



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

MAYRA DE NAZARÉ BARRAL DAS NEVES

Descaracterização de barragens de rejeito de bauxita: como a indução da sucessão ecológica pode atuar na melhoria do substrato na fase inicial de descaracterização

Tucuruí – PA
2023

MAYRA DE NAZARÉ BARRAL DAS NEVES

Descaracterização de barragens de rejeito de bauxita: como a indução da sucessão ecológica pode atuar na melhoria do substrato na fase inicial de descaracterização

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara.

Co-orientador: Prof. Dr. Marcos André Piedade Gama

Tucuruí – PA
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

B268d Barral das Neves, Mayra de Nazaré.
Descaracterização de barragens de rejeito de bauxita:
como a indução da sucessão ecológica pode atuar na
melhoria do substrato na fase inicial de descaracterização /
Mayra de Nazaré Barral das Neves. — 2023.
71 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara
Coorientador(a): Prof. Dr. Marcos André Piedade Gama
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Tucuruí, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão
Ambiental, Tucuruí, 2023.

1. Reflorestamento de barragem. 2. Adubação
verde. 3. Tecnosolo. 4. Espécies pioneiras. I. Título.

CDD 620.8

MAYRA DE NAZARÉ BARRAL DAS NEVES

Descaracterização de barragens de rejeito de bauxita: como a indução da sucessão ecológica pode atuar na melhoria do substrato na fase inicial de descaracterização

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara.
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos André Piedade Gama

Aprovado por:



Documento assinado digitalmente
Junior Hiroyuki Ishihara
Data: 26/07/2023 16:56:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Júnior Hiroyuki Ishihara, Dr. em Desenvolvimento Sócioambiental
PEBGA/NDAE/UFPA - (Orientador)



Documento assinado digitalmente
MARCOS ANDRE PIEDADE GAMA
Data: 31/07/2023 09:35:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Marcos André Piedade Gama, Dr. em Agronomia
UFRA - (Co-orientador)



Documento assinado digitalmente
RAYNNER MENEZES LOPES
Data: 01/08/2023 15:05:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Raynner Menezes Lopes, Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
PEBGA/NDAE/UFPA - (Examinador Interno)



Documento assinado digitalmente
GRACIALDA COSTA FERREIRA
Data: 04/08/2023 12:08:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Gracialda Costa Ferreira, Dra. em Botânica Tropical
PPGCF/UFRA - (Examinadora Externa)

08-14-2023

DocuSigned by:
Luis Enrique Sanchez
A67932799CDB43D

Prof. Luis Enrique Sánchez, Dr. em Economia dos Recursos Naturais e do Desenvolvimento. PPGEMin/USP - (Examinador Externo)

Tucuruí – PA
2023

Às minhas amadas avós (*in memoriam*), Maria de Nazaré e Humbelina que apesar de não terem tido a oportunidade de estudar, sempre me incentivaram e apoiaram a buscar aprendizado.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus que em sua infinita sabedoria e misericórdia me deu forças por madrugadas, dias e noites para continuar a jornada.

À minha mãe, a maior guerreira da minha vida, que sempre foi espelho de persistência e determinação, e que sempre me incentivou a buscar conhecimento em todas as fases da vida.

Ao meu pai, cujas palavras de apoio e ensinamento me fortaleceram e me ajudaram a amadurecer ao longo da vida.

Ao Shayann, que além de me incentivar a crescer continuamente, cuida de tudo, da nossa casa, da nossa família, de mim e do nosso filho, para que eu possa buscar o meu próprio desenvolvimento, você é o meu Tony Stark.

A Cris, que tem um amor gigante, e que me apoia em tudo o que eu preciso, você é muito mais que uma tia e irmã.

Navid, que em sua inocência me inspira a ser melhor todos os dias, não só como mãe, mas como mulher e profissional.

A Rosa que me dá segurança para focar no projeto enquanto sei que meu filho está seguro e bem cuidado. E por cuidar de mim também.

Aos meus orientadores, professores Junior e Marcos, pelos ensinamentos e valiosas contribuições, sem vocês este trabalho não seria possível.

Ao Jonilton Paschoal, que me presenteou com este projeto, com apoio profissional e com sua amizade. Obrigada por entregar de si o melhor como líder e como ser humano, você faz a diferença.

Ao Vicente, a Rosi, ao Ronaldo, ao sr. Quenevaldo e toda a equipe de recuperação de áreas da MPSA, pela ajuda em campo, nos dias de sol, no plantio e nas análises, sem vocês eu não teria conseguido.

Ao professor Norberto Noronha pelos ensinamentos sobre física do solo, pelas valiosas contribuições e por estar sempre disposto a ensinar.

Ao Daniel por ter ajudado com a maior parte das análises estatísticas, você não quebrou um galho, plantou uma árvore!

A banca examinadora pelas valiosas contribuições na ocasião da defesa de qualificação.

A Hydro Paragominas e Cícero Viana pelo fomento à pesquisa e por apoiar este projeto, e todos que direta ou indiretamente me deram qualquer tipo de apoio para que este trabalho fosse realizado.

Minha mais sincera gratidão!

RESUMO

O processo de descaracterização de barragens de rejeitos é atualmente uma das principais preocupações relacionadas à gestão de barragens de rejeitos no setor de mineração, o que pode ser notado pelas mudanças recentes em normas internacionais e legislações federais sobre o tema. Aplicar a revegetação como técnica de descaracterização de barragens de rejeito é um grande desafio, principalmente porque o teor de matéria orgânica no substrato é muito baixo ou inexistente. Neste contexto, este experimento foi conduzido em três tratamentos que tiveram a finalidade de demonstrar o desempenho da indução da sucessão ecológica em três ambientes em substrato de rejeito de bauxita com condições diferentes de adubação verde e adição de matéria orgânica. No tratamento T3 (testemunho) ocorreu o plantio de mudas arbóreas sobre o rejeito; no tratamento T2 além do plantio de arbóreas foi incluída adubação verde com leguminosas de cobertura; e no tratamento T1, além das mudas arbóreas e leguminosas de cobertura foi adicionada matéria orgânica de fonte externa. Para análise do processo de sucessão induzido foram avaliados parâmetros de qualidade físico-química do solo, de desenvolvimento da vegetação implantada e de produção de biomassa. Os resultados da análise física do solo não indicaram diferença significativa entre os tratamentos para DS, PT e estabilidade. Na análise de fertilidade, os 3 tratamentos apresentaram valores similares de pH, m% e V%, havendo exceções na camada 0-5 cm. O tratamento T1 se destacou quanto ao teor de MO e valores de CTC. Para os tratamentos T2 e T3 foram observados valores similares de CTC. Em T2 observou-se aumento de MO entre as coletas de 6 e 12 meses após a implantação do experimento. O maior valor de produção de biomassa de *Crotalaria spectabilis* Röth foi obtida em T1, porém, os valores obtidos para *Canavalia ensiformis* (L.) DC. não apresentaram diferença significativa entre T1 e T2. Os resultados de serrapilheira refletiram a pré-disponibilidade de MO no tratamento, com diferença significativa entre T3, T2 e T1. Em T1 obteve-se a maior taxa de mortalidade (Tm) para *Hymenaea courbaril* L., e não houve diferença significativa de Tm para as demais espécies entre os tratamentos. Os melhores resultados de ingresso de espécies arbustivas e arbóreas foram observados em T2. Não houve diferença significativa entre os valores de IP e IMA para os tratamentos para todas as espécies, com exceção para os dados de IP de diâmetro do colo de *Inga edulis* Mart., que foram maiores em T1. Ao longo do experimento, a maioria das mudas apresentou de 50 a 100% de folhas maduras e somente *Bixa orellana* L. e *Clitoria fairchildiana* R.A.Howard chegaram a florescer. A indução do processo de sucessão ecológica através dos tratamentos aplicados neste experimento foi efetiva para a introdução de fatores biológicos no substrato, a melhoria de atributos químicos na camada superficial e o povoamento de espécies arbóreas na fase inicial de descaracterização de barragens de rejeito de bauxita cujo uso futuro planejado seja o reflorestamento.

Palavras-chave: Reflorestamento de barragem; Adubação verde; Tecnosolo; espécies pioneiras.

ABSTRACT

The closure of tailing dams is currently one of the main concerns related to the management of tailing dams in the mining sector, which can be noted by the recent changes in international standards and federal legislation on the subject. Applying revegetation as a technique for recharacterization of tailing dams is a great challenge, mainly because the organic matter content in the substrate is very low or non-existent. In this context, this experiment was conducted in three treatments that had the purpose of demonstrating the performance of the induction of ecological succession in three environments in bauxite tailings substrate with different conditions of green manure and addition of organic matter. In the T3 treatment (control) there was the planting of tree seedlings on the tailings; in the T2 treatment, in addition to tree planting, green manure with cover legumes was included; and in the T1 treatment, in addition to tree seedlings and cover legumes, organic matter from external sources was added. For the analysis of the induced succession process, parameters of soil physicochemical quality, development of the implanted vegetation and biomass generation were evaluated. The soil analysis of physical attributes showed no significant difference between the treatments for bulk density, total porosity and stability. All 3 treatments presented similar values of pH, m% and V%, with exceptions in the 0-5 cm layer. The T1 treatment stood out in terms of OM content and CEC values. The treatments T2 and T3 presented similar CEC values. T2 showed an increase in OM between the collections of 6 and 12 months after the implementation of the experiment. The highest biomass production of *Crotalaria spectabilis* Röth occurred at T1, however, *Canavalia ensiformis* (L.) DC. showed no significant difference between T1 and T2. The results of litter behaved according to the pre-availability of OM in the treatment, gradually increasing and with significant difference between T3, T2 and T1. T1 presented the highest mortality rate (Tm) of the species *Hymenaea courbaril* L., and there was no significant difference of Tm for the other species between the treatments. T2 presented the best results of admission of shrub and tree species. There was no significant difference in plants growth between treatments for all species, except for stem diameter of *Inga edulis* Mart., which were higher at T1. Throughout the experiment the majority of the seedlings had 50 to 100% of mature leaves and only *Bixa orellana* L. and *Clitoria fairchildiana* R.A.Howard came to flower. The induction of the ecological succession process through the treatments applied in this experiment was effective for the introduction of biological factors in the substrate, the improvement of chemical attributes in the surface layer and the settlement of tree species in the initial phase of bauxite tailing dams closure whose planned future use is reforestation.

Keywords: Dam reforestation; Green manure; Technosoil; Pioneer species.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rejeito de bauxita após processo de disposição.	12
Figura 2 - Localização da área do experimento em relação à bacia hidrográfica e território municipal.	22
Figura 3 - Layout do Dique Piloto e bacias internas.	27
Figura 4 - (A) Coleta de subamostras. (B) Amostra composta transferida para saco plástico.	28
Figura 5 - Ilustrativo do modelo de blocos e distribuição das parcelas por tratamento.	31
Figura 6 - (A) Pesagem de matéria orgânica. (B) Espalhamento de matéria orgânica complementar.	32
Figura 7 - Disposição das mudas na parcela.	34
Figura 8 – Evolução dos valores médios de saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) em função dos tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas) aplicados em dique teste de rejeito de bauxita, em Paragominas/Pará: Agosto/2022.	39
Figura 9 – Evolução dos valores médios de saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) em função dos tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas) aplicados em dique teste de rejeito de bauxita, em Paragominas/Pará: Fevereiro/2023.	39
Figura 11 - Resultados médios das análises de densidade e porosidade total após 12 meses de implantação do experimento.	44
Figura 12 – Evolução dos valores médios do diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados em amostras de solos de área de disposição de rejeitos sob processo de recuperação ambiental, em Paragominas – Pará, 2023.	45
Figura 13 – Percentual de indivíduos por espécie em cada fase fenológica avaliada ao longo das coletas trimestrais (F1: Percentual de indivíduos com 50 a 100% de folhas em brotamento; F2: Percentual de indivíduos com 50 a 100% de folhas maduras; F3: Percentual de indivíduos com 50 a 100% de folhas em senescência).	50

Figura 14 - Taxa de ingresso espécies de porte arbustivo e arbóreo por tratamento (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Terminologias e conceitos aplicados a este trabalho e etapas associadas.	15
Tabela 2 - Características químicas do substrato na área amostral.....	28
Tabela 3 - Recomendações de adubação para nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).	30
Tabela 4 - Descritivo dos tratamentos adotados.	30
Tabela 5 - Espécies arbóreas utilizadas no experimento.	33
Tabela 6 - Variáveis estudadas para análise do desenvolvimento das espécies arbóreas.	36
Tabela 7 - Valores médios de conteúdo de saturação por alumínio (m) e saturação por bases (V) entre os períodos de coleta, Agosto de 2022 (Ago/22) e Fevereiro de 2023 (Fev/2023) em função dos tratamentos aplicados (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).....	40
Tabela 8 – Valores médios de conteúdo de matéria orgânica (MO) entre os períodos de coleta, Agosto de 2022 (Ago/22) e Fevereiro de 2023 (Fev/2023) em função dos tratamentos aplicados (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).....	41
Tabela 9 – Valores médios de CTC a pH7 entre os períodos de coleta, Agosto de 2022 (Ago/22) e Fevereiro de 2023 (Fev/2023) em função dos tratamentos aplicados (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).	41
Tabela 10 – Evolução entre épocas dos valores médios de CTC a pH7 em função dos tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas) aplicados em dique teste de rejeito de bauxita, em Paragominas/Pará.	42
Tabela 11 – Valores médios de pH em H ₂ O em função de tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas) e épocas de amostragem em Dique Teste de rejeito de bauxita, Paragominas-Pa.	42
Tabela 12 – Tabela geral de resultados médios dos parâmetros de análise química do solo entre campanhas.	43

Tabela 13 – Valores médios de produção de biomassa por espécie de leguminosa utilizada na cobertura do solo em Dique teste de rejeito de bauxita, em Paragominas, Pará.....	45
Tabela 14 – Valores médios de produção de matéria seca de serrapilheira em função de tratamentos e período de coleta.....	46
Tabela 15 - Resultados do incremento periódico trimestral médio e incremento médio anual estimado para as espécies arbóreas utilizadas.....	47
Tabela 16 - Resultado de Teste Tukey para <i>Inga edulis</i> Mart.....	48
Tabela 17 - Resultados da taxa de mortalidade indicada por espécie e tratamento.	48
Tabela 18 - Espécies regenerantes registradas nos três tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).	50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANA	Agência Nacional de Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASI	Aluminium Stewardship Initiative
CTC	capacidade de troca catiônica
CEC	Cation exchange capacity
DAP	Diâmetro a altura do peito
DC	Diâmetro do colete
ESG	Environmental, Social and Governance
GISTM	Global Industry Standard on Tailings Management
IAI	International Aluminum Initiative
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICMM	International Council on Mining & Metals
IMA	Incremento Médio Anual
IP	Incremento Periódico
MPSA	Mineração Paragominas S.A.
MST	massa seca total
NBR	Norma Brasileira
PFM	Plano de fechamento de mina
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PRAD	Programa de Recuperação de Áreas Degradadas
SB	soma de bases
SGB- CPRM	Serviço Geológico do Brasil
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UFRA	Universidade Federal Rural da Amazônia
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Justificativa.....	9
1.2 Objetivos	10
1.2.1 Geral.....	10
1.2.2 Específicos	10
2 REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1 Mineração de bauxita no Brasil.....	11
2.2 Descaracterização de Barragens de Rejeito	12
2.3 Processo de sucessão ecológica	18
2.4 Leguminosas de cobertura como agentes de incremento de matéria orgânica no solo (adubação verde).....	20
3 METODOLOGIA	22
3.1 Área de estudo.....	22
3.1.1 Localização e Hidrografia	22
3.1.2 Clima	22
3.1.3 Geologia	23
3.1.4 Geomorfologia	23
3.1.5 Vegetação	24
3.1.6 Processo produtivo, disposição e características do rejeito de bauxita.....	24
3.2 Preparo da área	29
3.3 Delineamento experimental.....	30
3.4 Aplicação de espécies vegetais	32
3.5 Indicadores avaliados	35
3.5.1 Solo	35
3.5.2 Vegetação	35

3.6	Análise dos resultados	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1	Solo.....	39
4.1.1	Parâmetros químicos.....	39
4.1.2	Parâmetros físicos.....	44
4.2	Vegetação	45
4.2.1	Biomassa e Serrapilheira.....	45
4.2.2	Desenvolvimento das mudas de espécies arbóreas	47
4.2.3	Ingresso de espécies regenerantes.....	50
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	52
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A bauxita é atualmente a principal matéria-prima utilizada globalmente na cadeia de produção de alumínio (CRU CONSULTING, 2022). Para a geração da polpa de bauxita que é utilizada na produção de alumina, o minério passa por um processo de beneficiamento físico de moagem e lavagem que resulta no produto (polpa de bauxita) e uma polpa de argila que não é aproveitável no processo (rejeito) (ABAL, 2022).

Apesar de novas tecnologias para disposição de rejeito estarem surgindo, de acordo com a Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2017) a principal forma de disposição do rejeito de bauxita no Brasil ainda ocorre em grandes reservatórios, nos quais o rejeito passa por um processo de secagem e acomodação ao longo do tempo até o final da vida útil do reservatório.

Desde 2017, após a ocorrência de fatalidades envolvendo acidentes com barragens de rejeito, tanto a legislação brasileira, como padrões internacionais para empresas de mineração, tem passado por revisões e criação de novas exigências, que estão atreladas à manutenção, operação, e processos de descaracterização dessas estruturas (BRASIL, 2020; BRASIL, 2021; BRASIL, 2022; ICMM, 2021; ASI, 2022; EQUATOR PRINCIPLES, 2020).

Padrões internacionais aplicados a empresas da cadeia do alumínio, como por exemplo, os padrões de performance da *Aluminium Stewardship Initiative* – ASI e as diretrizes que suportam os princípios do *International Council on Mining & Metals* – ICMM, têm se tornado mais restritivos quanto à aplicação das melhores práticas ambientais e de estabilidade de longo prazo no processo de descaracterização e pós-fechamento de barragens de rejeito (ICMM, 2020; ICMM, 2021; ASI, 2022).

Na literatura atual a utilização dos conceitos sobre o tema não apresenta um consenso bem definido (MASSIGNAN & SÁNCHEZ, 2022; SÁNCHEZ *et al.*, 2013). Assim, com base no que é cômputo entre as definições legais ou citadas na literatura, considera-se como descaracterização de barragens: o processo que garante que uma estrutura deixe de ter características de barragem ou exercer suas funções, englobando as etapas do descomissionamento, recuperação ambiental e monitoramento (BRASIL, 2020; BRASIL, 2022; ICMM, 2021; SAMARCO, 2021).

Diante do referido cenário, é iminente a necessidade de empresas do setor desenvolverem planos de descaracterização de barragens que contemplem práticas

viáveis, sustentáveis, em conformidade com as questões socioambientais e que atendam aos novos padrões impostos pela legislação e por entidades certificadoras, o que influencia diretamente em processos de financiamento em bancos nacionais e internacionais (IFC, 2007).

Para aplicar a revegetação como técnica de descaracterização de barragens de rejeito, o processo de melhoria da disponibilidade de nutrientes no substrato é etapa primordial. Neste sentido, a aplicação de leguminosas tem sido amplamente aplicada e indicada como técnica “verde” para incremento de nutrientes em solos pobres ou degradados (COELHO *et al.*, 2007; MOREIRA *et al.*, 2014; PAULINO *et al.*, 2009; BARRETO, FERNANDES, 2001; CARVALHO *et al.*, 2022; SCIVITTARO *et al.*, 2004).

Neste contexto, a hipótese considerada neste trabalho é que a indução da sucessão ecológica com aplicação de espécies arbóreas e leguminosas de cobertura pode contribuir positivamente para o processo inicial de descaracterização de barragens de rejeito de bauxita, considerando o potencial desses vegetais no processo de melhoria dos atributos físico-químicos do substrato, o que implicaria em um ambiente mais favorável para etapas posteriores do processo de revegetação sobre rejeito e descaracterização de barragens no setor de extração de bauxita.

1.1 Justificativa

A Resolução nº 68 de 30 de abril de 2021 da Agência Nacional de Mineração – ANM determina as diretrizes atreladas ao Plano de Fechamento de Mina, incluindo a elaboração do Plano de descaracterização de barragens de mineração. E a partir da publicação da Resolução ANM nº 95/2022, é tácita a implicação mandatória de descaracterização de diversas barragens existentes no Brasil, seja por incidência de comunidades na Zona de Auto Salvamento – ZAS, seja por conta do método construtivo da barragem.

O estado do Pará concentra a maior representatividade de arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) no país, equivalente a 45,6 % do total arrecadado (IBRAM, 2022b). De acordo com dados da ANM (2017), o Pará possui 37 empresas que exploram minerais metálicos, sendo 18 delas de médio ou grande porte, incluindo 3 grandes mineradoras de bauxita, que podem utilizar os

resultados deste trabalho como fonte de consulta para o planejamento e execução do processo de descaracterização de barragens de rejeito.

O planejamento adequado e a definição de técnicas sustentáveis do ponto de vista ambiental e de segurança geotécnica para o processo de descaracterização de barragens de mineração é algo pontuado em iniciativas e diretrizes internacionais da indústria mineral e do alumínio, como a ASI e o ICMM, além da determinação de padrões de sustentabilidade para indústrias minerais, envolvendo também suas barragens de rejeito, aplicados por bancos e financiadoras internacionais (ICMM, 2021; ASI, 2022; EQUATOR PRINCIPLES, 2020; IFC, 2007).

Para a descaracterização de barragens de rejeito com aplicação de técnicas de revegetação, um dos principais desafios indicados na literatura é a utilização de solo orgânico de fontes externas, recurso pouco disponível e cuja extração pode causar outros impactos ambientais (MASSIGNAN & SÁNCHEZ, 2022). Dessa forma, a importância deste trabalho se justifica pela necessidade de informações que indiquem alternativas viáveis e ambientalmente adequadas à utilização de fontes externas de solo para viabilizar a sobrevivência de espécies vegetais em barragens descomissionadas de rejeito de bauxita.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Avaliar a indução do processo de sucessão ecológica através do uso de adubação verde e plantio de espécies arbóreas, enquanto técnica de melhoria das características físico-químicas do substrato no processo inicial de descaracterização de barragens de rejeito de bauxita.

1.2.2 Específicos

- Avaliar o desempenho de espécies arbóreas e de cobertura para utilização em povoamento inicial e produção de biomassa vegetal nos processos de recuperação ambiental de reservatórios de rejeito de bauxita.
- Monitorar a evolução das propriedades físicas e químicas do solo em função da introdução de espécies arbóreas em associação com adubação orgânica.
- Avaliação inicial do ingresso espontâneo de espécies vegetais (regenerantes) nativas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Mineração de bauxita no Brasil

De acordo com dados consolidados pelo IBRAM (2022a) o setor mineral arrecadou US\$ 58 bilhões no Brasil em 2021, tendo sido um setor fundamental para o balanço da economia, considerando as exportações e importações no ano de referência. Mais especificamente a exportação de bauxita do Brasil, representou a arrecadação de US\$ 184 Milhões em 2021, equivalente a 1,48 Milhões de toneladas exportadas do minério (IBRAM, 2022a).

A extração de bauxita representa a primeira etapa da cadeia de produção do alumínio, metal utilizado globalmente e com demanda em crescimento nas indústrias de produtos para transporte, transmissão/produção de energia elétrica, embalagens e construção civil (CRU CONSULTING, 2022), além de sua ampla utilização na indústria de móveis, utensílios domésticos e eletrônicos. De acordo com dados do USGS (2022), o Brasil possui uma das maiores reservas de bauxita do mundo, com teor de alumínio aproveitável maior do que 40% (melhor qualidade do minério), estando 91% da produção de bauxita concentrada no estado do Pará (ABAL, 2017).

O processo de extração de bauxita nas minas do Brasil ocorre majoritariamente pelo método de lavra em tiras (ALVES, 2015; BARROS *et al.*, 2012), que consiste na abertura de tiras no solo até a profundidade que se encontra o minério aproveitável, no sequenciamento quando uma tira é aberta, a anterior é fechada para viabilizar o processo de recuperação da área. O minério segue para a etapa de beneficiamento para redução da granulometria do minério e lavagem para reduzir o teor de sílica, e através desse processo é gerado o rejeito que consiste basicamente em argila lavada durante o beneficiamento (ABAL, 2022).

Para o armazenamento do rejeito de bauxita são construídos reservatórios em estruturas de terra, geralmente aproveitando características da topografia do terreno local. Nos reservatórios ocorre a disposição programada do rejeito em formato de lama, que ao longo do tempo perde umidade por evaporação, infiltração e lixiviação, o que viabiliza o reaproveitamento de água após a disposição dos rejeitos. A depender da profundidade dos reservatórios, do volume de rejeito depositado e do tempo de disposição, o rejeito cria uma camada mais seca com aspecto craquelado (Figura 1).

Figura 1 - Rejeito de bauxita após processo de disposição.



Fonte: Hydro (2022).

Conforme dados do SIGBM/ANM atualizados até julho de 2023, o Brasil possui 928 barragens de mineração cadastradas no sistema, distribuídas em 20 estados brasileiros, sendo 461 inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB (ANM, 2023).

De acordo com o art. 15 da Resolução ANM nº 68/2021, todo empreendimento de mineração que possua barragens de rejeito é obrigado a apresentar o Plano de Descaracterização de Barragens. E a partir da publicação da Lei 14.066/2020 todo empreendedor possuidor de barragens construídas ou alteadas pelo método a montante ficou obrigado a concluir sua descaracterização até 25/02/2022, prazo total de 17 meses para o processo.

Tais regulamentações culminam com a necessidade tácita de as empresas do setor minerário possuírem planejamento adequado, com definição de técnicas exequíveis para o processo de descaracterização de barragens de rejeito, bem como, para os que possuem certificações e atendem a diretrizes internacionais para elegibilidade à financiamentos, ficando evidente a exigência de que as alternativas avaliadas para o processo de descaracterização de barragens de rejeito ocorra com aplicabilidade das melhores práticas ambientais, sociais e de governança (ICMM, 2021; ASI, 2022; EQUATOR PRINCIPLES, 2020; IFC, 2007).

2.2 Descaracterização de Barragens de Rejeito

Para melhor entendimento do conteúdo deste tópico e ao longo deste trabalho, é importante abordar os conceitos aplicados ao processo de descaracterização de

uma barragem de mineração de acordo com a legislação e normas vigentes, além do que consta na literatura. Assim, os principais termos utilizados quando se trata do processo de descaracterização de barragens são: desativação, descomissionamento e descaracterização.

A Resolução ANM nº 68/2021 determina para os empreendimentos com aplicabilidade, que o Plano de descaracterização de barragens de mineração deve compor o Plano de fechamento de mina (PFM). No contexto do fechamento de mina, Sánchez *et al.* (2013) conceituaram a desativação como:

Período que tem início pouco antes do término da produção mineral (encerramento) e se conclui com a remoção de todas as instalações desnecessárias e a implantação de medidas que garantam a segurança e a estabilidade da área, incluindo a recuperação ambiental e programas sociais; é possível desativar estruturas individuais de uma mina ainda em funcionamento, como pilhas e barragens (SÁNCHEZ *et al.*, 2013, p. 37).

Especificamente atrelados às barragens, a ABNT NBR nº 13028:2017 define:

Item 3.16 Vida útil operacional da barragem: período compreendido entre o início da operação e o fechamento da barragem”.

Item 3.17 Desativação da barragem: suspensão da operação, temporária ou definitivamente, quando a estrutura não está recebendo aporte de rejeitos e/ou sedimentos.

Item 5.4.14 Plano de fechamento: documento que contenha “uma descrição dos processos, atividades e alternativas de uso futuro, buscando integrar o plano de fechamento da barragem no plano de fechamento de mina, atendendo à legislação específica.

Item 5.4.15 Plano de desativação: documento que contemple “todas as atividades após o fim da vida útil operacional da barragem, como medidas de monitoramento e instrumentação, revestimentos, sistema de drenagem superficial e garantia de estabilidade (ABNT, 2017).

Já a Agência Nacional de Mineração – ANM, através da Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022) considera os seguintes conceitos:

VI - Barragem de mineração abandonada: estrutura que não está recebendo aporte de efluentes oriundos de sua atividade fim, mantendo-se com características de uma barragem de mineração, sem medidas de controle e/ou monitoramento e que não recebe manutenção preventiva e/ou corretiva do empreendedor, caracterizando o abandono da estrutura, no qual o processo de descaracterização está incompleto ou ausente ou que não atenda às determinações desta Resolução por mais de 6 (seis) meses;
[...]

VIII - Barragem de mineração descaracterizada: estrutura que não recebe, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, a qual deixa de possuir características ou de exercer função de barragem, de acordo com projeto técnico, compreendendo, mas não se limitando, às seguintes etapas concluídas:

a) Descomissionamento: encerramento das operações com a remoção das infraestruturas associadas, tais como, mas não se limitando: a espigotes e tubulações, exceto aquelas destinadas à garantia da segurança da estrutura;

b) Controle hidrológico e hidrogeológico: adoção de medidas efetivas para reduzir ou eliminar o aporte de águas superficiais e subterrâneas para o reservatório, bem como a redução controlada da linha freática no interior do reservatório;

c) Estabilização: execução de medidas tomadas para garantir a estabilidade física e química de longo prazo das estruturas que permanecerem no local; e
d) Monitoramento: acompanhamento pelo período mínimo de 2 (dois) anos após a conclusão das obras de descaracterização, objetivando assegurar a eficácia das medidas de estabilização.

IX - Barragem de mineração inativa ou desativada: estrutura que não está recebendo aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, mantendo-se com características de uma barragem de mineração e que não se enquadra como barragem abandonada;

[...]

XIII - Ciclo de vida: é a sucessão de fases na vida da estrutura de contenção de rejeitos/sedimentos, contemplando o planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e descaracterização (BRASIL, 2022);

Enquanto a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB (BRASIL, 2010), apresenta o seguinte conceito para barragem descaracterizada:

XV - barragem descaracterizada: aquela que não opera como estrutura de contenção de sedimentos ou rejeitos, não possuindo características de barragem, e que se destina a outra finalidade (BRASIL, 2010).

Vale (2022a) criou um glossário para acesso público relacionado à termos técnicos utilizados em suas publicações sobre barragens, onde:

Descaracterização: Processo que faz parte da última etapa do descomissionamento de uma barragem. Se refere ao tratamento da estrutura para que ela não apresente características de barragem e seja reincorporada ao relevo e ao meio ambiente. [...]

Descomissionamento: Processo de encerramento definitivo do uso de uma barragem. Ao fim do processo, a estrutura fica estável e é reincorporada ao relevo e ao meio ambiente (VALE, 2022a).

O ICM (2021) definiu duas fases atreladas ao final da vida útil da barragem, denominadas “fechamento” e “pós-fechamento”, conforme definições apresentadas:

Fechamento: esta fase do ciclo de vida da barragem começa quando a disposição de rejeitos no reservatório é cessada permanentemente e o plano de fechamento é implementado, incluindo:

- Transição da fase de operação para a fase de fechamento e pós-fechamento.
- Remoção de infraestrutura, tais como as tubulações.
- Mudanças na gestão ou tratamento de água.
- Construção de cobertura, reconformação ou revegetação sobre o rejeito e quaisquer diques/aterros ou outros elementos estruturais.
- Outras atividades de recuperação e descomissionamento. [...]

Pós-fechamento: Esta fase do ciclo de vida da barragem começa quando o plano de fechamento foi implementado e a barragem de rejeito concluiu a transição para manutenção e monitoramento de longo prazo. A fase de pós-

fechamento deve abranger todos os aspectos de conformidade de segurança e meio ambiente relacionados aos requisitos legais e de estabilidade de longo prazo (ICMM, 2021, p. 12, tradução da autora).

Pontua-se que em inglês o principal termo utilizado neste contexto é “*closure*” (ASI, 2022; ICMM, 2021; MAO; KAM, 2011) cuja tradução direta para o português é a palavra “fechamento”. Contudo, haja vista que a partir da publicação da Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022) o termo “fechamento” não foi utilizado, neste trabalho é usado o termo “descaracterização” para a fase final do ciclo de vida da barragem.

A partir das referências supracitadas, é possível perceber que a conceituação do processo de descaracterização de uma estrutura está geralmente associada às fases que compõem o processo de descaracterização, levando à uma possível definição dessas fases em forma de linha do tempo.

Desta forma, considerando que não foi encontrado na literatura uma descrição consensual sobre as terminologias aplicadas às etapas da descaracterização de barragens de rejeito (MASSIGNAN & SÁNCHEZ, 2022; SÁNCHEZ *et al.*, 2013), tomando como base as referências supracitadas, para este trabalho, foram consideradas as terminologias e conceitos atreladas a uma lógica de linha do tempo aplicada ao processo de descaracterização de barragens, preparada pela autora e indicada na Tabela 1.

Tabela 1 - Terminologias e conceitos aplicados a este trabalho e etapas associadas.

Terminologia	Conceito	Linha do tempo
Desativação	Paralização do aporte de rejeitos e/ou sedimentos	Etapas 1
Descomissionamento	Processo de remoção das infraestruturas associadas, estabilização da estrutura, controles geotécnicos, hidrológicos e hidrogeológicos.	Etapas 2
Descaracterização	Processo que garante que uma estrutura deixe de ter características de barragem ou exercer suas funções, engloba as etapas do descomissionamento, recuperação ambiental e monitoramento.	Etapas 3

Fonte: Elaborado pela autora do trabalho.

O planejamento do processo de descaracterização de barragens de rejeito deve considerar vários aspectos aplicáveis ao decorrer da vida útil da estrutura, como estabilidade estrutural, capacidade de retenção de sólidos e líquidos de acordo com o

projeto, controle para chuvas decamilenares, prevenção de processos erosivos, entre outros (MAO & KAM, 2011). Isto posto, desde a concepção do projeto do barramento é importante considerar a pretensão de uso futuro da área para que a operação e alterações do sistema sejam coerentes com o plano de descaracterização (ICMM, 2021).

Assim, se torna estratégico, e provavelmente mais econômico para as empresas considerar o uso futuro pós-fechamento planejado para o barramento, tanto nas fases de elaboração dos projetos de engenharia (concepção do projeto, planejamento de alteamentos, expansão etc.), quanto nas fases de instalação e operação do sistema. De forma que, premissas de engenharia como sistemas de drenagem, estruturas adicionais ou associadas (como alteamentos e bermas de equilíbrio) e métodos de disposição do rejeito, podem influenciar e ser influenciadas pelos elementos¹ e peso que se espera ser adicionado ao fim da vida útil da barragem quando do processo de descaracterização para garantia do uso futuro planejado para pós-fechamento.

Diretrizes internacionais de sustentabilidade para a cadeia de produção do alumínio abordam a remediação de reservatórios após seu fechamento. A ASI por exemplo, define como parte dos padrões de performance de empresas da cadeia do alumínio a remediação de áreas de resíduos de bauxita após seu fechamento, que apesar de serem aplicáveis às refinarias, possuem diretrizes que podem ser aplicadas à barragens de rejeito, como a busca por tecnologias que promovam a reutilização do rejeito de bauxita ou o estado da arte para seu armazenamento, bem como promover a recuperação de áreas mineradas de acordo com o plano de fechamento de mina (ASI 2022).

Já o ICMM divulgou em 2021 um guia completo para gestão de barragens de rejeito que contempla um capítulo inteiro dedicado ao processo de descaracterização da barragem. Neste capítulo, os autores reforçam sobre a importância de o manual de operação e as operações dos sistemas de disposição de rejeitos estarem alinhados com o plano de descaracterização, assim como a urgência sobre a implementação desta condição para barragens em fase de operação (ICMM, 2021).

¹ Elementos associados ao uso futuro planejado, por exemplo: se o uso futuro planejado é tornar a estrutura uma planta de energia eólica ou solar os elementos a serem adicionados serão diferentes e terão pesos, comportamentos e características diferentes do que de uma estrutura cujo uso futuro planejado é a revegetação, no qual até mesmo as espécies vegetais escolhidas para o processo podem ter peso, comportamento e características diferentes.

Massignan & Sánchez (2022) em uma revisão sistemática da literatura desde 1983 sobre descaracterização de barragens de rejeitos, identificaram 105 artigos que abordam o tema, de forma que apenas 47 trabalhos avaliam alguma alternativa de descaracterização, e 23 destes abordam por sua vez a análise da revegetação sobre o rejeito como técnica de descaracterização, um dos estudos foi desenvolvido no Brasil, porém, não é indicado nenhum estudo aplicado à região amazônica. Tal estudo, corrobora com a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que avaliem alternativas técnicas para o processo de descaracterização de barragens de rejeito.

A remoção/remanejamento ou reaproveitamento do rejeito é uma alternativa avaliada em poucos estudos (MASSIGNAN & SÁNCHEZ, 2022), e pouco considerada pelas empresas por diversos fatores que são influenciados pelas características do rejeito e pelo volume e disponibilidade de espaço para disposição alternativa dos rejeitos.

Já para barragens que acumulam rejeitos com altos teores de metais pesados e presença de substâncias tóxicas, uma técnica avaliada em alguns estudos citados por Massignan & Sánchez (2022) é o processo de fitorremediação, contudo, uma das preocupações atreladas a este método é a transferência de substâncias através da cadeia alimentar.

Uma das principais alternativas consideradas em planos e processos de descaracterização de barragens de mineração tem sido a revegetação do ambiente (GEOESTÁVEL, 2019; VALE, 2022b; MASSIGNAN & SÁNCHEZ, 2022). Uma das dificuldades associadas à esta alternativa está atrelada à aplicação de solo de fontes externas sobre o rejeito para viabilizar o estabelecimento da vegetação, que pode implicar em impactos negativos no local de remoção do solo, além de ser um recurso escasso (MASSIGNAN & SÁNCHEZ, 2022).

O conceito de alternativa “verde” ou “ambientalmente amigável”, do inglês *environmental friendly*, abrange o investimento em métodos e tecnologias com base em valores de ESG², envolvendo a aplicação das melhores práticas para preservação do meio ambiente e de valor social em toda a cadeia produtiva. Grandes bancos, instituições e associações de referência internacional têm determinado padrões nesse

² Sigla do inglês *Environmental, Social and Governance*, que em português pode ser traduzido para Ambiental, Social e Governança.

sentido para a indústria mineral (ICMM, 2021; ASI, 2022; EQUATOR PRINCIPLES, 2020; IFC, 2007).

Neste contexto, este estudo pretende abordar a fase inicial do processo de descaracterização de barragens de rejeito de bauxita, cujo uso futuro planejado seja a revegetação ou reflorestamento sobre o material depositado. Por fase inicial, neste caso, associado ao processo de sucessão ecológica, será trabalhada na etapa de recuperação ambiental a primeira fase de sucessão, na qual ocorre a introdução de fatores bióticos que melhoram as condições do substrato. As fases posteriores de recuperação ambiental no processo de descaracterização (conforme conceito descrito na Tabela 1), seriam, portanto, o enriquecimento de espécies vegetais e a aceleração das demais fases da sucessão ecológica, seguidas do monitoramento ambiental.

2.3 Processo de sucessão ecológica

O entendimento do processo de sucessão ecológica é fundamental para o planejamento da revegetação em áreas degradadas, uma vez que a indução das espécies ao mimetismo do processo natural de sucessão pode suportar a aplicação de técnicas para aceleração ou adiantamento de etapas na recuperação de áreas (MATTHES; MARTINS, 1996).

Algumas categorias de sucessão ecológica podem ser aplicadas ao estudo da dinâmica temporal da vegetação, dentre elas, a que mais se aproxima ao caso aplicado neste estudo seria a sucessão primária, definida por Pillar (1994) da seguinte forma:

Sucessão primária é o desenvolvimento da vegetação em substrato recém formado ou exposto, ao invés de solo já desenvolvido. O sítio não contém legado biológico de vegetação prévia (banco de sementes, matéria orgânica). Propágulos colonizadores devem vir de fora do sítio. Exemplos de sucessão primária ocorrem em deltas, costas oceânicas elevadas, depósitos vulcânicos, dunas, afloramentos rochosos, recifes, rejeitos de minérios (PILLAR, 1994, Pág. 2).

De toda forma, o conceito de sucessão ecológica é envolvido por paradigmas científicos atrelados à definição do ordenamento ou dinamismo das fases de sucessão, que varia de um conceito de sucessão com visão determinista e fases ordenadas, onde o “clímax seria um estado estável onde a vegetação estaria em equilíbrio com o clima presente”, à um conceito com visão mais casualista ou “teoria reducionista”, de forma que as espécies vegetais sofrem influência de outros fatores

como a presença de outras espécies e fatores locais (PILLAR, 1994; MATTHES; MARTINS, 1996; NUNES; CAVASSAN, 2011).

Com base na teoria reducionista, Matthes e Martins (1996) descreveram que “a sucessão é meramente uma dominância fisionômica sequencial do local por espécies com diferentes ciclos de vida, taxas de crescimento e diferentes tamanhos na maturidade”. Ocorre um consenso entre as teorias correlato ao ciclo de vida das espécies florestais, com distinção mais clara de dois grupos ecológicos principais: pioneiras (mais encontradas em áreas abertas) e clímax ou “árvores da floresta” (árvores encontradas em florestas maduras e que contribuem para formação do dossel) (FINEGAN, 1984 *apud* MATTHES; MARTINS, 1996).

Diversas variáveis bióticas e abióticas do ambiente podem influenciar o processo de sucessão ecológica, desde a germinação de sementes ao desenvolvimento, entre os quais a diversidade das plantas, disponibilidade e intensidade da luz, alterações no ambiente, clima, concentração de nutrientes, umidade do solo, bem como a competição entre espécies de diferentes fases sucessionais (BAZZAZ, 1979; JARDIM, 2015).

Nesse contexto, com base nos conceitos de Pillar (1994) e Matthes e Martins (1996), pelas pesquisas de Finegan (1984) e conclusões de Bazzaz (1979) e Jardim (2015), neste estudo foi considerado como a fase primária de sucessão ecológica em barragens de rejeito àquela em que se inicia a introdução de fatores biológicos no substrato até o desenvolvimento de vegetação arbórea com predominância de espécies pioneiras, seja por meio natural ou induzido pelo ser humano através de técnicas de recuperação ambiental.

O acompanhamento de indicadores das fases de sucessão em florestas recuperadas, tais como os atributos físico-químicos do solo e dinâmica florestal (mortalidade, incremento de diâmetro/altura, ingresso, índices de diversidade e de desenvolvimento das plantas, entre outros), demonstraram resultados eficientes para o acompanhamento do processo de recuperação em diversos estudos (BARBIERI *et al.*, 2012; BRASIL NETO *et al.*, 2021; CASTANHO, 2009; MIRANDA NETO *et al.* 2012; SALOMAO *et al.*, 2007).

O estudo de Brasil Neto *et al.* (2021) em áreas sob processo de recuperação após mineração de bauxita, no entorno da área experimental deste estudo, indicou que áreas em processo de regeneração natural de 2 e 7 anos apresentaram ambos 100% de espécies pioneiras no estrato inferior, 100% de espécies pioneiras no estrato

intermediário das áreas com 2 anos de regeneração natural e 80% nas áreas com 7 anos, e em média 63% de espécies no estrato superior das duas áreas. Tal resultado corrobora com a predominância de espécies pioneiras na fase inicial do processo de sucessão apontada por outros autores (MATTHES; MARTINS, 1996; JARDIM, 2015).

A produção de biomassa através da utilização de plantas de cobertura tem sido apontada em diversos estudos como fator de importante contribuição para a qualidade do processo de melhoria das condições do solo (CAVALCANTE *et al.*, 2012; ANDRADE *et al.*, 2022; CARVALHO *et al.*, 2022; LOPES, 2000; RAYOL; ALVINO-RAYOL, 2013). Contudo, ainda são poucos os estudos encontrados na literatura tratando sobre a aplicação de leguminosas para melhorias das condições de substrato de rejeito de mineração. Franco *et al.* (1996) observaram a adaptação de espécies de leguminosas no substrato em barragens de rejeito de bauxita a partir da correção de acidez e incremento de macronutrientes, apontando que a determinação da produção de biomassa “foi o melhor indicador da contribuição das diversas espécies para os estádios iniciais de revegetação do rejeito da bauxita”.

2.4 Leguminosas de cobertura como agentes de incremento de matéria orgânica no solo (adubação verde)

A adubação verde pode ser conceituada como o processo de aplicação de espécies vegetais com características de rápido crescimento para cobertura e melhoria das condições do solo, como a fixação de nitrogênio, por exemplo, e que após certo período (podendo ser o ciclo de uma rotação de culturas, ou o período de floração da espécie) podem ser abatidas e aplicadas no solo para incremento de matéria orgânica (BARRETO, FERNANDES, 2001; CARVALHO *et al.*, 2022; SCIVITTARO *et al.*, 2004).

Nesse contexto, a adubação verde atua como técnica eficiente e com benefícios evidenciados em múltiplos estudos para melhoria dos atributos químicos e físicos do solo, envolvendo a promoção de ciclagem de nutrientes, incremento de matéria orgânica e fixação de nitrogênio, além de a depender da espécie, contribui na inibição da propagação de espécies daninhas, cobertura do solo (prevenção de processos erosivos) e como alternativa orgânica à utilização de fertilizantes minerais (SCIVITTARO *et al.*, 2004).

A aplicação de leguminosas como adubação verde tem sido indicada em diversos estudos científicos, principalmente por seu potencial de fixação de nitrogênio no solo (COELHO *et al.*, 2007; MOREIRA *et al.*, 2014; PAULINO *et al.*, 2009; BARRETO; FERNANDES, 2001; CARVALHO *et al.*, 2022; SCIVITTARO *et al.*, 2004).

Espécies como *Crotalaria spectabilis* Röth (Crotalária) e *Canavalia ensiformis* (L.) DC. (Feijão-de-porco) são destacadas na literatura por apresentarem bom desempenho na produção de biomassa, aumento da capacidade de troca de cátions do solo, adaptação a solos com baixa fertilidade, eficiência na redução de nematoides (no caso da *Crotalaria* sp.) e controle de plantas invasoras (no caso do *Canavalia ensiformis* (L.) DC.) (BARRETO, FERNANDES, 2001; RAYOL; ALVINO-RAYOL, 2013; LOPES, 2000; CARVALHO *et al.*, 2022; PAULINO *et al.*, 2009; ANDRADE *et al.*, 2022).

Carvalho *et al.* (2022), estimaram que *Canavalia ensiformis* (L.) DC. pode produzir de 20 a 25 toneladas de biomassa por hectare, enquanto *Crotalaria* sp. alcança entre 20 a 30 t ha⁻¹. Tais valores podem variar, a depender da densidade de semeadura das espécies, características do solo e adubação complementar aplicada, conforme pôde ser verificado no estudo desenvolvido por Cavalcante *et al.* (2012), que obteve produção de massa fresca de *Crotalaria* sp. e *Canavalia ensiformis* (L.) DC. de 19 t ha⁻¹ e 16,2 t ha⁻¹, respectivamente.

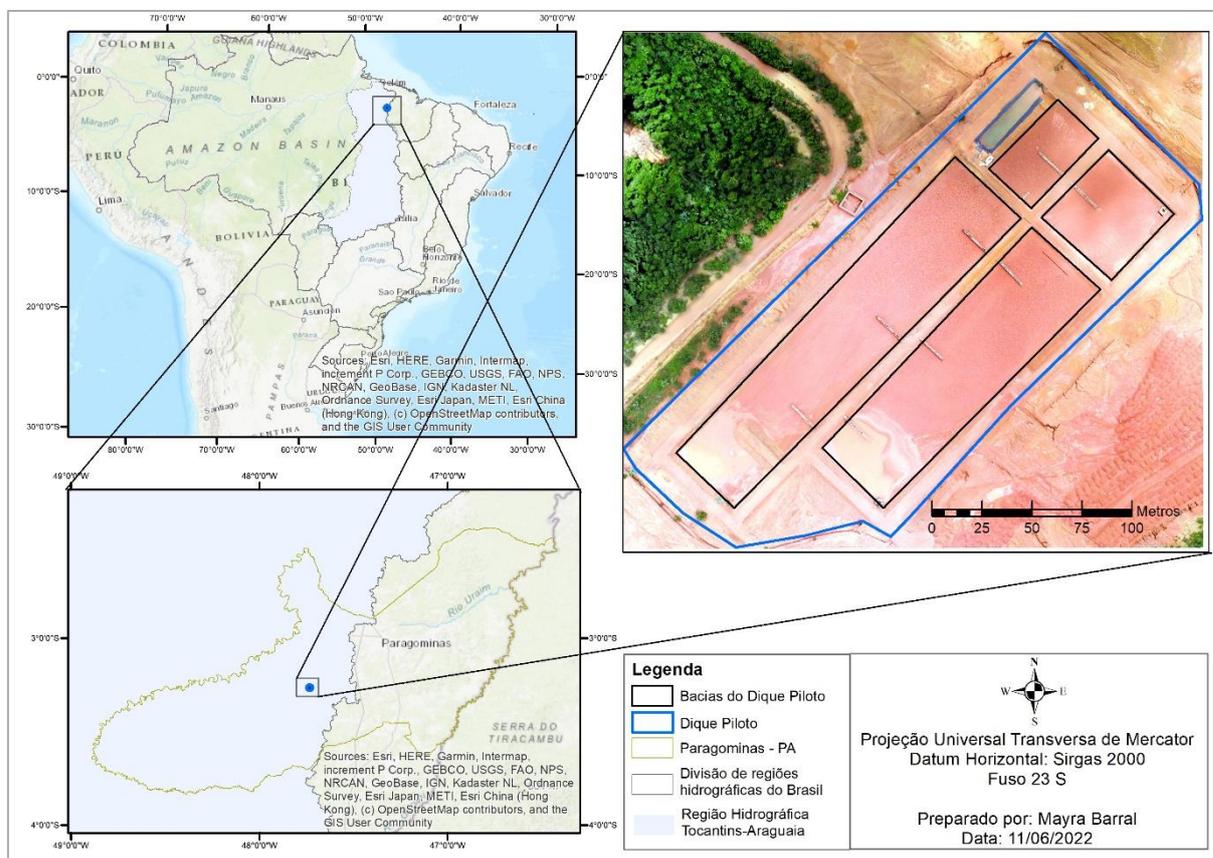
3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

3.1.1 Localização e Hidrografia

O experimento foi conduzido na área da empresa Mineração Paragominas S.A (MPSA), localizada no município de Paragominas, no estado do Pará. O local do experimento está inserido na região hidrográfica Tocantins-Araguaia (ANA, 2022), e localmente está inserido na bacia do rio capim, microbacia do igarapé Parariquara (Figura 2).

Figura 2 - Localização da área do experimento em relação à bacia hidrográfica e território municipal.



Fonte: Elaborado pela autora do trabalho.

3.1.2 Clima

De acordo com Pinto *et al.* (2009) no município de Paragominas o clima é quente e úmido, a umidade relativa do ar média é de 81%, com temperatura média anual de 26°C. No município é registrado um período mais chuvoso que varia de dezembro a maio e um período mais seco que ocorre entre junho e novembro, tendo sido classificado por Bastos *et al.* (2005) no tipo climático Aw1 segundo a classificação

de Koppen, que indicaram um total de precipitação anual de 1.800mm, com variação de 800 a 2.800mm.

Na área de entorno do local do experimento, o maior índice pluviométrico foi registrado no mês de abril e o menor índice nos meses de setembro a novembro, a partir de análise de resultados de janeiro de 2015 a dezembro de 2021 realizado por Sanches *et al.* (2022).

3.1.3 Geologia

O município de Paragominas está inserido nas bacias sedimentares do Marajó e do Parnaíba, a área deste estudo mais especificamente incide na bacia sedimentar do Parnaíba (SGB-CPRM, 2019).

Quanto aos aspectos geológicos do Platô Miltônia 3, Golder Associates (2003) indicou a presença das seguintes formações geológicas com base em análise de dados da perfuração de dois poços profundos e dados do Projeto Radam, estando em ordem de maior profundidade para menor: Formação Serra Grande, Formação Pimenteiras, Formação Cabeças, Formação Longá, Formação Piauí, Formação Pedra de Fogo, Formação Orizombro, Formação Itapecuru e Formação Barreiras, esta última formada por “sedimentos clásticos mal selecionados que variam de siltitos a conglomerados”.

Em termos pedológicos, na área de estudo ocorrem Latossolos Amarelos Distróficos e Plintossolos Petricos Concrecionários (SANTOS *et al.*, 2011).

3.1.4 Geomorfologia

De acordo com Brandt, Casaverde e Hidrosam (2003), a região está inserida no Planalto Setentrional Pará-Maranhão, e é formada por um conjunto de platôs provenientes do recorte de uma grande mesa terciária regional, tendo duas unidades morfológicas características: platôs e terras baixas que compõem um relevo de degradação e planície aluvial que forma um relevo de agradação.

O relevo local possui três características principais: platô, morro e colinas, onde ocorrem dois sistemas de drenagem responsáveis pela dissecação (corte) dos platôs, sendo eles os igarapés Patauateua e Potiritá, afluentes do Rio Capim (BRANDT; CASAVARDE; HIDROSAM, 2003).

3.1.5 Vegetação

As áreas florestadas do município de Paragominas são formadas por três subtipos: floresta densa submontana, floresta densa de terra baixa e floresta densa aluvial, em diversos estágios de conservação (PINTO *et al.*, 2009). Especificamente a área de entorno do experimento é composta principalmente por Floresta Ombrófila Densa, na qual são identificados alguns usos do solo, correlatos ao estágio de conservação da vegetação, tais quais: floresta primária alterada, floresta secundária, áreas de pasto / culturas agrícolas e solo exposto (FERREIRA *et al.*, 2015).

3.1.6 Processo produtivo, disposição e características do rejeito de bauxita

3.1.6.1 Processo produtivo da mina de bauxita

A MPSA executa extração de bauxita pelo método de lavra a céu aberto em tiras, pelo qual a extração o minério passa por um processo físico de beneficiamento que gera a polpa de bauxita (concentrado) e o rejeito. De acordo com Quaresma *et al.* (2022), esse processo é constituído pelas seguintes etapas:

- **Britagem:** esta etapa consiste na cominuição inicial do minério até o tamanho de 6", através de dois processos de britagem, primária e secundária.
- **Homogeneização:** nesta etapa o minério é disposto em pilhas para homogeneização granulométrica, em seguida o minério é retomado para transporte até a moagem.
- **Moagem Semi-Autógena (SAG):** aqui ocorre a primeira adição de água no processo, o moinho promove a “desagregação do mineral ganga da bauxita por meio da redução do tamanho do minério grosseiro”.
- **Peneiramento:** nesta etapa ocorre lavagem e classificação granulométrica do minério em peneiras com dois *decks*, um de abertura quadrada de 19 mm e outro com abertura retangular de 36 x 12,5 mm.
 - **Rebritagem:** o minério retido nos *decks* de peneiramento é direcionado para rebritagem, para novo processo de cominuição até que o minério atinja fração menor do que 12,7 mm.
- **Ciclonação de Finos:** os ciclones recebem o minério peneirado com fração menor que 12,7 mm e realizam nova classificação por diferencial de densidade do minério através de hidrociclones em duas etapas

(ciclonação primária e secundária) que garantem granulometria menor que 0,21 mm para a próxima etapa do processo.

- **Moagem de Bolas e Circuito de Classificação:** o moinho de bolas recebe o produto da rebitagem e o *underflow* da ciclonação secundária de finos. Após nova classificação granulométrica gera-se o produto para espessamento (*underflow*) ou material de *overflow* que segue para a etapa de ciclonação de deslamagem/superfinos.
- **Ciclonação de Superfinos:** o objetivo desta etapa é a separação do minério ultrafino da argila (rejeito). Nesta etapa, o *overflow* é encaminhado por gravidade para o espessador de rejeito, e o *underflow* retorna para o processo.
- **Ciclonação de Adensamento:** nesta etapa ocorre o adensamento do minério para concentração de sólidos acima de 60% e posterior encaminhamento para os espessadores de polpa.
- **Espessamento de concentrado:** nestes espessadores ocorre a concentração da polpa de bauxita para posterior bombeamento. Nesta etapa ocorre recuperação de água clarificada para reutilização no processo.
- **Espessamento de rejeito:** nesta etapa ocorre o adensamento do rejeito que entra no circuito com 6% de sólidos e sai com variação de 33 a 35% de sólidos para disposição nos sistemas de rejeito. Nesta etapa também ocorre recuperação de água clarificada para reutilização no processo da usina.

No processo de espessamento ocorre a adição de solução flocculante a partir de polímeros acrílicos “com a diluição em linha para a faixa de concentração de 0,10 a 0,05 % p/p, conforme a necessidade operacional” para acelerar o processo de concentração da polpa e retomada de água, cuja dosagem é calculada a partir do percentual de sólidos e vazão da polpa que alimenta os espessadores de concentrado e de rejeito. Em 2021 houve recuperação de 91,93% de água dos espessadores para reutilização no processo da usina (QUARESMA *et al.*, 2022).

Adicionalmente, Quaresma *et al.* (2022) explicaram que com a finalidade de ajustar o pH das polpas de rejeito e concentrado nos espessadores, ocorre adição de cal hidratada com concentração de 1,6%, cuja dosagem varia de 2 a 6 m³ h⁻¹.

3.1.6.2 Disposição de rejeito

A MPSA possui dois sistemas de rejeitos denominados Sistema de Rejeitos I – SR1 (Vale) e Sistema de Rejeitos II – SR2 (Platô), que são inspecionados e geridos de acordo com a Lei nº 12.334 e Portaria DNPM nº70.389 (AGRIPINO *et al.*, 2022). Os mesmos autores descreveram os sistemas da seguinte forma:

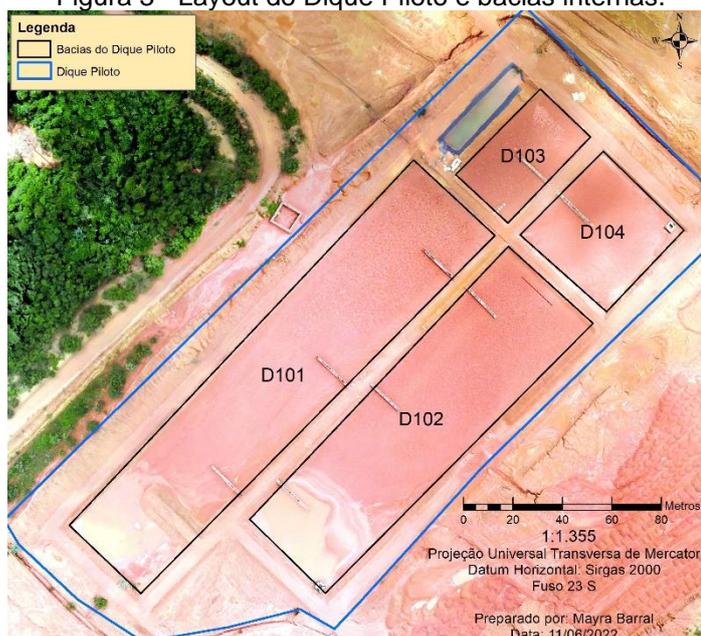
*“o Sistema de Rejeito do Vale é composto por 03 barragens, sendo a Barragem B1 destinada à disposição de rejeitos, a Barragem B6 para clarificação e contenção de sedimentos e a Barragem B5 destinada à proteção das nascentes. O sistema RP1 (Reservatório do Platô) composto por quatro quadrantes internos destinadas à disposição de rejeitos (RP1-A, RP1-B, RP1-C e RP1-D), oito bacias de clarificação (BCs), dois canais de contorno e o vertedor de emergência” (AGRIPINO *et al.*, 2022, p. 8).*

Além disso, existe uma estrutura auxiliar e independente dos dois sistemas, denominada Dique Piloto, que foi construída com a finalidade de realização de testes e experimentos com os rejeitos da MPSA. A disposição nos sistemas de rejeito ou no Dique Teste ocorre através de tubulações que conectam os espessadores de rejeito e as estruturas de disposição.

3.1.6.3 Caracterização da área experimental

A área do experimento é parte de um sistema piloto de disposição de rejeitos de bauxita para testes, que contém quatro (4) diques internos denominados D101, D102, D103 e D104 (Figura 3).

Figura 3 - Layout do Dique Piloto e bacias internas.



Fonte: Elaborado pela autora do trabalho.

Para este experimento, apenas o dique D101 foi utilizado na implantação das parcelas. O dique D101 possui 2 m de altura, 39 m de largura e 202 m de comprimento, com volume útil de 15.756 m³. A última disposição de rejeito no sistema piloto ocorreu em dezembro de 2016, assim, a partir dessa data o rejeito passou por processo de sedimentação, formando uma camada compactada de rejeito de aproximadamente 1 m de profundidade.

Em 02 de agosto de 2021, para análise dos atributos químicos, procedeu-se pela coleta de amostras de rejeito no Dique Piloto (Figura 4), a qual foi realizada em profundidade de 0-20 cm, considerando coleta de cinco subamostras para formação de uma amostra composta, com base na metodologia de coleta indicada por Abrahão e Marques (2013), sendo 1 subamostra de ponto central e as demais coletadas na direção dos quatro pontos cardeais cada uma, porém com distância de 2,5 m e não 5 m devido ao tamanho das parcelas (6 x 10 m).

Figura 4 - (A) Coleta de subamostras. (B) Amostra composta transferida para saco plástico.



Fonte: Elaborado pela autora do trabalho.

A caracterização química do rejeito foi realizada no laboratório de solos da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA (campus Belém) conforme metodologia indicada por Teixeira *et al.* (2017), tendo sido obtidos os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Características químicas do substrato na área amostral.

(continua)

Parâmetros	Determinações	Unidade	Resultados
M.O	Mat.Orgânica	g kg ⁻¹	4,8
pH	H ₂ O	-	5,50
pH	KCl	-	5,08
P	(Mehlich-1)	mg dm ⁻³	0,58
K	(Mehlich-1)	mg dm ⁻³	7,43
Ca	(KCl-1 mol/L)	cmolc dm ⁻³	0,07
Mg	(KCl-1 mol/L)	cmolc dm ⁻³	0
Al	(KCl-1 mol/L)	cmolc dm ⁻³	0,28
H + Al	(Acetato de cálcio)	cmolc dm ⁻³	0,47
S.B.	(Soma de bases)	cmolc dm ⁻³	0,09
C.T.C. efetiva	(C.T.C.)	cmolc dm ⁻³	0,369
C.T.C. pH 7,0	(C.T.C.)	cmolc dm ⁻³	0,559
m%	sat. por alumínio	%	75,88
V%	(Saturação de bases)	%	15,92
Relação Ca/Mg	-	-	0
Relação Ca/K	-	-	3,68
Relação Mg/K	-	-	0
Relação (Ca+Mg)/K	-	-	3,68
%K C.T.C.	(% de K na C.T.C.)	%	3,40
%Ca C.T.C.	(% de Ca na C.T.C.)	%	12,52

Tabela 2 - Características químicas do substrato na área amostral.

(conclusão)

Parâmetros	Determinações	Unidade	Resultados
%Mg C.T.C.	(% de Mg na C.T.C.)	%	0,00
%H+Al C.T.C.	(% H + Al na C.T.C.)	%	84,08

Fonte: Elaborado pela autora do trabalho.

Os resultados obtidos indicam que o substrato a ser trabalhado tem características de solo ácido, com baixa ou nenhuma disponibilidade de macronutrientes.

3.2 Preparo da área

O preparo da área iniciou em janeiro de 2022 com a etapa de subsolagem, para descompactação do solo antes da instalação das parcelas. A partir disso, por conta das características químicas do substrato (Tabela 2), procedeu-se com aplicação de corretivos, adubação e incremento de matéria orgânica (este último apenas nas parcelas que receberam o tratamento T1) antes do semeio e plantio das leguminosas utilizadas.

Para a correção do pH do solo foi aplicado 0,302 t ha⁻¹ (302 kg ha⁻¹) de calcário dolomítico com PRNT de 91%, e esta quantidade aplicada foi baseada no método de saturação por bases a partir da Equação (1). A saturação por bases indicada como adequada (V2= 65%) foi obtida a partir do trabalho de Veloso *et al.* (2020).

$$NC = T \cdot (V2 - V1) / PRNT \quad (1)$$

Na qual:

NC: necessidade de calagem em T/ha.

T: capacidade de troca catiônica (cmol_c dm⁻³)

V1: saturação por bases atual (%);

V2: saturação por bases desejada (%);

PRNT: Poder Relativo de Neutralização Total (%).

Considerando a recomendação de calagem (302 kg ha^{-1}) para a área experimental foi definida que haveria necessidade da quantidade de $1,8 \text{ kg}$ por parcela de 60 m^2 .

A adubação foi realizada em duas etapas: primeiro, nas covas na época do plantio e, segundo, em torno de 60 dias depois foi realizada adubação de cobertura. Para tanto, foram consideradas como referência para as leguminosas de cobertura as recomendações sugeridas por Cravo e Souza (2020) para cultura do feijão-caupi, já para as leguminosas arbóreas foram consideradas como referência as recomendações sugeridas por Rocha *et al.* (2020) para cultura de Eucalipto (Tabela 3).

Tabela 3 - Recomendações de adubação para nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).

Etapa:	Espécies de cobertura		Espécies arbóreas	
	Plantio	Cobertura	Plantio	Cobertura
N (kg ha^{-1})	20	20	10	20
P ₂ O ₅ (kg ha^{-1})	80	-	60	20
K ₂ O (kg ha^{-1})	90	-	10	40

Fonte: Brasil *et al.* (2020)

3.3 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em blocos casualizados com três tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos foram denominados T1, T2 e T3 (Tabela 4).

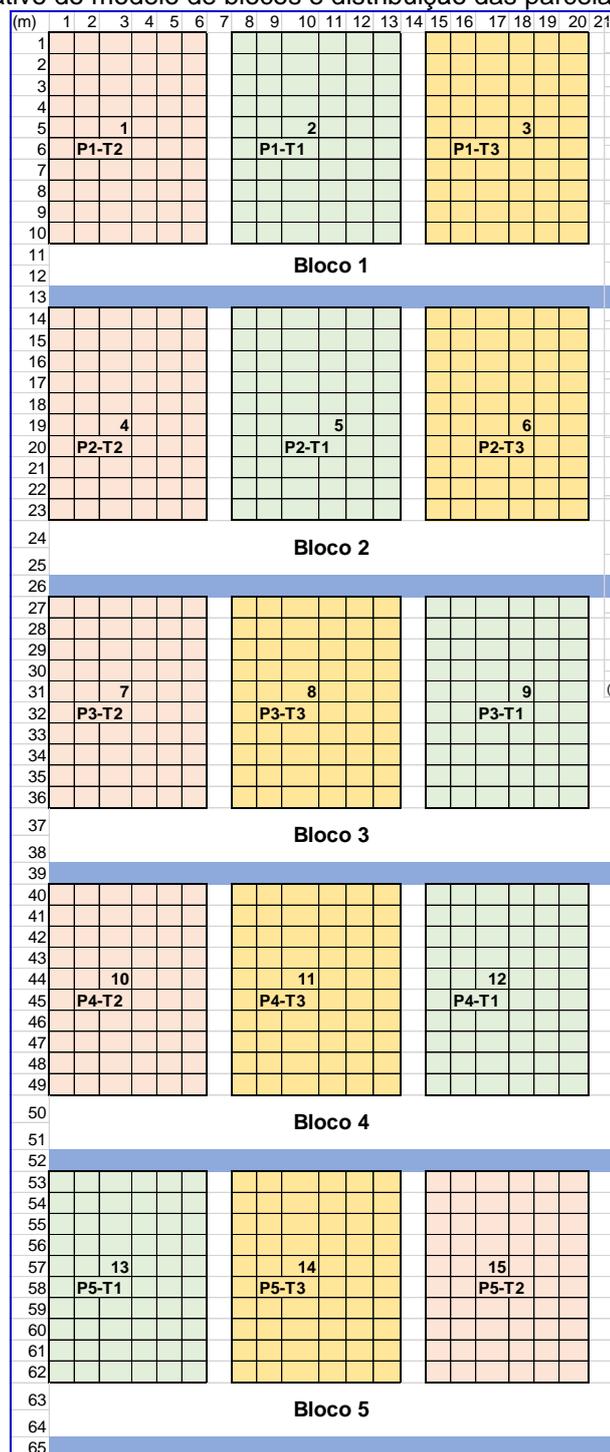
Tabela 4 - Descritivo dos tratamentos adotados.

Código	Descrição
T1	aplicação de matéria orgânica complementar a partir de resíduos orgânicos de madeira em decomposição, mais sementeira de espécies de cobertura e plantio de mudas arbóreas.
T2	sementeira de espécies de cobertura e plantio de mudas arbóreas.
T3	somente plantio de mudas arbóreas (testemunho).

Fonte: Elaborado pela autora do trabalho.

A definição dos tratamentos objetivou responder questões técnico-científicas relacionadas à sobrevivência e desenvolvimento das espécies utilizadas para diferentes condições de disponibilidade de matéria orgânica do substrato. Os tratamentos para correção de acidez do solo e adubação (tópico 3.2) foram aplicados em todas as parcelas do experimento. As parcelas possuem dimensão de $6 \times 10 \text{ m}$ (60 m^2), dispostas conforme esquema indicado na Figura 5.

Figura 5 - Ilustrativo do modelo de blocos e distribuição das parcelas por tratamento.



Fonte: Elaborado pela autora do trabalho.

Para o incremento de matéria orgânica nas parcelas que receberam o tratamento T1 foram coletados resíduos florestais provenientes de toras de madeira em decomposição. A proporção utilizada foi de 40 t ha⁻¹, resultando em 240 kg por parcela de 60 m² cada. O material foi pesado e separado em sacos de rafia em

proporções de 30 kg cada. A aplicação foi realizada por espalhamento na superfície do solo, sem incorporação (Figura 6).

Figura 6 - (A) Pesagem de matéria orgânica. (B) Espalhamento de matéria orgânica complementar.



Fonte: Elaborado pela autora do trabalho.

3.4 Aplicação de espécies vegetais

Para este trabalho foram priorizadas espécies resistentes à ambientes com menor disponibilidade de nutrientes no substrato, sendo a maioria delas pertencentes à Fabaceae por sua alta capacidade de fixação de nitrogênio no solo e de melhoria das características químicas do solo (COELHO *et al.*, 2007; MOREIRA *et al.*, 2014; PAULINO *et al.*, 2009; BARRETO; FERNANDES, 2001; CARVALHO *et al.*, 2022; SCIVITTARO *et al.*, 2004), dentre elas, espécies arbóreas e de cobertura, sendo uma arbustiva e uma herbácea.

Além disso, foi considerado o registro de ocorrência das espécies em levantamentos florísticos realizados nos platôs miltônia 3 e 5, antes do processo de extração de bauxita (SANTOS, 2014; SANTOS, 2016; FLORESTAS, 2020); e o conhecimento empírico dos trabalhadores do Programa de Recuperação de Áreas Degradadas – PRAD da MPSA que indicaram espécies com maior chance de sobrevivência em condições menos favoráveis de fertilidade do solo.

Foi também indicada *Clitoria fairchildiana* R.A.Howard por ter apresentado bom desenvolvimento em experimento de outra mineradora sobre rejeito de bauxita (MARINHO, 2021). No total foram utilizadas cinco espécies arbóreas (Tabela 5) para compor o experimento.

Tabela 5 - Espécies arbóreas utilizadas no experimento.

ID	Nome comum	Nome científico	Grupo Ecológico
Sp.1	Ingá-cipó	<i>Inga edulis</i> Mart.	Pioneira ¹ / Secundária inicial ²
Sp.2	Palheteira	<i>Clitoria fairchildiana</i> R.A.Howard	Pioneira ³
Sp.3	Fava-de-bolota	<i>Parkia platycephala</i> Benth.	Pioneira ⁴
Sp.4	Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Secundária tardia à Clímax ⁵
Sp.5	Urucum	<i>Bixa orellana</i> L.	Pioneira ⁶

Fonte: 1 Lorenzi (1998); 2 Santos, *et al.* (2004); 3 Castanho (2009); 4 Lorenzi (1998); 5 Costa, *et al.* (2011), Ferreira, *et al.* (2016); 6 Barbieri, *et al.* (2011).

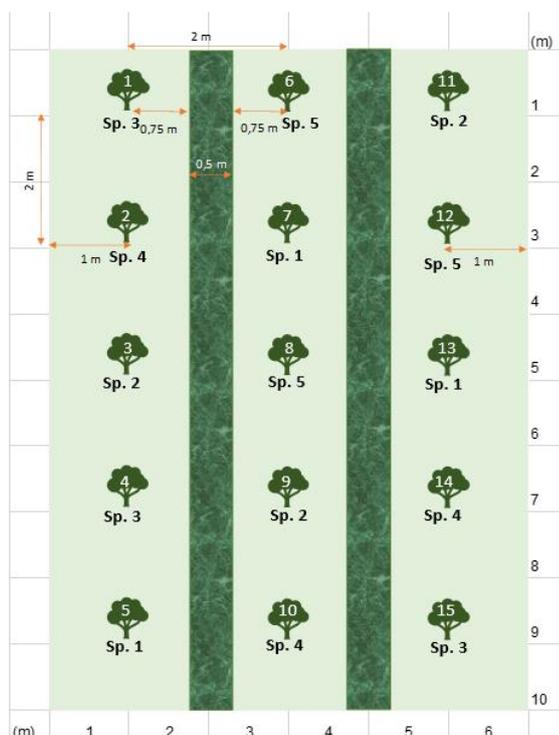
Para as espécies arbóreas foram produzidas mudas de raiz nua através de semeadura em sementeira com areia, quando os brotos atingiram de 2 a 3 pares de folhas foram então transferidos para sacos plásticos com dimensão de 14cmx20cmx10cm contendo substrato (mistura de *topsoil*, areia branca e adubo NPK 06-30-06). No transplante das plântulas abriu-se um orifício no centro da embalagem para acomodação completa da raiz. A partir disso, as mudas foram mantidas em viveiro coberto com sombrite 50%, localizado dentro da área da MPSA, com os devidos cuidados de irrigação periódica até atingirem a altura média de 30 cm, quando foram então submetidas ao processo de rustificação, que consistiu basicamente em maior exposição solar e menor irrigação antes da expedição para campo.

Das espécies utilizadas neste experimento todas passaram por um processo mínimo de três meses de rustificação, com exceção de *Clitoria fairchildiana* (Palheteira) que teve um tempo menor de rustificação, sendo o mínimo de dois meses, conforme indicado por Silva (2022b). Para expedição a campo, foi realizada análise qualitativa do colo, considerando diretrizes como aparência lenhosa “amarronzada”, textura rígida e robustez compatível com o peso da parte aérea da muda, com o porte das mudas variando de 30 cm a 50 cm, medidos da região do colo até a gema apical.

O plantio das mudas de espécies arbóreas ocorreu no dia 25/02/2022, em covas com dimensões de 40x40x40 cm, contendo uma mistura do material (rejeito) e *topsoil* proveniente das áreas de supressão da mina, na proporção de 1:1. Para o transplante das mudas, do saco para as covas, houve a garantia de manutenção do

torrão inteiro e ausência de enovelamento das raízes. As mudas foram plantadas com espaçamento de 2 m entre si e 1 m do limite da parcela (Figura 7).

Figura 7 - Disposição das mudas na parcela.



Fonte: Elaborado pela autora do trabalho.

As espécies de cobertura selecionadas foram *Crotalaria spectabilis* (crotalária) e *Canavalia ensiformis* (feijão-de-porco). Nas parcelas que receberam os tratamentos T1 e T2, entre as fileiras de mudas arbóreas, foi realizada a semeadura de *Crotalaria spectabilis* e *Canavalia ensiformis*, com distância de 75 cm das mudas de espécies arbóreas (Figura 7). A semeadura destas duas espécies foi realizada no dia 21/02/2022. As sementes de crotalária foram semeadas em linha reta com 2 cm entre si, já as sementes de feijão-de-porco tiveram o espaçamento de 10 cm entre si, conforme indicam Fernandes, Barreto e Emídio Filho (1999).

A coleta das plantas de *Crotalaria spectabilis* para medição da produção de biomassa ocorreu no início da floração dos indivíduos, 77 dias após a semeadura. Quanto a *Canavalia ensiformis*, a coleta para medição da biomassa ocorreu no início da floração dos indivíduos, 141 dias a partir da semeadura. A partir disso, procedeu-se o abate das plantas para aplicação como adubo verde nas próprias parcelas.

3.5 Indicadores avaliados

3.5.1 Solo

As amostras de rejeito para caracterização química foram coletadas após o plantio das mudas de leguminosas arbóreas e forrageiras, a cada seis meses, por um período de doze meses, a partir de coletas de amostras simples para formação de amostras compostas que foram submetidas à análise laboratorial. Para uma análise mais detalhada das camadas superficiais do solo, foram coletadas amostras nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Em cada parcela foram coletadas cinco subamostras para formar uma amostra composta para cada profundidade, conforme metodologia indicada por Abrahão e Marques (2013).

Foram realizadas análises químicas das amostras coletadas para avaliação da fertilidade do solo (rejeito) a partir dos seguintes parâmetros: matéria orgânica, pH em H₂O, acidez potencial (H+Al) e cátions trocáveis (Ca⁺², Mg⁺² e K⁺), Al⁺³, P, conforme metodologia indicada por Teixeira *et al.* (2017). Assim, foi possível também estimar os valores de soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V %) e saturação por Al (m %).

As análises físicas foram realizadas nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm no intuito de avaliar a evolução da estrutura do solo, para tanto, ao final do experimento foram avaliados os seguintes parâmetros: estabilidade de agregados em água, densidade do solo e porosidade total, seguindo a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017).

3.5.2 Vegetação

As mudas de espécies arbóreas foram codificadas com a representação do número da parcela e número da planta (código das mudas: código da parcela /nº da muda na parcela/código da espécie, ex.: P1-T2-1-Sp.3 lê-se *parcela do bloco 1, tratamento 2, muda 1, espécie 3*) e, foram avaliadas trimestralmente, quanto ao crescimento, através da análise de variáveis dendrométricas (Tabela 6). A análise da dinâmica de crescimento neste estudo inclui a determinação da taxa de mortalidade, ingresso de plantas regenerantes (espontâneas) e eventos fenológicos (brotamento, senescência, floração e frutificação). A partir do 6º mês após o plantio, foi avaliada a produção de serrapilheira por tratamento, através da coleta semestral (período seco e chuvoso) de material em subparcelas aleatórias de 1 m² dentro de cada parcela.

Tabela 6 - Variáveis estudadas para análise do desenvolvimento das espécies arbóreas.

Variável estudada	Periodicidade
Diâmetro do coleto – DC (cm)	Trimestral (1)
DAP (cm)	Trimestral (2)
Altura total (cm)	Trimestral
Taxa de mortalidade	Trimestral
% de folhas novas	Trimestral
% de folhas em senescência	Trimestral
Ausência/presença de flores/frutos	Trimestral
Produção de serrapilheira	Semestral (3)

Fonte: elaborado pela autora do trabalho.

Notas:

(1) Para plantas com altura do fuste até 1,30 m

(2) A partir do momento que as plantas atingirem fustes com altura maior que 1,30m

(3) A partir do 6º mês após o plantio

O diâmetro do coleto foi obtido a partir da medição do colo da muda a uma altura de 10 cm do solo. A medição da altura total foi realizada considerando a base até o fim da copa de cada planta. A informação do percentual de folhas novas e folhas em senescência, bem como a ausência ou presença de flores e frutos foi obtida através de observação visual.

O método de quantificação da produção de serrapilheira estocada no solo foi baseado na técnica descrita por Scoriza *et al.* (2012), assim foram instaladas estacas de madeira e barbante para delimitação de subparcelas de 1 m² a partir do 6º mês após o plantio, ao total foram instaladas 3 subparcelas ao acaso em cada parcela, considerando 5 blocos de repetições. A serrapilheira foi recolhida a cada 6 meses em sacos de papel identificados com o código da parcela e então pesados, na sequência o material foi submetido a secagem em estufa de 65°C até atingir massa constante para obtenção do peso seco. A partir disso, foram estimadas médias de produção semestral e anual de serrapilheira por tratamento. É importante mencionar que este método de coleta da serrapilheira foi o que se demonstrou mais adequado considerando o porte da vegetação presente no experimento, e a adaptação com uso de barbante permitiu que a coleta refletisse a disponibilidade real de serrapilheira no local, incluindo aquela trazida pelo arraste da chuva.

A produção de biomassa das espécies de cobertura (Crotalária e Feijão de porco) foi estimada a partir da massa seca total (MST), para coleta foram delimitadas ao acaso 3 subparcelas de 1 m² cada, a coleta da biomassa aérea ocorreu no período de floração (maio/2022 para Crotalária e julho/2022 para feijão de porco) a partir do corte raso das mudas dentro das subparcelas, essas amostras foram transportadas em sacos de papel e submetidas a processo de secagem em estufa a 65 °C até atingir massa constante para obtenção da massa seca. O material também foi pesado a fresco em balança de precisão de 5 g para análise da relação entre massa seca e fresca (% MS/MF).

3.6 Análise dos resultados

Para obtenção da porosidade total (PT) do substrato avaliado foi aplicada a Equação (2).

$$PT = (1 - D_s/D_p) * 100 \quad (2)$$

Na qual: D_s é a densidade do solo e D_p é Densidade das partículas, tendo sido aplicado o valor 2,65 g cm⁻³, usualmente utilizado para solos minerais (BRASIL NETO *et al.*, 2021).

Para análise do Incremento Periódico (IP) foi aplicada a Equação (3) com utilização dos dados dendrométricos obtidos para as mudas (diâmetro do coleto e altura total).

$$IP = (Y_1 - Y_0)/t \quad (3)$$

Na qual: Y_0 é o resultado da medição dendrométrica obtida na primeira medição; Y_1 é o resultado da medição dendrométrica obtida nas campanhas subsequentes e t é o tempo de análise (neste caso foi medido em trimestres).

Como a duração do experimento foi de 12 meses, conseqüentemente com análise de plantas com idade máxima de 1 ano, o Incremento Médio Anual (IMA) foi estimado a partir do IP trimestral com aplicação da Equação (4).

$$IMA = IP * 4 \quad (4)$$

Na qual: “IP” é incremento médio trimestral, multiplicado por 4 trimestres para obter a estimativa de incremento médio anual.

A taxa de mortalidade (T_m) foi avaliada por espécie, através da relação percentual entre a quantidade de mudas plantadas e a quantidade de mudas mortas, que pode ser representada pela Equação (5).

$$T_m (\%) = (N_1/N_0).100 \quad (5)$$

Na qual: N_0 é o número de mudas plantadas e N_1 é o número de mudas mortas ao final do período experimental.

A taxa de ingresso (T_i) foi avaliada tomando como referência o estudo de Coelho *et al.* (2003), a partir da Equação (6).

$$T_i (\%) = (N_1/N_0).100 \quad (6)$$

Na qual: N_0 é o número de mudas plantadas e N_1 é o número de indivíduos ingressantes ao final do período experimental. Neste estudo foram considerados como ingressantes os indivíduos de espécies arbustivas e arbóreas regenerantes presentes nas parcelas.

Para obtenção da relação entre a massa seca e a massa fresca ($R_{.MS/MF}$) produzidos pelas plantas de cobertura foi aplicada a Equação (7).

$$R_{.MS/MF} (\%) = (M_S/M_F).100 \quad (7)$$

Na qual: M_S é a Massa seca e M_F é a Massa fresca.

Para análise de variância das variáveis dendrométricas obtidas e resultados das análises de solo foi aplicada ANOVA seguida de teste de Tukey com utilização do programa Rstudio.

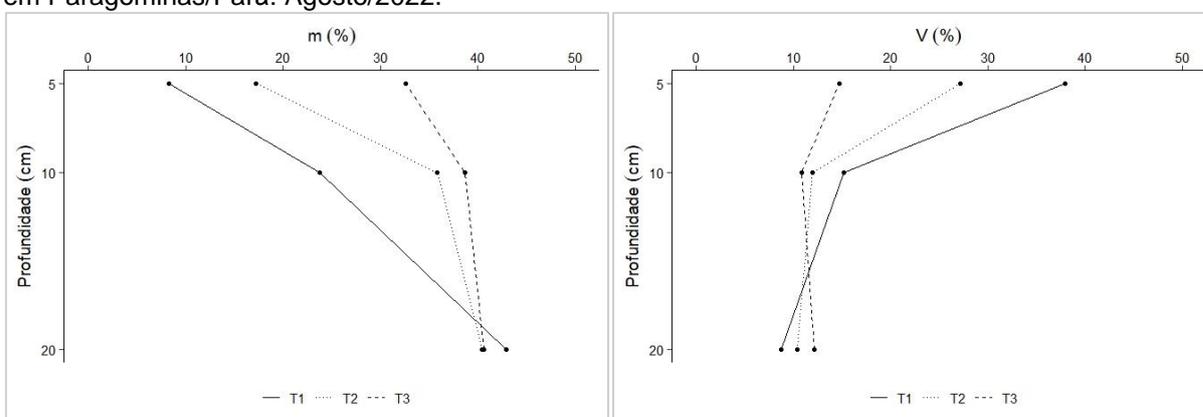
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Solo

4.1.1 Parâmetros químicos

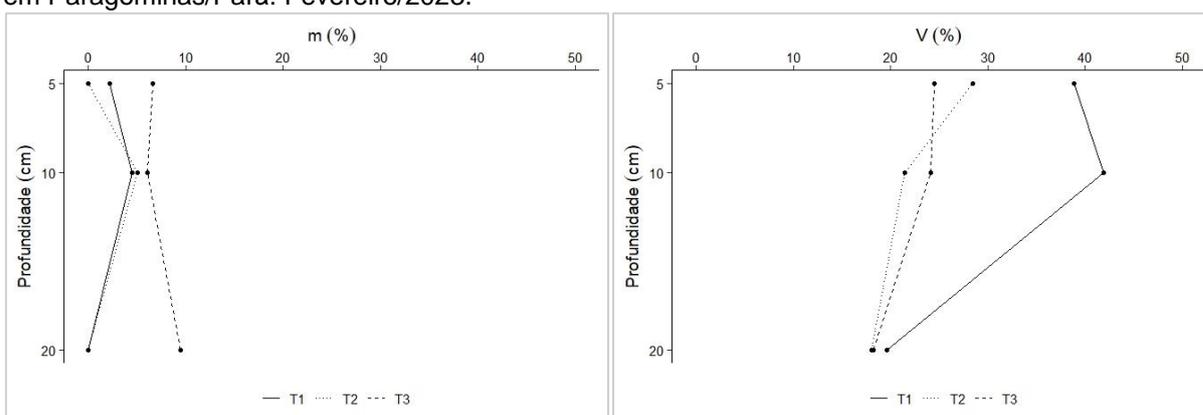
Na primeira campanha de análise do solo, ocorrida seis meses após a implantação do experimento (agosto/2022), os valores médios de saturação por alumínio (m) se comportaram de forma inversa aos de saturação por bases (V) para todos os tratamentos e camadas avaliadas (Figura 8).

Figura 8 – Evolução dos valores médios de saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) em função dos tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas) aplicados em dique teste de rejeito de bauxita, em Paragominas/Pará: Agosto/2022.



Na segunda época de coleta (fevereiro/2023), os resultados de V não diferiram significativamente em função dos tratamentos em nenhuma das camadas avaliadas (Tabela 7), no entanto, a relação inversa entre os parâmetros m e V ficou ainda mais evidente (Figura 9).

Figura 9 – Evolução dos valores médios de saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) em função dos tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas) aplicados em dique teste de rejeito de bauxita, em Paragominas/Pará: Fevereiro/2023.



Foi possível notar que ao longo do tempo houve redução significativa da saturação de Al (m%) no substrato na maioria dos tratamentos e profundidades avaliadas (Tabela 7). Tais resultados demonstram a resposta positiva do substrato ao processo de calagem aplicado durante a preparação das parcelas, e que na camada superior o tempo de resposta variou de acordo com o tratamento aplicado, de forma que quanto maior a indução da disponibilidade de matéria orgânica no tratamento, melhor o resultado em 6 meses após a implantação do experimento.

Tabela 7 - Valores médios de conteúdo de saturação por alumínio (m) e saturação por bases (V) entre os períodos de coleta, Agosto de 2022 (Ago/22) e Fevereiro de 2023 (Fev/2023) em função dos tratamentos aplicados (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).

Tratamento	Profundidade cm	m (%)		V (%)	
		Ago/2022	Fev/2023	Ago/2022	Fev/2023
T1	0-5	8,31a	2,18b	37,95	38,87
T2	0-5	17,23a	0,00b	27,17	28,43
T3	0-5	32,64	6,62	14,71	24,53
T1	5-10	23,77a	4,56b	15,15	41,93
T2	5-10	35,86a	5,05b	11,94	21,49
T3	5-10	38,70a	6,06b	10,87	24,11
T1	10-20	42,90a	0,00b	8,75b	19,64a
T2	10-20	40,43a	0,00b	10,42	18,03
T3	10-20	40,64	9,52	12,13	18,20

Houve resposta significativa do solo na camada 10-20 cm em relação à saturação por bases (V%) em função do tratamento T1, onde ocorreu aumento dos valores do indicador ao longo do tempo (Tabela 7). O aumento de V% ocorrido nas demais camadas e tratamentos não foram estatisticamente significativos.

Na camada mais superficial (0 – 5 cm) os resultados indicam que o conteúdo de MO obtidos a partir da aplicação do tratamento T1 foi significativamente superior aos demais tratamentos nas duas épocas de amostragem (Tabela 8). Estes resultados demonstram a resposta positiva do solo a prévia adição de matéria orgânica prevista no tratamento T1 no início do experimento.

Tabela 8 – Valores médios de conteúdo de matéria orgânica (MO) entre os períodos de coleta, Agosto de 2022 (Ago/22) e Fevereiro de 2023 (Fev/2023) em função dos tratamentos aplicados (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).

Época da Coleta	Tratamento	Profundidade cm	MO g kg ⁻¹
Ago/2022	T1	0-5	25,3a
	T2	0-5	4,0c
	T3	0-5	3,8c
Fev/2023	T1	0-5	27,1a
	T2	0-5	10,3b
	T3	0-5	4,7c

Na segunda coleta registrou-se que houve incremento no conteúdo de matéria orgânica da camada superior em função do tratamento T2 (Tabela 8), tal resultado pode ser atribuído à incorporação e decomposição de biomassa no substrato, resultante do abate das leguminosas de cobertura utilizadas. O estudo de Andrade *et al.* (2022) apontou que espécies de *Crotalaria* apresentam taxa de decomposição em 60 dias após o corte, o que corrobora com o resultado obtido para T2 após o abate das leguminosas de cobertura.

Quando se comparam os tratamentos percebe-se que nas duas coletas os resultados de CTC a pH 7,0 na camada superior do tratamento T1 foram beneficiados pela adição de matéria orgânica no início do experimento (Tabela 9). Nas camadas 5-10 e 10-20 cm não houve diferença significativa entre os tratamentos para CTC a pH 7,0.

Tabela 9 – Valores médios de CTC a pH7 entre os períodos de coleta, Agosto de 2022 (Ago/22) e Fevereiro de 2023 (Fev/2023) em função dos tratamentos aplicados (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).

Época da Coleta	Tratamento	Profundidade cm	CTC a pH7 cmolc dm ⁻³
Ago/2022	T1	0-5	3,40a
	T2	0-5	2,64b
	T3	0-5	2,08b
Fev/2023	T1	0-5	2,48a
	T2	0-5	1,18b
	T3	0-5	1,09b

Entre épocas de coleta, com exceção da camada 5-10 cm em T1, observou-se a redução da CTC a pH7 em todas as camadas e tratamentos (Tabela 10), o que pode estar relacionado à lixiviação de nutrientes no período chuvoso e à aceleração de

decomposição da MO na presença de umidade. Acosta *et al.* (2014) em um estudo que avaliou a decomposição de plantas de cobertura, identificou que durante o período de maior regime pluviométrico houve maior taxa de decomposição da fitomassa.

Tabela 10 – Evolução entre épocas dos valores médios de CTC a pH7 em função dos tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas) aplicados em dique teste de rejeito de bauxita, em Paragominas-PA.

Tratamento	Profundidade cm	CTC a pH7 (cmolc dm ⁻³)	
		Ago/2022	Fev/2023
T1	0-5	3,40a	2,48b
T2	0-5	2,00a	1,07b
T3	0-5	1,70a	0,97b
T1	5-10	2,64	1,18
T2	5-10	1,72a	1,07b
T3	5-10	1,67a	0,84b
T1	10-20	2,08a	1,09b
T2	10-20	1,72a	1,10b
T3	10-20	1,83a	0,88b

Os resultados de pH indicaram diferença significativa entre épocas apenas na camada superior (0-5 cm) em função dos tratamentos T1 e T2, nas demais camadas não houve diferença significativa entre épocas ou tratamento (Tabela 11).

Tabela 11 – Valores médios de pH em H₂O em função de tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas) e épocas de amostragem em Dique Teste de rejeito de bauxita, Paragominas-PA.

Tratamento	Profundidade cm	pH H ₂ O	
		Ago/2022	Fev/2023
T1	0-5	4,59b	5,77a
T2	0-5	4,62b	5,58a
T3	0-5	4,96	5,55
T1	5-10	4,95	5,68
T2	5-10	4,67	5,02
T3	5-10	4,87	4,98
T1	10-20	5,26	5,62
T2	10-20	5,17	5,57
T3	10-20	4,85	5,33

Na sequência são apresentados os resultados gerais da análise química do solo (Tabela 12), é importante mencionar que as análises estatísticas foram realizadas para comparação dos resultados em cada camada e tratamento entre campanhas, não houve, neste momento, análise comparativa entre camadas.

Tabela 12 – Tabela geral de resultados médios dos parâmetros de análise química do solo entre campanhas.

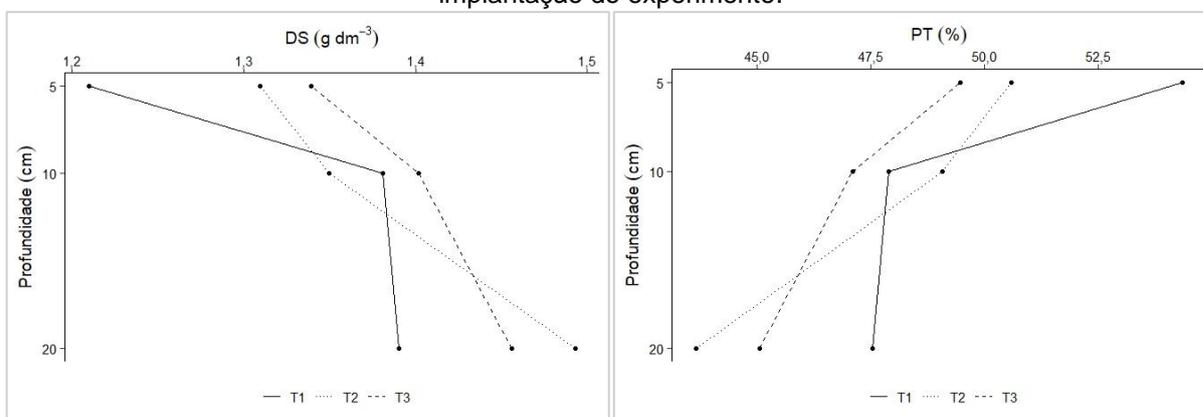
Data da Coleta	Tratamento	Profundidade cm	pH H ₂ O	MO g kg ⁻¹	P mg dm ⁻³	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CTC pH 7,0	CTC Efetiva	V %	m
						cmolc dm ⁻³									
Ago/ 2022	T1	0-5	4,6	25,3	29,9	1,0	0,1	0,2	0,1	2,2	1,2	3,4	1,4	38	8
		5-10	5,0	9,6	5,5	0,3	0,0	0,1	0,1	2,2	0,4	2,6	0,5	15	24
		10-20	5,3	3,7	0,8	0,2	0,0	0,0	0,1	1,9	0,2	2,1	0,3	9	43
	T2	0-5	4,6	4,0	15,2	0,4	0,0	0,1	0,1	1,5	0,5	2,0	0,6	27	17
		5-10	4,7	2,5	3,8	0,1	0,0	0,0	0,1	1,5	0,2	1,7	0,3	12	36
		10-20	5,2	2,9	0,4	0,1	0,1	0,0	0,1	1,5	0,2	1,7	0,3	10	40
	T3	0-5	5,0	3,8	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	1,4	0,3	1,7	0,4	15	33
		5-10	4,9	4,4	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	1,5	0,2	1,7	0,3	11	39
		10-20	4,9	4,5	2,8	0,2	0,0	0,1	0,1	1,6	0,2	1,8	0,3	12	41
Fev/ 2023	T1	0-5	5,8	27,1	22,0	0,6	0,3	0,1	0,0	1,5	0,9	2,5	1,0a	39	2
		5-10	5,7	11,6	1,6	0,1	0,2	0,0	0,0	0,9	0,3	1,2	0,3	42	5
		10-20	5,6	4,2	0,6	0,1	0,1	0,0	0,0	0,9	0,2	1,1	0,2	20	0
	T2	0-5	5,6	10,3	2,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,8	0,3	1,1	0,3	28	0
		5-10	5,0	2,3	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,8	0,2	1,1	0,3	21	5
		10-20	5,6	4,1	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,9	0,2	1,1	0,2	18	0
	T3	0-5	5,6	4,7	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7	0,2	1,0	0,2	25	7
		5-10	5,0	8,9	0,7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7	0,2	0,8	0,2	24	6
		10-20	5,3	5,7	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,7	0,2	0,9	0,2	18	10

MO: matéria orgânica; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; Al: alumínio; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V: saturação de bases; m: saturação por alumínio; T1: plantio de espécies arbóreas, espécies de cobertura (adubação verde) e uso de material orgânico T2: plantio de espécies arbóreas e espécies de cobertura (adubação verde); T3: testemunha, tendo recebido apenas o plantio de espécies arbóreas.

4.1.2 Parâmetros físicos

Os resultados obtidos a partir das análises físicas do solo para os parâmetros densidade e porosidade total (Figura 10) indicaram que, em cada profundidade avaliada, não houve variação significativa em função dos tratamentos. Tais resultados apontaram que a camada superior analisada (0-5 cm) foi a que apresentou valores ligeiramente menores de densidade, bem como os maiores valores de porosidade foram encontrados na camada superior, diminuindo com o aumento da profundidade. Tal resposta pode ser associada à maior disponibilidade de matéria orgânica na camada superior do solo.

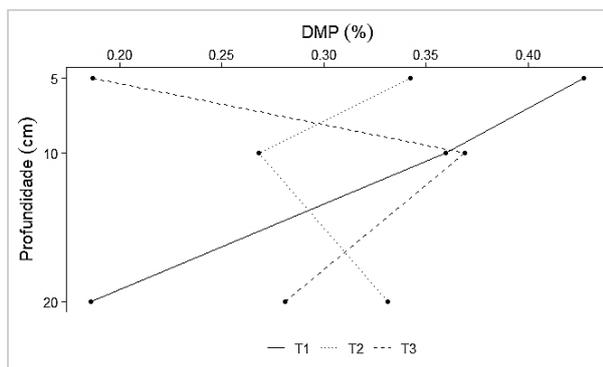
Figura 10 - Resultados médios das análises de densidade e porosidade total após 12 meses de implantação do experimento.



Di Carlo *et. al.* (2019) em uma revisão sistemática da literatura verificaram em diversos estudos que a adição de matéria orgânica e a colonização por plantas contribui para a redução da densidade do substrato em áreas de disposição de lama vermelha, que embora não seja exatamente o mesmo material tratado neste estudo, possui características físicas parecidas.

A análise de estabilidade de agregados demonstrou que o diâmetro médio ponderado (DMP) não variou significativamente em função dos tratamentos em nenhuma das camadas avaliadas. Os valores de DMP variaram entre 0,19 e 0,43 mm (Figura 11).

Figura 11 – Evolução dos valores médios do diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados em amostras de solos de área de disposição de rejeitos sob processo de recuperação ambiental, em Paraquominas – Pará, 2023.



Importante ressaltar que a resposta do solo em relação a atributos físicos como densidade, porosidade e estabilidade de agregados pode levar anos, conforme pontuado por Di Carlo *et al.* (2019), os quais indicaram que a melhoria de atributos físicos foi mais representativa em áreas que possuíam entre 9 e 11 anos de implantação dos tratamentos, e que além disso os melhores resultados foram encontrados na rizosfera, demonstrando a importância das raízes das plantas no processo de estruturação do solo.

4.2 Vegetação

4.2.1 Biomassa e Serrapilheira

Em relação à produção de biomassa pelas espécies de cobertura (Tabela 13) verificou-se que os valores médios de matéria seca (MS) produzido por *Crotalaria spectabilis* (crotalária) foram 110% maior nas parcelas do tratamento T1 (7,81 t ha⁻¹) em relação ao obtido nas parcelas do tratamento T2 (3,71 t ha⁻¹).

Quanto à *Canavalia ensiformis* (feijão-de-porco) os valores médios de matéria seca foram 18% maior nas parcelas do tratamento T1 (1,65 t ha⁻¹) em relação ao obtido nas parcelas do tratamento T2 (1,40 t ha⁻¹) – Tabela 13.

Tabela 13 – Valores médios de produção de biomassa por espécie de leguminosa utilizada na cobertura do solo em Dique teste de rejeito de bauxita, em Paraquominas, Pará.

Tratamento	Espécie	MF (t ha ⁻¹)	MS (t ha ⁻¹)	Relação MF/MS (%)
T1	<i>Crotalaria spectabilis</i> Röth	21,24	7,81	35%
	<i>Canavalia ensiformis</i> (L.) DC.	4,57	1,65	40%
T2	<i>Crotalaria spectabilis</i> Röth	12,03	3,71	31%
	<i>Canavalia ensiformis</i> (L.) DC.	3,74	1,40	45%

MF: Matéria fresca; MS: Matéria seca.

Ao longo das coletas, após abate das plantas das espécies de cobertura, foi identificado que houve germinação espontânea de *Crotalaria spectabilis*, assim, no 11º mês após a implantação do experimento foi realizado novo abate e avaliação da produção de biomassa dos indivíduos remanescentes. Neste caso, o resultado obtido foi que em T1 a produção de MS foi maior do que em T2, com valores médios de 0,67 t ha⁻¹ e 0,04 t ha⁻¹, respectivamente.

Os resultados apontam que a utilização de material orgânico em T1 foi fator determinante na maior produção de biomassa por *Crotalaria spectabilis* em relação ao tratamento T2. É possível que *Canavalia ensiformis* não tenha demonstrado a mesma diferença de resposta entre os tratamentos devido ao espaçamento aplicado durante a semeadura (a cada 10 cm), que implicou em menos sementes plantadas em relação à *Crotalaria spectabilis*, semeadas a cada 2 cm.

Em relação a produção de serrapilheira, durante o período seco, observou-se no tratamento T1 uma taxa média de 2,31 t ha⁻¹, enquanto nos tratamentos T2 e T3 registraram-se taxas de 1,81 t ha⁻¹ e 0,28 t ha⁻¹, respectivamente. No período chuvoso, as taxas de produção de serrapilheira foram de 1,61 t ha⁻¹ para T1, 0,36 t ha⁻¹ para T2 e 0,05 t ha⁻¹ para T3. Tais resultados demonstram diferenças significativas na produção de serrapilheira entre os tratamentos (Tabela 14), indicando que a pré-disponibilidade de matéria orgânica em cada tratamento influenciou a quantidade de serrapilheira depositada no solo, uma vez que nos estudos fenológicos não foram identificados picos de queda foliar que pudessem influenciar os resultados de produção de serrapilheira nos períodos de coleta em função dos tratamentos.

Tabela 14 – Valores médios de produção de matéria seca de serrapilheira em função de tratamentos e período de coleta.

Tratamento	Agosto/2022	Fevereiro/2023
	t ha ⁻¹	
T1	2,31a	1,61a
T2	1,81b	0,36b
T3	0,28c	0,05b

O menor resultado de serrapilheira em fevereiro/2023 (período chuvoso) pode estar associado ao arraste de material pela chuva e à decomposição dos resíduos de biomassa gerada pelo abate das leguminosas de cobertura (ACOSTA *et al.*, 2014).

4.2.2 Desenvolvimento das mudas de espécies arbóreas

Os resultados de incremento periódico (IP) e estimativas de incremento médio anual (IMA) indicaram que *Parkia platycephala* (Fava-de-bolota) apresentou valores acima da média (em comparação com as demais espécies) nos três tratamentos, tanto em relação ao diâmetro do colo quanto à altura (Tabela 15). Para *Bixa orellana* (Urucum) observou-se os melhores resultados de IP e IMA associado ao diâmetro do colo nos tratamentos T1 e T3. O incremento de altura de *Bixa orellana* foi o segundo menor nos três tratamentos, entretanto, os dados de altura obtidos corroboram com as informações de porte desta espécie em cultivares da Embrapa³ indicados para o estado do Pará (Castro *et al.*, 2009).

Tabela 15 - Resultados do incremento periódico trimestral médio e incremento médio anual estimado para as espécies arbóreas utilizadas.

Tratamento	Espécie	IP	IP	IMA	IMA
		DColo	Altura	DColo	Altura
cm					
T1	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	0,15	5,83	0,60	23,33
	<i>Parkia platycephala</i> Benth.	0,49	35,50	1,97	142,00
	<i>Inga edulis</i> Mart.	0,43	18,40	1,70	73,60
	<i>Clitoria fairchildiana</i> R.A.Howard	0,38	27,83	1,51	111,33
	<i>Bixa orellana</i> L.	0,57	8,81	2,30	35,24
T2	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	0,08	4,74	0,34	18,95
	<i>Parkia platycephala</i> Benth.	0,43	35,56	1,73	142,22
	<i>Inga edulis</i> Mart.	0,31	14,81	1,26	59,24
	<i>Clitoria fairchildiana</i> R.A.Howard	0,23	16,82	0,93	67,29
	<i>Bixa orellana</i> L.	0,40	5,62	1,60	22,49
T3	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	0,11	4,12	0,45	16,48
	<i>Parkia platycephala</i> Benth.	0,47	40,50	1,87	162,00
	<i>Inga edulis</i> Mart.	0,28	15,02	1,13	60,10
	<i>Clitoria fairchildiana</i> R.A.Howard	0,30	25,53	1,21	102,13
	<i>Bixa orellana</i> L.	0,52	7,67	2,09	30,67

IP: Incremento trimestral médio; IMA: estimativa de incremento médio anual; DColo: diâmetro do colo.

Nos três tratamentos *Hymenaea courbaril* (Jatobá) foi a que apresentou os menores valores de IP e IMA, tanto em relação ao diâmetro do colo quanto à altura. Este resultado pode ser um indicador associado ao seu grupo ecológico, por ser uma espécie secundária tardia à clímax, o ambiente não foi propício o suficiente para o seu

³ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

desenvolvimento, em contraste com as espécies pioneiras que apresentaram resultados melhores de IP e IMA nos três tratamentos. Lima *et al.* (2010) observaram que a exposição de mudas de *Hymenaea courbaril* à pleno sol afetou negativamente seu desenvolvimento, o que pode ter sido um dos fatores associados ao resultado obtido neste estudo.

No geral, no tratamento T1 obteve-se os maiores resultados de IP e IMA, enquanto em T2 ocorreram os menores resultados dos 3 tratamentos. Cabe mencionar que as análises de variância e Teste Tukey apontaram que somente *Inga edulis* apresentou variação significativa de diâmetro do colo entre os tratamentos (Tabela 16), não apresentando variação significativa de altura entre os tratamentos. Nenhuma das demais espécies apresentou variação significativa entre os tratamentos que se enquadrasse no pressuposto elegível para Teste Tukey no Rstudio, tanto para diâmetro do colo quanto para altura.

Tabela 16 - Resultado de Teste Tukey para *Inga edulis* Mart.

Tratamento	IP Dcolo	IMA Dcolo
	cm	
T1	0,43a	1,70a
T2	0,31ab	1,26ab
T3	0,28b	1,13b

Quanto à taxa de mortalidade (Tm), os menores resultados foram observados nos tratamentos T2 e T3. Para *Clitoria fairchildiana* (Palheteira) observou-se Tm de 0% em todos os tratamentos, enquanto para *Hymenaea courbaril* (Jatobá) obteve-se a maior taxa de mortalidade considerando o experimento como um todo, tendo apresentado maior Tm no tratamento T1 (Tabela 17).

Tabela 17 - Resultados da taxa de mortalidade indicada por espécie e tratamento.

Espécie	T _m -T1	T _m -T2	T _m -T3	T _m -Total
<i>Parkia platycephala</i> Benth.	20%	0%	7%	9%
<i>Inga edulis</i> Mart.	0%	7%	7%	4%
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	33%a	7%b	7%b	16%
<i>Clitoria fairchildiana</i> R.A.Howard	0%	0%	0%	0%
<i>Bixa orellana</i> L.	7%	0%	0%	2%
Tm por tratamento	12%	3%	4%	

No geral, os valores de mortalidade não diferiram significativamente entre as espécies, em função dos tratamentos, com exceção de *Hymenaea courbaril* que

diferiu significativamente no tratamento T1. Não foi observada variação entre os valores de T2 e T3, apesar de ter sido registrado Tm de 20% para *Parkia platycephala* no tratamento T1, em números inteiros a resposta de mortalidade média não foi considerada significativa.

Na observação dos eventos fenológicos, registrou-se que no quarto trimestre após o plantio, *Bixa orellana* (urucum) apresentou flores e/ou frutos em todos os tratamentos, de modo que no tratamento T1 80% dos indivíduos apresentavam floração, em T2 67% e em T3 53%. Este resultado indica que o período de floração ocorrido no experimento é coerente com a floração da espécie em outros ambientes após o plantio, indicando que a partir de 6 a 10 meses após o plantio ocorre sua floração, conforme indicado por Castro *et al.* (2009), e corrobora com informações fenológicas do urucum apontadas por Portal *et al.* (2013) e Franco *et al.* (2008), que indicam que a espécie floresce e frutifica todos os meses do ano.

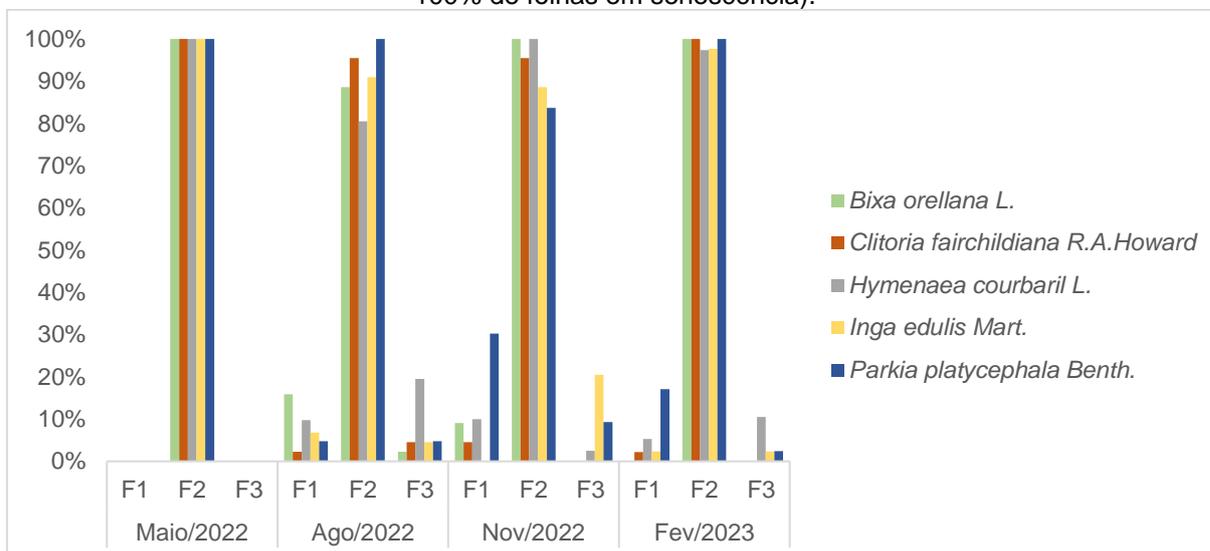
Também no quarto trimestre após o plantio, *Clitoria fairchildiana* (palheteira) apresentou floração em 33%, 73% e 80% dos indivíduos em T1, T2 e T3, respectivamente. Nenhuma das demais espécies apresentou floração ao longo do experimento.

Em geral, os resultados das demais fases fenológicas foi homogêneo entre os tratamentos, não havendo grande diferença entre os resultados de percentuais de folhas em broto, maduras ou em senescência. Assim, tais dados serão apresentados e discutidos na sequência sem distinção de tratamento.

Na 1ª coleta (3 meses após o plantio) observou-se que 100% das mudas plantadas estavam com 50 a 100% de folhas maduras, ao longo das demais coletas trimestrais esse comportamento não apresentou variação expressiva, de forma que a maioria das mudas se manteve com 50 a 100% de folhas maduras e não apresentou tendência de queda foliar (senescência) ou brotamento maior que 25% (Figura 12).

Os maiores registros de indivíduos com folhas em senescência (variando de 50 a 100%), ocorreram em Agosto e Novembro de 2022 em 20% de mudas de *Hymenaea courbaril* e *Inga edulis*, respectivamente. Por outro lado, houve pico de brotamento de forma mais intensa para 30% dos indivíduos de *Parkia platycephala* em Novembro/2022. Cabe reforçar, que para os indivíduos de *Hymenaea courbaril* foram registradas as menores taxas de crescimento no experimento, e ao longo das análises de fenologia as mudas desta espécie não apresentaram desenvolvimento da copa de forma que houvesse aumento expressivo da quantidade de galhos e folhas.

Figura 12 – Percentual de indivíduos por espécie em cada fase fenológica avaliada ao longo das coletas trimestrais (F1: Percentual de indivíduos com 50 a 100% de folhas em brotamento; F2: Percentual de indivíduos com 50 a 100% de folhas maduras; F3: Percentual de indivíduos com 50 a 100% de folhas em senescência).



4.2.3 Ingresso de espécies regenerantes

Na área do experimento foram quantificados 139 indivíduos de 9 espécies regenerantes de porte arbustivo e arbóreo, além de 78 indivíduos de 6 espécies de porte herbáceo, distribuídos nos três tratamentos (Tabela 18).

Tabela 18 - Espécies regenerantes registradas nos três tratamentos (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).

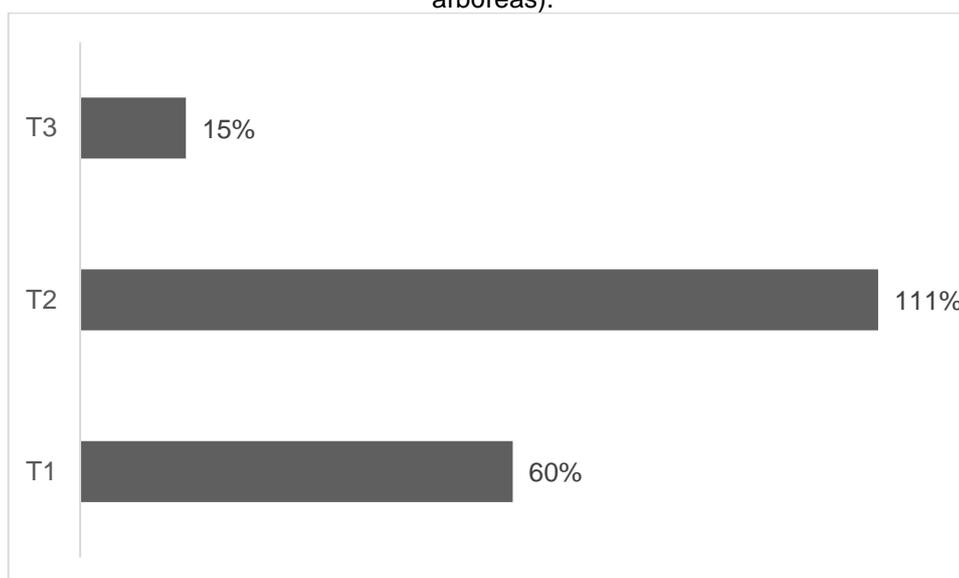
Porte	Nome científico	Tratamento	Total indivíduos
Arbóreas e arbustivas	<i>Byrsonima verbascifolia</i> (L.) DC.	T1; T2	2
	<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	T1; T2; T3	10
	<i>Inga marginata</i> Willd.	T2	4
	<i>Lantana camara</i> L.	T3	1
	<i>Solanum crinitum</i> Lam.	T1; T2; T3	11
	<i>Solanum rugoso</i>	T1; T2; T3	6
	<i>Solanum subnerme</i> Jacq.	T1; T2; T3	23
	<i>Urena lobata</i> L.	T1; T2	77
	<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	T1; T2; T3	5
Herbácea	<i>Borreria alata</i> (Aubl.) DC.	T1; T2; T3	6
	<i>Borreria spinosa</i> Cham. & Schltld.	T1; T2; T3	50
	<i>Emilia fosbergii</i> Nicolson	T1	1
	<i>Mimosa pudica</i> L.	T1; T2; T3	7
	<i>Mimosa</i> sp (1)	T1; T2	12
	<i>Waltheria indica</i> L.	T1; T3	2

(1) Espécie sem espinhos da família *Mimosa*.

Nenhuma das espécies plantadas no experimento foi encontrada entre os indivíduos regenerantes identificados, fato associado aos resultados das fases fenológicas observadas, que indicaram floração para duas das cinco espécies no último trimestre do experimento, não havendo tempo hábil para possível germinação destas quando da avaliação do ingresso espontâneo de novos indivíduos.

No tratamento T2 foi registrado o maior índice de ingresso de espécies regenerantes de porte arbustivo e arbóreo (Figura 13). No tratamento T3, por sua vez, foram observadas as menores taxas de ingresso, fato que pode ser associado à baixa disponibilidade de nutrientes nas parcelas do tratamento.

Figura 13 - Taxa de ingresso espécies de porte arbustivo e arbóreo por tratamento (T1 – material orgânico + leguminosas de cobertura + arbóreas; T2 - leguminosas de cobertura + arbóreas; T3 - arbóreas).



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As espécies arbóreas utilizadas neste estudo, pertencentes ao grupo ecológico de pioneiras, apresentaram resultados satisfatórios em relação à taxa de mortalidade e crescimento e podem ser consideradas aptas para o povoamento de barragens de rejeito de bauxita na fase inicial do processo de descaracterização.

Das espécies estudadas, apenas *Hymenaea courbaril*, pertencente ao grupo ecológico secundária tardia à clímax, não é recomendada para plantio sobre rejeito de bauxita na fase inicial de descaracterização de barragem.

As espécies de cobertura, por sua vez, apresentaram resultados satisfatórios de produção de biomassa considerando as condições do substrato no momento da semeadura.

As propriedades físicas do solo não foram alteradas de forma significativa em função do tratamento.

Em relação às propriedades químicas ficou demonstrado que a utilização do tratamento T1 tende a promover melhorias nos atributos como MO, CTC, m%, V% e pH, principalmente na camada mais superficial (0-5 cm). De forma geral, os resultados obtidos em relação aos atributos químicos do substrato demonstraram que:

- A utilização de material orgânico, associado a semeadura de espécies de cobertura e plantio de espécies arbóreas foi o tratamento com melhores resultados no curto prazo.
- A semeadura de espécies de cobertura e plantio de espécies arbóreas, sem adição de matéria orgânica de fonte externa, contribui para melhoria do solo em menor intensidade e rapidez de resposta que o primeiro tratamento.
- A aplicação de tratos culturais (todos os tratamentos) e o plantio das espécies arbóreas (tratamento controle), por sua vez, demonstrou ser a forma mais lenta de se obter melhorias no substrato na fase inicial de processos de descaracterização de barragens.

Adicionalmente, considerando o período de análise desde a implantação deste experimento (12 meses), é possível inferir que não houve tempo suficiente para resposta do substrato em relação aos atributos físicos do rejeito e de alguns parâmetros da análise de fertilidade como pH, V% e CTC nas camadas mais profundas.

A implantação dos tratamentos viabilizou o ingresso de espécies regenerantes sobre o rejeito, sendo o tratamento T2 o mais propício para o ingresso espontâneo de espécies arbustivas e arbóreas, e o tratamento T1 o mais propício para o ingresso de herbáceas.

A indução do processo de sucessão ecológica promovida pelos diferentes tratamentos aplicados neste experimento, foi efetiva para a introdução de fatores biológicos no substrato acompanhado do ingresso de espécies regenerantes herbáceas, arbustivas e arbóreas, bem como promoveu povoamento inicial com espécies arbóreas pioneiras resistentes às condições do substrato, não havendo tempo suficiente para resposta do solo quanto aos atributos físicos, mas tendo demonstrado resultados positivos para a melhoria das características químicas na camada superficial.

Recomendações para estudos futuros:

- Avaliar o comportamento das raízes ao longo do tempo, considerando a estrutura física do rejeito nas camadas mais profundas.
- Avaliar a melhoria dos atributos físico-químicos do substrato de rejeito de bauxita em função de diferentes ciclos e tipos de manejo das leguminosas de cobertura.
- Continuidade do monitoramento das propriedades físico-químicas na área do experimento, a fim de avaliar se ao longo do tempo é obtido retorno em qualidade dos parâmetros físicos nos diferentes tratamentos e dos parâmetros químicos nas camadas menos superficiais.
- Avaliar a produção de serrapilheira por espécie recomendada neste estudo para utilização na fase inicial do processo de descaracterização de barragens.
- Este estudo foi conduzido em ambiente estável em relação ao recalque e compactação do rejeito, e não foram avaliados parâmetros geotécnicos, como o efeito do peso das espécies arbóreas induzidas na reologia e possibilidade de recalque do material em diferentes profundidades de deposição do rejeito, parâmetros importantes de serem avaliados quando da implementação de planos de descaracterização de barragens de rejeito e que podem ser objeto de estudos complementares a este.

REFERÊNCIAS

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. **Alumínio. Cadeia Primária**. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>. Acesso em 09/06/2022.

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. **Bauxita no Brasil. Mineração Responsável e Competitividade**. São Paulo, SP: Gráfica Mundo. Abril/2017. 66 p. Disponível em: http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf. Acesso em 08/06/2022.

ABRAHÃO, W. A. P. e MARQUES, J. J. **Manual de coleta de solos para valores de referência de qualidade no Estado de Minas Gerais**. Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM. Belo Horizonte, 2013. Disponível em <<http://www.feam.br/images/stories/2015/SOLOS/manual%20coleta%20solos.pdf>>. Acesso em 12/02/2020.

ACOSTA, J. A. de A., Amado, T. J. C., Silva, L. S. da ., Santi, A., & Weber, M. A.. (2014). **Decomposição da fitomassa de plantas de cobertura e liberação de nitrogênio em função da quantidade de resíduos aportada ao solo sob sistema plantio direto**. *Ciência Rural*, 44(5), 801–809. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014005000002>. Acesso em 02 Jun. 2023.

AGRIPINO, L. *et al.* **Relatório Técnico Operacional dos Sistemas de Disposição de Rejeitos da MPESA – Relatório Anual 2021**. Sistema de disposição de rejeitos I e II, Barragens B1, B5, B6 e Rejeito Platô RP1. In: Relatório de Informação Ambiental Anual, Sistema de Rejeitos I Barragens do Vale LO 11353/2018. Relatório Técnico. Paragominas, PA: Mineração Paragominas S.A. 2022. 77 p.

ALVES, Loiane Picanço. **Mapeamentos das frentes de lavra da mina de bauxita de Juruti – PA**. 2015. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Marabá, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.unifesspa.edu.br/handle/123456789/333>>. Acesso em: 13/06/2022.

ANDRADE, R. A. *et al.* **Taxas de cobertura e decomposição de adubos verdes na Amazônia Sul Ocidental**. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 1-15, 21 fev. 2022. Centro Universitário de Maringá. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2022v15n1e8600>. Acesso em: 28 fev. 2022.

ANM, Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Estadual Pará 2017 Ano Base 2016**. Coord. Marina Marques Dalla Costa *et al.*; Equipe Técnica por Maria do Rosário Miranda Costa *et al.* – Brasília: DNPM, 2017. Disponível em <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-estadual/para/amest-2017_pa_v1/view>. Acesso em 10/06/2022.

ANM. Agência Nacional de Mineração. Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração – SIGBM. **Cadastro Nacional**. Classificação Nacional de Barragens de Mineração. Disponível em:

<https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem>. Acesso em 24/07/2023.

ASI, Aluminium Stewardship Initiative. **ASI Performance Standard**. Version 3 – May 2022. 33 p. Disponível em <<https://aluminium-stewardship.org/wp-content/uploads/2022/05/ASI-Performance-Standard-V3-May2022-2.pdf>>. Acesso em 09/06/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028**: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 16 p.

BARBIERI, D.J *et al.* **Análise de crescimento de Bixa orellana L. sob efeito da inoculação micorrízica e adubação fosfatada**. Revista Brasileira de Plantas Mediciniais [online]. 2011, v. 13, n. 2 [Acessado 1 Junho 2022], pp. 129-138. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1516-05722011000200002>>. Epub 02 Ago 2011. ISSN 1983-084X.

BARRETO, A.C.; FERNANDES, M.F. **Recomendações técnicas para o uso da adubação verde em solos de tabuleiros costeiros**. Aracaju: Embrapa Acre, 2001. 7 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/68744/1/CPATC-CIR.-TEC.-19-01.pdf>. Acesso em 14/06/2022.

BARROS, Dalmo Arantes de *et al.* **Characterization of the bauxite mining of the Poços de Caldas alkaline massif and its socio-environmental impacts**. Rem: Revista Escola de Minas [online]. 2012, v. 65, n. 1 [Accessed 13 June 2022], pp. 127-133. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000100018>>. Epub 27 Apr 2012. ISSN 1807-0353. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000100018>.

BASTOS, Therezinha Xavier, *et al.* **Frequência de Chuva e Ocorrência de Seca na Microrregião de Paragominas-PA**. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia (14.: 2005 jul. : Campinas-SP) Anais [recurso eletrônico]. Campinas, SP: SBA, 2005. [2] p. Disponível em < <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/1714.pdf>>. Acesso em 05/08/2022.

BAZZAZ, F. A. **The Physiological Ecology of Plant Succession**. Annual Review of Ecology and Systematics. Vol. 10:351-371 (Volume publication date November 1979). <<https://doi.org/10.1146/annurev.es.10.110179.002031>>. Acesso em 30/05/2022.

BRANDT MEIO AMBIENTE, CASAVARDE e HIDROSAM (Consórcio/Pará). **Mineração Vera Cruz S/A (MVC) - Estudo de Impacto Ambiental - EIA**: Lavra e Beneficiamento de bauxita. Paragominas/PA, 2003. 2 v.

BRASIL NETO, Alberto Bentes; *et al.* Natural regeneration for restoration of degraded areas after bauxite mining: a case study in the eastern amazon. **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 171, p. 106392, nov. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106392>. Acesso em: 13 jun. 2022.

BRASIL. Constituição (2010). Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece A Política Nacional de Segurança de Barragens Destinadas À Acumulação de**

Água Para Quaisquer Usos, À Disposição Final Ou Temporária de Rejeitos e À Acumulação de Resíduos Industriais, Cria O Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens e Altera A Redação do Art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, e do Art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de Julho de 2000. Brasília, DF, 20 set. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 09 jun. 2022.

BRASIL. Constituição (2020). Lei nº 14066, de 30 de setembro de 2020. **Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração).** Brasília, DF, 30 set. 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art3. Acesso em: 10 jun. 2022.

BRASIL. Constituição (2021). Resolução ANM nº 68, de 30 de abril de 2021. **Dispõe sobre as regras referentes ao Plano de Fechamento de Mina - PFM e revoga as Normas Reguladoras da Mineração nº 20.4 e nº 20.5, aprovadas pela Portaria DNPM nº 237, de 18 de outubro de 2001.** Brasília, DF: Agência Nacional de Mineração – ANM. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anm-n-68-de-30-de-abril-de-2021-317640591>. Acesso em: 09 jun. 2022.

BRASIL. Constituição (2022). Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. **Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.** Brasília, DF: Agência Nacional de Mineração – ANM. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2022.

CARVALHO, Martha Lustosa *et al.* **Guia prático de plantas de cobertura:** aspectos filotécnicos e impactos sobre a saúde do solo [recurso eletrônico]. Piracicaba/SP: ESALQ-USP, 2022. 126 p. Organização de Maurício Roberto Cherubin. DOI: 10.11606/9786589722151. Disponível em: https://www.esalq.usp.br/biblioteca/pdf/Livro_Plantas_de_Cobertura_completo.pdf. Acesso em: 13 jun. 2022.

CASTANHO, Guilherme Gurian. **Avaliação de dois trechos de uma Floresta Semidecidual restaurada por meio de plantio, com 18 e 20 anos, no Sudeste do Brasil.** 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-18052009-163446/publico/Guilherme_Castanho.pdf. Acesso em: 30 maio 2022.

CASTRO, Cleómenes Barbosa de *et al.* **A cultura do urucum:** Embrapa Amazônia Oriental. 2. ed. Brasília, Df: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 61 p. (Coleção Plantar, 64). ISBN 978-85-7383-451-2. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/128282/1/PLANTAR-Urucum-ed02-2009.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2023.

CAVALCANTE, V. S. *et al.* **Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental [online]. 2012, v. 16, n. 5 [Acessado 4 Janeiro 2022], pp. 521-528. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000500008>>. Epub 25 Abr 2012. ISSN 1807-1929. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000500008>.

COELHO, Roberta de Fátima Rodrigues *et al.* **Ingresso e mortalidade em uma floresta em diferentes estágios sucessionais no município de Castanhal, Pará.** Acta Amazonica [online]. 2003, v. 33, n. 4 [Acessado 14 Junho 2022], pp. 619-630. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0044-59672003000400008>>. Epub 08 Feb 2011. ISSN 1809-4392. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672003000400008>.

COELHO, Selma Regina de Freitas *et al.* **Crescimento, nutrição e fixação biológica de nitrogênio em plantios mistos de eucalipto e leguminosas arbóreas.** Pesquisa Agropecuária Brasileira [online]. 2007, v. 42, n. 6 [Acessado 26 Julho 2021], pp. 759-768. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600001>>. Epub 23 Jul 2007. ISSN 1678-3921. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600001>.

COSTA, W. S. *et al.* **Jatobá – Hymenaea courbaril L.** Espécies Nativas da Mata Atlântica | Nº 2, 2011. Projeto: Prospecção do Conhecimento Científico de Espécies Florestais Nativas. Polo de Excelência em Florestas. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Disponível em: http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/11139/Jatoba_Ecologia%2C%20manejo%2C%20silvicultura%20e%20tecnologia%20de%20especies%20nativas%20da%20Mata%20atlantica%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em 31/05/2022.

CRAVO, M. S. e SOUZA, B. D. L. Feijão-Caupi. In: BRASIL, Edilson Carvalho *et al.* (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará.** 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 247-249. (ISBN 978-85-7035-932-2). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1125022/recomendacoes-de-calagem-e-adubacao-para-o-estado-do-para>. Acesso em: 01 jun. 2022.

CRU Consulting. **Opportunities for aluminium in a post-Covid economy.** Prepared for the International Aluminium Institute (IAI). CRU Reference: ST2342-21. 28/01/2022. Disponível em: https://international-aluminium.org/resource/opportunities-for-aluminium-in-a-post-covid-economy/?_thumbnail_id=6715. Acesso em 09/06/2022.

DI CARLO E., CHEN C. R., HAYNES R. J., PHILLIPS I. R., COURTNEY R. **Soil quality and vegetation performance indicators for sustainable rehabilitation of bauxite residue disposal areas: a review.** Soil Research 57, 419-446. (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1071/SR18348>. Acesso em 02 Jun. 2023.

EQUATOR PRINCIPLES. **The Equator Principles.** A financial industry benchmark for determining, assessing and managing environmental and social risk in projects. EP4. July 2020. Disponível em: https://equator-principles.com/app/uploads/The-Equator-Principles_EP4_July2020.pdf. Acesso em 10/06/2022.

FERNANDES, M. F.; BARRETO, A. C. e EMÍDIO FILHO, J. **Fitomassa de adubos verdes e controle de plantas daninhas em diferentes densidades populacionais de leguminosas**. Pesquisa Agropecuária Brasileira [online]. 1999, v. 34, n. 9 [Acessado 4 Janeiro 2022], pp. 1593-1600. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000900009>>. Epub 02 Dez 2005. ISSN 1678-3921. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000900009>.

FERREIRA, G.C.; BARROS, P. L. C; CRUZ, P. C. **Relatório Síntese sobre o conhecimento da Vegetação e Flora da área da Mineração Paragominas S.A.** Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA. Belém-Pará. 2015.

FERREIRA, W. C. *et al.* **Crescimento de Espécies Arbóreas Plantadas em Área de Exploração de Cascalho em Usina Hidrelétrica**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.13 n.24; p.340 2016. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2016b/agrarias/crescimento%20de%20especie%20s.pdf>. Acesso em 31/05/2022.

Flores, A.S. **Crotalaria in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB82990>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

FLORESTAS, Gestão Socioambiental. Relatório Técnico Científico. **Estudo de Caracterização da Vegetação, Utilizando Inventário Amostral na Área de 1.375,91 Ha da Mineração Paragominas S.A – MPSA**. Paragominas, PA. 2020. 100 p.

FRANCO, A. A., CAMPELLO, E.F.C., DIAS, L. E., FARIA, S. M. de. **Uso de leguminosas associadas a microrganismos na revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas-PA**. Itaguaí: EMBRAPA-CNPAB; 1996. 71p. (EMBRAPA-CNPAB. Documentos, 27). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAB-2010/32721/1/doc027.pdf>. Acesso em 14/06/2022.

FRANCO, C.F.O.; SILVA, F.C.P. da; CAZÉ FILHO, J.; BARREIRO NETO, M.; SÃO JOSÉ, A.R.; REBOUÇAS, T.N.H.; FONTINÉLLI, I.S.C. **Etnobotânica e Taxonomia do Urucuzeiro**. 2008. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2008_1/UrucumTaxon/index.htm>. Acesso em: 02 jun. 2023.

GEOESTÁVEL. **Plano de Desativação das Barragens de Rejeitos do SR1 da Mineração Paragominas – MPSA**. Relatório Técnico. Ref.: GST-MD-525BP-17-0002. Dezembro – 2019.

GOLDER ASSOCIATES (Belo Horizonte - MG). **Estudos Hidrogeológicos da Área do Platô Miltônia 3**. Paragominas-PA, 2003. (RT-039-5107-5120-0009-00-B).

HYDRO. **Barragens**. Atualizado em 16 de maio de 2022. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/north-america/brasil/paragominas/mineracao-paragominas/barragens/>. Acesso em 09/06/2022.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Mineração em números, 2021**. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>. Acesso em 08/06/2022 (a).

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Mineração em números, IT22**. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>. Acesso em 25/07/2022 (b).

ICMM, International Council on Mining & Metals. **Global Industry Standard on Tailings Management**. GISTM. August 2020. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/tailings/global-industry-standard-on-tailings-management>. Acesso em 10/06/2022.

ICMM, International Council on Mining & Metals. **Tailings Management**. Good practice guide. May 2021. Disponível em: https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2021/guidance_tailings-management.pdf. Acesso em 10/06/2022.

IFC, International Finance Corporation. **Environmental, Health, and Safety Guidelines for Mining**. December 10, 2007. Disponível em: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/595149ed-8bef-4241-8d7c-50e91d8e459d/Final%2B-%2BMining.pdf?MOD=AJPERES&CVID=nPthex1&id=1323153264157>. Acesso em 10/06/2022.

JARDIM, Fernando Cristovam da Silva. Natural re generation in tropical forests. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal Of Agricultural And Environmental Sciences**, [S.L.], v. 58, n. 1, p. 105-113, 2015. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1676>.

Lima AL da S, Zanella F, Castro LDM de. **Crescimento de Hymenaea courbaril L. var. stilbocarpa (Hayne) Lee et Lang. e Enterolobium contortisiliquum (Vell.) Morong (Leguminosae) sob diferentes níveis de sombreamento**. Acta Amaz [Internet]. 2010Mar;40(1):43–8. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672010000100006>. Acesso em 10 Jun. 2023.

LOPES, O.M.N. **Feijão-de-porco leguminosas para controle de mato e adubação verde do solo**. Altamira: Embrapa Amazônia Oriental, 2000. 4 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/38454/1/FeijaoPorcoLeguminosa.pdf>. Acesso em 14/06/2022.

LORENZI, Harri. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil**. 2. ed. Nova Odessa, Sp: Editora Plantarum, 1998. 2 v.

MAO, Y. & KAM, S. **Closure of tailings dams**. In: AB Fourie, M Tibbett & A Beersing (eds), *Mine Closure 2011: Proceedings of the Sixth International Conference on Mine Closure*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 361-372. Disponível em: https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1152_38_Mao. Acesso em 09/06/2022.

MARINHO, J. **RES: Troca de experiências - Desenvolvimento de vegetação sobre rejeito de bauxita**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <mayra.barral@hydro.com>. em: 22 out. 2021.

MASSIGNAN, R. S. & SANCHEZ, L. E. **O que significa descaracterizar barragens de rejeitos de mineração? Uma revisão sistemática da literatura**. Engenharia Sanitária e Ambiental [online]. 2022, v. 27, n. 2 [Acessado 10 Junho 2022], pp. 225-

234. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-415220200422>>. Epub 13 Maio 2022. ISSN 1809-4457.

MATTHES, Luiz António Ferraz; MARTINS, Fernando Roberto. Conceitos em sucessão ecológica. **Revista Brasileira de Horticultura Ornamental**, [S.L.], v. 2, n. 2, p. 19-32, 14 maio 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/rbho.v2i2.122>. Acesso em: 13/06/2022.

MIRANDA NETO, Aurino *et al.* Estrato de regeneração natural de uma floresta restaurada com 40 anos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S.L.], v. 32, n. 72, p. 409-420, 28 dez. 2012. Embrapa Florestas. Disponível em: https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/369/pdf_16. Acesso em 14/06/2022.

MOREIRA, Vitor *et al.* **Características adaptativas da associação simbiótica e da fixação biológica do nitrogênio molecular em plantas jovens de *Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl., uma leguminosa arbórea nativa do Cerrado.** Rodriguésia [online]. 2014, v. 65, n. 2 [Acessado 26 Julho 2021], pp. 517-525. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S2175-78602014000200013>>. Epub 01 Jul 2014. ISSN 2175-7860. <https://doi.org/10.1590/S2175-78602014000200013>.

NUNES, Patrícia da Silva; CAVASSAN, Osmar. **As concepções históricas de sucessão ecológica e os livros didáticos.** Filosofia e História da Biologia, v. 6, n. 1, p. 87-104, 2011. Edição eletrônica: ISSN 2178-6224. Disponível em: <<https://www.abfhib.org/FHB/FHB-06-1/FHB-6-1-06.html>>. Acesso em 13/06/2022.

PAULINO, Gleícia Miranda *et al.* **Fixação biológica e transferência de nitrogênio por leguminosas em pomar orgânico de mangueira e gravioleira.** Pesquisa Agropecuária Brasileira [online]. 2009, v. 44, n. 12 [Acessado 26 Julho 2021], pp. 1598-1607. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200006>>. Epub 22 Set 2010. ISSN 1678-3921. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200006>.

PILLAR, V.D. 1994. **Dinâmica temporal da vegetação.** UFRGS. Departamento de Botânica. Disponível em <http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br>. Acesso em 02/03/2022.

PINTO *et al.* **Diagnóstico Socioeconômico e Florestal do município de Paragominas.** Relatório Técnico. Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – Imazon, Belem – PA, 2009. Disponível em <<https://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/outros/iagnostico-socioeconomico-e-florestal-do.pdf>>. Acesso em 18/05/2022.

PORTAL, Ruanny Karen Vidal Pantoja *et al.* Avaliação fenológica do urucum (*Bixa orellana* L.). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL, 17.; SEMINÁRIO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL, 1., 2013, Belém, PA. **Anais.** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2013. 1 CD-ROM. PIBIC 2013. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/91982/1/Resumo51.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2023.

QUARESMA, A. *et al.* **Relatório Anual de operações da Usina de Beneficiamento de Bauxita da MPSA – 2021**. In: Relatório de Informação Ambiental Anual, Usina LO 10915/2018. Relatório Técnico. Paragominas, PA: Mineração Paragominas S.A. 2022. 73 p.

RAYOL, B.P.; ALVINO-RAYOL, F.O. **Produção de biomassa e teor de nutrientes do feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.) em reflorestamento no estado do Pará**. Revista Agroecossistemas, 4 85 - 90, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/agroecossistemas/article/download/1216/1649>. Acesso em 14/06/2022.

REIS, Pamella Carolline Marques dos Reis *et al.* Taxas de Recrutamento e Mortalidade de Espécies de Lecythidaceae após Colheita Florestal na Amazônia Oriental. **Enciclopédia Biosfera**, [S.L.], v. 13, n. 24, p. 970-979, 6 dez. 2016. Centro Científico Conhecer. Disponível em: http://dx.doi.org/10.18677/encibio_2016b_092. Acesso em: 14 jun. 2022.

ROCHA, Jonas Elias Castro da, *et al.* Eucalipto. In: BRASIL, Edilson Carvalho *et al.* (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. Brasília, Df: Embrapa, 2020. p. 399-401. (ISBN 978-85-7035-932-2). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1125022/recomendacoes-de-calagem-e-adubacao-para-o-estado-do-para>. Acesso em: 01 jun. 2022.

ROSSI, Luiz Marcelo Brum *et al.* Modelagem de Mortalidade em Florestas Naturais. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 37, n. 2, p. 275-291, 21 ago. 2007. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v37i2.8656>. Acesso em: 03 jun. 2022.

SALOMAO, Rafael Paiva *et al.* Dinâmica da regeneração natural de árvores em áreas mineradas na Amazônia. **Bol. Mus. Para. Emilio Goeldi Cienc. Nat.**, Belém, v. 2, n. 2, p. 85-139, ago. 2007. Disponível em <http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1981-81142007000200007&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 29 abr. 2023.

SAMARCO. **Manual de Segurança de Barragens e Estruturas Geotécnicas**. Código SMIN-MGP-GGE-001, Revisão 00, Data da aprovação: 06/08/2021. Disponível em: <https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2022/06/SMIN-MGP-GGE-001.pdf>. Acesso em 31 mai. 2023.

SANCHES *et al.* **Relatório Técnico de Monitoramento Hidrométrico**. Mineração Paragominas. Paragominas – PA. Dezembro de 2020 a dezembro de 2021. Grupo Construserv águas e energia. Emitido em 17/01/2022.

SÁNCHEZ, L.E.; SILVA-SÁNCHEZ, S.S.; NERI, A.C. **Guia para o Planejamento do Fechamento de Mina**. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, 2013. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/00004091.pdf>. Acesso em 09 jun. 2022.

SANTOS, D. E. **Dinâmica de crescimento da vegetação em áreas de floresta secundária no platô miltônia 3, em Paragominas – PA.** Relatório Técnico. Paragominas, PA: Eco Florestal. 2014. 44 p.

SANTOS, D. E. **Estudo de caracterização da vegetação em 821,97 hectares para lavra de bauxita na Mineração Paragominas, Paragominas-PA.** Relatório Técnico. Paragominas, PA: Eco Florestal. 2016. 144 p.

SANTOS, H. G. *et al.* **O Novo Mapa de Solos do Brasil - Legenda Atualizada.** Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2011. ISSN 1517-2627. Disponível em <<https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>>. Acesso em 31 mai. 2022.

SANTOS, J. H. S. *et al.* **Distinção de grupos ecológicos de espécies florestais por meio de técnicas multivariadas.** Revista *Árvore* [online]. 2004, v. 28, n. 3 [Acessado 30 Maio 2022], pp. 387-396. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000300010>>. Epub 04 Out 2004. ISSN 1806-9088. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000300010>.

SCIVITTARO, W. B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E. **Dinâmica de adubos verdes no sistema solo-planta.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. 33 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 127). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/33522/1/documento-127.pdf>. Acesso em 14 jun. 2022.

SCORIZA, Rafael Nogueira *et al.* Métodos para coleta e análise de serrapilheira aplicados à ciclagem de nutrientes. **Série Técnica Floresta e Ambiente**, [s. l], v. 2, p. 01-18, 2012. Disponível em: <https://app.periodikos.com.br/journal/stfloram/article/587fb8330e8825696bb65ffe>. Acesso em: 20 jun. 2022.

SGB-CPRM. **Limites das bacias sedimentares brasileiras.** Atualizado em 20 de agosto de 2019. Serviço Geológico do Brasil - CPRM – GeoSGB. Disponível em <<https://geoportal.cprm.gov.br/portal/home/item.html?id=84c97c2a40944eb0801a4581a755dfb4>>. Acesso em 31 mai. 2022.

SILVA, L. **Relatório Anual PRAD 2021.** Programa de Recuperação de Áreas Degradadas, Programa de Salvamento de Germoplasma e Programa Plantio Compensatório. Mineração Paragominas S.A. Relatório Técnico. Paragominas, PA: Egis – Engenharia e Consultoria. 2022a. 131 p.

SILVA, L. **RES: Projeto de mestrado.** [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <mayra.barral@hydro.com>. em: 17 mai. 2022b.

SILVA, L. **RES: Projeto de mestrado.** [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <mayra.barral@hydro.com>. em: 03 jun. 2022c.

SILVA, Simone. **RES: Análises químicas do rejeito.** [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <mayra.barral@hydro.com>. em: 05 ago. 2022.

SNACK, C. **Canavalia in Flora e Funga do Brasil.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB82744>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

SOUZA, Rikelly Souza. **Gênese e Comportamento Físico- Hídrico de Solos Construídos em Mina de Bauxita no Sudoeste Paraense**. 142f. Orientador: Dr. Mário Lopes Junior. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1019>. Acesso em: 02 Jun. 2023.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. Embrapa Informação Tecnológica. 2017. Disponível em < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>>. Acesso em 18/05/2022.

TERRA MEIO AMBIENTE. **Relatório de Informação Ambiental Anual, Dique Piloto LO 11108/2018**. Ano de referência: 2021. Relatório Técnico. Paragominas, PA: Terra Ltda. 2022. 32 p.

USGS. United States Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2022**. U.S. Geological Survey, 2022, 202 p. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs2022>. Acesso em 08/06/2022

VALE. **Descaracterização de Barragens**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/de-characterization/Paginas/default.aspx#ancora-modelo1>. Acesso em 10 jun. 2022 (b).

VALE. **Glossário**: confira e entenda melhor alguns termos técnicos e específicos sobre barragens. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/glossario.aspx. Acesso em: 09 jun. 2022 (a).

VELOSO, Carlos Alberto Costa *et al.* Correção da acidez do solo. In: BRASIL, Edilson Carvalho *et al.* (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. Brasília, Df: Embrapa, 2020. p. 121-131. (ISBN 978-85-7035-932-2). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1125022/recomendacoes-de-calagem-e-adubacao-para-o-estado-do-para>. Acesso em: 01 jun. 2022.

VITAL, Ana Rosa Tundis *et al.* **Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária**. Revista Árvore [online]. 2004, v. 28, n. 6 [Acessado 14 Junho 2022] , pp. 793-800. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600004>>. Epub 16 Maio 2005. ISSN 1806-9088. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600004>. Acesso em: 13/06/2022.