificados pelas bolas de sementes ou também conhecidas na literatura como *seed balls*, são reconhecidos como opções alternativas e complementares para a restauração de áreas perturbadas, especialmente em locais de difícil acesso. Essas técnicas destacam-se por sua abordagem economicamente mais viável em comparação com o plantio de mudas (Gornish et al., 2019, Rojas-Botero et al., 2020; Martins et al., 2021; Fonseca et al., 2024).

O uso de bolas de sementes (*seed balls*) na restauração florestal oferece uma série de vantagens significativas, já que proporcionam uma forma prática e eficiente de distribuir sementes em áreas de difícil acesso, promovendo a regeneração natural da vegetação. Além disso, as bolas de sementes proporcionam proteção física às sementes contra as condições adversas do ambiente, como a seca e a erosão do solo e contra a predação de animais (Gornish et al., 2019; Kannan et al., 2021; Tamilarasan et al., 2021). Alguns estudos destacaram a eficácia das *seed balls* na promoção da germinação e estabelecimento de plantas em ambientes de restauração, além da capacidade de aumentar a diversidade de espécies vegetais em áreas restauradas permitindo combinar diferentes espécies com funções ecológicas distintas em um mesmo núcleo, de modo similar ao que ocorre naturalmente (Martins et al., 2021; Pasha et al., 2023). Esses benefícios contribuem para tornar as bolas de sementes uma ferramenta valiosa na restauração de ecossistemas florestais perturbados, promovendo a conservação da biodiversidade e a resiliência desses ecossistemas (Gornish et al., 2019; Alvaes, 2023).

Portanto, por intermédio da parceria realizada entre o Laboratório de Restauração Florestal (LARF) e a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), diversas pesquisas têm sido realizadas desde 2011 com o objetivo de apoiar o programa de restauração florestal em áreas mineradas e em regiões destinadas à compensação ambiental, visando promover uma mineração de bauxita sustentável (Martins et al., 2020). Nesse sentido este estudo teve como objetivos: I) avaliar a

eficácia do tecnosolo (Rejeito de bauxita + composto orgânico) como substrato para as bolas de sementes; II) avaliar a germinação e crescimento de espécies nativas da Mata Atlântica na técnica de bolas de semente em ambiente controlado; III) comparar a germinação de sementes com diferentes tamanhos na técnica de bolas de semente em condições de campo; IV) explorar a viabilidade do uso de bolas de sementes como técnica alternativa de enriquecimento em áreas em restauração florestal após a mineração de bauxita.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

O Estudo foi dividido em duas etapas: a primeira, com bolas de sementes contendo diferentes proporções de tecnosolo combinado com adubação NPK 06-30-06, foi conduzida na casa de vegetação do Laboratório de Restauração Florestal (LARF - UFV), localizado no Viveiro de Pesquisas Florestais da UFV; e a segunda etapa, com bolas de sementes contendo diferentes tamanhos de sementes, foi realizada em condições de campo como técnica de enriquecimento, em uma área pós-mineração de bauxita da Companhia Brasileira de Alumínio – CBA, situada no município de São Sebastião da Vargem Alegre, Minas Gerais – Brasil.

### **2.1. Etapa I: Bolas de sementes com tecnosolo em ambiente controlado**

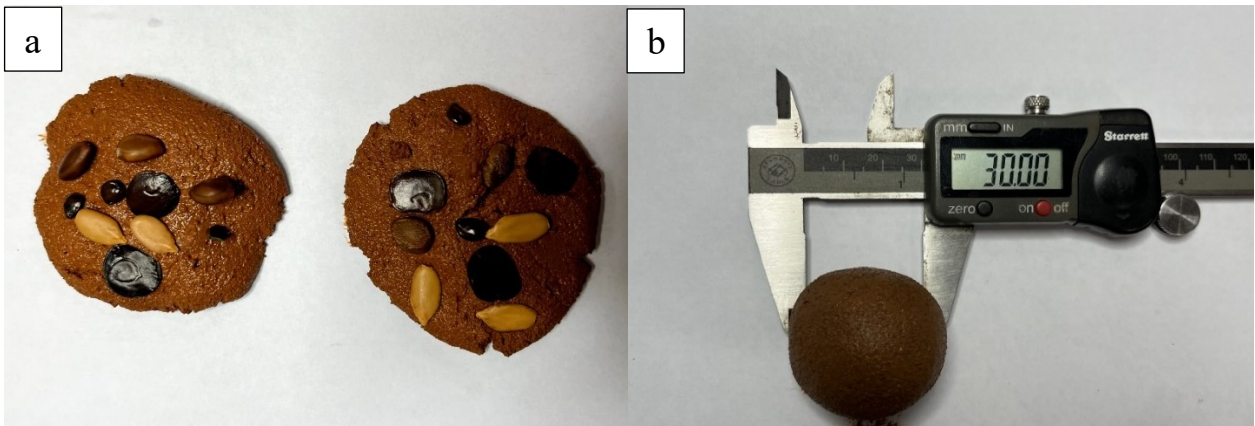
O Experimento foi realizado em ambiente controlado na casa de vegetação do LARF – UFV, situada no Viveiro de Pesquisas Florestais da UFV, onde foram testadas bolas de sementes confeccionadas com 3 cm de diâmetro. Os tratamentos foram definidos utilizando o rejeito de bauxita e composto orgânico, em diferentes proporções.

Adotou-se o diâmetro de 3cm para a confecção das bolas de semente, conforme a metodologia proposta por Martins et al. (2021). Para garantir a padronização das repetições, após a confecção das bolas, o diâmetro de cada uma foi medido com um paquímetro digital. Além disso, foram selecionadas quatro espécies arbóreas nativas da Mata Atlântica que ocorrem na região, sendo duas classificadas como espécies pioneiras: fedegoso (*Senna macranthera* (DC. Ex Collad.)

H.S.Irwin & Barneby) e tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong) e duas classificadas como espécies secundárias iniciais: angico vermelho (*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.) e pau-amendoim (*Pterogyne nitens* Tul.). Todas as espécies possuem sementes classificadas como ortodoxas.

Para a confecção das bolas foram utilizadas 5 sementes de cada espécie, perfazendo um total de 20 sementes em cada bola (Figura 1). As sementes foram adquiridas de fornecedores de procedência. A viabilidade das sementes foi testada mediante a testes de germinação para cada uma das espécies, previamente à montagem do experimento.

**Figura 1.** Confecção das bolas de sementes (a) Mensuração do diâmetro das bolas de sementes com paquímetro digital(b)



Os testes de germinação foram conduzidos na casa de vegetação do LARF, onde foram colocadas 20 sementes de cada espécie na areia esterilizada e foi avaliado a porcentagem de germinação durante 30 dias. Todas as espécies apresentaram médias de taxa de germinação de no mínimo 85%.

As sementes de *E. contortisiliquum*, *S. macranthera* e *P. nitens*, que apresentam dormência tegumentar, foram submetidas à quebra desta dormência através de escarificação mecânica, conforme instruções fornecidas pelo fornecedor, utilizando lixa.

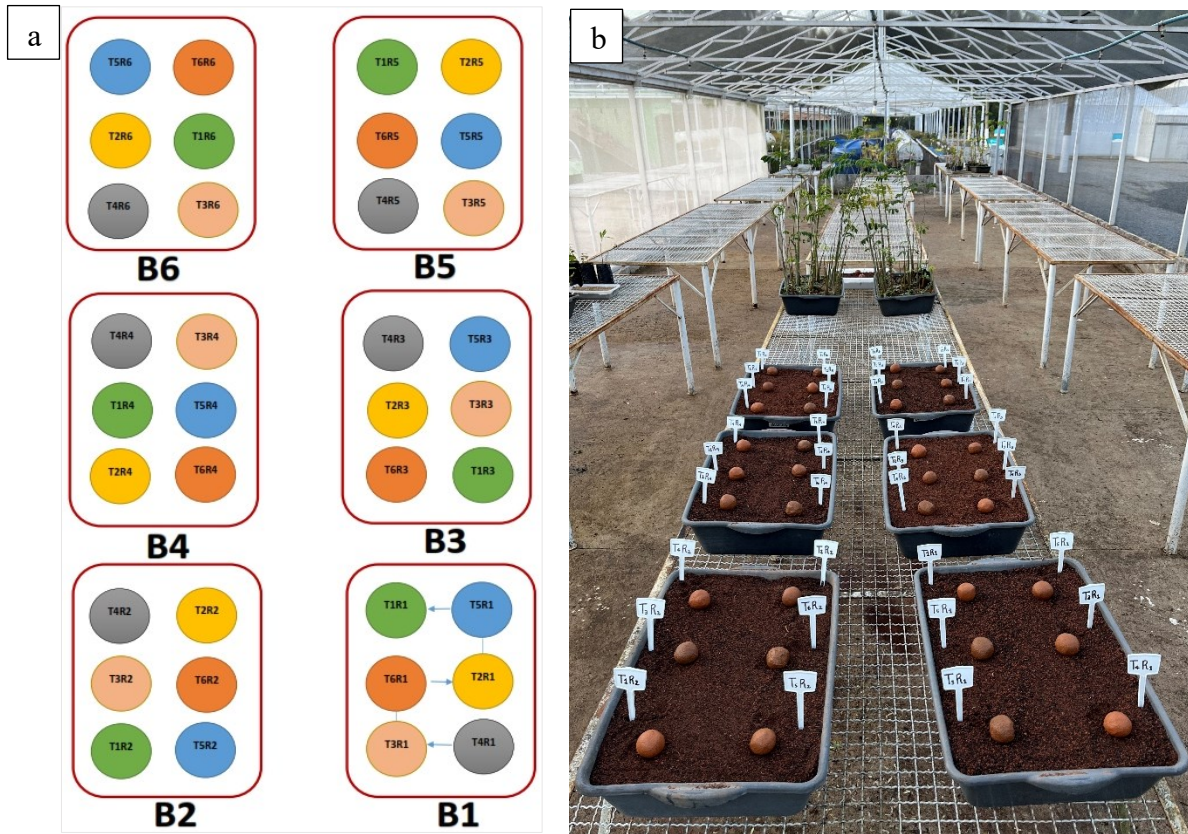
Em relação à adubação das bolas de sementes, foram adicionadas 10 gramas de fertilizante NPK (06-30-06) por cada quilo de substrato utilizado, conforme metodologia proposta por Alves, (2023). A Adição de adubo teve como finalidade proporcionar condições nutricionais ideais, principalmente durante as fases iniciais de germinação e crescimento. Adicionalmente, a utilização

de água foi necessária para garantir a aderência das sementes ao substrato durante a fabricação das bolas.

A confecção das bolas foi realizada no Laboratório de Restauração Florestal e posteriormente foram transportadas para a casa de vegetação da UFV. Foram confeccionadas seis bolas para cada um dos seis tratamentos, totalizando 36 bolas com 720 sementes semeadas: T1: Rejeito puro, T2: 75% de rejeito + 25 % de composto orgânico, T3: 50% de rejeito+50 % de composto orgânico, T4: Rejeito puro + NPK, T5: 75% de rejeito + 25 % de composto orgânico + NPK, T6: 50% de rejeito + 50 % de composto orgânico + NPK.

O experimento foi conduzido seguindo um delineamento inteiramente casualizado, no qual as trinta e seis bolas foram distribuídas aleatoriamente em seis blocos. Cada bloco foi representado por uma bandeja plástica de 20 litros ocupada com substrato e composto orgânico, em que não foi adicionado adubo visando simular a situação normalmente encontrada em campo. Após a distribuição das bolas nos blocos, todas foram corretamente identificadas com a ajuda de uma placa de identificação (Figura 2).

**Figura 2.** Desenho do lineamento inteiramente casualizado (a) e detalhe da alocação das bandejas com as bolas de sementes nas bancadas da Casa de vegetação, viveiro UFV (b)



As bandejas foram colocadas sobre bancadas no viveiro e o controle da umidade foi realizado através de um sistema automático de irrigação por aspersão, ajustado conforme as condições ambientais do local, que podiam variar em quantidade e duração. O monitoramento e avaliação das bolas foi feito semanalmente. Foram realizadas vinte e três avaliações, sendo a última após 190 dias da implantação do experimento. Para contabilizar a germinação, as bolas foram cuidadosamente examinadas, e todas as sementes que desenvolveram radícula foram consideradas. Adicionalmente à contagem da germinação, foi feita a medição da altura de cada uma das mudas para assim avaliar o crescimento das espécies.

### 2.1.1. Análise dos dados

As análises estatísticas foram realizadas no programa R (version 4.4.0; R Core Team 2024). Inicialmente utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk e gráficos Q-Q para avaliar a normalidade dos

dados de germinação (Crawley, 2013). O teste de Kruskal-Wallis seguido pelo teste post-hoc de Dunn foi utilizado para comparar a média de germinação dos seis tratamentos (dados não-normalmente distribuídos), utilizando o pacote 'dunn.test'. O gráfico de germinação média foi desenhado usando a função “geom\_bar” disponível no pacote "ggplot2" (Wickham 2016). Além disso foram feitas curvas de crescimento médio para cada uma das espécies. As curvas de crescimento foram construídas usando as funções “geom\_line” e “geom\_point”, disponíveis no pacote “ggplot2” (Wickham, 2016).

## 2.2. Etapa II: Bolas de semente com tecnosolo em condições de campo

A fim de avaliar a eficácia prática da técnica de bolas de sementes utilizando tecnosolo e sementes de diferentes tamanhos de espécies nativas da Mata Atlântica, a segunda etapa do experimento foi montado em condições de campo. Foram confeccionadas bolas que variaram em tamanho e nas espécies arbóreas utilizadas. Foram adotadas duas categorias: I) sementes com tamanho inferior a 0,5 cm e II) sementes com tamanho maior a 0,5 cm de comprimento. Na primeira categoria, as bolas foram confeccionadas com um diâmetro de 3 cm, enquanto na segunda, o diâmetro adotado foi de 6 cm, conforme o tamanho das sementes de cada categoria.

A proporção do substrato utilizado como tecnosolo foi de 50% de rejeito de bauxita e 50% de composto orgânico. Esta proporção foi escolhida conforme o resultado de germinação obtido na primeira fase do experimento. Para a primeira categoria (< 0,5 cm), foram utilizadas as espécies: *Senna macranthera* (DC. ex Collad.) H.S.Irwin & Barneby, *Cecropia hololeuca* Miq e *Schinus terebinthifolia* Raddi; na segunda categoria (> 0,5 cm), foram empregadas as espécies: *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong, *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub e *Platypodium elegans* Vogel.

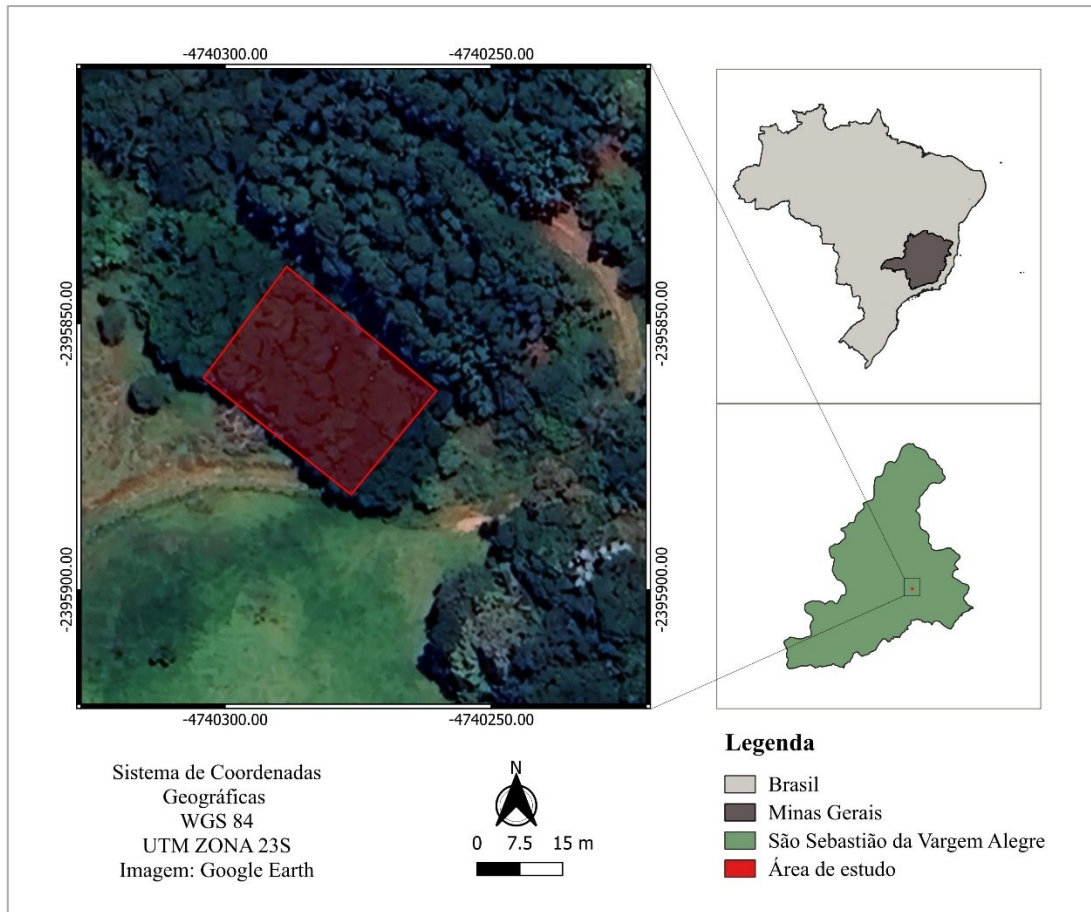
Foram utilizadas 5 sementes de cada espécie conforme categoria de tamanho, totalizando 15 sementes em cada bola. Previamente à montagem do experimento, um teste de germinação foi montado para verificar a viabilidade das sementes, todas as sementes empregadas neste teste se encontravam viáveis e apresentaram médias de taxa de germinação de no mínimo 85% para cada espécie.

Foi realizada a quebra de dormência das espécies que precisavam conforme as recomendações do fornecedor. As sementes de *E. contortisiliquum*, *S. macranthera* e *P. dubium* foram submetidas à escarificação mecânica com lixa, enquanto as sementes de *P. elegans* foram submetidas a um corte longitudinal seguido de imersão em água a temperatura ambiente por 24 horas.

As bolas foram confeccionadas no Laboratório de Restauração Florestal e transportadas para o campo, em uma área de 800 m<sup>2</sup> pós-mineração de bauxita da Companhia Brasileira de Alumínio – CBA, situada no município de São Sebastião da Vargem Alegre, Minas Gerais – Brasil, onde foi feito o plantio homogêneo da espécie *Anadenanthera peregrina* (

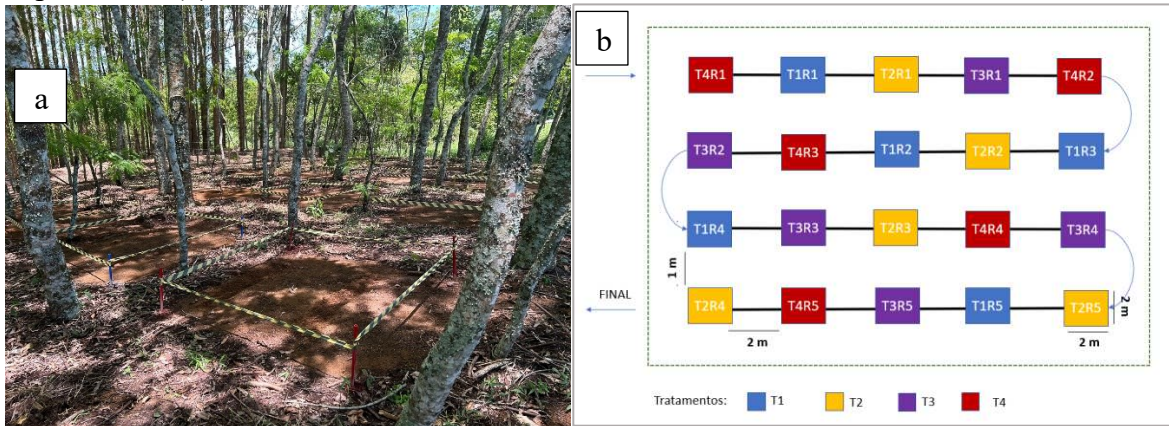
Figura 3). De acordo com a classificação de Köppen, a região possui um clima do tipo Cwa, caracterizado por verões quentes e chuvosos e uma estação seca bem definida. A precipitação média anual é de 1.287 mm, e a temperatura média anual é de 20,3 °C. (Instituto Nacional de Meteorologia - Inmet, 2016). O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico (Santos, 2018), que corresponde a um *Oxisol* (Soil Survey Staff, 2014) e a um *Ferralsol*, na Base de Referência Mundial para Recursos do Solo (IUSS Working Group WRB, 2015). O plantio homogêneo da espécie nativa angico vermelho (*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.) foi realizado há aproximadamente 13 anos. Foram definidos os seguintes quatro tratamentos: T1: Bolas de sementes grandes, T2: Bolas de sementes pequenas, T3: Semeadura direta com sementes grandes e o T4: semeadura direta com sementes pequenas.

**Figura 3.** Localização da área do estudo, no município de São Sebastião da Vargem Alegre, MG, com destaque para a área de plantio.



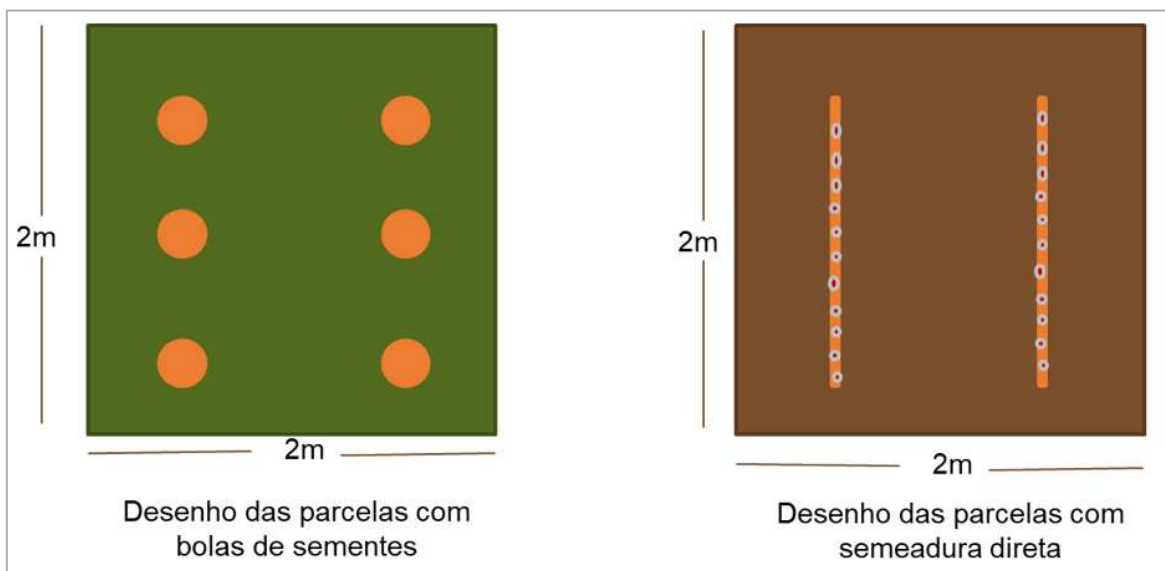
O experimento foi instalado adotando um delineamento inteiramente casualizado, com 4 tratamentos e 5 repetições por tratamento distribuídas aleatoriamente na área de plantio entre as linhas (Figura 4b). As parcelas de 2x2m foram delimitadas com canos de PVC identificados com a cor correspondente ao tratamento e fita zebraada (Figura 4a).

**Figura 4.** Parcelas na área de plantio (a), Desenho do lineamento inteiramente casualizado do experimento (b)



O experimento foi implantado durante o período chuvoso, especificamente no mês de dezembro, com o objetivo de favorecer a germinação das sementes devido à maior disponibilidade de água nesse período. A disposição das bolas de sementes, assim como a semeadura direta, seguiu um padrão uniforme em todas as parcelas, conforme ilustrado na Figura 5.

**Figura 5.** Esquema de alocação das bolas de sementes e da semeadura direta em cada tratamento



O monitoramento das parcelas foi realizado mensalmente depois da montagem do experimento, totalizando cinco avaliações. Para a contagem da germinação, as parcelas foram cuidadosamente examinadas, e todas as sementes que desenvolveram radícula foram consideradas.

Todas as plântulas contabilizadas foram identificadas com uma plaqueta plástica, atribuindo um código de identificação.

### 2.2.1. Análise de dados

A normalidade dos dados de média de germinação entre os tratamentos, foi testada mediante ao teste de Shapiro–Wilk e o gráfico Q–Q, e a homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo teste de Bartlett (Crawley 2013). Para comparar a média de germinação entre os quatro tratamentos, foi utilizada a ANOVA de uma via (One-Way ANOVA) seguida do teste de Tukey para comparações múltiplas. Para este teste foi considerado um nível de significância de  $p < 0,05$ . Os gráficos foram desenhados usando a função 'geom\_boxplot' do pacote "ggplot2" (Wickham 2016), no software R (versão 4.4.0; R Core Team, 2024).

Para comparar a média de germinação por espécie (dados com distribuição paramétrica) foi realizado um teste t de Student, a um nível de significância de  $p < 0,05$ . Nesta análise, foram consideradas as espécies que apresentaram germinação em todas as repetições experimentais (*E. contortisiliquum* e *S. terebinthifolia*). As demais espécies (*S. macranthera* e *P. dubium*) apresentaram baixa germinação, por isto não foram incluídas na análise, enquanto (*C. hololeuca* e *P. elegans*) não apresentaram indivíduos germinados. Os gráficos foram criados utilizando a função 'geom\_bar' do pacote 'ggplot2' (Wickham 2016), no software R (versão 4.4.0; R Core Team, 2024).

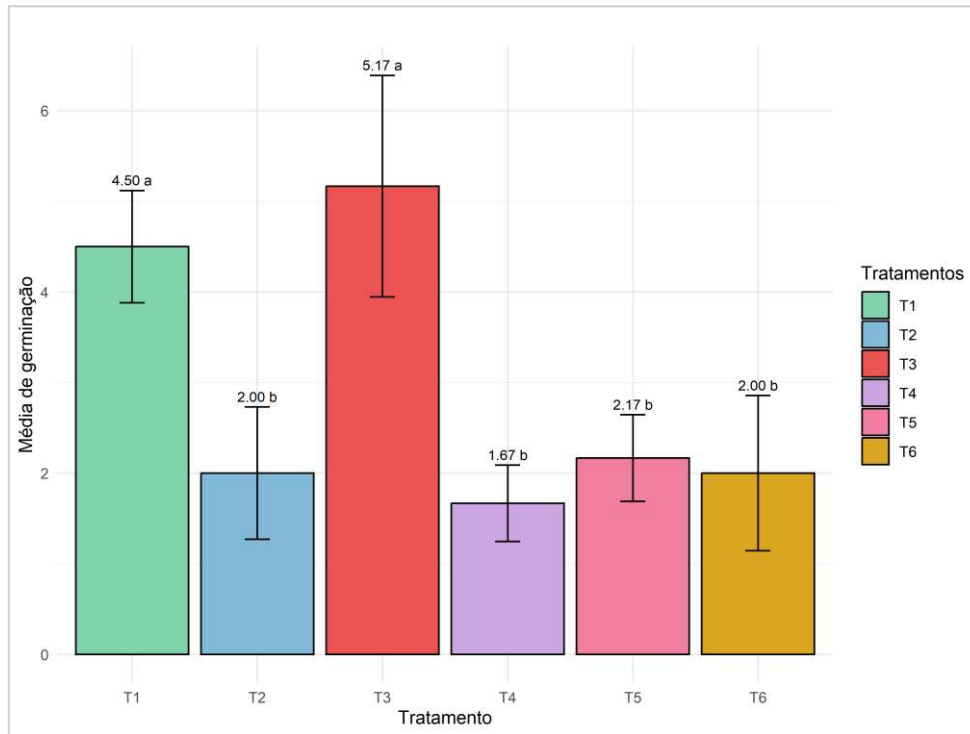
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Etapa I: Bolas de sementes com tecnosolo em ambiente controlado

Considerando a germinação de todos os tratamentos, 105 sementes foram contabilizadas após 190 dias da implantação do experimento, correspondendo a 14,6% das sementes semeadas. Esses resultados são similares aos encontrados por Alves, (2023) e significativamente superior aos apresentados por Jones et al. (2014), um dos poucos trabalhos que utilizaram a técnica de bolas de sementes, onde a espécie arbustiva *Coleogyne ramosissima* foi testada no deserto de Mojave, Estados Unidos, com uma taxa de germinação de apenas 5%. Em outros países, como a Índia, há trabalhos relacionados à germinação de sementes com a técnica de bolas, mas eles não obtiveram sucesso na germinação (Aspalli et al., 2020). Em todos os tratamentos foram verificadas germinação de sementes, sendo que a espécie *E. contortisiliquum* obteve a maior taxa de germinação, totalizando 49 sementes o que corresponde ao 47% do total das sementes germinadas. Por outro lado, *P. nitens* apresentou os valores mais baixos de germinação no experimento, com apenas 9 sementes germinadas. É importante ressaltar que esses resultados são influenciados por uma variedade de fatores, incluindo interações ambientais, características dos substratos e relações entre as espécies, as quais respondem de maneiras diversas (Souza et al., 2015; Larson et al., 2020; Carrera-Castaño et al., 2020; Klupczyńska & Pawłowski, 2021).

Quanto às médias de germinação, diferenças significativas foram observadas entre os tratamentos, indicando que os tratamentos T1 e T3 são estatisticamente superiores aos demais (Figura 6). A utilização do rejeito puro como substrato nas bolas de sementes não apresentou nenhuma limitação para a germinação de sementes, visto que este tratamento apresentou média (T1: 4,5a) estatisticamente similar ao tratamento com 50% de rejeito e 50% de composto orgânico (T3: 5,17a). Observa-se uma variação nas médias de germinação entre os tratamentos, evidenciando a influência das diferentes proporções de tecnosolo utilizadas. Os tratamentos com adição de adubo (T4, T5 e T6) apresentaram resultados inferiores em termos de média de germinação, sugerindo que a adição de adubo não contribuiu para o aumento da germinação das espécies. Além disso, a utilização do rejeito puro evidenciou ser uma alternativa eficaz para facilitar a germinação das sementes, indicando que o aproveitamento do rejeito da mineração de bauxita pode ser viável na técnica de bolas de sementes.

**Figura 6.** Médias de germinação por tratamento, **T1:** Rejeito puro, **T2:** 75% de rejeito + 25 % de composto orgânico, **T3:** 50% de rejeito+50 % de composto orgânico, **T4:** Rejeito puro + NPK, **T5:** 75% de rejeito + 25 % de composto orgânico + NPK, **T6:** 50% de rejeito + 50 % de composto orgânico + NPK.

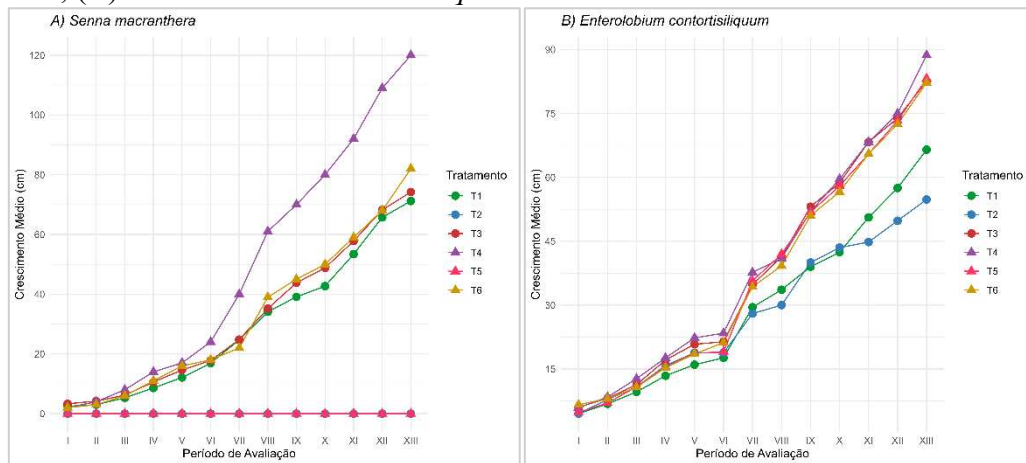


O aproveitamento do rejeito de mineração na germinação de espécies florestais vem sendo empregado e promovido também em outros trabalhos, como Scarpa et al. (2022), que testaram a tolerância de duas espécies do gênero *Schinus* e duas espécies do gênero *Handroanthus* cultivadas em rejeitos de mineração de ferro.

De acordo com o crescimento médio das espécies em resposta a cada tratamento, o comportamento variou significativamente entre espécies pioneiras e espécies secundárias iniciais. As médias máximas de crescimento das espécies pioneiras variaram entre 90-120 cm (Figura 7), enquanto nas espécies secundárias o máximo foi de 25 cm (Figura 8). Esses resultados eram esperados, pois as espécies pioneiras geralmente se desenvolvem mais rapidamente, aproveitando-se das condições favoráveis iniciais para o crescimento (Sampaio et al., 2012, Santiago et al., 2021).

O desenvolvimento das duas espécies pioneiras (*S. macranthera*, *E. contortisiliquum*) foi superior no T4 (Rejeito puro+ NPK) (Figura 7), o que sugere que a utilização de rejeito puro de bauxita na conformação do tecnosolo pode proporcionar um meio eficaz para o crescimento dessas espécies. Além disso, a técnica de bolas de sementes com adubo fornece nutrientes essenciais que são aproveitados nos estágios iniciais da muda, favorecendo o crescimento acelerado e, portanto, melhorando as condições para o estabelecimento. Isso concorda com o sugerido no estudo realizado na Malásia, onde as bolas de sementes protegeram as sementes de estresses bióticos e abióticos, e o vermicomposto (também conhecido como húmus de minhoca) forneceu nutrientes e hormônios de crescimento que melhoraram significativamente o estabelecimento e a taxa de sobrevivência de *Leucaena leucocephala*, também classificada como espécie pioneira (Tamilarasan et al., 2021). No caso da espécie *S. macranthera*, não foram observados indivíduos germinados nos tratamentos com Rejeito+25% composto, independentemente da adição de adubo, o que indica uma resposta negativa a esse tratamento.

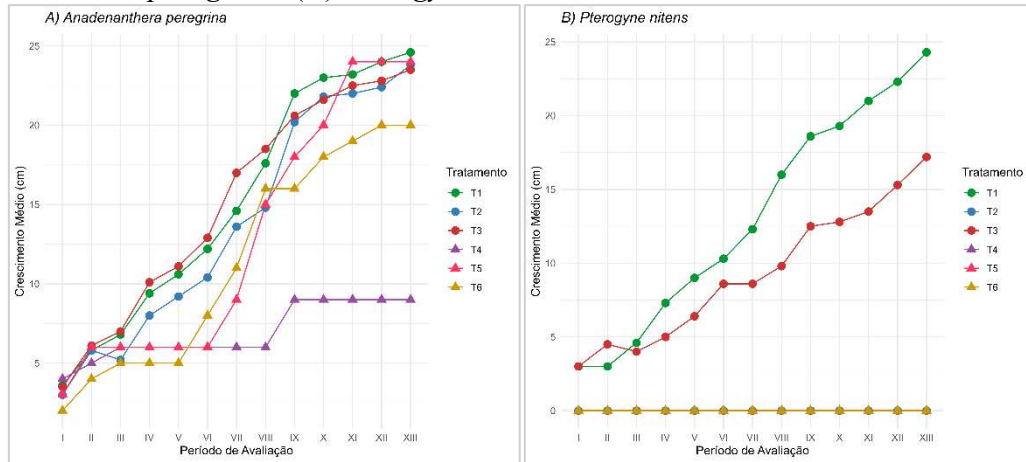
**Figura 7.** Crescimento médio das espécies Pioneiras em resposta aos seis tratamentos (A) *Senna macranthera*, (B) *Enterolobium contortisiliquum*



Em contraste com as espécies pioneiras, o desenvolvimento das espécies secundárias iniciais revelou padrões distintos em resposta aos diferentes tratamentos. Os melhores resultados nas médias de crescimento foram apresentados no T1 para ambas espécies (Figura 8). Ainda que o tratamento com rejeito puro continue sendo o mais eficaz, a adição de adubo não influenciou o crescimento médio dessas duas espécies secundárias iniciais. Essas descobertas sugerem que as

espécies secundárias iniciais podem ter requisitos de crescimento distintos e respostas diferenciadas aos tratamentos comparadas às espécies pioneiras (Santos et al., 2019).

**Figura 8.** Crescimento médio das espécies secundárias iniciais em resposta aos seis tratamentos, (A) *Anadenanthera peregrina*, (B) *Pterogyne nitens*



Além disso, vale ressaltar que a espécie *P. nitens* só apresentou germinação nos tratamentos sem adubação (T1, T3) dos 6 tratamentos estudados (Figura 8B). Esse resultado sugere uma possível sensibilidade da *P. nitens* à presença de adubo, indicando uma resposta diferenciada dessa espécie aos diferentes tratamentos. Tal comportamento pode estar relacionado às características intrínsecas da espécie e à sua interação com os componentes do tecnosolo, destacando a importância de considerar as particularidades de cada espécie na implementação da técnica de bolas de sementes. Além disso, fatores climáticos como temperatura podem influenciar diretamente na germinação, estudos realizados por Iralu et al. (2019) indicaram que as sementes de *P. nitens* apresentam melhor germinação em temperaturas mais altas (20-35°C).

De forma geral, observa-se que o crescimento das espécies não é comprometido ao utilizar várias espécies no mesmo núcleo (bola de sementes) (Figura 9) (Alves, 2023). Pelo contrário, evidencia-se que essa técnica atende satisfatoriamente às necessidades de proporcionar um meio propício para a germinação e crescimento das espécies, fornecendo condições favoráveis como proteção, umidade e nutrientes (Fukouoka et al., 2009). Além disso, o aumento da diversidade de espécies por meio da prática de semeadura mediante bolas de sementes pode enriquecer significativamente as áreas em restauração florestal (Saganuma et al., 2008). Utilizando espécies de diferentes categorias sucessionais, com crescimentos diferenciados no campo e adaptadas a diversas condições de luminosidade, é possível imitar o processo sucessional que ocorre

naturalmente (Wiener, 2010; Callegaro et al., 2016; Santos & Ferreira, 2020). Isso contribui para o avanço do processo de sucessão ecológica e promove a restauração eficiente e sustentável da funcionalidade dos ecossistemas (Martins et al., 2020).

**Figura 9.** Mudas germinadas nas bolas de sementes após 190 dias da montagem do experimento, na casa de vegetação, Viveiro UFV.

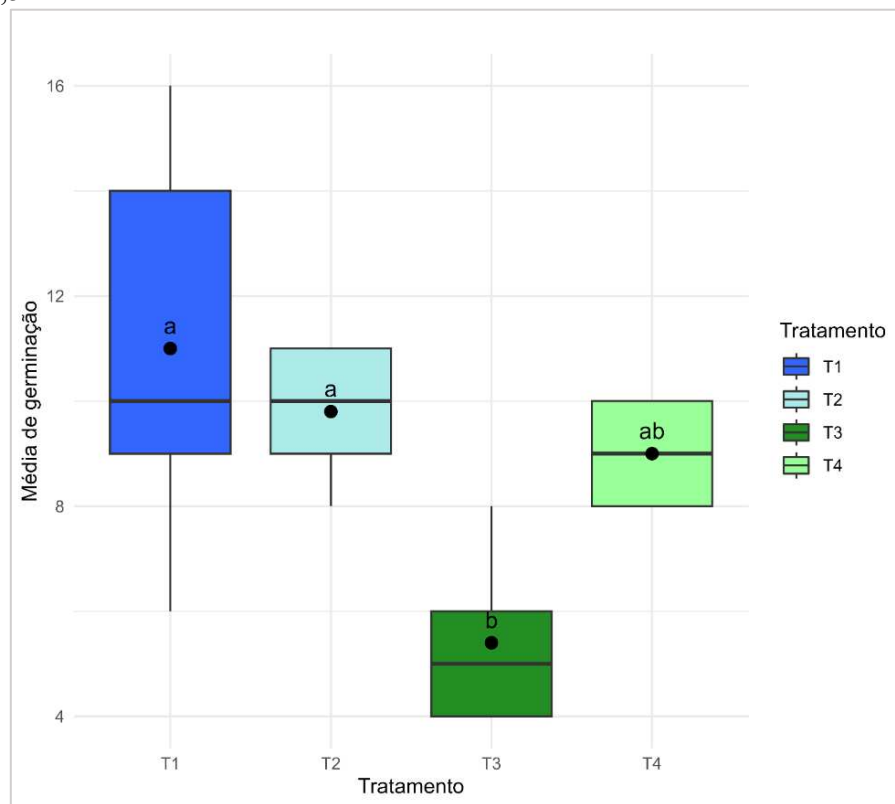


### 3.2. Etapa II: Bolas de semente com tecnosolo em condições de campo

Considerando os quatro tratamentos avaliados, 176 sementes germinaram após 150 dias da montagem do experimento. Das seis espécies utilizadas, quatro apresentaram germinação, enquanto duas não germinaram. A espécie *E. contortisiliquum* foi superior, com 77 indivíduos germinados, seguida por *S. terebinthifolia* com 74, *S. macranthera* com 20 e *P. dubium* com 5 indivíduos germinados. Quanto à média de germinação, a análise de variância (ANOVA) revelou diferenças significativas na germinação das sementes entre os tratamentos. O teste de Tukey mostrou que a germinação média foi significativamente menor no tratamento T3 em comparação com T1 e T2. Não houve diferenças significativas entre os tratamentos T1, T2 e T4, nem entre os tratamentos T3 e T4. As médias de germinação foram 11.0 para T1, 9.8 para T2, 5.4 para T3 e 9.0

para T4. Esses resultados indicam que o tratamento T3 (Semeadura direta de sementes > 0,5 cm) foi o menos eficaz em promover a germinação das sementes, enquanto os tratamentos T1, T2 e T4 apresentaram as maiores médias de germinação. Isso sugere que a técnica de bolas de sementes é mais eficiente na germinação tanto de sementes com tamanhos maiores (T1) quanto de sementes com tamanhos menores (T2). Em contraste, a semeadura direta mostrou-se mais eficiente para sementes menores (Figura 10).

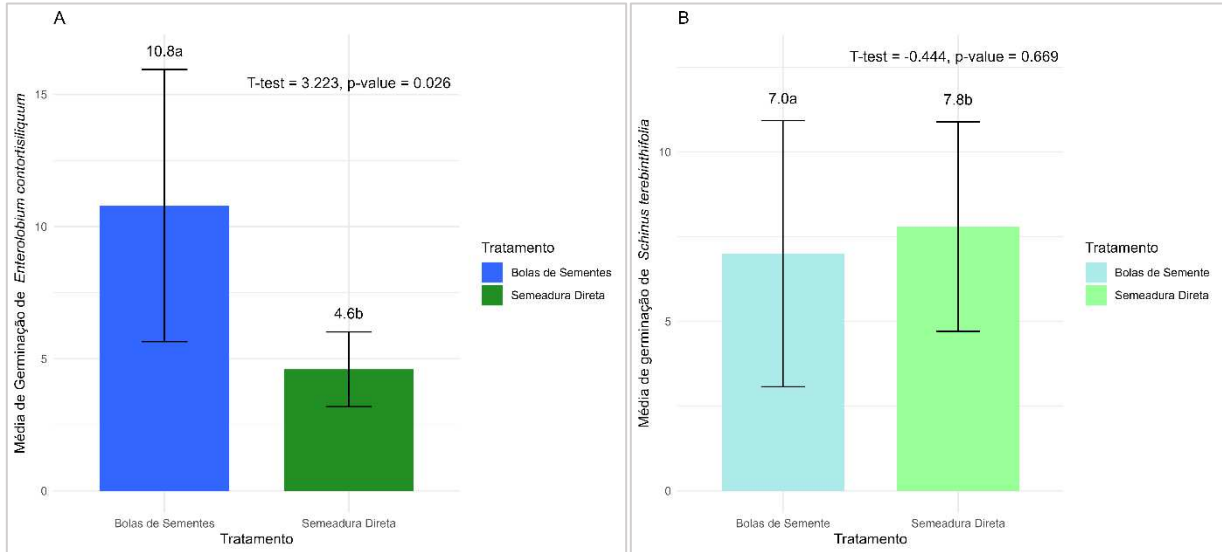
**Figura 10.** Médias de Germinação por tratamento, T1: Bolas com sementes > 0,5 cm; T2: Bolas com sementes < 0,5 cm; T3: Semeadura direta com sementes > 0,5 cm e T4: Semeadura direta com sementes < 0,5 cm.



Na comparação das médias de germinação por espécie, foram consideradas apenas as espécies que apresentaram germinação em todas as repetições experimentais (*E. contortisiliquum* e *S. terebinthifolia*). As demais espécies (*S. macranthera* e *P. dubium*) foram excluídas da análise devido à baixa taxa de germinação observada, enquanto *C. hololeuca* e *P. elegans* não apresentaram indivíduos germinados. Os resultados do teste t indicaram que a germinação de *E. contortisiliquum* foi significativamente maior com o uso da técnica de bolas de sementes em comparação com a semeadura direta ( $t = 3.223$ ,  $df = 4.601$ ,  $p = 0.026$ ), corroborando com os

resultados verificados por Alves, (2023) que confirma o potencial de *E. contortisiliquum* na técnica de bolas de sementes. A média de germinação com bolas de sementes foi de 10,8 enquanto a média com sementeadura direta foi de 4,6 indicando que a técnica de bolas de sementes é significativamente mais eficaz para promover a germinação de *E. contortisiliquum* (Figura 11A).

**Figura 11.** Médias de germinação de (A) *Enterolobium contortisiliquum* em relação aos tratamentos T1 e T3, (B) *Schinus terebinthifolia* em relação aos tratamentos T2 e T4.



As bolas de sementes se destacam como uma técnica que proporciona proteção contra a predação das sementes (Fukuoka, 2009). Ao revestir as sementes com substrato, essa técnica cria um ambiente propício para a germinação, e também fornece proteção adicional até que a semente consiga germinar (Martins et al., 2021; Alves, 2023). A predação de sementes impacta negativamente a recuperação de áreas florestais por sementeadura direta, pois reduz a quantidade de sementes viáveis para germinação. Consequentemente a predação pode comprometer a densidade e a diversidade das plantas emergentes, dificultando a regeneração natural e a formação de uma cobertura vegetal adequada (Doust, 2011; Moreira et al., 2021; Garlet & Da Silva Melo, 2024). O vigor das sementes de *Enterolobium contortisiliquum* é fortemente afetado pelo ataque de insetos, resultando em uma redução significativa da qualidade fisiológica das sementes devido ao consumo de suas reservas nutritivas (Donato et al., 2010). Com base nos resultados e nas taxas de germinação apresentadas por *E. contortisiliquum*, pode-se inferir que a técnica de bolas de sementes pode mitigar os efeitos negativos da predação de sementes e otimizar o estabelecimento dos indivíduos nos processos de restauração florestal, visto que o crescimento inicial mais acelerado pode minimizar os efeitos da predação. Sendo assim, *E. contortisiliquum* pode ser considerada uma

espécie potencial na recuperação e restauração dos ecossistemas florestais (Silva et al., 2021a; Martins et al., 2021; Gazzola et al., 2023).

Em relação à média de germinação de *Schinus terebinthifolia*, os resultados do teste t de indicaram que não há uma diferença estatisticamente significativa na germinação de sementes entre os métodos de bolas de sementes e semeadura direta ( $t = -0.444$ ,  $df = 7.583$ ,  $p = 0.669$ ). As médias de germinação foram 7,0 para o método de bolas de sementes e 7,8 para a semeadura direta. Esses resultados sugerem que ambos métodos são igualmente eficazes para a germinação da espécie *S. terebinthifolia* no contexto avaliado (Figura 11B). A resposta positiva desta espécie às duas técnicas sugere uma boa adaptabilidade, demonstrando também boa resposta ao uso do rejeito de bauxita como substrato. Embora existam poucos estudos avaliando os rejeitos de mineração como substrato (Scarpa et al., 2022), nosso estudo ressalta as potencialidades da utilização do rejeito de bauxita como substrato na propagação de *S. terebinthifolia*. Além disso é importante ressaltar que a utilização de espécies florestais que atraem fauna, como *S. terebinthifolia*, desempenha um papel crucial na restauração florestal, principalmente no que tange ao restabelecimento das relações fauna e flora (Silva et al., 2019; Fonseca, 2021; Loureiro et al., 2021). Dessa forma, a presença de espécies zoocóricas, como por exemplo *S. terebinthifolia*, podem desempenhar um papel importante em processos ecológicos como a dispersão de sementes e polinização, acelerando a recuperação dos ecossistemas (Almeida & Viani, 2020; Loureiro et al., 2021).

#### 4. CONCLUSÕES

A técnica de bolas de sementes utilizando tecnosolo com rejeito de bauxita é uma alternativa inovadora e promissora para impulsionar os processos de restauração florestal, principalmente em projetos de enriquecimento. Os maiores percentuais de germinação em condições controladas foram observados nas bolas de semente com tecnosolo na proporção 50% de rejeito e 50% de composto orgânico, e no tratamento com rejeito puro. Além disso, a utilização da técnica de bolas de semente possibilita o aproveitamento do material residual da atividade mineradora, contribuindo para a gestão sustentável dos rejeitos de mineração de bauxita. Os efeitos da adição de adubo NPK não foram observados na germinação de espécies nas bolas de sementes. Contudo, o crescimento das espécies pioneiras (*S. macranthera* e *E. contortisiliquum*) foi positivamente influenciado pela adubação.

O experimento de campo comparando os tamanhos de sementes versus as técnicas de bolas de semente e de semeadura direta demonstrou que a germinação de sementes com tamanhos maiores ( $> 0,5$  cm) foi significativamente superior nas bolas de semente do que na semeadura direta. Em contraste, o efeito da técnica não foi significativo na média de germinação de sementes menores ( $<0,5$  cm). Analisando a nível de espécie, *E. contortisiliquum* e *S. terebinthifolia* apresentaram as maiores taxas de germinação em condições experimentais de campo. A resposta de germinação do *E. contortisiliquum* foi superior na técnica de bolas de sementes, enquanto para *S. terebinthifolia* não foram observadas diferenças entre as bolas de semente e a semeadura direta.

*Enterolobium contortisiliquum* destaca-se como uma espécie-chave, pois responde de maneira satisfatória à técnica de bolas de sementes tanto em ambiente controlado como em condições de campo, resultando em um número significativamente maior de sementes germinadas e um crescimento mais acelerado em comparação com outras espécies avaliadas neste estudo. É importante ressaltar que as espécies podem apresentar comportamentos variáveis de acordo com suas características ecológicas e a interação com os componentes do tecnosolo, o ambiente e outras espécies, destacando a importância de considerar as particularidades de cada espécie na implementação da técnica de bolas de sementes.

## 5. REFERÊNCIAS

- Almeida, C., & Viani, R. A. G. (2020). Non-continuous reproductive phenology of animal-dispersed species in young forest restoration plantings. *Biotropica*, 53(1), 266-275. <https://doi.org/10.1111/btp.12869>
- Alves, W. V. L. (2023). Restauração florestal em áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão, Minas Gerais, Brasil. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.690>
- ANM. (2022). Anuário Mineral Brasileiro Principais Substâncias Metálicas 2022; Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022>. Pdf Acesso em 03 de outubro de 2023
- Aspalli, N., Nidoni, U. K., J, K., Latha, H., & Aspalli, S. (2020). Comparison of Efficacy of Different Afforestation Techniques with Seed Wombs. *International Journal Of Current Microbiology And Applied Sciences*, 9(2), 3065-3072. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.902.353>
- Balestrin, D., Martins, S. V., Schoorl, J., 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>
- Balestrin, D., Martins, S. V., Fonseca, C. A. (2020). Ecological restoration and forest coverage advancement in a region influenced by bauxite mining, Minas Gerais, Brazil. In: K., Vlioger (Ed.). *Recent advances in ecological restoration*. Nova Science Publishers, 143-154.
- Callegaro, R., Andrzejewski, C., Longhi, S., Longhi, R., & Biali, L. (2016). Composição das categorias sucessionais na estrutura horizontal, vertical e diamétrica de uma Floresta Ombrófila Mista Montana. *Agrária*, 11(4), 350-358. <https://doi.org/10.5039/agraria.v11i4a5406>
- Carrera-Castaño, G., Calleja-Cabrera, J., Pernas, M., Gómez, L., & Oñate-Sánchez, L. (2020). An Updated Overview on the Regulation of Seed Germination. *Plants*, 9(6), 703. <https://doi.org/10.3390/plants9060703>
- 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>
- Crawley, M. J. (2013). *The R Book*. John Wiley & Sons.
- Donato, D. B., Fonseca, A. G., De Assis, S. L., Machado, E. L. M., & Bispo, D. F. A. (2010). Dano de Caryedes sp. (COLEOPTERA; BRUCHIDAE) e seus Reflexos na Propagação de *Enterolobium*

contortisiliquum (LEGUMINOSAE). *Floresta E Ambiente*, 17(2), 118-123. <https://doi.org/10.4322/floram.2011.015>

Doust, S. J. (2011). Seed Removal and Predation as Factors Affecting Seed Availability of Tree Species in Degraded Habitats and Restoration Plantings in Rainforest Areas of Queensland, Australia. *Restoration Ecology*, 19(5), 617-626. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2010.00681.x>

Fonseca, W. S. (2021). Bioindicadores para avaliação e monitoramento da restauração ecológica de área em ambiente de mineração de bauxita, Mirai, MG. <https://locus.ufv.br/handle/123456789/28543>.

Fonseca, W. S., Martins, S. V., & Villa, P. M. (2023). Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. *Floresta e Ambiente*, 30(1), 1-14. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2023-0041>

Fonseca, W. S., Martins, S. V., Fiorese, E. M., & Villa, P. M. (2024). Complementing seedling planting with nucleation techniques increases forest restoration potential in areas around bauxite mining. *Land Degradation & Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.5118>

Fukuoka M. (2009). *The one-straw revolution: An introduction to natural farming*. New York Review of Books.

Garlet, J., & Da Silva Melo, R. (2024). Seed predation of forest species in the southern Amazon. En Seven Editora eBooks. <https://doi.org/10.56238/sevened2024.007-076>

Gornish, E. S., Arnold, H., & Fehmi, J. S. (2019). Review of seed pelletizing Strategies for arid land restoration. *Restoration Ecology*, 27(6), 1206-1211. <https://doi.org/10.1111/rec.13045>

Gazzola, M. D., Rovedder, A. P. M., Matiello, J., Schenato, R. B., Croda, J. P., Camargo, B., & Piaia, B. B. (2023). Semeadura direta de espécies florestais para restauração ecológica na transição Pampa – Mata Atlântica. *Ciência Florestal*, 33(3), e68327. <https://doi.org/10.5902/1980509868327>

Instituto Nacional de Meteorologia-Inmet. (2016). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)

Iralu, V., Barbhuyan, H. S. A., & Upadhaya, K. (2019). Ecology of seed germination in threatened trees: a review. *Energy, Ecology And Environment*, 4(4), 189-210. <https://doi.org/10.1007/s40974-019-00121-w>

IUSS Working Group WRB. (2015). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. In FAO (Ed.), *World Soil Resources Reports*. (World Soil). Rome. <https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>

- Jones, L. C., Schwinning, S., & Esque, T. C. (2014). Seedling ecology and restoration of blackbrush (*Coleogyne ramosissima*) in the Mojave Desert, United States. *Restoration Ecology*, 22(5), 692-700. <https://doi.org/10.1111/rec.12128>
- Kannan, R., Dhivya, V., & Janani, T. S. K. (2021). Future Perspective of Seed Ball Technology For Creating New Ecosystem. *International Journal Of Plant And Environment*, 7(04), 293-296. <https://doi.org/10.18811/ijpen.v7i04.9>
- Klupczyńska, E. A., & Pawłowski, T. A. (2021). Regulation of Seed Dormancy and Germination Mechanisms in a Changing Environment. *International Journal Of Molecular Sciences*, 22(3), 1357. <https://doi.org/10.3390/ijms22031357>
- Komlóssy, G., van Deursen, C., & Raahauge, B. E. (2022). Bauxite: Geology, Mineralogy, Resources, Reserves and Beneficiation. In *Smelter Grade Alumina from Bauxite: History, Best Practices, and Future Challenges* (pp. 19-132). Cham: Springer International Publishing
- Larson, J. E., Anacker, B. L., Wanous, S., & Funk, J. L. (2020). Ecological strategies begin at germination: Traits, plasticity and survival in the first 4 days of plant life. *Functional Ecology*, 34(5), 968-979. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13543>
- Loureiro, N., De Souza, T. P., Nascimento, D. F. D., & Nascimento, M. T. (2021). Survival, seedlings growth and natural regeneration in areas under ecological restoration in a sandy coastal plain (restinga) of southeastern Brazil. *Austral Ecology*, 47(2), 326-340. <https://doi.org/10.1111/aec.13114>
- Martins S.V. (2016). *Recuperação de áreas degradadas: Ações em Áreas de Preservação Permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração*. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 3º Ed. 270p.
- Martins, S. V. (2018). Alternative forest restoration techniques. En *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72908>
- Martins S.V., Cosimo LHE, Balestrin D, Fonseca WS, Andrade CF, Barros RS. (2020). Restoration of Tree and Shrub Diversity Post Bauxite Mining, in the Southeastern Region of Minas Gerais, Brazil. In: Kristian de Vlieger. (Org.). *Recent Advances in Ecological Restoration*. 1ed.Estados Unidos: Nova, 2020, v.1, p. 33-62.
- Martins, S. V., Alves, W. V. L., Villa, P. M., Kruschewsky, G. C., & Dias, A. A. (2021). Bolas de Sementes com rejeito da Barragem de Fundão: Uma inovação na restauração florestal das áreas atingidas na região de Mariana, MG. En *Editora Científica Digital eBooks* (pp. 61-72). <https://doi.org/10.37885/210805631>

- Moreira, P. A., De Siqueira Neves, F., & Lobo, J. A. (2021). Consequences of tropical dry forest conversion on diaspore fate of *Enterolobium contortisiliquum* (Fabaceae). *Plant Ecology*, 222(4), 525-535. <https://doi.org/10.1007/s11258-021-01124-6>
- Oliveira, R. E., & Engel, V. L. (2017). A Restauração Florestal na Mata Atlântica: três décadas em revisão. *Ciência, Tecnologia & Ambiente*, 5(1), 40-48. <https://doi.org/10.4322/2359-6643.05101>
- Pesha, J., Renukadevi, G., G, S., R, S., & S, P. (2023). Eco-Centric Landscaping: The Science and Strategy of 5-Meter Seed Ball Deployment. 2023 International Conference On System, Computation, Automation And Networking (ICSCAN). <https://doi.org/10.1109/icscan58655.2023.10395387>
- Rojas-Botero, S., Solorza-Bejarano, J., Kollmann, J., & Teixeira, L. H. (2020). Nucleation increases understory species and functional diversity in early tropical forest restoration. *Ecological Engineering*, 158, 106031. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106031>
- Suganuma, M. S., Torezan, J. M. D., Cavalheiro, A. L., Vanzela, A. L. L., & Benato, T. (2008). Comparando metodologias para avaliar a cobertura do dossel e a luminosidade no sub-bosque de um reflorestamento e uma floresta madura. *Revista Árvore*, 32(2), 377-385. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622008000200020>
- Sampaio, M. T. F., Polo, M., & Barbosa, W. (2012). Estudo do crescimento de espécies de árvores semidecíduas em uma área ciliar revegetada. *Revista Árvore*, 36(5), 879-886. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622012000500010>
- Santiago, I. N., Piedade, M. T. F., Weiss, B., Demarchi, L. O., & Lopes, A. (2021). Germinação de sementes e morfologia de plântulas de espécies pioneiras da várzea amazônica. *Ciência Florestal*, 31(1), 271-289. <https://doi.org/10.5902/1980509840676>
- Santos, D. M. D., Da Silva, K. A., Santos, J. M. F. F. D., & De Lima Araújo, E. (2018). Soil seed bank and its importance in the natural regeneration of degraded areas. *Ethnobiology and Conservation*. <https://doi.org/10.15451/ec2018-03-07.05-1-7>
- Santos, O. D. O., Mendes, K. R., Martins, S. V. C., Batista-Silva, W., dos Santos, M. A., de Figueirôa, J. M., ... & Pompelli, M. F. (2019). Physiological parameters and plasticity as key factors to understand pioneer and late successional species in the Atlantic Rainforest. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41, 1-18.
- Santos, V. A. H. F. D., & Ferreira, M. J. (2020). Initial establishment of commercial tree species under enrichment planting in a Central Amazon secondary forest: Effects of silvicultural treatments. *Forest Ecology And Management*, 460, 117822. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117822>
- Scarpa, A. L. M., Rodrigues, F. A., Da Cunha Cruz, Y., Duarte, V. P., De Castro, E. M., Pasqual, M., & Pereira, F. J. (2022). Seed germination, initial growth and leaf anatomy of seedlings of four

tree species grown in mine tailings in Brazil. *Seed Science Research*, 32(2), 104-113. <https://doi.org/10.1017/s0960258522000174>

Silva, M., Rovedder, A., Hummel, R., Piaia, B., Toso, L., Felker, R., Peccatti, A., & Matiello, J. (2019). Desenvolvimento inicial e fenologia em núcleos de restauração no bioma Mata Atlântica, Sul do Brasil. *Agrária*, 14(1), 1-7. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i1a5612>.

Silva, N. A. J., Fernandes, N. M. M., Oliveira, N. C. M., Oliveira, N. D. D. S., Santos, N. B. C. C., & De Moura Fernandes, N. M. R. (2021). Desenvolvimento de *Enterolobium contortisiliquum* e *Mimosa caesalpiniiifolia* inoculadas com *Azospirillum brasiliense* em área degradada por mineração. *Acta Biológica Catarinense*, 8(4), 43-49. <https://doi.org/10.21726/abc.v8i4.1647>

Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12th ed.). USDA Natural Resources Conservation Service.

Souza, M. L., Silva, D. R. P., Fantecelle, L. B., & De Lemos Filho, J. P. (2015). Key factors affecting seed germination of *Copaifera langsdorffii*, a Neotropical tree. *Acta Botanica Brasílica/Acta Botânica Brasília*, 29(4), 473-477. <https://doi.org/10.1590/0102-33062015abb0084>

Suganuma, M. S., De Araújo Barbosa, C. E., Cavalheiro, A. L., & Torezan, J. M. D. (2008). Enriquecimento artificial da diversidade de espécies em reflorestamentos: análise preliminar de dois métodos, transferência de serapilheira e semeadura direta. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 30(2). <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v30i2.3629>

Tamilarasan, C., Jerlin, R., & Raja, K. (2021). Seed Ball technique for enhancing the establishment of subabul (*Leucaena leucocephala*) under varied habitats. *Journal Of Tropical Forest Science*, 33(3), 349-355. <https://doi.org/10.26525/jtfs2021.33.3.349>

USGS (2024). *Mineral commodity summaries 2024: United States Geological Survey*, 212 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.

Wickham, H., & Wickham, H. (2016). *Data analysis* (pp. 189-201). Springer International Publishing

Wiener, E. M. (2010). Ecological Research and the Management of Young Successional Forests: A Case Study on the Reintroduction of Native Tree Species on a Terra Firme Site in Northeastern Peru. *Journal Of Sustainable Forestry*, 29(6-8), 571-590. <https://doi.org/10.1080/10549811003739098>

Yadav, S. K., Banerjee, A., Jhariya, M. K., Meena, R. S., Khan, N., & Raj, A. (2022). Eco-restoration of bauxite mining: An ecological approach. In *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability* (pp. 173-193). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00028-4>

## CAPÍTULO II. BANCO DE SEMENTES DO SOLO COMO BIOINDICADOR DA RESTAURAÇÃO FLORESTAL COMPENSATÓRIA À MINERAÇÃO DE BAUXITA.

### Resumo

O banco de sementes do solo é um importante bioindicador da resiliência dos ambientes em restauração florestal. Este estudo teve como objetivo comparar a composição florística do banco de sementes do solo de uma área de compensação à mineração de bauxita, em relação à uma mata nativa secundária adjacente, pertencentes à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em Itamarati de Minas - MG. Foram coletadas 20 amostras de solo superficial em área com 2 anos de plantio de mudas altas (PMA) e 20 amostras no ecossistema de referência (ER). As amostras foram colocadas em estufa (sombrite 50%) no viveiro de pesquisas da Universidade Federal de Viçosa, onde foram avaliadas durante nove meses. Todos os indivíduos germinados durante foram contabilizados e identificados. As espécies foram classificadas quanto à origem, forma de vida, categoria sucessional e síndrome de dispersão. Os índices de diversidade de Shannon-Wiener ( $H'$ ) e Equabilidade de Pielou ( $J'$ ) foram calculados no FITOPAC 2.1. A abordagem de rarefação foi empregada para comparar a riqueza de espécies entre as áreas. As médias de riqueza de espécies e abundância de indivíduos (dados paramétricos) foram comparadas através do Teste-t ( $p < 0,05$ ). O diagrama de Venn foi utilizado para verificar o número de espécies compartilhadas entre as áreas. O escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) foi usado para analisar a variação na composição florística. As análises estatísticas foram feitas no software R. Em PMA foram registrados 1.404 indivíduos, 53 espécies e 23 famílias botânicas, com ( $H'$ ) = 2,687 e ( $J'$ ) = 0,671. Na área ER foram registrados 1.056 indivíduos, 33 espécies e 22 famílias, com ( $H'$ ) = 2,145 e ( $J'$ ) = 0,607. A composição florística dos bancos de semente do solo foi significativamente diferente, possivelmente devido aos diferentes estágios sucessionais das áreas. Em ambas áreas predominaram espécies pioneiras, herbáceas e de origem nativa. Foram registradas 5 espécies arbóreas em ER e 7 espécies arbóreas em PMA, das quais 3 espécies são compartilhadas nas áreas: *Cecropia glaziovii*, *Solanum mauritianum* e *Trema micrantha*. A presença dessas três espécies zoocóricas sugere que a fauna dispersora está contribuindo para a conectividade ecológica da paisagem por meio da dispersão de sementes. Espera-se que com o avanço do processo sucessional, a composição florística das duas áreas se torne mais similar. Os resultados deste estudo permitiram identificar a presença de espécies exóticas invasoras no banco de sementes do solo, como *Urochloa*

*decumbens*. Tendo em vista que a restauração florestal é um processo dinâmico, sujeitos a alterações como mortalidade de mudas, invasão de espécies exóticas, entre outras, recomenda-se o monitoramento contínuo das áreas. Espera-se que com o avanço do processo sucessional as diferenças na composição florística dos bancos de sementes entre as áreas diminuam. O plantio de mudas altas e a preservação de fragmentos florestais e o plantio de mudas altas, realizados pela empresa, contribuem para a recuperação da biodiversidade e sustentabilidade da mineração de bauxita.

**Palavras-chave:** Biodiversidade; Compensação ambiental; Mudas altas; Resiliência.

## CHAPTER II: SOIL SEED BANK AS A BIOINDICATOR OF COMPENSATORY FOREST RESTORATION FOR BAUXITE MINING

### Abstract

The soil seed bank is an important bioindicator of the resilience of environments undergoing forest restoration. The objective of this study was to compare the floristic composition of the soil seed bank in a compensation area for bauxite mining with that of an adjacent secondary native forest, both belonging to Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) in Itamarati de Minas, MG. Twenty surface soil samples were collected from an area with 2 years of tall seedling planting (PMA) and 20 samples from the reference ecosystem (RE). The samples were placed in a greenhouse (50% shade) at the research nursery of the Federal University of Viçosa and evaluated for nine months. All germinated individuals were counted and identified. The species were classified according to origin, life form, successional category, and dispersal syndrome. The Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ) and Pielou's evenness index ( $J'$ ) were calculated using FITOPAC 2.1. The rarefaction approach was used to compare species richness between areas. Means of species richness and individual abundance (parametric data) were compared using the t-test ( $p < 0.05$ ). A Venn diagram was used to check the number of species shared between the areas. Non-metric multidimensional scaling (NMDS) was used to analyze the variation in floristic composition. Statistical analyses were performed using R software. In the PMA, 1,404 individuals, 53 species, and 23 botanical families were recorded, with ( $H'$ ) = 2.687 and ( $J'$ ) = 0.671. In the RE area, 1,056 individuals, 33 species, and 22 families were recorded, with ( $H'$ ) = 2.145 and ( $J'$ ) = 0.607. The floristic composition of the soil seed banks was significantly different, possibly due to the different successional stages of the areas. Both areas were dominated by pioneer, herbaceous, and native species. Five tree species were recorded in the RE and seven in the PMA, with three species shared between the areas: *Cecropia glaziovii*, *Solanum mauritianum*, and *Trema micrantha*. The presence of these three zoochoric species suggests that dispersing fauna are contributing to the ecological connectivity of the landscape through seed dispersal. It is expected that as the successional process advances, the differences in floristic composition between the areas will diminish. Considering that forest restoration is a dynamic process, subject to changes such as seedling mortality, invasion of exotic species, among others, continuous monitoring of the area is recommended. It is expected that as the successional process advances, the differences in floristic composition between the areas

will decrease. The planting of tall seedlings and the preservation of forest fragments carried out by the company contribute to the recovery of biodiversity and the sustainability of bauxite mining.

**Keywords:** Biodiversity; Environmental compensation; Tall seedlings; Resilience.

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração de bauxita é uma atividade fundamental para a produção de alumínio (USGS, 2024). No entanto, como qualquer outra atividade pode provocar impactos ambientais, resultantes da remoção da vegetação e das camadas superficiais do solo, o que pode gerar desequilíbrios no ambiente (Banning et al., 2008; Barros et al., 2012; Fengler et al., 2017). Porém, a extração de bauxita se distingue de outros tipos de mineração devido à sua natureza pontual, superficial e temporária, envolvendo a extração em áreas pequenas e subsequentemente recuperadas em sequência, o que possibilita um retorno rápido à atividade produtiva (Komlóssy et al., 2022). Em resposta a esses desafios, as empresas mineradoras implementam programas de restauração e compensação florestal, restaurando ecossistemas florestais que desempenham um papel crucial na conservação da biodiversidade e na promoção da sustentabilidade ambiental (Cosimo et al., 2021; Fonseca et al., 2023).

Diante disso, a restauração florestal é uma ciência relativamente nova, mas que vem nas últimas décadas se tornando cada vez mais robusta e mostrando que é possível transformar uma perturbada em um ecossistema resiliente e que apresente os processos ecológicos necessários à sua sustentabilidade no longo prazo (Martins, 2018a). Portanto, para alcançar esses objetivos, o planejamento, a avaliação e o monitoramento da restauração florestal, são essenciais para orientar as ações de restauração em ambientes de mineração. Comparar diferentes áreas com ecossistemas de referência, verificar a necessidade de receber novas interferências, além de determinar o estágio em que a área se torna autossustentável, vão determinar a trajetória e o sucesso dos processos de restauração ecológica (Martin & Lyons, 2018; Balestrin et al., 2019a; Rodríguez-Uña et al., 2020).

Na avaliação e monitoramento da restauração florestal, os indicadores mais comumente utilizados são de natureza vegetativa como a regeneração natural, a ciclagem de nutrientes, a produção de serapilheira, a abertura de dossel, o banco de sementes do solo e a chuva de sementes (Balestrin et al., 2019b; Silva et al., 2021a; Martins et al., 2021; Fonseca et al., 2024). Esses indicadores apresentam vantagem por ser de fácil quantificação (Martins, 2009). Nesse contexto, o estudo da composição florística, da dinâmica e da diversidade do banco de sementes do solo é um bom indicador para avaliar o estado de conservação e o potencial de restauração dos ecossistemas florestais, visto que, pode fornecer importantes informações, como exemplo, a

presença de espécies invasoras pode influenciar negativamente o processo de sucessão (Martins et al., 2008; Santos et al., 2018a; Silva et al., 2021b).

O banco de sementes do solo é formado por sementes viáveis que estão presentes no solo e na camada de serapilheira. Essas sementes podem germinar imediatamente após a dispersão ou permanecer dormentes aguardando condições favoráveis para a germinação (Yan et al., 2013; Martins et al., 2015). Segundo Calegari et al. (2013) As sementes presentes no solo podem ser classificadas como autóctones, ou seja, originárias das espécies locais, ou como alóctones, quando provierem de áreas adjacentes. A riqueza e a diversidade de sementes do banco de uma área estão ligadas ao histórico de uso da terra (Tucker et al., 2023).

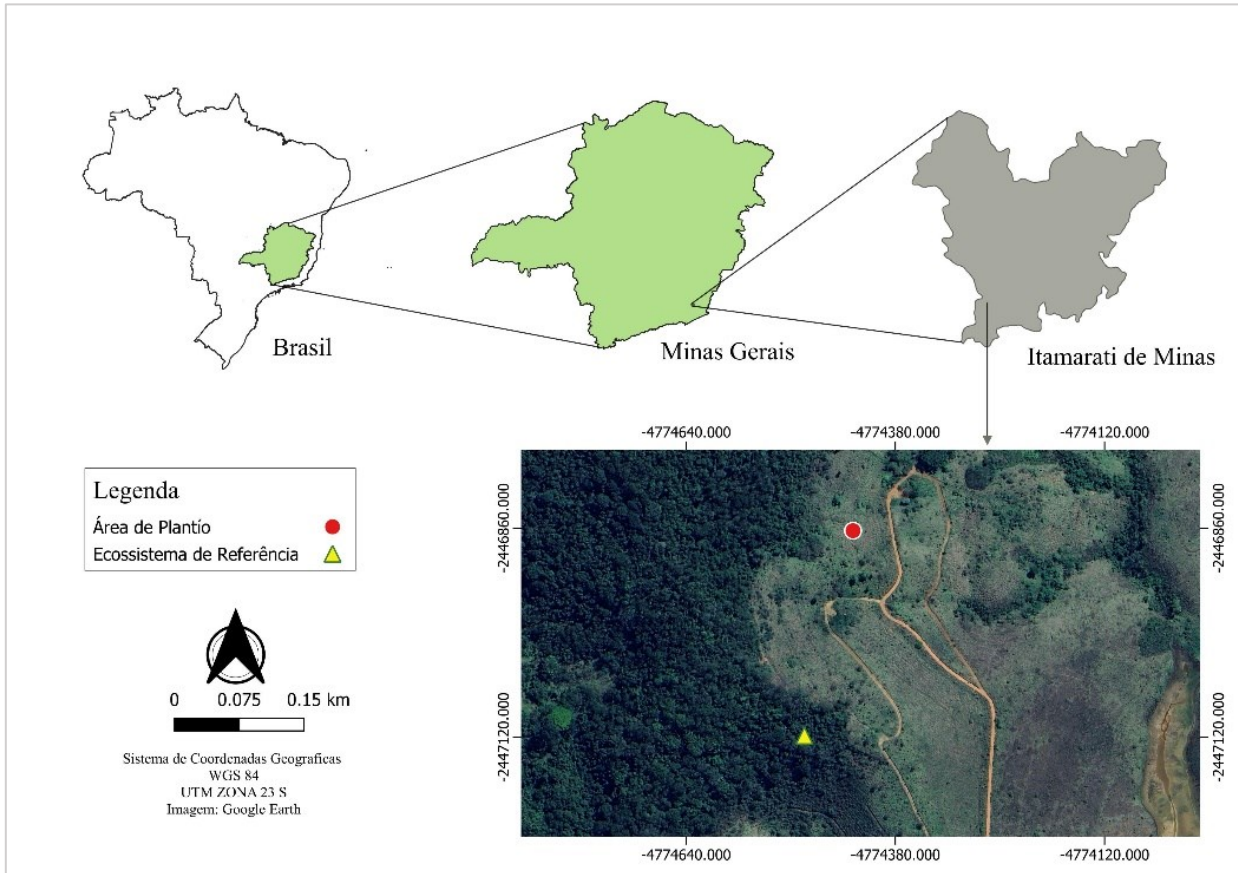
O objetivo deste estudo foi comparar a composição florística do banco de sementes do solo de uma área de compensação à mineração de bauxita, em relação à uma mata nativa secundária adjacente, pertencentes à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em Itamarati de Minas-MG.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Área de estudo**

O estudo foi conduzido em uma área em restauração ecológica, localizada no município de Itamarati, Minas Gerais – Brasil (Figura 12), onde foi feito plantio de mudas altas há aproximadamente 2 anos. Esta área de estudo foi incorporada ao programa de compensação ambiental da empresa Companhia Brasileira de Alumínio – CBA.

**Figura 12.** Localização da área do estudo, no município de Itamarati, MG, com destaque para os dois ambientes analisados.



O município de Itamarati de Minas está situado na Zona da Mata Mineira, no sudeste do Brasil. A vegetação predominante da área é a Floresta Estacional Semidecidual, pertencente ao domínio da Mata Atlântica (IBGE, 2012). Segundo a classificação de Köppen, o clima local é do tipo Cwa, caracterizado como temperado úmido com verões quentes e invernos secos (Álvares et al., 2013). A região apresenta altitudes variando de 200 a 700 metros e um relevo que vai de levemente ondulado a montanhoso. Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, o solo mais comum na área é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Santos et al., 2018b).

## 2.2. Amostragem e condução do experimento

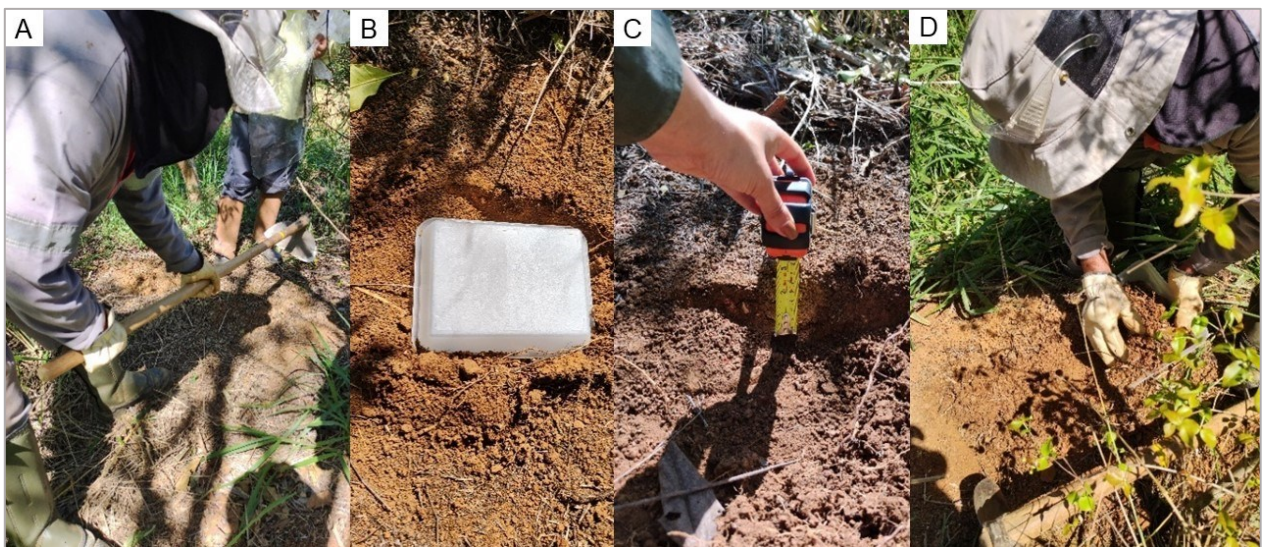
Para amostragem do banco de sementes foram delimitados dois ambientes

**Ecosistema de referência (ER):** fragmento de Floresta Estacional Semidecidual secundária adjacente (300 m aproximadamente de distância do PMA). Ambiente I.

**Plantio de mudas altas (PMA):** Área de compensação ambiental onde foram plantadas mudas de espécies nativas da Mata Atlântica há aproximadamente dois anos e meio. Ambiente II.

Após a definição das duas áreas de estudo, foram coletadas aleatoriamente 20 amostras de solo superficial (5cm de profundidade), totalizando 40 amostras, no mês de setembro. Para a coleta das amostras, foi utilizado um gabarito de PVC com dimensões de 27x20 cm a uma profundidade de 5 cm (Figura 13). A metodologia adotada seguiu os procedimentos comumente aplicados em pesquisas sobre o banco de sementes do solo em Floresta Estacional Semidecidual em Minas Gerais (Balestrin et al., 2019b; Martins et al., 2021; Fonseca et al., 2024).

**Figura 13.** Coleta do banco de sementes do solo em Itamarati, MG. Limpeza da área e retirada da serapilheira superficial existente (A); Gabarito de 27 x 20 cm utilizado para dimensionamento (B); Definição da profundidade do solo a coletar as amostras (C); Retirada das amostras de banco de sementes do solo (D).



As 40 amostras coletadas foram acondicionadas em sacos plásticos transparentes, identificadas e transportadas para o Laboratório de Restauração Florestal (LARF). No laboratório as amostras foram peneiradas em peneira grossa (malha 4 mm) para remover fragmentos de plantas,

folhas, flores, raízes. Em seguida foi realizada uma inspeção visual cuidadosa para verificar que não foram filtradas sementes grandes, conforme metodologia de The Heerdt et al. (1996) e Fonseca et al., (2024).

As amostras foram transportadas para o Viveiro de Pesquisa da Universidade Federal de Viçosa, onde foram transferidas para bandejas plásticas com dimensões de 27 x 20,5 x 6 cm, dotadas de furos para prevenir o acúmulo de água. Essas bandejas foram colocadas sobre bancadas na casa de vegetação, equipada com tela de sombreamento de 50% (Figura 14). Para minimizar o risco de contaminação, foram posicionadas bandejas preenchidas com areia grossa esterilizada nas bancadas.

**Figura 14.** Bandejas com amostras do solo do banco de sementes na casa de vegetação do Laboratório de Restauração Florestal, viveiro UFV.



As amostras permaneceram sob irrigação automatizada por aspersão durante aproximadamente 9 meses. Após sete meses do início do experimento, as amostras foram revolvidas para facilitar a germinação de sementes que pudessem estar enterradas no fundo da bandeja e deixadas mais dois meses para inspecionar e descartar germinação de novas espécies após o período de avaliação.

### 2.3. Avaliação do banco de sementes

Os bancos de sementes foram avaliados a cada duas semanas, registrando e identificando todas as plântulas emergentes por espécie. Para essa análise, foi utilizado o método de emergência de plântulas, conforme descrito por ter Heerdt et al. (1996). A classificação taxonômica das espécies foi realizada conforme o sistema *Angiosperm Phylogeny Group IV* (APG IV, 2016) e a nomenclatura das espécies foi verificada usando a Lista de Espécies da Flora do Brasil (<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>) e a base de dados do World Flora Online (WFO, 2024).

As espécies foram classificadas com base em sua origem (nativa ou exótica) e forma de vida (arbórea, arbustiva, herbácea ou trepadeira) (Reflora, 2024). Além disso, foram categorizadas segundo sua classe sucessional (pioneira, secundária inicial ou secundária tardia) (Gandolfi et al., 1995) e síndrome de dispersão (autocórica, anemocórica ou zoocórica) (Van Der Pijl, 1982).

### 2.4. Análise de dados

Os parâmetros fitossociológicos como densidade relativa e frequência relativa e os índices de diversidade (Shannon-Wiener e Equabilidade de Pielou) foram calculados utilizando o programa FITOPAC 2.1 (Shepherd, 2010). O diagrama de Venn foi desenhado usando a função “*venn.diagram*” do pacote “*VennDiagram*” (Chen & Boutros, 2011) para verificar o número de espécies compartilhadas e exclusivas nos ambientes PMA e ER.

A abordagem de rarefação foi utilizada para comparar a riqueza de espécies entre as áreas amostrais (PMA e ER). As curvas de rarefação e extrapolação foram estimadas baseadas no número de parcelas com o primeiro número de Hill,  $q = 0$  (Chao et al., 2014).

Uma matriz de dados de presença (1) e ausência (0) foi utilizada para fazer as extrapolações (Colwell et al., 2012). A rarefação foi estimada com a média de 100 repetições de *bootstrapping* para estimar os intervalos de confiança de 95%. Quando os intervalos de confiança de 95% não se sobrepõem, significa que os números de espécies diferem significativamente em  $p < 0,05$  (Colwell et al., 2012). Essas estimativas foram obtidas usando o pacote “*iNEXT*” (Chao et al., 2014) do software estatístico R (versão 4.4.0; R Core Team, 2024).

Para testar a distribuição normal da riqueza de espécies e abundância de indivíduos, utilizou-se o teste de Shapiro–Wilk e o gráfico Q–Q, e a homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo teste de Bartlett (Crawley, 2013). As médias de riqueza de espécies e abundância de indivíduos (dados paramétricos) foram comparadas através do Teste-t adotando um nível de significância de  $p < 0,05$ . Os gráficos foram desenhados usando as funções 'geom\_violin' e 'geom\_boxplot' do pacote "ggplot2" (Wickham 2016), no software R (versão 4.4.0; R Core Team, 2024).

O escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) foi usado para analisar a variação na composição florística dos bancos de sementes do solo entre os ambientes (PMA e ER), usando a função "metaMDS" e a dissimilaridade euclidiana baseada nos dados de presença e ausência (Oksanen et al., 2022). Além disso, uma análise de variância permutacional multivariada (PERMANOVA, 999 permutações) foi realizada para testar as diferenças na composição de espécies, usando a função "adonis" disponível no pacote "*Vegan*" (versão 2.6.4; Oksanen et al. 2022).

Para verificar a distribuição das espécies e dos indivíduos em termos percentuais entre grupos funcionais: origem, forma de vida, categoria sucessional, e a síndrome de dispersão foram construídos gráficos de barras (barplots). Os gráficos foram desenhados usando as funções 'geom\_bar' do pacote "ggplot2" (Wickham 2016) no software R (versão 4.4.0; R Core Team, 2024).

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Composição florística, fitossociologia e diversidade do banco de semente do solo**

Durante o período de nove meses de avaliação dos bancos de sementes do solo, foram amostrados 2.460 indivíduos de 59 espécies e 27 famílias botânicas nas duas áreas de estudo. Todos os indivíduos foram identificados até o nível de espécie. Nos ambientes analisados, predominou a presença de espécies nativas, do grupo ecológico das pioneiras, com hábitos herbáceos e dispersão anemocórica. Nas bandejas de controle, não foi observada a emergência de plântulas, indicando a ausência de contaminação por sementes de fontes externas. A florística e os grupos funcionais dos dois bancos de sementes do solo estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Florística e grupos funcionais das espécies identificadas no banco de sementes do solo do Ecossistema de Referência (ER) e do Plantio de mudas altas (PMA), no município de Itamarati, MG, Brasil.

Família botânica/ Espécie	ER	Ni	DeRel	FrRel	PMA	Ni	DeRel	FrRel	Origem	Forma de vida	Categoria Sucessional	Síndrome Dispersão
<b>Acanthaceae</b>												
<i>Ruellia makoyana</i> Jacob-Makoy ex Closon	x	1	0.09	0.63					Nat.	Herb	Nc	Aut
<b>Aristolochiaceae</b>												
<i>Aristolochia labiata</i> Willd.	x	1	0.09	0.63	x	1	0.07	0.37	Nat.	Trep	P	Ane
<b>Asteraceae</b>												
<i>Emilia fosbergii</i> Nicolson					x	3	0.21	1.12	Exo.	Herb	P	Ane
<i>Erechtites hieracifolius</i> (L.) Raf. ex DC.					x	2	0.14	0.75	Nat.	Herb	P	Ane
<i>Gamochaeta pensylvanica</i> (Willd.) Cabrera					x	1	0.07	0.37	Nat.	Herb	Si	Ane
<i>Gamochaeta purpurea</i> (L.) Cabrera	x	35	3.31	3.8	x	76	5.41	3.73	Nat.	Herb	Si	Ane
<i>Lepidaploa remotiflora</i> (Rich.) H.Rob.					x	16	1.14	1.87	Nat.	Arbu	P	Ane
<i>Sigesbeckia orientalis</i> L.					x	10	0.71	2.24	Exo.	Herb	Nc	Ane
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	x	2	0.19	1.27	x	11	0.78	2.61	Nat.	Herb	P	Ane
<i>Trichogonia salviifolia</i> Gardner					x	1	0.07	0.37	Nat.	Arbu	Nc	Ane
<i>Vernonanthura divaricata</i> (Spreng.) H.Rob.					x	1	0.07	0.37	Nat.	Arbo	P	Ane
<i>Vernonanthura polyanthes</i> (Sprengel) Vega & Dematteis					x	14	1	3.36	Nat.	Arbu	P	Ane
<i>Youngia japonica</i> (L.) DC.	x	1	0.09	0.63	x	2	0.14	0.75	Exo.	Herb	P	Ane
<b>Cannabaceae</b>												
<i>Trema micranthum</i> (L.) Blume	x	1	0.09	0.63	x	10	0.71	2.24	Nat.	Arbo	P	Zoo
<b>Commelinaceae</b>												
<i>Commelina benghalensis</i> L.	x	164	15.53	9.49	x	5	0.36	0.75	Exo.	Herb	P	Aut
<b>Convolvulaceae</b>												
<i>Ipomoea nil</i> (L.) Roth					x	1	0.07	0.37	Nat.	Trep	P	Aut
<i>Ipomoea purpurea</i> (L.) Roth	x	1	0.09	0.63					Nat.	Trep	P	Aut
<b>Cyperaceae</b>												
<i>Fimbristylis dichotoma</i> (L.) Vahl	x	12	1.14	3.16	x	28	1.99	4.48	Nat.	Herb	P	Aut
<i>Scleria gaertneri</i> Raddi	x	17	1.61	3.8	x	3	0.21	0.75	Nat.	Herb	Nc	Aut
<b>Euphorbiaceae</b>												
<i>Croton glandulosus</i> L.					x	1	0.07	0.37	Nat.	Herb	P	Zoo
<i>Croton urucurana</i> Baill.					x	18	1.28	2.99	Nat.	Arbo	P	Zoo

Familia botânica/ Espécie	ER	Ni	DeRel	FrRel	PMA	Ni	DeRel	FrRel	Origem	Forma de vida	Categoria Sucessional	Síndrome Dispersão
<i>Euphorbia hirta</i> L.	x	1	0.09	0.63	x	16	1.14	1.49	Nat.	Herb	P	Aut
<i>Euphorbia hyssopifolia</i> L.	x	2	0.19	1.27	x	5	0.36	0.75	Nat.	Herb	P	Aut
<b>Fabaceae</b>												
<i>Macroptilium lathyroides</i> (L.) Urb.					x	1	0.07	0.37	Nat.	Herb	P	Aut
<i>Mimosa pudica</i> L.					x	1	0.07	0.37	Nat.	Herb	P	Aut
<i>Senna spectabilis</i> (DC.) H.S.Irwin & Barneby					x	2	0.14	0.37	Nat.	Arbo	P	Aut
<b>Hypericaceae</b>												
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	x	4	0.38	1.9					Nat.	Arbu	P	Zoo
<b>Hypoxidaceae</b>												
<i>Hypoxis decumbens</i> L.	x	1	0.09	0.63	x	8	0.57	1.49	Nat.	Herb	Nc	Aut
<b>Lamiaceae</b>												
<i>Hyptis atrorubens</i> Poit.	x	387	36.65	9.49	x	91	6.48	5.6	Nat.	Herb	P	Aut
<i>Mesosphaerum suaveolens</i> (L.) Kuntze					x	2	0.14	0.37	Nat.	Arbu	P	Zoo
<i>Salvia officinalis</i> L.					x	1	0.07	0.37	Exo.	Herb	Nc	Aut
<b>Malvaceae</b>												
<i>Luehea grandiflora</i> Mart.	x	6	0.57	2.53					Nat.	Arbo	Si	Ane
<i>Sida acuta</i> Burm.f.	x	35	3.31	5.06	x	2	0.14	0.75	Nat.	Arbu	P	Aut
<i>Sida glaziovii</i> K.Schum.	x	1	0.09	0.63	x	6	0.43	1.12	Nat.	Arbu	Nc	Aut
<i>Sida rhombifolia</i> L.					x	76	5.41	2.99	Nat.	Herb	P	Ane
<i>Sidastrum micranthum</i> (A.St.-Hil.) Fryxell					x	13	0.93	0.75	Nat.	Arbu	P	Aut
<i>Triumfetta bartramia</i> L.					x	3	0.21	0.75	Nat.	Arbu	P	Zoo
<i>Triumfetta semitriloba</i> Jacq.	x	1	0.09	0.63	x	24	1.71	2.24	Nat.	Arbu	P	Zoo
<b>Melastomataceae</b>												
<i>Clidemia hirta</i> (L.) D.Don	x	172	16.29	12.03	x	72	5.13	5.97	Nat.	Arbu	P	Zoo
<b>Moraceae</b>												
<i>Ficus guaranitica</i> Chodat					x	3	0.21	0.75	Nat.	Arbo	Si	Zoo
<b>Oxalidaceae</b>												
<i>Oxalis corniculata</i> L.	x	42	3.98	5.7	x	329	23.43	7.46	Exo.	Herb	P	Aut
<b>Phyllantaceae</b>												
<i>Phyllanthus orbiculatus</i> Rich.					x	5	0.36	1.12	Nat.	Herb	P	Zoo
<i>Phyllanthus tenellus</i> Roxb.	x	14	1.33	2.53	x	14	1	1.87	Nat.	Herb	Si	Zoo
<b>Piperaceae</b>												
<i>Piper aduncum</i> L.	x	2	0.19	0.63	x	16	1.14	2.24	Nat.	Arbu	P	Zoo

Familia botânica/ Espécie	ER	Ni	DeRel	FrRel	PMA	Ni	DeRel	FrRel	Origem	Forma de vida	Categoria Sucessional	Síndrome Dispersão
<b>Plantaginaceae</b>												
<i>Scoparia dulcis</i> L.	x	71	6.72	6.96	x	55	3.92	5.6	Nat.	Herb	P	Ane
<b>Poaceae</b>												
<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.	x	17	1.61	3.8	x	3	0.21	0.37	Exo.	Herb	P	Ane
<i>Urochloa decumbens</i> (Stapf) R.D.Webster	x	4	0.38	1.9	x	339	24.15	7.46	Exo.	Herb	P	Ane
<b>Polygalaceae</b>												
<i>Asemeia violacea</i> (Aubl.) J.F.B.Pastore & J.R.Abbott					x	3	0.21	0.75	Nat.	Herb	Nc	Zoo
<b>Rubiaceae</b>												
<i>Borreria latifolia</i> (Aubl.) K.Schum.	x	12	1.14	4.43	x	1	0.07	0.37	Nat.	Herb	Si	Aut
<i>Borreria verticillata</i> (L.) G.Mey.	x	3	0.28	1.27					Nat.	Herb	P	Aut
<i>Richardia brasiliensis</i> Gomes					x	29	2.07	3.73	Nat.	Herb	P	Ane
<i>Sabicea villosa</i> Willd. ex Schult.	x	1	0.09	0.63	x	1	0.07	0.37	Nat.	Arbu	Nc	Zoo
<b>Sapindaceae</b>												
<i>Matayba elaeagnoides</i> Radlk.	x	1	0.09	0.63					Nat.	Arbo	St	Zoo
<b>Solanaceae</b>												
<i>Nicandra physalodes</i> (L.) Gaertn.	x	1	0.09	0.63	x	18	1.28	3.73	Exo.	Arbu	P	Aut
<i>Solanum americanum</i> Mill.					x	3	0.21	0.37	Nat.	Herb	P	Zoo
<i>Solanum mauritianum</i> Scop.	x	2	0.19	1.27	x	8	0.57	2.24	Nat.	Arbo	P	Zoo
<b>Urticaceae</b>												
<i>Cecropia glaziovii</i> Sneathl.	x	41	3.88	10.13	x	43	3.06	3.73	Nat.	Arbo	P	Zoo
<b>Verbenaceae</b>												
<i>Lantana camara</i> L.					x	6	0.43	1.87	Exo.	Arbu	P	Zoo
<i>Stachytarpheta cayennensis</i> (Rich.) Vahl					x	1	0.07	0.37	Nat.	Herb	P	Ane
<b>Total</b>		<b>1056</b>	<b>100</b>	<b>100</b>		<b>1404</b>	<b>100</b>	<b>100</b>				

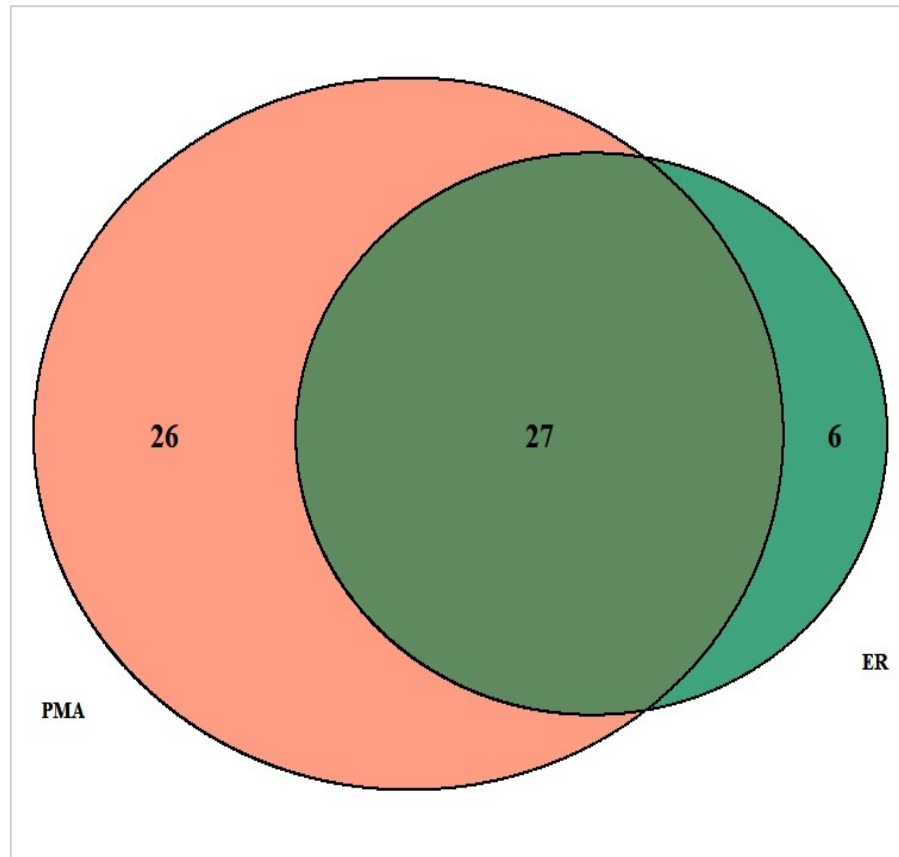
Em que: ER: Ecossistema de Referência; PMA: Plantio de mudas altas; DeRel: Densidade; reativa, FrRel: Frequência Relativa; Origem (Nat: Nativa, Exo: Exótica); Forma de vida (Arbo: Arbórea, Arbu: Arbustiva, Herb: Herbácea, Trep: Trepadeira); Categoria sucessional (P: Pioneira, Si: Secundária inicial, St: Secundária tardia, Nc: Não classificada); Síndrome de dispersão (Ane: anemocórica, Aut: autocórica, Zoo: zoocórica), x: Indica a presença da espécie no banco de sementes do solo.

No banco de sementes do solo do ecossistema de referência (ER), foram contabilizados 1.056 indivíduos, distribuídos em 33 espécies e 22 famílias botânicas, resultando em uma densidade estimada de 997 propágulos por m<sup>2</sup>. Os índices avaliados mostraram um índice de Shannon-Weaver (H') de 2,212 e uma Equabilidade de Pielou (J') de 0,607. Doze das espécies identificadas no banco de sementes apresentavam apenas um indivíduo cada. Em termos de abundância, destacaram-se as espécies: *Hyptis atrorubens* Poit. representando 36.65% dos indivíduos, *Clidemia hirta* (L.) D.Don (16.29%), *Commelina benghalensis* L.(15.63%), *Scoparia dulcis* L.(6.72%) e *Oxalis corniculata* L.(3.98%). Neste ambiente, Melastomataceae, Urticaceae, Commelinaceae, Lamiaceae e Malvaceae, foram as famílias botânicas que tiveram maior destaque em relação à frequência.

No banco de sementes do solo no ambiente de plantio de mudas altas (PMA), foram registrados 1.404 indivíduos, pertencentes a 53 espécies e 23 famílias botânicas, resultando em uma densidade estimada de 1.300 propágulos por m<sup>2</sup>. O índice de Shannon-Weaver foi de 2,665, e a Equabilidade de Pielou alcançou 0,671. Doze espécies foram recrutadas com apenas um indivíduo igual ao verificado em ER. Em termos de abundância, destacaram-se as espécies: *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster (24.15%), *Oxalis corniculata* L. (23.43%), *Hyptis atrorubens* Poit. (6.48%), *Sida rhombifolia* L. e *Gamochaeta purpurea* (L.) Cabrera (5.41%). As famílias botânicas com destaque em frequência foram: Asteraceae, Oxalidaceae, Poaceae, Melastomataceae e Lamiaceae.

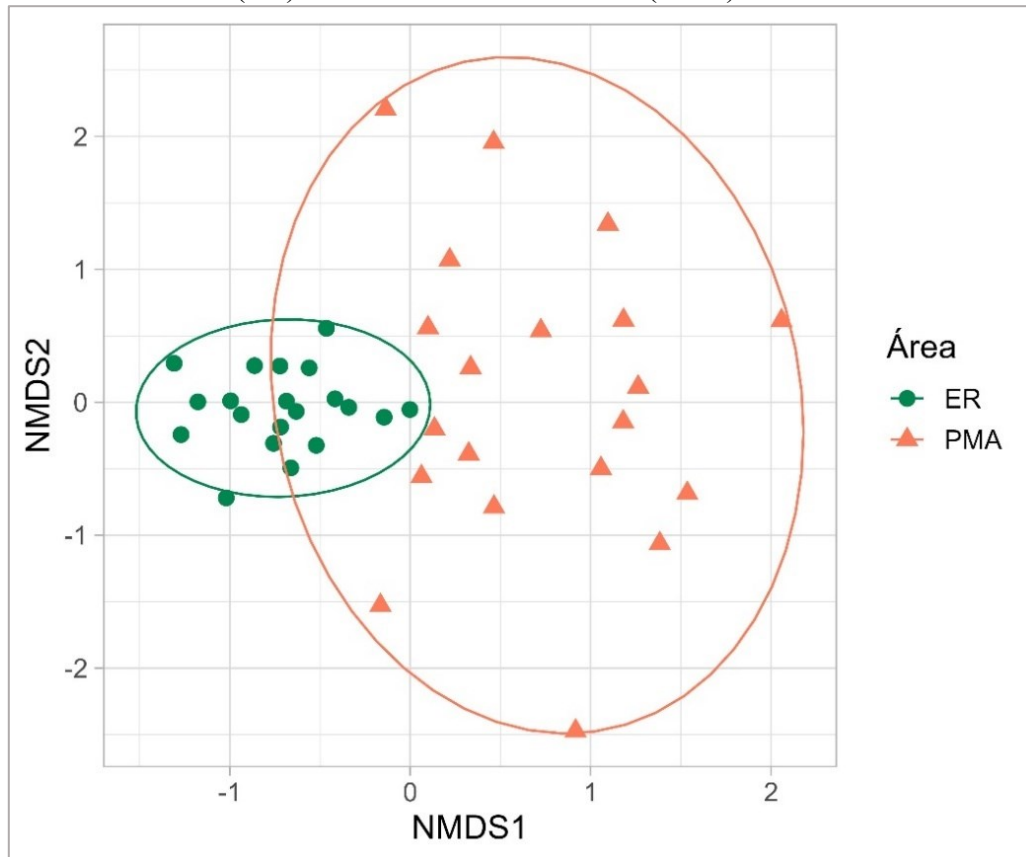
Em relação as espécies compartilhadas entre os ambientes (ER e PMA), foram identificadas 27 espécies comuns. O ER apresentou 6 espécies exclusivas, enquanto o banco de sementes do solo da área PMA revelou 26 espécies exclusivas (Figura 15).

**Figura 15.** Diagrama de Venn apresentando o compartilhamento de espécies entre os ambientes e o número de suas respectivas espécies exclusivas. Em que: ER – Ecossistema de Referência; PMA – Plantio de mudas altas.



Ao comparar a composição florística dos bancos de sementes do solo nos dois ambientes, foi identificada uma diferença significativa (Stress=0,18; Permanova,  $F_{1,38}=6,781$ ;  $p$ -valor<0,001), resultando na formação de dois grupos distintos no escalonamento multidimensional não métrico (NMDS) (Figura 16).

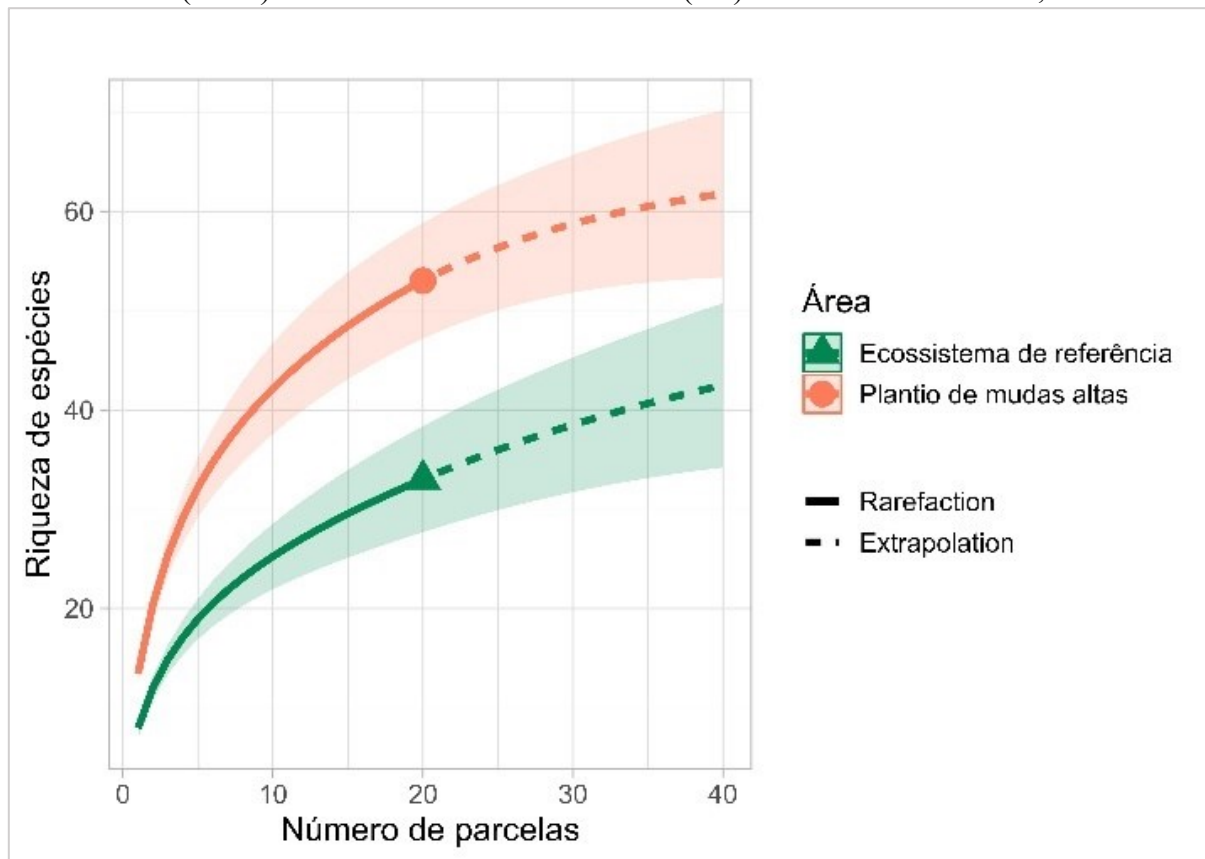
**Figura 16.** Escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) da composição florística de espécies, baseado em dados de presença e ausência, entre os bancos de sementes do solo do Ecossistema de referência (ER) e o Plantio de mudas altas (PMA) em Itamarati de Minas, MG.



### 3.2. Riqueza e abundância do banco de semente do solo

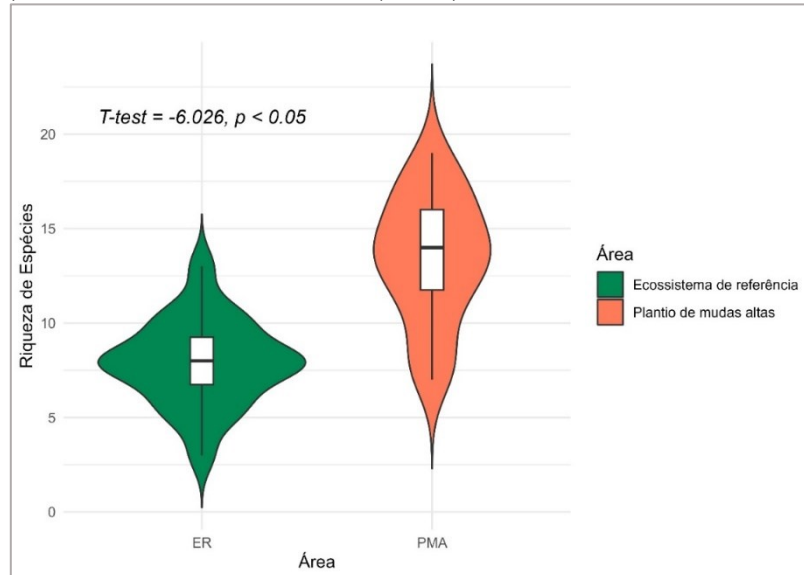
A riqueza de espécies observada na amostragem foi de 33 espécies para o Ecossistema de Referência (ER) e de 53 espécies para o Plantio de Mudas Altas (PMA). Os valores interpolados mostraram uma diferença estatisticamente significativa na riqueza de espécies entre os bancos de sementes do solo dos ambientes PMA e ER (Figura 17).

**Figura 17.** Curvas de rarefação (linha contínua) e extrapolação (linha tracejada) da riqueza de espécies do banco de sementes do solo de acordo com o número de parcelas amostradas no Plantio de Mudanças Altas (PMA) e no Ecossistema de referência (ER) em Itamarati de Minas, MG.



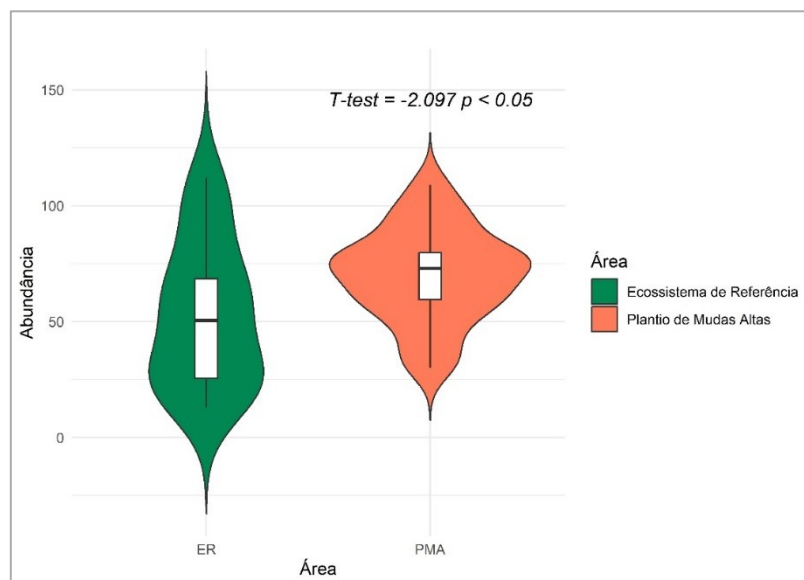
A riqueza de espécies média foi estatisticamente diferente entre os dois ambientes (T-test = -0,026;  $p < 0,05$ ), com o banco de sementes do solo do plantio de mudas (PMA) apresentando média de 13,4 espécies, enquanto no ecossistema de referência (ER) apresentou média de 7,9 espécies por parcela (Figura 18).

**Figura 18.** Diferenças na riqueza de espécies média entre os bancos de sementes do Ecossistema de referência (ER) e o Plantio de mudas altas (PMA) em Itamarati de minas, MG.



A abundância de indivíduos média também foi estatisticamente superior no banco de sementes do solo do PMA com média de 70.2 indivíduos por parcela, enquanto o Ecossistema de referência apresentou média de 52,8 ( $T\text{-test} = -2,097; p < 0,05$ ) (Figura 19).

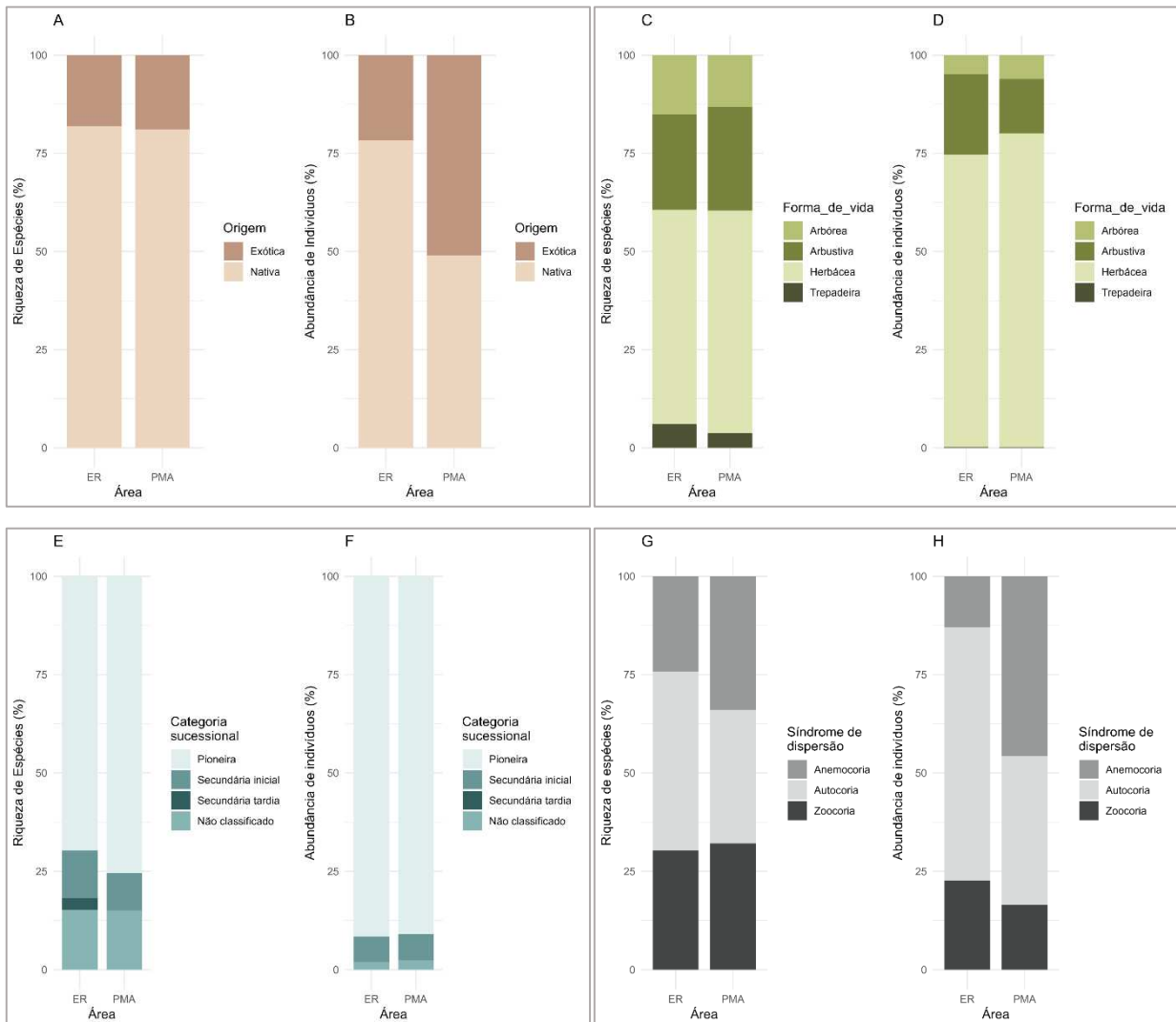
**Figura 19.** Diferenças na abundância de indivíduos por parcela entre os bancos de sementes do Ecossistema de referência (ER) e o Plantio de mudas altas (PMA) em Itamarati de minas, MG.



### 3.3. Grupos funcionais do banco de semente do solo

Ao classificar as espécies identificadas nos bancos de sementes do solo avaliados nos dois ambientes (ER e PMA) segundo sua origem (Figura 20A e B), forma de vida (Figura 20 C e D), categoria sucessional (Figura 20 E e F) e síndrome de dispersão (Figura 20 G e H), constatou-se predominância de espécies nativas, com hábitos herbáceos, pertencentes ao grupo ecológico das pioneiras, com dispersão anemocórica.. Esse padrão foi observado tanto na porcentagem de riqueza de espécies quanto na porcentagem de abundância de indivíduos.

**Figura 20.** Distribuição da riqueza de espécies e abundância de indivíduos, em relação a origem (A e B), Forma de vida (C e D), Categoria sucessional (E e F) e síndrome de dispersão (G e H), nos bancos de sementes do solo coletados nos dois ambientes, ER- Ecossistema de referência, PMA- Plantio de mudas altas



### 3.3.1. *Ambiente I: Ecosistema de Referência (ER)*

Em relação à origem das espécies identificadas no banco de sementes do solo do ER, 81,82% foram classificadas como nativas, enquanto 18,18% como exóticas (Figura 20A). Em termos de abundância de indivíduos, 78,31% nativos e 21,69% exóticos (Figura 20B). Quanto à forma de vida das espécies, 54,55% das espécies identificadas foram herbáceas, seguidas por 24,24% de arbustivas, 15,15% de arbóreas e 6,06% de trepadeiras (Figura 20C). De forma similar, houve um predomínio de indivíduos com características herbáceas (74,43%), enquanto os demais indivíduos corresponderam aos grupos de arbustivos (20,55%), arbóreos (4,83%) e trepadeiras (0,19%) (Figura 20D).

Quanto à categoria sucessional das espécies, 69,70% são pioneiras, 12,12% foram classificadas como secundárias iniciais, 3,03% como secundárias tardias e 15,15% não foram classificadas em nenhuma categoria sucessional. (Figura 20E). Em relação ao total de indivíduos, 91,57% foram categorizados como pioneiros, 6,34% como secundários iniciais, 0,09% como secundários tardios e 1,99% sem classificação (Figura 20F). Considerando a síndrome de dispersão, as espécies autocóricas representaram 45,45%, as zoocóricas 30,30% e as anemocóricas 24,24% (Figura 20G). Em relação à abundância, também houve predomínio de indivíduos autocóricos, representando 64,39%, seguidos pelos zoocóricos com 22,63% e anemocóricos com 12,97% (Figura 20H).

### 3.3.2. *Ambiente II: Plantio de mudas altas (PMA)*

No banco de sementes do solo do PMA, foram identificadas 81,13% das espécies como nativas e 18,87% como exóticas (Figura 20A). Em contraste, em relação ao total de indivíduos, 51% pertencem à categoria exótica e 49% à categoria nativa (Figura 20B). A maior abundância de indivíduos exóticos está relacionada ao predomínio de *Urochloa decumbens* com 339 indivíduos e *Oxalis corniculata* (329). Quanto à forma de vida das espécies identificadas, houve predomínio de espécies com forma de vida herbácea (56,60%), seguidas por arbustivas (26,42%), arbóreas (13,21%) e trepadeiras (3,77%) (Figura 20C). Em relação aos indivíduos, também se destacou a forma de vida herbácea, com 79,99% do total, enquanto os demais foram classificados como arbustos (13,82%), árvores (6,05%) e trepadeiras (0,14%) (Figura 20D).

No que se refere à categoria sucessional, as espécies categorizadas como pioneiras se destacaram com 75,47%, enquanto as secundárias iniciais representaram 9,43% e 15,09% não foram classificadas (Figura 20E). Nesta área não foram identificadas espécies secundárias tardias. De forma semelhante, em relação ao total de indivíduos, 90,88% foram classificados na categoria pioneira, 6,77% como secundárias iniciais, e apenas 2,35% dos indivíduos não tiveram classificação (Figura 20F). De acordo com a síndrome de dispersão, as espécies foram classificadas em proporções semelhantes nas três categorias: anemocóricas (33,96%), autocóricas (33,96%) e zoocóricas (32,08%) (Figura 20G). Em relação aos indivíduos, houve maior variação na classificação, com a categoria anemocórica representando 45,66% dos indivíduos, a categoria autocórica 37,82% e a categoria zoocórica 16,52% dos indivíduos (Figura 20H).

#### 4. DISCUSSÃO

A riqueza de espécies identificadas nos bancos de sementes do solo neste estudo foi superior a outros estudos anteriores na Mata Atlântica brasileira (Silva et al., 2019; Martins et al., 2021; Arêas et al., 2022; Brumatti et al., 2023), mas foi inferior à registrada por Calegari et al. (2013), Neto et al. (2014) e Neto et al. (2016). Os índices de Shannon e a equabilidade de Pielou indicaram valores médios de diversidade e ausência de dominância ecológica nos dois bancos de sementes analisados, alinhando-se com os resultados de outras pesquisas sobre Florestas Estacionais Semidecíduais (Balestrin et al., 2019b; Martins et al., 2021; Fonseca et al., 2024). Áreas em estágios iniciais de sucessão geralmente mostram bancos de sementes do solo com altas densidades de sementes, que tendem a diminuir conforme a sucessão avança (Martins et al., 2024). A densidade de propágulos registrada no banco de sementes do solo do PMA é maior do que a densidade média reportada por Martins et al. (2021) para áreas em processo de restauração florestal através do plantio de mudas na Zona da Mata, no Sudeste de Minas Gerais. Esses resultados refletem a teoria da sucessão ecológica, onde há maior disponibilidade de sementes nos estágios iniciais devido à contribuição das espécies pioneiras na formação de um banco de sementes do solo persistente (Benitez-Malvido, 2023).

Embora os bancos de sementes do solo (PMA e ER) apresentaram composições florísticas diferentes, o número de espécies compartilhadas nos bancos de sementes do solo pode ser um indicativo de que a proximidade geográfica entre as áreas está contribuindo para a conectividade

ecológica e no aumento do potencial de recuperação do ecossistema (Silva et al.,2019; Martins et al.,2021).

Considerando a origem das espécies, as nativas apresentaram maior riqueza nos dois bancos de sementes do solo. No entanto, em termos de abundância de indivíduos, o banco de sementes do solo do PMA apresentou valores elevados de propágulos de origem exótica, com espécies como *Urochloa decumbens* e *Oxalis corniculata* representando o maior número de indivíduos germinados. A presença significativa de *U. decumbens* decorre do fato de que a área estava ocupada por pastagem dessa espécie, antes da restauração florestal, e destaca a necessidade de monitoramento constante, a fim de controlar possíveis distúrbios que possam prejudicar o desenvolvimento das mudas. As espécies exóticas invasoras como *U. decumbens* comprometer a trajetória sucessional dos processos de restauração ecológica (Thomas et al., 2018, Costa et al., 2020; Martins et al.,2021), contudo, espera-se que com o aumento do sombreamento pelas mudas altas, as sementes de *U. decumbens* não consigam germinar e desapareçam do banco de sementes do solo com o tempo.

O banco de sementes do solo de PMA e ER apresentou maior densidade e riqueza de espécies herbáceas. A predominância da forma de vida herbácea é uma característica comum em estudos de banco de sementes do solo em regiões tropicais (Balestrin et al., 2019b, Costa et al., 2020, Silva et al., 2021b; Fonseca et al., 2024) Esse resultado sugere que a prevalência das espécies herbáceas pode ser atribuída ao ciclo de vida curto, à alta produção de sementes e ao histórico de uso agrícola da área, como pastagem, entre outros fatores (Balestrin et al., 2019b; Adjalla et al., 2022; Fonseca et al., 2024). Geralmente, as espécies herbáceas são as primeiras a colonizar as áreas perturbadas, devido aos eficientes mecanismos de dispersão e facilitadas pela dormência facultativa das sementes, o que as torna especialmente adaptadas a esses ambientes (Adjalla et al., 2022). Tendo em vista que estas espécies geralmente apresentam baixas exigências nutricionais, conseguem se adaptar bem às condições iniciais do solo. A presença de espécies herbáceas nas fases iniciais dos processos de restauração desempenha um papel fundamental no aumento da cobertura vegetal, na diminuição da erosão, na melhoria do microclima local e na retenção de água, auxiliando para a estabilização do solo (Martins et al., 2008; Calegari et al., 2013, Martins et al., 2021). À medida que a sucessão ecológica avança, a densidade dessas espécies herbáceas tende a

diminuir, favorecendo o desenvolvimento de espécies de outras formas de vida, tais como arbustivas, arbóreas, epífitas, entre outros (Silva et al., 2019; Fonseca et al., 2024).

Cabe ressaltar que, embora o número de espécies e indivíduos arbóreos seja menor em comparação com a categoria herbácea, a presença de espécies arbóreas como *Cecropia glaziovii*, *Solanum mauritianum* e *Trema micranthum* nos bancos de sementes do solo tanto do PMA quanto do ER, constitui um bom indicador. (Martins et al., 2018b; Alves, 2023). Essas espécies têm grande importância ecológica, principalmente no restabelecimento das relações funcionais entre fauna e flora associadas a dispersão de sementes zoocóricas (Trolliet et al., 2017). A dispersão de sementes pela fauna facilita a regeneração natural e a manutenção da diversidade biológica, contribuindo para a resiliência e sustentabilidade dos ambientes restaurados (Corlett, 2017). Portanto, a presença dessas espécies arbóreas reflete a saúde dos bancos de sementes e desempenha um papel fundamental na restauração florestal.

A predominância de espécies e indivíduos do grupo ecológico pioneiro nos dois bancos de sementes do solo analisados reflete uma característica típica das florestas tropicais (Weerasinghe et al., 2018; Martins et al., 2021; Benitez-Malvido, 2023; Fonseca et al., 2024). O banco de sementes dessas florestas é composto principalmente por espécies pioneiras exigentes em luz, responsáveis pelas primeiras etapas da regeneração natural (Bechara et al., 2020). Essa predominância reforça o potencial de recuperação da vegetação após perturbações, sendo atribuída à capacidade dessas espécies de formar um banco persistente no solo. Isso se deve à longa viabilidade das sementes, alta produção e mecanismos de dispersão eficientes. (Balestrin et al., 2019b; Vandvik et al., 2015) Além disso, as espécies pioneiras são conhecidas por seu rápido crescimento sob plena exposição solar, tornando-se excelentes indicadores de resiliência frente a perturbações naturais ou antrópicas (Martins et al., 2021). Adicionalmente, a presença de espécies arbóreas do grupo ecológico secundária inicial, como *Ficus guaranítica* no banco de semente do solo do PMA, é um bom indicador da chegada de propágulos de espécies zoocóricas proveniente dos fragmentos florestais adjacentes que podem facilitar o avanço dos processos sucessionais na área.

Considerando a síndrome de dispersão, o predomínio da categoria autocórica em ER está associado à forte contribuição das espécies *Hyptis atrorubens* (387 indivíduos) e *Commelina benghalensis* (164). Estas espécies são frequentemente encontradas em áreas de pastagem e

contribuem na manutenção de um banco de semente do solo persistente (Mafra et al., 2020; Souza et al., 2020). Em contraste, no PMA, a maior abundância de indivíduos foi encontrada na categoria anemocórica, devido à alta presença de *U. decumbens*, com 339 indivíduos, representando 24,15% dos indivíduos germinados nesta área. Além da alta produção de semente, *U. decumbens* apresenta sementes leve, que são facilmente dispersas pelo vento (Dantas-Junior et al., 2018; Xavier et al., 2021) A análise da riqueza de espécies nas categorias de síndrome de dispersão em PMA revelou padrões similares, o que indica uma dinâmica equilibrada entre as espécies autocóricas, anemocóricas e zoocóricas.

## 5. CONCLUSÕES

Os bancos de sementes do solo da área em restauração compensatória por meio do plantio de mudas altas (PMA) e da floresta secundária adjacente como ecossistema de referência (ER) apresentaram composições florísticas distintas. Este resultado está associado principalmente aos diferentes estágios sucessionais das áreas. Quanto aos grupos funcionais dos bancos de sementes do solo foram observadas características comuns, destacando-se pela predominância de espécies de origem nativa, forma de vida herbácea e categoria sucessional pioneira. No entanto, considerando a síndrome de dispersão, no ER predominaram a categoria autocórica, enquanto no PMA predominaram indivíduos anemocóricos.

Os resultados deste estudo permitiram identificar a ocorrência de espécies de gramíneas exóticas no banco de sementes do solo, como *Urochloa decumbens* (braquiária), que já estavam presentes antes da restauração, uma vez que a área estava ocupada por pastagem. Mas como as sementes desta espécie de gramínea dependem de luz para germinação e estabelecimento, espera-se que com o fechamento do dossel pelas mudas altas plantadas, elas não consigam germinar e venham a ser gradativamente reduzidas no banco de sementes. Destaca-se que as ações de plantio de mudas altas e a preservação de fragmentos florestais na paisagem, realizadas pela empresa, contribuem significativamente para a recuperação da biodiversidade e sustentabilidade ambiental da mineração de bauxita.

## 6. REFERÊNCIAS

- Adjalla, C., Tosso, F., Salako, K. V., & Assogbadjo, A. E. (2022). Soil seed bank characteristics along a gradient of past human disturbances in a tropical semi-deciduous forest: Insights for forest management. *Forest Ecology and Management*, 503, 119744. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119744>
- 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: 1-20.
- Álvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013).
- Alves, W. V. L. (2023). Restauração florestal em áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão, Minas Gerais, Brasil. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.690>
- Arêas, E. M. J., Arêas, P. M. J., Campello, E. F. C., & De Resende, A. S. (2022). Banco de sementes do solo após 25 anos do plantio de leguminosas arbóreas em área de empréstimo – Seropédica, RJ. *Ciência Florestal*, 32(2), 698-714. <https://doi.org/10.5902/1980509847031>
- Balestrin, D., Martins, S. V., Schoorl, J., Lopes, A. T., & De Andrade, C. F. (2019a). 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>
- Balestrin, D., Martins, S. V., Fonseca, W., & Cosimo, L. H. E. (2019b). Relationship between soil seed bank and canopy coverage in a mined area. *Revista Árvore*, 43(4). <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400003>
- Banning, N., Grant, C. D., Jones, D. L., & Murphy, D. V. (2008). Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence. *Soil Biology & Biochemistry*, 40(8), 2021-2031. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.04.010>
- Barros, D. A., Guimarães, J. C. C., Pereira, J. A. A., Borges, L. A. C., Silva, R. A., & Pereira, A. A. (2012). Characterization of the bauxite mining of the Poços de Caldas Alkaline Massif and its socio-environmental impacts. *REM. Revista Escola de Minas*, 65(1), 127-133. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672012000100018>
- Bechara, F. C., Salvador, L. Z., Ventura, R. A., Topanotti, L. R., Gerber, D., Da Cruz, I. S., & Simonelli, M. (2020). Vegetation and seed bank of an open-scrub bush restinga formation in the Southeastern coast of Brazil. *Revista de Biología Tropical*, 68(2). <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i2.39241>
- Benitez-Malvido, J. (2023). In Site Soil Seed-Banks: Size, Composition and Persistence across Tropical Successional Stages. *Plants*, 12(15), 2760. <https://doi.org/10.3390/plants12152760>

Brumatti, D. V., Da Silva Freitas, W., & De Oliveira, C. H. R. (2023). Serapilheira, banco de sementes e fertilidade do solo na região do horto florestal de Ibatiba-ES: um fragmento florestal do bioma Mata Atlântica. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 21(12), 26243-26267. <https://doi.org/10.55905/oelv21n12-150>

Calegari, L., Martins, S. V., Campos, L. C., Silva, E., & Gleriani, J. M. (2013). Avaliação do Banco de sementes do Solo para fins de restauração florestal em Carandaí, MG. *Revista Arvore*, 37(5), 871-880. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622013000500009>

Chao, A., Gotelli, N. J., Hsieh, T. C., Sander, E. L., Ma, K. H., Colwell, R. K., & Ellison, A. M., (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*. 84, 45–67. <https://doi.org/10.1890/13-0133.1>

Chen, H. & Boutros, PC. (2011). VennDiagram: a Package for the Generation of Highly-Customizable Venn and Euler Diagrams in R. *BMC Bioinformatics*, 12(35), 1–7. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-35>

Colwell, R. K., Chao, A., Gotelli, N. J., Lin, S., Mao, C. X., Chazdon, R. L., & Longino, J. T. (2012). Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. *Journal Of Plant Ecology*, 5(1), 3-21. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr044>

Corlett, R. T. (2017). Frugivory and seed dispersal by vertebrates in tropical and subtropical Asia: An update. *Global Ecology and Conservation*, 11, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.04.007>

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>

Costa, P. F., Pereira, Z. V., Santos, B. S. D., Fernandes, S. S. L., Fróes, C. Q., & Barbosa, T. O. (2020). Banco de sementes do solo em áreas restauradas no sul do estado de Mato Grosso do Sul – MS. *Ciência Florestal*, 30(1), 104. <https://doi.org/10.5902/1980509832896>

Crawley, M. J (2013). *The R book: Second Edition*. John Wiley and Sons Ltd, West Sussex, United Kingdom, p 975

Dantas-Junior, A. B., Musso, C., & Miranda, H. S. (2018). Seed longevity and seedling emergence rate of *Urochloa decumbens* as influenced by sowing depth in a Cerrado soil. *Grass And Forage Science*, 73(3), 811-814. <https://doi.org/10.1111/gfs.12347>

- Fengler, F. H., Bressane, A., Carvalho, M. M., Longo, R. M., De Medeiros, G. A., De Melo, W. J., Jakovac, C. C., & Ribeiro, A. (2017). Forest restoration assessment in Brazilian Amazonia: A new clustering-based methodology considering the reference ecosystem. *Ecological Engineering*, 108, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.008>
- Fonseca, W. S., Martins, S. V., & Villa, P. M. (2023). Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. *Floresta e Ambiente*, 30(1), 1-14. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2023-004>
- Fonseca, W. 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*. <https://doi.org/10.1002/ldr.5118>
- Gandolfi, Sergius; Leitão Filho, Hermógenes de Freitas; Bezerra, Carlos Lineu Frota. Levantamento florístico e caráter sucessional das espécies arbustivo-arbóreas de uma floresta mesófila semidecídua no município de Guarulhos, SP. *Revista brasileira de biologia*, v. 55, n. 4, p. 753-767, 1995.
- IBGE, (2012). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2 ed. Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro: IBGE, 2012, 276 p.
- Komlóssy, G., van Deursen, C., & Raahauge, B. E. (2022). Bauxite: Geology, Mineralogy, Resources, Reserves and Beneficiation. In *Smelter Grade Alumina from Bauxite: History, Best Practices, and Future Challenges* (pp. 19-132). Cham: Springer International Publishing
- Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Mafra, N.A, Miranda, I., Neto, SVC, Leal, ES, Lacques, AE, & Mitja, D. (2020). Composição florística e estrutura das plantas espontâneas das pastagens de Urochloa no norte do Amapá. *Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 63
- Martin, D. M., & Lyons, J. E. (2018). Monitoring the social benefits of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 26(6), 1045-1050. <https://doi.org/10.1111/rec.12888>
- Martins, S.V., De Almeida, D.P., Fernandes, L.V., & Ribeiro, T. (2008). Banco de sementes como indicador de restauração de uma área degradada por mineração de caulim em Brás Pires, MG. *Revista Árvore*, 32(6), 1081-1088. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622008000600013>
- Martins S.V. (2009). Soil seed bank as indicator of forest regeneration potential in canopy gaps of a semideciduous forest in Southeastern Brazil. In: Fournier, M. V. (org.). *Forest regeneration: ecology, management and economics*. New York: Nova Science Publishers, p.113-128.
- Martins S.V. (2014). *Recuperação de matas ciliares: no contexto do Novo Código Florestal*. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 3º Ed. 220p.

Martins S.V., Borges EEL, & Silva KA. (2015). O banco de sementes do solo e sua utilização como bioindicador de restauração ecológica. In: Martins, S.V. (Ed.) Restauração ecológica de ecossistemas degradados. Viçosa: Editora UFV, 3ª Ed, p. 19-41.

Martins, S. V. (2018a). Alternative forest restoration techniques. En InTech eBooks. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72908>

Martins, S. V., Balestrin, D., & Lopes, A. T. (2018b). *Trema micrantha* (L.) Blume, espécie chave na restauração de áreas degradadas. *MG Biota*. 2018b, 10(4), 61-68.

Martins, S. V., Da Silva Fonseca, W., Cosimo, L. H. E., & Balestrin, D. (2021). Soil Seed Banks in Two Environments of Forest Restoration Post Bauxite Mining: Native Tree Plantation and Natural Regeneration. *Research In Ecology*, 3(1), 1-13. <https://doi.org/10.30564/re.v3i1.2631>

Martins, S. V., Pilocelli, A., Kruschewsky, G. C., Dias, A. A., Nabeta, F. H., & Villa, P. M. (2024). Seed bank and aboveground vegetation of Atlantic Forest re-growing on mining tailings in Mariana: Highlighting diversity patterns of functional groups. *Ecological Research*. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12453>

Neto, A. M., Martins, S. V., De Almeida Silva, K., & Gleriani, J. M. (2014). Banco de sementes do solo e serapilheira acumulada em floresta restaurada. *Revista Árvore*, 38(4), 609-620. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622014000400004>

Neto, A. M., Martins, S. V., De Almeida Silva, K., Lopes, A. T., & De Abreu Demolinari, R. (2016). Banco de Sementes em Mina de Bauxita Restaurada no Sudeste do Brasil. *Floresta E Ambiente*, 24(0). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.125414>

Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, & E., Wagner, E. (2018) 'Vegan': community ecology package. R package version 2.4-6. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf>.

Flora do Brasil (2024). (s. f.). [www.reflora.jbrj.gov.br](http://www.reflora.jbrj.gov.br). <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/PrincipalUC/PrincipalUC.do?lingua=es>.

Rodríguez-Uña, A., Cruz-Alonso, V., Rohrer, Z., & Martínez-Baroja, L. (2020). Fresh perspectives for classic forest restoration challenges. *Restoration Ecology*, 28(1), 12-15. <https://doi.org/10.1111/rec.13093>

Santos, D. M. D., Da Silva, K. A., Santos, J. M. F. F. D., & De Lima Araújo, E. (2018a). Soil seed bank and its importance in the natural regeneration of degraded areas. *Ethnobiology and Conservation*. <https://doi.org/10.15451/ec2018-03-07.05-1-7>

Santos, H. G. D. (2018b). Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa

- Shepherd GJ. (2010). *Fitopac 2.1*. Campinas, Brasil: Departamento de Botânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Silva, K. A., Martins, S. V., Neto, A. M., & Lopes, A. T. (2019). Soil Seed Banks in a Forest Under Restoration and in a Reference Ecosystem in Southeastern Brazil. *Floresta E Ambiente*, 26(4). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.004719>
- Silva, C. V., Martins, S. V., Villa, P. M., Kruschewsky, G. C., Dias, A. A., & Nabeta, F. H. (2021a). Banco de semillas de relaves mineros como indicador de recuperación de vegetación en Brasil. *Revista de Biología Tropical*, 69(2), 700-716. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i2.41800>
- Silva, A. C. A., Martins, S. V., & Balestrin, D. (2021b). Soil seed bank as a bioindicator to identify invasive species. *Floresta*, 51(3), 760. <https://doi.org/10.5380/rf.v51i3.72709>
- Souza, J. D., De Souza Aguiar, B. A., Santos, D. M. D., De Araujo, V. K. R., Simões, J. A., De Andrade, J. R., & De Lima Araújo, E. (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. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtaa008>
- Ter Heerd, G., Bekker, R. M., Bakker, J. P., & Verweij, G. (1996). An Improved Method for Seed-Bank Analysis: Seedling Emergence After Removing the Soil by Sieving. *Functional Ecology*, 10(1), 144. <https://doi.org/10.2307/2390273>
- Thomas, P. A., Schüler, J., Da Rosa Boavista, L., Torchelsen, F. P., Overbeck, G. E., & Müller, S. C. (2018). Controlling the invader *Urochloa decumbens*: Subsidies for ecological restoration in subtropical Campos grassland. *Applied Vegetation Science*, 22(1), 96-104. <https://doi.org/10.1111/avsc.12407>
- Trolliet, F., Forget, P., Doucet, J., Gillet, J., & Hambuckers, A. (2017). Frugivorous birds influence the spatial organization of tropical forests through the generation of seedling recruitment foci under zoochoric trees. *Acta Oecologica*, 85, 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2017.09.010>
- Tucker, N. I. J., Elliott, S., Holl, K. D., & Zahawi, R. A. (2023). Restoring tropical forests: lessons learned from case studies on three continents. En *Springer eBooks* (pp. 63-101). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25412-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25412-3_3)
- USGS (2024). Mineral commodity summaries 2024: United States Geological Survey, 212 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>
- Vandvik, V., Klanderud, K., Meineri, E., Måren, I. E., & Töpper, J. (2015). Seed banks are biodiversity reservoirs: species–area relationships above versus below ground. *Oikos*, 125(2), 218-228. <https://doi.org/10.1111/oik.02022>
- Van Der Pijl, L. (1982). Principles of Dispersal in Higher Plants. En *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87925-8>

- Xavier, R. O., Christianini, A. V., Pegler, G., Leite, M. B., & Silva-Matos, D. M. (2021). Distinctive seed dispersal and seed bank patterns of invasive African grasses favour their invasion in a neotropical savanna. *Oecologia*, 196(1), 155-169. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-04904-z>
- Yan, Q., Zhu, J., & Gang, Q. (2013). Comparison of spatial patterns of soil seed banks between larch plantations and adjacent secondary forests in northeast China: Implication for spatial distribution of larch plantations. *Trees*, 27(6), 1747-1754. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0920-y>
- Weerasinghe, M., Ashton, M. S., Hooper, E. R., & Singhakumara, B. M. P. (2018). Floristics of soil seed banks on agricultural and disturbed land cleared of tropical forests. *Restoration Ecology*, 27(1), 138-147. <https://doi.org/10.1111/rec.12711>
- WFO (2023). World Flora Online. Available at: <http://www.worldfloraonline.org> (Accessed on Nov 11, 2023).
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer International Publishing

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A restauração florestal em ambientes de mineração de bauxita é fundamental para garantir a sustentabilidade ambiental dessa atividade. O uso da técnica de bolas de sementes com tecnosolo mostrou-se uma alternativa promissora, com resultados significativos na promoção da germinação e no estabelecimento de espécies-chave para o enriquecimento de áreas em restauração florestal. Além disso, esta técnica contribui para o reaproveitamento sustentável dos resíduos da mineração de bauxita, apresentando vantagens em termos de eficiência, acelerando a recuperação da cobertura vegetal e restabelecendo os processos ecológicos essenciais para a sustentabilidade do ecossistema.

As ações implementadas pela empresa mineradora como: o plantio de mudas altas, o monitoramento contínuo das áreas e a preservação de fragmentos florestais, têm se mostrado eficazes na recuperação gradual de áreas perturbadas e na promoção da conectividade ecológica das paisagens. Em complemento, o estudo do banco de sementes do solo mostrou-se uma importante ferramenta para monitorar a trajetória ecológica e garantir a sustentabilidade a longo prazo das áreas restauradas, com base em parâmetros funcionais e ecológicos. A colaboração entre a academia e os setores privados tem sido essencial para o desenvolvimento de técnicas inovadoras e para o aprimoramento da avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração, garantindo que a exploração mineral de bauxita gere contribuições econômica de grande relevância, contribua na conservação ambiental e atenda os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e das iniciativas internacionais.