



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E PLANEJAMENTO
ESPACIAL
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

DANIEL GUIMARÃES GONÇALVES

CARBONO E RECAATINGAMENTO: efetividade da recuperação de áreas degradadas por mineração e protocolo de regeneração conduzida

**TERESINA-PI
2025**

DANIEL GUIMARÃES GONÇALVES

CARBONO E RECAATINGAMENTO: efetividade da recuperação de áreas degradadas por mineração e protocolo de regeneração conduzida

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Planejamento Espacial do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Análise e Planejamento Espacial.

Área de concentração: Linha II – Análise ambiental

Orientadora: Prof^a. Dr.^a Bruna de Freitas Iwata

**TERESINA-PI
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

—
Gonçalves, Daniel Guimarães

G635c Carbono de recaatingamento : efetividade da recuperação de áreas degradadas por mineração e protocolo de regeneração conduzida / Daniel Guimarães Gonçalves. - 2025.
115 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2025.

Orientadora : Profa Dra. Bruna de Freitas Iwata.

1. Resiliência ecológica. 2. Florestas secas. 3. Práticas restaurativas. 4. Ecologia do semiárido. I. Título.

CDD - 910

—

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085

DANIEL GUIMARÃES GONÇALVES

CARBONO E RECAATINGAMENTO: EFETIVIDADE DA RECUPERAÇÃO DE
ÁREAS DEGRADADAS POR MINERAÇÃO E PROTOCOLO DE REGENERAÇÃO
CONDUZIDA

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Análise e
Planejamento Espacial do Instituto Federal
do Piauí, como parte integrante dos
requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Análise e Planejamento
Espacial.

Aprovada em: 30/09/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Bruna de Freitas Iwata (Orientadora)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Prof. Dr. Francílio de Amorim dos Santos
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Prof. Dr. Tiago da Costa Silva Barbosa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Ao povo brasileiro, que sustenta a
educação pública com seus tributos; e ao
povo piauiense que sustenta minha família
pelo salário do serviço público.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, razão da minha alegria e fonte do meu entendimento, que através de São José de Cupertino, padroeiro dos estudantes em apuros, sempre me auxiliou de modo infalível.

Enormemente e com profunda e alegre gratidão, à minha orientadora Dra Bruna Iwata, que confiou em mim, mesmo quando eu não acreditava, me motivou a concluir este trabalho e cujo auxílio, orientação e amizade jamais poderei retribuir em justa proporção.

À minha família, em especial meu companheiro Neylon, que suportou as vicissitudes desse processo, acumulando funções familiares e me dando apoio e estímulo para seguir em frente.

Aos professores do MAPEPROF, que com entusiasmo e excelência contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico e como ser humano.

A todos os trabalhadores e trabalhadoras que de alguma forma exerceram seus ofícios e, cruzando com meu caminho, ofereceram valiosa contribuição para esse trabalho, em especial os colegas da SEMARH Marcelo e Ezequiel, que me conduziram nas viagens de campo.

À Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí e à Companhia Porto Piauí que colaboraram para o prosseguimento das minhas atividades acadêmicas.

Enfim, aos amigos e colegas pelo auxílio e refrigério da amizade, meu muito obrigado!

RESUMO

A pesquisa investigou a efetividade da recuperação de áreas degradadas por mineração no bioma Caatinga, com ênfase na regeneração natural por meio do pousio e na utilização do carbono do solo como indicador de qualidade ambiental. Partiu-se das hipóteses de que: (1) os parâmetros de análise e as rotinas de monitoramento presentes nos Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADs) apresentam fragilidades metodológicas capazes de comprometer a avaliação da recuperação; e (2) o carbono do solo constitui um indicador robusto e sensível para aferir a efetividade da regeneração conduzida em áreas mineradas. A metodologia integrou análise documental de PRADs, campanhas de campo com registro das feições geomorfológicas e da condição da vegetação, e análises edáficas em duas profundidades, espacializadas por interpolação e krigagem para identificação de padrões de estoque de carbono. Foram elaborados três produtos: um artigo de revisão bibliográfica sobre recuperação de áreas na Caatinga e estocagem de carbono; um artigo científico apresentando os resultados empíricos da análise de carbono do solo em áreas mineradas submetidas ao pousio; e um Protocolo de Avaliação da Regeneração Natural, destinado a orientar ações de monitoramento e políticas públicas. Os resultados demonstraram fragilidades significativas nos PRADs analisados, incluindo diagnósticos genéricos, inconsistências entre áreas licenciadas e áreas efetivamente exploradas e ausência de monitoramento sistemático. As campanhas de campo confirmaram a execução de atividades minerárias em áreas sem licenciamento válido e registraram solo exposto, processos erosivos, baixa diversidade vegetal e sinais de abandono pós-exploração. A análise do carbono no solo evidenciou um gradiente de desempenho entre os sítios avaliados: Marco, Pio IX e Capivara apresentaram maiores estoques e maior coerência vertical; Agreste e Jaicós mostraram condições intermediárias; e Picos apresentou os menores valores e maior fragmentação. Os achados confirmaram parcialmente a hipótese principal, ao revelar fragilidades metodológicas e insuficiência de monitoramento em PRADs, e confirmaram integralmente a hipótese complementar, validando o carbono do solo como indicador sensível e consistente para mensurar a efetividade da regeneração conduzida. Conclui-se que a recuperação na Caatinga demanda protocolos claros, métricas verificáveis e monitoramento contínuo, capazes de orientar decisões técnicas e fortalecer a resiliência ecológica e climática do semiárido.

Palavras-chave: Resiliência ecológica; florestas secas; práticas restaurativas; indicadores ambientais; ecologia do semiárido; carbono do solo

ABSTRACT

The research investigated the effectiveness of the recovery of mining-degraded areas in the Caatinga biome, with emphasis on natural regeneration through fallowing and on the use of soil carbon as an indicator of environmental quality. The study was based on two central hypotheses: (1) the analytical parameters and monitoring routines adopted in the PRADs – acronym for Degraded Area Recovery Plan – exhibit methodological weaknesses capable of compromising the assessment of restoration outcomes; and (2) soil carbon constitutes a robust and sensitive indicator for measuring the effectiveness of assisted regeneration processes in mined areas. The methodology integrated documentary analysis of PRADs, field surveys recording geomorphological features and vegetation conditions, and soil analyses at two depths, spatialized through interpolation and kriging to identify patterns of carbon stock distribution. Three products were developed: a literature review article on area recovery in the Caatinga and carbon storage; a scientific article presenting empirical results of soil-carbon analysis in mined areas under fallow; and a Natural Regeneration Assessment Protocol designed to guide monitoring actions and support public policy. The results revealed significant weaknesses in the PRADs examined, including generic diagnostics, inconsistencies between licensed areas and the areas actually exploited, and the absence of systematic monitoring. Field campaigns confirmed mining activities in areas without valid environmental licenses and documented exposed soil, erosive processes, low vegetation diversity, and signs of post-extraction abandonment. Soil-carbon analysis showed a performance gradient among the evaluated sites: Marco, Pio IX, and Capivara exhibited higher carbon stocks and greater vertical coherence; Agreste and Jaicós presented intermediate conditions; and Picos showed the lowest values and the greatest spatial fragmentation. The findings partially confirmed the main hypothesis by revealing methodological fragilities and insufficient monitoring in PRADs, and fully confirmed the complementary hypothesis by validating soil carbon as a sensitive and reliable indicator for measuring the effectiveness of assisted regeneration. The study concludes that recovery efforts in the Caatinga require clear protocols, verifiable metrics, and continuous monitoring capable of informing technical decision-making and strengthening the ecological and climatic resilience of the semi-arid region.

Keywords: Ecological resilience; dry forests; restorative practices; environmental indicators; semi-arid ecology; soil carbon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Ocorrência do Bioma Caatinga no Brasil e no Piauí	11
Figura 02 – Processos Minerários Ativos no Piauí	13
Figura 03 – Afunilamento do universo da pesquisa	19
Figura 04 – Situação das Áreas de Pesquisa	21
Figura 05 - Análise de condutividade em amostra de solo	22
Figura 06 - Análise de matéria orgânica particulada em amostra de solo	22
Figura 07 - Amostras de solo para análise	22
Figura 08 – Amostras de solo catalogados para envio ao laboratório	23
Figura 09 – Procedimento de coleta de 05 cm de camada superficial de solo	23
Figura 10 - Localização das áreas de pesquisa em relação aos processos minerários no sudeste do Piauí	24
Figura 11 – Frente de lavra de diabásio em exploração; vegetação ao fundo	27
Figura 12 – Área de exploração com manifestação do estrato herbáceo	27
Figura 13 – Coleta de solo na área do entorno da lavra	27
Figura 14 – Área de vegetação no entorno da lavra em perturbação por fogo	27
Figura 15 – Solo exposto com feições degradadas.	29
Figura 16 – Registro de vegetação xeromórfica, típica da Caatinga.	29
Figura 17 – Paisagem vegetal dominada por espécie pioneira arbustiva	30
Figura 18 – Coleta de solo na área de pesquisa	30
Figura 19 – Evidência da adoção de prática de RAD proposta nos estudos.	33
Figura 20 – Testemunho de ravinamento na área de pesquisa	33

Figura 21 – Testemunho de vegetação xeromórfica, típica da Caatinga	33
Figura 22 – Instalações desativadas da unidade industrial, destino da extração	33
Figura 23 – Camada superficial de matéria orgânica	36
Figura 24 – Reabilitação da área degradada com destinação para agricultura	36
Figura 25 – Serrapilheira com presença de fogo recente	36
Figura 26 – Evidência de vegetação xeromórfica na área de pesquisa	36
Figura 27 – Afloramento rochoso na área de pesquisa	39
Figura 28 – Vegetação arbustiva bem desenvolvida, serrapilheira densa	39
Figura 29 – Área de lavra abandonada, com represamento de água na cava de exploração	42
Figura 30 – Propriedade vizinha impactada pela erosão e perda de solo causada pela degradação	42
Figura 31 – Solo pobre em serrapilheira e baixa cama de matéria orgânica	42
Figura 32 – Entorno de vegetação dominado por espécie exótica	42
Figura 33 – Área degradada isolada por risco de acidentes; impacto na drenagem natural das microbacias	43
Figura 34 – Paisagem alterada da área de degradação por exploração mineral de argila	43
Figura 35 – Solo rochoso, arenoso e pouca camada superficial de matéria orgânica	45
Figura 36 – Aspecto geral da vegetação	45
Figura 37 – Aspecto geral da vegetação arbustiva, esparsada	45
Figura 38 – Aspecto geral da vegetação arbustiva, esparsada	45

LISTA DE SIGLAS

ANM – Agência Nacional de Mineração

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

GEE – Gases de Efeito Estufa

ISRN – Índice de Similaridade de Regeneração Natural

LI – Licença de Instalação

LO – Licença de Operação

LP – Licença Prévia

MAPBIOMAS – Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MO – Matéria Orgânica do Solo

N – Nitrogênio Total

OEMA – Órgão Estadual de Meio Ambiente

PCA – Plano de Controle Ambiental

PNMA – Política Nacional de Meio Ambiente

PRAD – Plano de Recuperação de Áreas Degradadas

RAD – Recuperação de Áreas Degradadas

SEMARH – Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (do Piauí)

SUMÁRIO

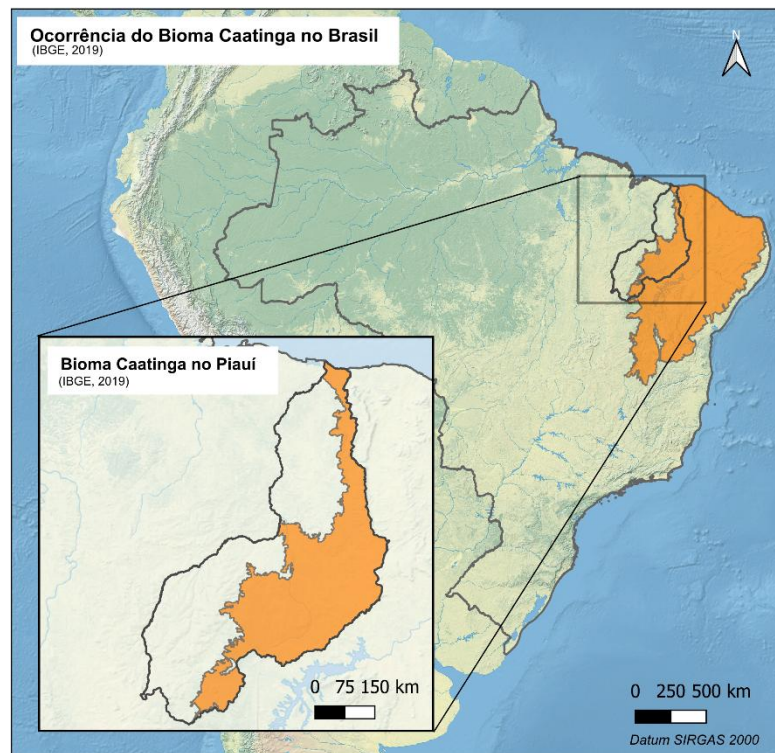
1	INTRODUÇÃO	11
2	METODOLOGIA	19
2.1	PESQUISA DOCUMENTAL	19
2.2	PESQUISA DE CAMPO	20
2.3	ANÁLISE DE CARBONO NO SOLO	21
3	RESULTADOS	24
3.1	ANÁLISE DAS PROPOSTAS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR MINERAÇÃO EM ÁREAS DE CAATINGA	24
3.1.1	Área 01 – Picos	25
3.1.2	Área 02 – Jaicós	28
3.1.3	Área 03 – Pio IX	30
3.1.4	Área 04 – Marcolândia 02	34
3.1.5	Área 05 – Marcolândia 01	37
3.1.6	Área 06 – São João Do Piauí – Capivara	39
3.1.7	Área 07 – São João Do Piauí – Agreste	43
3.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A – ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	59
	APÊNDICE B – ARTIGO DE ANÁLISE DE SOLO	85
	APÊNDICE C - PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO DA REGENERAÇÃO NATURAL EM ÁREAS DE CAATINGA	102

1. INTRODUÇÃO

Embora muitas vezes descrita como resiliente, e em outras reduzida a um ambiente de baixa valorização, a Caatinga permanece entre os biomas brasileiros menos estudados. Apesar do intenso consumo de seus recursos naturais, ainda há poucas informações em volume e qualidade suficientes para compreender plenamente seus processos de regeneração diante das pressões antrópicas.

No estado do Piauí, essas pressões assumem contornos particulares. A Caatinga piauiense, concentrada sobretudo no setor sul-oriental (Figura 01), está associada a áreas de terrenos cristalinos, clima semiárido e indicadores socioeconômicos desfavoráveis, compondo um quadro em que a vulnerabilidade ambiental se soma à fragilidade social.

Figura 01 – Ocorrência do Bioma Caatinga no Brasil e no Piauí



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base no IBGE (2019)

Nessa configuração, a Caatinga recobre aproximadamente 47,2% do território estadual (PFALTZGRAFF, 2010; PROJETO MAPBIOMAS, 2023). Segundo o Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004), a Caatinga, no Estado do Piauí, se manifesta predominantemente na forma de Savana Estépica, havendo ainda outras manifestações de fisionomias florestais.

O conhecimento da vegetação é crucial para a recuperação de áreas degradadas, avaliação de impactos ambientais e criação de planos de manejo e a identificação correta das espécies herbáceas são passos iniciais desse processo. Na Caatinga, a flora é pouco estudada e sua diversidade ainda não foi completamente mapeada, especialmente no Piauí, onde há falta de dados quantitativos; entender a flora é vital para desenvolver estratégias eficientes de recuperação ambiental (ROCHA et al. 2021).

A dinâmica histórica de ocupação do território brasileiro, aliada às características geomorfológicas, climáticas e socioeconômicas da região, intensificou a exploração da Caatinga, sobretudo de recursos madeireiros e minerais de valor econômico, resultando na deterioração de sua qualidade ambiental.

A atividade econômica baseada no extrativismo mineral tem se expandido, especialmente no Sul global, e na América Latina e no Brasil esse fenômeno apresenta diversas complexidades e especificidades, sendo amplamente estudado em diferentes áreas do conhecimento, podendo-se definir o extrativismo como as atividades que extraem grandes volumes de recursos naturais pouco ou nada processados, destinados principalmente à exportação ou transformação (SANTOS et. al., 2021)

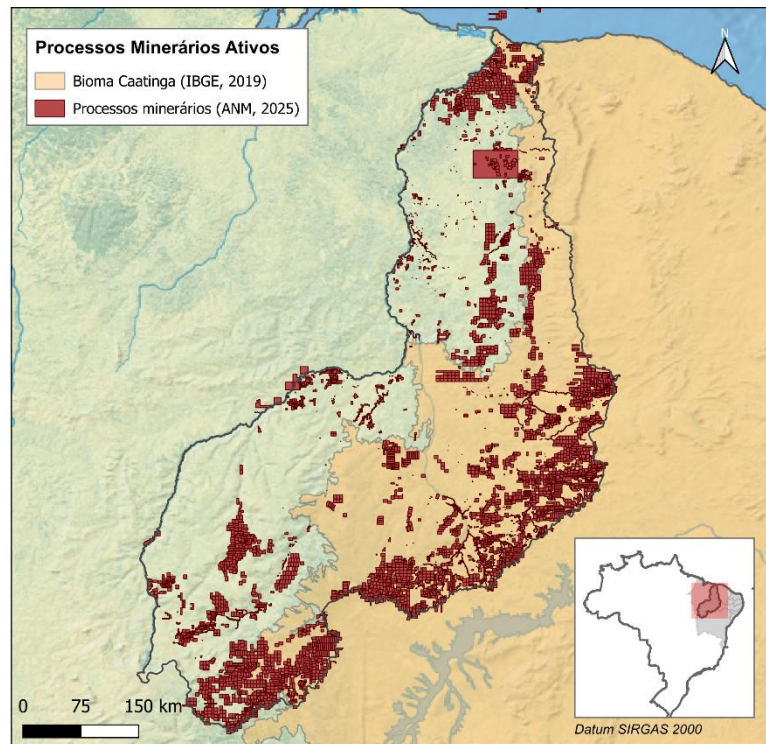
Uma das principais dificuldades na gestão da atividade mineral é a falta de integração entre os governos e a sociedade civil para estabelecer uma política mineral eficaz. A ausência de critérios claros e normas que conciliem a mineração com a preservação ambiental agrava os impactos causados por essa atividade, e sem uma metodologia de intervenção e debate amplo sobre os interesses envolvidos, o problema ambiental se intensifica (MAIA et. al., 2020, p. 196).

A atividade mineradora divide-se em duas etapas principais: a pesquisa, que envolve o estudo e levantamento das jazidas, e a lavra, que se refere ao conjunto de

operações coordenadas para a extração e o aproveitamento industrial das substâncias minerais. Esse processo vai desde a retirada dos minérios até o seu beneficiamento, compreendendo tanto a fase de estudo quanto a de extração dos minérios, que podem estar presentes em diferentes formas e estados físicos, caracterizando-se em uma atividade intrinsecamente ligada a impactos ambientais, por envolver a retirada de recursos naturais não renováveis, afetando ecossistemas e gerando alterações no meio ambiente (RÉGIS, 2021, p. 112).

A atividade mineradora figura entre os maiores contribuintes de degradação ambiental, provocando impactos significativos em zonas rurais e em áreas urbanas (ANTUNES; SILVA, 2024). No estado do Piauí atualmente existem 5.528 processos minerários (Figura 02) contemplando as fases de requerimento de pesquisa, autorização de pesquisa, licenciamento, concessão de lavra, lavra garimpeira e disponibilidade (ANM, 2025)

Figura 02 – Processos Minerários Ativos no Piauí



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base no IBGE (2019)

O potencial de degradação das atividades de mineração foi reconhecido pelo sistema jurídico, de modo que a Constituição de 1988 determina a obrigação do explorador de recursos minerais de recuperar o meio ambiente degradado de acordo com solução técnica exigida pelo órgão competente e, ainda, a recuperação de terras áridas em regiões de baixa renda sujeitas a seca periódicas (BRASIL, 1988).

Como instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente, a recuperação de áreas degradadas tem por objetivo o retorno do sítio degradado, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente, estando diretamente relacionada com o licenciamento ambiental (BRASIL, 1981).

O licenciamento ambiental, procedimento administrativo prévio em que o Estado utiliza do poder de polícia para controlar os particulares, visa prever, evitar, controlar e monitorar as consequências negativas das atividades potencialmente efetivamente poluidoras e capazes de causar degradação ambiental.

Em linhas gerais, o licenciamento de atividades de mineral enquadra-se no rito ordinário trifásico, exigindo-se licença prévia (LP), licença de Instalação (LI) e licença de operação (LO). Usualmente o procedimento é acompanhado de estudos ambientais gerais, como Plano de Controle Ambiental (PCA) ou mesmo o Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EIA), além de estudo complementar prevendo especificamente como, ao final da atividade de mineração, o local será gerenciado através de Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). Dada a complexidade das variáveis envolvidas, o licenciamento ambiental tornou-se um dos temas mais controversos e mal compreendidos no Brasil, devido à lentidão gerada pela falta de estrutura dos órgãos ambientais, à burocracia excessiva, a decisões pouco embasadas e à postura imprudente de empreendedores e políticos em relação à aceleração do crescimento econômico (COSTA e ALBUQUERQUE, 2021, p.111)

Atualmente, o licenciamento ambiental de empreendimentos com alto potencial poluidor ou de impacto socioambiental é visto apenas como uma etapa burocrática para obtenção de licenças pelos empreendedores. Além disso, a falta de normas claras confere grande poder discricionário aos agentes públicos, já que as leis não estabelecem diretrizes precisas, deixando as decisões sujeitas aos interesses de gestores e empreendedores (MAIA et. al., 2020, p. 201).

O sistema legal de proteção ambiental, operacionalizado pelos órgãos ambientais através dos procedimentos administrativos, da aplicação dos instrumentos da política ambiental, do monitoramento e da persecução do desenvolvimento sustentável e da proteção da qualidade ambiental, deveria analisar e acompanhar as iniciativas de recuperação ambiental e promovê-las à vista de suas atribuições e necessária garantia do futuro comum às presentes e futuras gerações.

Embora a legislação que regulamenta o licenciamento ambiental exista há mais de quarenta anos, muitos empreendimentos ainda operam sem as licenças necessárias. Isso evidencia que o marco legal não foi suficiente para impedir a atuação irregular de algumas empresas, o que dificulta o monitoramento das atividades que causam danos significativos ao meio ambiente pelos órgãos responsáveis (COSTA e ALBUQUERQUE, 2021, p.112)

As modificações dos componentes naturais derivadas das perturbações humanas na dinâmica do meio físico levam à intensificação de eventos naturais como processo erosivos e movimentos de massa, de modo de novos processos não se criam, mas a expansão das paisagens culturais acaba por promover a aceleração de processos superficiais e o aumento da suscetibilidade a riscos para a sociedade. (GIRÃO et al. 2013).

A complexidade socioambiental da Caatinga, somada à expansão da atividade mineradora e às fragilidades do sistema jurídico e institucional, torna a recuperação de áreas degradadas um desafio multidimensional.

A análise dos aspectos ecológicos, legais e de gestão revela que, embora existam instrumentos normativos e técnicos previstos em lei, sua aplicação tem sido insuficiente para conter os impactos acumulados. Nesse contexto, compreender a dinâmica da vegetação, a efetividade do licenciamento ambiental e os efeitos da degradação antrópica é essencial para subsidiar estratégias mais eficazes de manejo e recuperação ambiental, contribuindo não apenas para a proteção da biodiversidade, mas também para a redução dos riscos socioambientais associados à exploração mineral na Caatinga.

O pousio, entendido como a interrupção do uso alternativo do solo e a consequente exclusão de agentes degradantes, configura-se como uma técnica de

baixa exigência de investimentos, que privilegia os processos ecológicos endêmicos. Todavia, em ecossistemas frágeis como a Caatinga, sua aplicação demanda acompanhamento sistemático para que não se confunda regeneração com abandono.

Diante desse quadro, discutir estratégias de regeneração e restauração torna-se imperativo. A dinâmica climática impõe restrições importantes, mas também abre oportunidades, como a menor disseminação de espécies exóticas invasoras e a valorização dos processos naturais de regeneração da vegetação nativa.

Portanto, as estratégias de restauração e regeneração natural precisam ser analisadas em função das especificidades climáticas. Em áreas semiáridas, condições como estresse hídrico e sazonalidade reduzem a proliferação de espécies exóticas invasoras, o que pode favorecer a regeneração espontânea de plantas nativas em ambientes degradados (HORSTMANN et al., 2023).

Nesse cenário de complexidade de atributos e de lacunas científicas, torna-se fundamental compreender como as pressões históricas de uso da terra moldaram a degradação do bioma. A ocupação humana no semiárido, marcada por práticas extrativistas e de baixo planejamento territorial, intensificou a retirada de recursos naturais e contribuiu para a fragilização da vegetação e dos solos.

Considerando as particularidades ecológicas da Caatinga, sua configuração paisagística e as dinâmicas socioeconômicas que moldam o território, este estudo busca responder a um problema central: em que medida as áreas degradadas por mineração na Caatinga piauiense, submetidas ao pousio como técnica de recuperação, apresentam resultados efetivos de restauração ambiental? Para isso, examina-se se as iniciativas avaliadas pelos órgãos ambientais realmente cumprem os objetivos estabelecidos nos Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADs) e se demonstram indicadores confiáveis de recuperação, especialmente no tocante à dinâmica da paisagem e ao estoque de carbono como parâmetros avaliativos dos serviços ecossistêmicos.

. A pesquisa fundamenta-se na hipótese de que existem fragilidades metodológicas nos parâmetros de análise, na sistemática de monitoramento e no acompanhamento, por parte dos órgãos reguladores, das iniciativas de recuperação

de áreas degradadas na Caatinga, de modo que os procedimentos burocráticos vigentes não asseguram a efetividade das proposições de restauração.

Assume-se, ainda, como hipótese complementar, que o carbono do solo pode se configurar como um indicador ambiental objetivo e consistente para avaliar a qualidade da recuperação e aferir o êxito das iniciativas de regeneração conduzida, por refletir tanto a dinâmica ecológica quanto a capacidade de resiliência dos ecossistemas afetados.

O objetivo geral consistiu em avaliar a efetividade da recuperação ambiental por meio do pousio, discutindo, a partir da análise geoambiental integrada, caminhos metodológicos capazes de subsidiar um protocolo de regeneração conduzida para o “recaatingamento”. Como objetivos específicos, destacam-se: (i) realizar análise geoambiental comparativa de iniciativas de recuperação em áreas de mineração no Piauí; (ii) examinar criticamente os PRADs apresentados para essas áreas; (iii) confrontar as informações documentais com os dados empíricos obtidos em campo; e (iv) propor um roteiro metodológico orientador para práticas passivas de regeneração na Caatinga.

A avaliação da efetividade das iniciativas de recuperação revela-se urgente diante do equilíbrio sensível dos ecossistemas da Caatinga, condicionado por suas particularidades edafoclimáticas e pela crescente pressão de exploração de seus recursos naturais. Nessa perspectiva, o estudo contribui para o aprimoramento de procedimentos técnicos e metodológicos aplicados à recuperação de áreas degradadas, ampliando o repertório de ferramentas disponíveis a pesquisadores, profissionais e gestores ambientais comprometidos com a proteção da qualidade ambiental e o desenvolvimento sustentável regional.

Como desdobramentos concretos, a pesquisa resultou na elaboração de três produtos principais: um artigo de revisão bibliográfica com título :”Recuperação de áreas na Caatinga como estratégia de estocagem de carbono e mitigação climática”, que sistematiza o conhecimento existente e discute criticamente as interfaces entre restauração ecológica e serviços ecossistêmicos; um artigo científico com título “Carbono do solo e pousio como vetores de recuperação em áreas de mineração da Caatinga”, que apresenta os resultados empíricos da pesquisa de campo e analisa o

carbono como indicador de qualidade ambiental; e a proposição de um Protocolo de Avaliação da Regeneração Natural, concebido como guia metodológico para orientar iniciativas de recuperação na Caatinga, contemplando dimensões ecológicas, espaciais e de monitoramento.

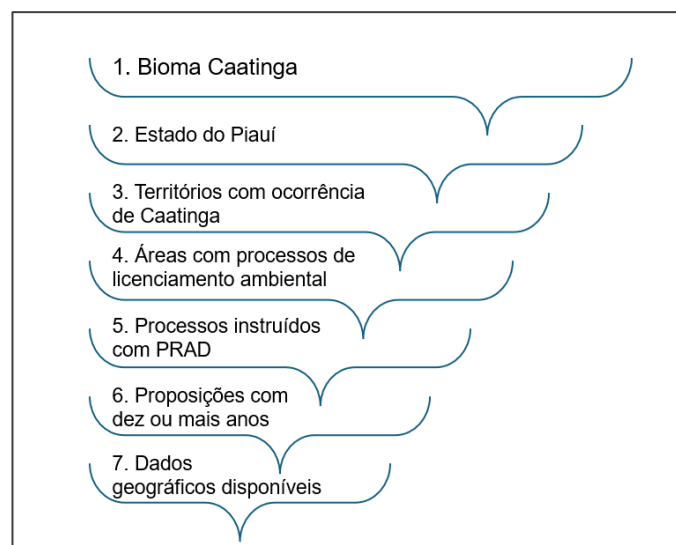
2. METODOLOGIA

2.1 PESQUISA DOCUMENTAL

Segundo a classificação de Marconi e Lakatos (2009, p. 48-55), a etapa inicial da pesquisa fundamentou-se na técnica de pesquisa documental, com base em registros oficiais arquivados em órgão público. Foram selecionados documentos de caráter primário e retrospectivo, especificamente processos administrativos de licenciamento ambiental de competência estadual do órgão seccional do SISNAMA, no Estado do Piauí.

A delimitação do universo da pesquisa foi conduzida por meio de um processo de filtragem sucessiva, representado graficamente em forma de esquema de afunilamento (Figura 03).

Figura 03 – Afunilamento do universo da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Esse procedimento iniciou-se pela definição do recorte temático (bioma Caatinga), seguido pelo recorte territorial (Estado do Piauí e mesorregiões) e, por fim, pela seleção do conjunto de áreas que atendiam cumulativamente aos seguintes critérios: existência de pedidos de licenciamento ambiental; apresentação formal de PRAD; protocolo com mais de dez anos; e disponibilidade de dados georreferenciados aptos a subsidiar a análise espacial e a localização e acesso para visita de campo.

Para a escolha dos processos, estabeleceu-se como critério a antiguidade mínima de dez anos do protocolo, a partir de maio de 2024, de modo a possibilitar a observação de alterações ambientais em período suficiente para avaliação. Além disso, consideraram-se apenas os processos que apresentavam Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) e estavam localizados em duas áreas de interesse: a Mesorregião do Sudeste Piauiense e a porção da Microrregião de São Raimundo Nonato, ambas inseridas no bioma Caatinga.

Uma vez identificados os processos que continham informações essenciais, como localização geográfica, histórico da atividade mineradora e propostas de recuperação ambiental realizou-se a análise de conteúdo das iniciativas de RAD descritas nos documentos e preparação da pesquisa de campo.

2.2 PESQUISA DE CAMPO

A etapa de campo foi planejada para complementar a pesquisa documental, permitindo a observação direta das áreas de estudo e a verificação in loco das informações contidas nos processos de licenciamento ambiental e nos Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD).

Essa fase contemplou visitas sistemáticas às áreas selecionadas, localizadas nos municípios de São João do Piauí, Picos, Jaicós, Marcolândia e Pio IX (Figura 04), abrangendo diferentes produtos de exploração mineral (areia, argila, saibro e diabásio), no período de junho e julho de 2024 e fevereiro e março de 2025.

A análise privilegiou a observação da paisagem, buscando identificar alterações geomorfológicas, indícios de supressão de vegetação, interrupção da sucessão ecológica e sinais de degradação ativa, como ravinamentos, voçorocamentos e compactação do solo. Também foram registradas evidências de uso atual ou passado, tais como conversão agrícola, presença de gado, indícios de fogo e ocupação por espécies exóticas invasoras.

Foram realizados registros fotográficos georreferenciados, descrições detalhadas da fitofisionomia e levantamento de espécies pioneiras visíveis no campo.

A caracterização da vegetação buscou distinguir os estratos arbóreo, arbustivo e gramíneo-lenhoso, de acordo com as classificações oficiais do IBGE, além de observar a diversidade relativa entre espécies nativas e exóticas.

Figura 04 – Situação das Áreas de Pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Além do diagnóstico biofísico, as campanhas de campo contemplaram o registro das pressões antrópicas incidentes, incluindo presença de infraestrutura, alteração de cursos d'água, abandono das áreas mineradas e efetividade das técnicas de recuperação, buscando confrontar a realidade observada com as propostas formais apresentadas nos PRADs, de modo a avaliar sua aplicabilidade prática.

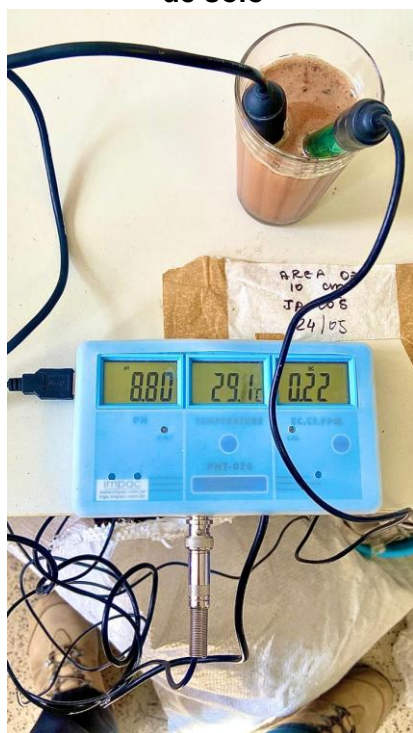
2.3 ANÁLISE DE CARBONO NO SOLO

O solo foi analisado de forma exploratória por meio da coleta de amostras superficiais, em especial quanto a parâmetros de carbono no solo. A coleta foi conduzida nas sete áreas de pesquisa da Caatinga piauiense, inseridas em ambiente semiárido com forte sazonalidade climática e elevada heterogeneidade pedológica. Nessas áreas, afetadas por mineração e em diferentes estágios de pousio ou perturbação, foram coletadas amostras de solo em duas profundidades (0–5 cm e 5–

10 cm) para avaliar indicadores de qualidade ambiental. Determinaram-se os teores de carbono orgânico do solo (C), nitrogênio total (N) e a razão C/N, bem como a matéria orgânica (MO), em conjunto com análises granulométricas para classificação textural.

Com base na concentração de C, densidade aparente e espessura da camada, estimaram-se os estoques de carbono (Mg ha^{-1}) em cada profundidade e para o total de 0–10 cm, utilizando valores médios de densidade aparente específicos por área. Os resultados foram posteriormente espacializados por meio de interpolação linear e krigagem (Processo Gaussiano com kernel radial), gerando superfícies contínuas comparáveis entre áreas e profundidades. Essa abordagem permitiu identificar gradientes, áreas críticas e padrões associados à textura, ao uso do solo e ao pousio, consolidando o carbono do solo como indicador sensível da efetividade da recuperação ambiental em áreas mineradas da Caatinga.

Figura 05 - Análise de condutividade em amostra de solo



Fonte: Autor (2024)

Figura 06 - Análise de matéria orgânica particulada em amostra de solo



Fonte: Autor (2024)

Figura 07 - Amostras de solo para análise



Fonte: Autor (2024)

Figura 08 – Amostras de solo catalogados para envio ao laboratório



Fonte: Autor (2025)

Figura 09 – Procedimento de coleta de 05 cm de camada superficial de solo



Fonte: Autor (2025)

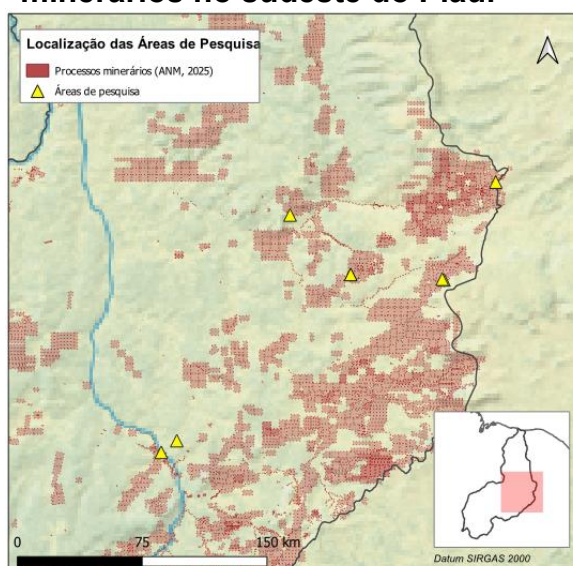
3. RESULTADOS

3.1. ANÁLISE DAS PROPOSTAS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR MINERAÇÃO EM ÁREAS DE CAATINGA

A análise das propostas de recuperação de áreas degradadas por mineração na Caatinga piauiense foi realizada a partir da seleção de processos minerários com mais de dez anos de protocolo e que apresentavam Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADs). As áreas contempladas abrangem diferentes contextos geográficos e tipologias de exploração mineral, distribuídas nos municípios de Picos, Jaicós, Pio IX, Marcolândia e São João do Piauí.

A Figura 10 ilustra a localização das áreas de pesquisa em relação à malha de processos minerários ativos no estado, evidenciando a inserção dos estudos em zonas do semiárido piauiense fortemente pressionadas pela atividade extrativa. A presença de centenas de processos distribuídos de forma difusa sobre o território confirma a magnitude da mineração como vetor de alteração da paisagem e reforça a necessidade de avaliar criticamente a efetividade das propostas de recuperação apresentadas nos licenciamentos.

Figura 10 - Localização das áreas de pesquisa em relação aos processos minerários no sudeste do Piauí



Fonte: Elaborado pelo autor, com base na ANM (2025)

Dessa forma, cada caso analisado combina a leitura documental — referente aos relatórios técnicos de licenciamento e aos PRADs — com o relato de campo,

permitindo identificar a distância entre o que foi formalmente proposto e a realidade observada nas áreas mineradas.

3.1.1. Área 01 - Picos

a. RELATÓRIO PROCESSO DE LICENCIAMENTO

PROCEDIMENTO OEMA: Licenciamento ambiental (LP; LI)

ATIVIDADE: Extração e beneficiamento de diabásio para produção de brita

VOLUME DE EXPLORAÇÃO: 334.208 m³

ÁREA: 5,05 ha

LOCALIZAÇÃO: Localidade "Fátima", zona rural de Picos; 7° 3'3.77"S, 41°33'28.45"O

DATA SOLICITAÇÃO: FEVEREIRO 2013

b. POSICIONAMENTO DO ÓRGÃO AMBIENTAL

Processo arquivado por abandono do solicitante, sem complementação e sem emissão da licença ambiental. Emissão de parecer condicional, solicitando a apresentação de documentos complementares, em especial retificações em autorizações de superficiários e apresentação de autorização de supressão vegetal. O parecer técnico não se manifestou sobre nenhum elemento dos estudos técnicos de recuperação ambiental. Processo foi formalmente arquivado por ausência de complementações e esclarecimentos solicitados nos pareceres técnicos.

c. ANÁLISE DOS DOCUMENTOS TÉCNICOS APRESENTADOS PARA PROPOSIÇÃO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

O interessado apresentou Projeto Técnico de Exploração Mineral e estudos ambientais, em volume único, reunindo Plano de Controle Ambiental (PCA), Relatório de Controle Ambiental (RCA) e Plano de Reabilitação de Área Degradada (PRAD).

O Projeto Técnico especifica a forma de exploração, inclusive de outras áreas contíguas à área solicitada, informando método de pesquisa e lavra, estudo de reserva geológica, potencial de demanda e viabilidade comercial, informações de infraestrutura, obras civis e segurança.

O estudo ambiental (PCA/RCA/PRAD) apresenta informações gerais do empreendimento, descrição do projeto, diagnóstico ambiental, avaliação dos impactos ambientais, programas e planos de controle e proteção ambiental e plano de reabilitação de área degradada. O diagnóstico do meio biótico apresenta resultado resumo de levantamento fitossociológico de campo, indicando espécies ocorrentes e análise da estrutura vertical da fitofisionomia. Observou-se que foram utilizados tanto dados primários como dados secundários, apresentados diretamente, sem discussão ou análise sinérgica entre si.

d. PROPOSTAS DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA

Embora o PRAD mencione iniciativas de reabilitação, ou seja, destinação de novo uso capaz de cessar os processos de degradação sem necessariamente propiciar a sucessão ecológica, as técnicas indicadas resumem-se a estabilização de taludes e adoção de dissipadores de energia (de natureza geomorfológica) e revegetação (de natureza ecológica). As técnicas propostas são detalhadas em nível básico, sem detalhamento executivo adaptado para as realidades espaciais da área a serem aplicada.

Considerando o longo horizonte de tempo, a proposição a nível de projeto básico na fase de planejamento faz sentido uma vez que o licenciamento prévio tem como escopo aprovar a concepção do projeto. As técnicas de revegetação detalham, por exemplo, espaçamento, tratamentos culturais e espécies de primeira escolha e quantitativo de 50.000 mudas. Essa proposição precisará ser ajustada quando de sua execução a nível de projeto executivo. Observou-se ainda a ausência de compromissos de monitoramento e acompanhamento do desempenho da recuperação através de indicadores.

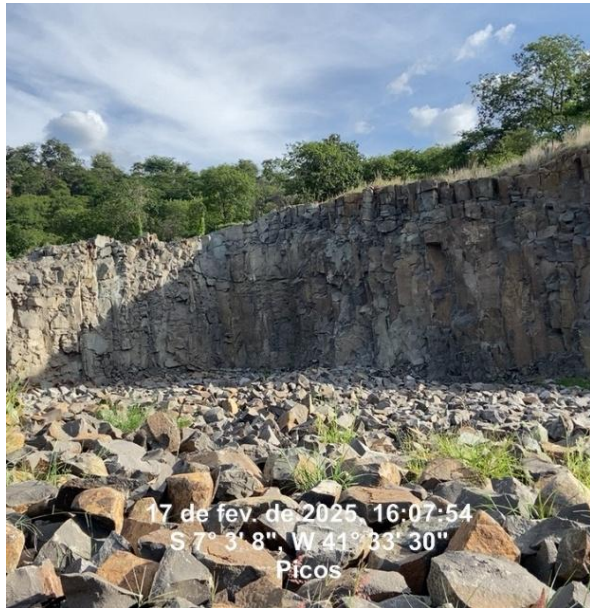
e. RELATO DE CAMPO

A área estava em exploração, de modo que a atividade não apresenta frentes de lavras exauridas para exploração que justifiquem o início do processo de recuperação. Embora os processos objeto da pesquisa tenham sido abandonados, a regularização da atividade se deu através de processos mais recentes de licenciamento que contemplaram a área em estudo. As coletas de solo foram realizadas nas áreas de vegetação adjacente, contíguas às áreas de lavra mineral. Essas áreas apresentam

estágio de perturbação, provavelmente por degradação causada por fogo recente. Não se evidencia a execução das técnicas recomendadas pelo PRAD.

f. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 11 – Frente de lavra de diabásio em exploração; vegetação ao fundo



Fonte: Autor (2025)

Figura 12 – Área de exploração com manifestação do estrato herbáceo



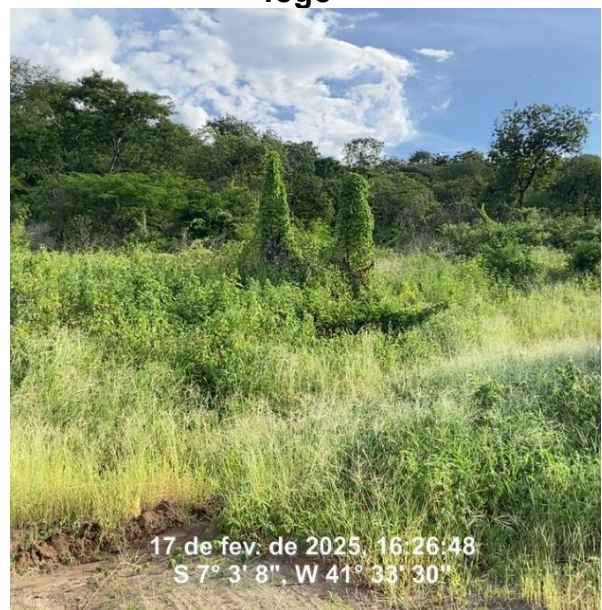
Fonte: Autor (2025)

Figura 13 – Coleta de solo na área do entorno da lavra



Fonte: Autor (2025)

Figura 14 – Área de vegetação no entorno da lavra em perturbação por fogo



Fonte: Autor (2025)

3.1.2. Área 02 - Jaicós

a. RELATÓRIO PROCESSO DE LICENCIAMENTO

PROCEDIMENTO OEMA: Licenciamento ambiental trifásico (LP; LI; LO)

ATIVIDADE: Extração de argila para uso na indústria cerâmica

VOLUME DE EXPLORAÇÃO: não informado

ÁREA: 7,62 ha

LOCALIZAÇÃO: Localidade “Cajú”, zona rural de Jaicós; 7° 22’ 15,00” S / 041° 13’ 46,00”

DATA SOLICITAÇÃO: JUNHO 2013

b. POSICIONAMENTO DO ÓRGÃO AMBIENTAL

Processo arquivado por abandono do solicitante, sem complementação e sem emissão da licença ambiental. Emissão de parecer técnico, condicionando o prosseguimento da análise à apresentação de complementações e esclarecimentos, como projeto e plano de lavra, informações sobre supressão da vegetação, averbação da reserva legal e inscrição no cadastro técnico federal. O parecer técnico não se manifestou sobre nenhum elemento dos estudos técnicos de recuperação ambiental.

c. ANÁLISE DOS DOCUMENTOS TÉCNICOS APRESENTADOS PARA PROPOSIÇÃO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

O interessado apresentou estudo ambiental em volume único reunindo Plano de Conservação Ambiental (PCA) e Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). O estudo apresenta duas fotos, comprovando que a atividade mineral já ocorre na área. O PCA utiliza apenas dados gerais do município e do Piauí, sem discutir as consequências e impactos ambientais da atividade. Em determinado trecho alega a quase desnecessidade de intervenções: “...vale ressaltar que 5 há é uma área muito pequena, fácil de se recompor.” (BARROS FILHO, 2013)

d. PROPOSTAS DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA

O PRAD, além de linguagem genérica, não apresenta informações importantes, como diagnóstico ambiental específico da área, não discute sobre técnicas de recuperação, resumindo-se a uma seção de quatro parágrafos no estudo, apenas

informando a realização futura de revegetação. O documento foi elaborado exclusivamente com dados primários.

e. RELATO DE CAMPO

A área possui indícios de exploração mineral, apresentando alterações geomorfológicas e de interrupção da sucessão ecológica, verificáveis na análise da paisagem. A vegetação do entorno testemunha ocorrência do bioma Caatinga, com boa variabilidade e diversidade razoável de espécies vegetais dominantes. No local da coleta a presença destaca-se a presença de espécie pioneira, arbustiva de altura média de 2,5 a 3,0 metros; caule em fuste ramificado e baixa diversidade. O solo apresentava-se raso, com afloramento rochoso, pouca matéria orgânica e presença de fauna edáfica. A área, embora possua Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, não obteve licenciamento ambiental, tendo sido explorada e mantida em pousio não monitorado. É marcante a presença de áreas com forte lavagem hídrica pela drenagem pluvial, mantendo a continuação de processos erosivos por ravinamento e voçorocamento raso. Não se evidencia a execução das técnicas recomendadas pelo PRAD.

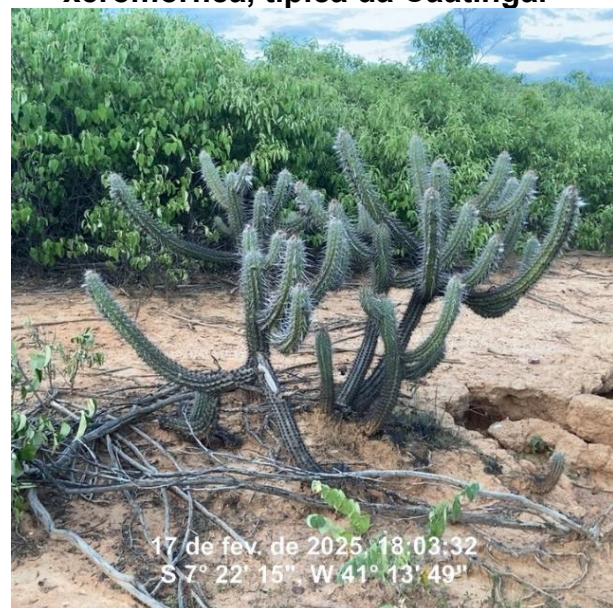
f. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 15 – Solo exposto com feições degradadas.



Fonte: Autor (2025)

Figura 16 – Registro de vegetação xeromórfica, típica da Caatinga.



Fonte: Autor (2025)

Figura 17 – Paisagem vegetal dominada por espécie pioneira arbustiva



Fonte: Autor (2024)

Figura 18 – Coleta de solo na área de pesquisa



Fonte: Autor (2024)

3.1.3. Área 03 - Pio IX

a. RELATÓRIO PROCESSO DE LICENCIAMENTO

PROCEDIMENTO OEMA: Licenciamento ambiental (LP; LI)

ATIVIDADE: Extração de argila, com exploração mecanizada, para uso na indústria de cimento

VOLUME DE EXPLORAÇÃO: 14.637.892 ton

ÁREA: 98,2 ha

LOCALIZAÇÃO: Localidade "Gurgueia", zona rural de Pio IX; 6° 52' 22.997" S 40° 26' 27.787" W

DATA SOLICITAÇÃO: DEZEMBRO 2010

b. POSICIONAMENTO DO ÓRGÃO AMBIENTAL

Licença Prévia ambiental emitida, condicionando a emissão da Licença de Instalação à apresentação do cadastro técnico federal, licenciamento e outorgada fonte de água, autorização do superficiário, e autorização de supressão vegetal. Parecer técnico recomenda a emissão da LP, desde que a apresentação dos documentos ausentes sejam condicionantes para as próximas fases do licenciamento. O parecer técnico não

se manifestou sobre nenhum elemento dos estudos técnicos de recuperação ambiental.

c. ANÁLISE DOS DOCUMENTOS TÉCNICOS APRESENTADOS PARA PROPOSIÇÃO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

O interessado apresentou Plano de Controle Ambiental (PCA) e Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD). O diagnóstico ambiental utilizou dados secundários de estudos de viabilidade realizados no ano 2001.

O PCA apresenta detalhamento na previsão de impactos com relação direta ou indireta na capacidade de recuperação da área degradada, são eles: alteração das características do solo; carreamento do solo – erosão; alteração na estabilidade de encostas; alteração na topografia de intervenção; remoção da vegetação; afugentação da fauna; redução dos efeitos dispersivos da fauna; alteração da paisagem.

As medidas mitigadoras dos impactos relacionados à recuperação da área degradada são descritas de forma genérica, sendo elas: formação de reservatórios d'água nas escavações exauridas, com peixamento das áreas de lavras exauridas; formação de depósitos de topsoil; revegetação das áreas remanescentes.

O PRAD reproduz as seções de caracterização e descrição da atividade, diagnóstico ambiental, legislação incidente e impactos ambientais do PCA, e desenvolve adicionalmente, limitadamente, um capítulo sobre Plano de Recuperação de Áreas Degradadas.

d. PROPOSTAS DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA

Entre as técnicas recomendadas está a formação de leiras com material oriundo do desmatamento, de modo que *“... raízes, troncos e galhos, serão acumulados em leiras. O material enleirado substituirá temporariamente os micro-habitats e abrigos perdidos, hospedeiros da fauna.”* O estudo justifica a ação, afirmando que *“... os restos das árvores poderá [sic] retornar à superfície da área, para servir de abrigo à fauna, principalmente micro e mesofauna do solo, enquanto se decompõem”*. (SANTOS, 2010 p. 65-66).

Outras técnicas apresentadas no PRAD são: recomposição topográfica, através da estabilização de taludes, construção de terraços como dissipadores de energia, descompactação do solo e correção da fertilidade do solo. A revegetação, já mencionada no PCA, é detalhada, e indica de forma consorciada o transplante de serapilheira, de áreas de contribuição do entorno. Prevê, ainda, a adoção de espécies arbustivas e arbóreas, por plantio de mudas, de vinte e duas espécies escolhidas. Não apresenta indicadores ou critérios de monitoramento e acompanhamento da sucessão e recuperação ecológica.

e. RELATO DE CAMPO

A área possui indícios de exploração mineral e possui testemunhos da implantação das técnicas descritas no PRAD. A vegetação do entorno confirma a presença do bioma Caatinga, apresentando baixa heterogeneidade estrutural e reduzida diversidade de espécies dominantes. Inserida na Região Florística Nordestina, a fitofisionomia corresponde à Savana-Estépica / Caatinga do Sertão Árido, mais especificamente Savana-Estépica, marcada por dois estratos bem definidos: um superior arbustivo, pouco adensado, e outro inferior composto por gramíneas, espécies lenhosas baixas e xeromórficas, de acordo com a classificação do IBGE.

A área apresenta solo em grande parte exposto, evidenciando processos de degradação mais intensos e perda de camada superficial. Foi registrada a presença de gado, fator que contribui para o pisoteio e compactação do solo. A vegetação é composta principalmente por espécies arbustivas pioneiras, distribuídas de forma esparsa, associadas a manchas pontuais de desenvolvimento de vegetação mais densa. Observou-se também enleiramento de restos de cobertura vegetal, provavelmente resultante de manejo antrópico.

O terreno revela sinais de ravinamento e de erosão subsuperficial, indicando fragilidade geomorfológica em continuidade. Foram identificados indícios de fogo anterior, bem como a presença de serapilheira fina, porém relativamente diversa, cobrindo de forma descontínua a superfície. Durante a observação direta, registrou-se a ocorrência de avifauna em sobrevoo e, no solo, avistamentos pontuais de edafofauna. Evidencia-se a execução das técnicas recomendadas pelo PRAD, mas

insuficientes tanto para restauração ecológica quanto para cessação da degradação, embora propicie a sucessão se comparada com a ausência de manejo.

f. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 19 – Evidência da adoção de prática de RAD proposta nos estudos.



Fonte: Autor (2025)

Figura 20 – Testemunho de ravinamento na área de pesquisa



Fonte: Autor (2025)

Figura 21 – Testemunho de vegetação xeromórfica, típica da Caatinga



Fonte: Autor (2025)

Figura 22 – Instalações desativadas da unidade industrial, destino da extração



Fonte: Autor (2025)

3.1.4. Área 04 - Marcolândia 02

a. RELATÓRIO PROCESSO DE LICENCIAMENTO

PROCEDIMENTO OEMA: Licenciamento ambiental trifásico (LP; LI; LO)

ATIVIDADE: Extração de saibro para construção civil e outros usos consorciados

VOLUME DE EXPLORAÇÃO: não informado

ÁREA: 10,14ha

LOCALIZAÇÃO: Localidade “Sítio Deserto”, zona rural de Marcolândia; 7°24'7.41"S, 40°43'6.73"W

DATA DA SOLICITAÇÃO: JANEIRO 2014

b. POSICIONAMENTO DO ÓRGÃO AMBIENTAL

Processo arquivado por abandono do solicitante, sem complementação e sem emissão da licença ambiental. Emissão de parecer técnico apontando necessidade de complementação de documentos, como averbação de reserva legal, ausência de legalização da área na autoridade mineral (DNPM), ausência de autorização do superficiário. Sobre os estudos de recuperação ambiental, a única observação é sobre ausência de assinatura do PRAD pelo responsável por sua elaboração.

c. ANÁLISE DOS DOCUMENTOS TÉCNICOS APRESENTADOS PARA PROPOSIÇÃO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

Tendo o mesmo interessado, e tratando-se de áreas vizinhas, embora não sejam contíguas, os estudos das localidades “Deserto” e “Riacho Fechado” em Marcolândia são idênticos, havendo sido apresentados Plano de Controle Ambiental (PCA) e Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD). Os estudos são genéricos, elaborados totalmente com dados secundários e sem recorte específico para a área a sofrer intervenção. Os dados e informações são apresentados sem contexto e sem discussão.

d. PROPOSTAS DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA

Como do documento para o processo da localidade “Riacho Fechado”, o PRAD apresenta como proposta ações de natureza geomorfológica, como suavização de taludes, dissipadores de energia, de natureza edáfica, como descompactação do solo,

e ecológica, apontando revegetação com a ação principal. Especifica etapas da revegetação, indicando semeadura de gramíneas e plantio de mudas de espécies lenhosas, sem detalhar ou sugerir espécies indicadas.

O estudo aborda a importância do monitoramento, mas não apresenta indicadores ou estratégia verificável de acompanhamento ao longo do tempo, apenas elencando ações como controle de pragas, controle de invasão de herbáceas, desbaste periódico (sem indicar periodicidade) e controle da erosão com escavação manual, sem apresentar detalhes.

e. RELATO DE CAMPO

A área não possui indícios de exploração mineral, por ausência de testemunhos de paisagem, considerando a conversão do uso do solo. A vegetação do entorno confirma a presença do bioma Caatinga, apresentando baixa heterogeneidade estrutural e reduzida diversidade de espécies dominantes. Inserida na Região Florística Nordestina, a fitofisionomia corresponde à Savana-Estépica / Caatinga do Sertão Árido, mais especificamente Savana-Estépica, marcada por dois estratos bem definidos: um superior arbustivo, pouco adensado, e outro inferior composto por gramíneas, espécies lenhosas baixas e xeromórficas, de acordo com a classificação do IBGE.

Durante a coleta observou-se a ocorrência de espécie pioneira, não identificada, de porte arbustivo entre 2,5 e 3,0 metros de altura, caule ramificado e reduzida diversidade florística. Apesar da previsão de um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, a área não obteve licenciamento ambiental, sendo explorada e posteriormente destinada ao uso agrícola.

Registra-se que a conversão em lavoura resultou na permanência de apenas fragmentos de vegetação nativa nas áreas circunvizinhas, os quais foram utilizados como referência para caracterização. Há evidências de fogo recente, e a serapilheira encontrada é fina e com baixa diversidade. O solo, compactado, apresentou camada superficial de 10 cm de difícil coleta. Foram ainda registrados avistamentos ocasionais de avifauna e de serpentofauna no local. Não se evidencia a execução das técnicas recomendadas pelo PRAD.

f. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 23 – Camada superficial de matéria orgânica

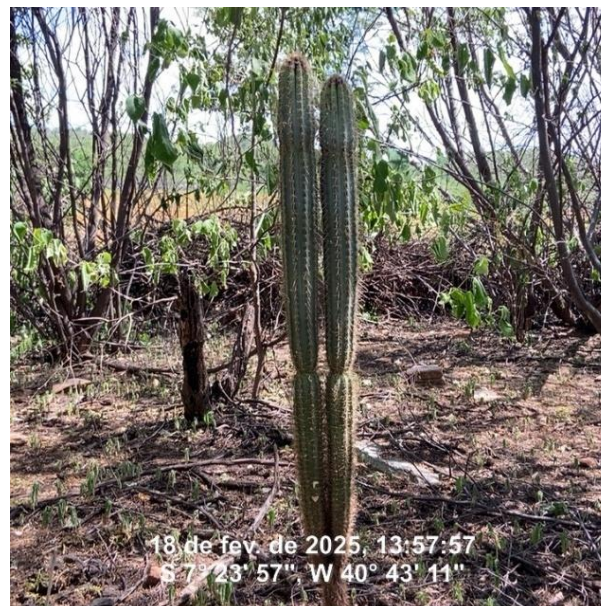
Fonte: Autor (2025)

Figura 24 – Reabilitação da área degradada com destinação para agricultura

Fonte: Autor (2025)

Figura 25 – Serrapilheira com presença de fogo recente

Fonte: Autor (2025)

Figura 26 – Evidência de vegetação xeromórfica na área de pesquisa

Fonte: Autor (2025)

3.1.5. Área 05 - Marcolândia 01

a. RELATÓRIO PROCESSO DE LICENCIAMENTO

RELATÓRIO PROCESSO DE LICENCIAMENTO

PROCEDIMENTO OEMA: Licenciamento ambiental trifásico (LP; LI; LO)

ATIVIDADE: Extração de saibro para construção civil e outros usos consorciados

VOLUME DE EXPLORAÇÃO: não informado

ÁREA: 4,02ha

LOCALIZAÇÃO: Localidade "Sítio Riacho Fechado", zona rural de Marcolândia;
7°23'50.54"S, 40°43'53.19"W

DATA DA SOLICITAÇÃO: JANEIRO 2014

b. POSICIONAMENTO DO ÓRGÃO AMBIENTAL

Processo arquivado por indeferimento do pedido. Emissão de parecer técnico apontando diversas inconsistências, entre elas a ausência de projeto técnico de exploração de lavra, do volume de material a ser explotado, da previsão de quantidade de empregos a serem gerados, sobre a supressão de vegetação e reserva legal. Sobre os elementos técnicos das informações de recuperação ambiental o parecer se ateve apenas a informar que, caso seja adotada modalidade de reabilitação com aproveitamento das cavas para implantação de atividade de piscicultura, haveria a necessidade de pleitear processo de licenciamento adicional.

c. ANÁLISE DOS DOCUMENTOS TÉCNICOS APRESENTADOS PARA PROPOSIÇÃO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

O interessado apresentou Plano de Controle Ambiental (PCA) e Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD). Conforme atestado pelo parecer técnico de licenciamento, os estudos são genéricos, elaborados totalmente com dados secundários e sem recorte específico para a área a sofrer intervenção. Os dados e informações são apresentados sem contexto e sem discussão.

O PCA apresenta detalhamento na previsão de impactos com relação direta ou indireta na capacidade de recuperação da área degradada, são eles: poluição do solo por resíduos sólidos; assoreamento dos cursos d'água; alteração na drenagem

superficial; desfiguração da paisagem natural; supressão da mata nativa; fuga da fauna nativa; perda de fauna ameaça de extinção; destruição de habitats. A maior parte das medidas mitigadoras concentra a resolução das consequências destes impactos na iniciativa de recuperação da área degradada, apresentada em outro volume.

A síntese conclusiva da avaliação de impactos do PCA indica que “... a supressão da vegetação nativa será pouco relevante...” uma vez que “ ... terão seus efeitos amortecidos pelos programas ambientais...”. Finaliza justificando que “sem o empreendimento, as populações pobres [sic] perderão a oportunidade de empregos diretos e indiretos. E o município, o Estado e a União deixariam de arrecadar tributos.” (BATISTA, 2013).

d. PROPOSTAS DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA

O PRAD apresenta como proposta ações de natureza geomorfológica, como suavização de taludes, dissipadores de energia, de natureza edáfica, como descompactação do solo, e ecológica, apontando revegetação com a ação principal. Especifica etapas da revegetação, indicando semeadura de gramíneas e plantio de mudas de espécies lenhosas, sem detalhar ou sugerir espécies indicadas. O estudo aborda a importância do monitoramento, mas não apresenta indicadores ou estratégia verificável de acompanhamento ao longo do tempo, apenas elencando ações como controle de pragas, controle de invasão de herbáceas, desbaste periódico (sem indicar periodicidade) e controle da erosão com escavação manual, sem apresentar detalhes.

e. RELATO DE CAMPO

A área possui indícios de exploração mineral, apresentando alterações geomorfológicas e de interrupção da sucessão ecológica, verificáveis através da análise da paisagem. A vegetação do entorno testemunha ocorrência do bioma Caatinga, com baixa variabilidade e pouca diversidade de espécies vegetais dominantes. Encontrando-se na Região Florística Nordestina, caracteriza-se como Savana-Estépica / Caatinga do Sertão Árido, especificamente Savana-Estépica, pela existência de dois estratos bem delimitados, sendo um arbustivo superior e esparso e outro inferior gramíneo-lenhoso, conforme classificação do IBGE. No local da coleta a presença destaca-se a presença de espécie pioneira, não identificada, arbustiva de

altura média de 2,5 a 3,0 metros, com caule em fuste ramificado e baixa diversidade. O solo apresentava-se raso, com afloramento rochoso e baixa presença de fauna edáfica.

A área, embora possua Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, não obteve licenciamento ambiental, tendo sido explorada e mantida em pousio não monitorado. Não se evidencia a execução das técnicas recomendadas pelo PRAD.

f. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 27 – Afloramento rochoso na área de pesquisa



Fonte: Autor (2025)

Figura 28 – Vegetação arbustiva bem desenvolvida, serrapilheira densa



Fonte: Autor (2025)

3.1.6. Área 06 - São João Do Piauí – Capivara

a. RELATÓRIO PROCESSO DE LICENCIAMENTO

PROCEDIMENTO OEMA: Licenciamento Ambiental Trifásico (LP; LI; LO)

ATIVIDADE: Extração de argila para uso na fabricação de cerâmica

VOLUME DE EXPLORAÇÃO: 12.000 t/ano

ÁREA: 49,75 ha

LOCALIZAÇÃO: Localidade “Espinheiro”, zona rural de São João do Piauí;
8°19'43.41"S, 42°15'34.81"W

DATA DA SOLICITAÇÃO: Outubro 2011

b. POSICIONAMENTO DO ÓRGÃO AMBIENTAL

Processo arquivado por abandono do solicitante, sem complementação e sem emissão da licença ambiental. Emissão de parecer técnico apontando necessidade de complementação de documentos, como ausência de comprovação de reserva legal, croqui de acesso, plano de lavra, anotação de responsabilidade técnica pela execução e pelos estudos ambientais, cadastro técnico federal da atividade.

O parecer técnico possui uma sessão apenas para discutir questões relacionadas aos estudos, destacando problemas quanto à confiabilidade das informações, inconsistências sobre as atividades a serem desenvolvidas, desatualização da legislação apresentada. Quanto ao PRAD, considerou inadequado o prazo de execução. Foi solicitada a apresentação de novo PRAD e correções no PCA.

c. ANÁLISE DOS DOCUMENTOS TÉCNICOS APRESENTADOS PARA PROPOSIÇÃO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

O processo de licenciamento foi instruído com a apresentação de um Plano de Controle Ambiental (PCA) e de um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). O PCA limita-se a organizar capítulos descritivos do empreendimento, diagnóstico ambiental genérico, avaliação de impactos, prognóstico e conclusões pouco detalhadas. O PRAD, por sua vez, restringe-se a expor generalidades sobre a atividade de lavra, acompanhadas de informações superficiais a respeito dos impactos causados, métodos básicos de controle da mineração e uma proposta de recuperação apresentada de forma ampla e sem adequação às condições específicas da área de intervenção.

Ambos os estudos se baseiam exclusivamente em dados secundários, sem qualquer referência a procedimentos metodológicos de campo ou à realização de coletas destinadas ao diagnóstico ambiental. Destaca-se a ausência completa de registros fotográficos ou de imagens da área, lacuna que chegou a ser apontada no próprio parecer técnico do licenciamento. Não há descrição do relevo ou da vegetação local, sendo indicado apenas que o diagnóstico teria abrangido a área de influência. De forma geral, os documentos não estabelecem análise crítica sobre as informações

reunidas, restringindo-se a compilar dados dispersos de caráter municipal, sem contextualização específica para a área a ser recuperada.

d. PROPOSTAS DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA

O PRAD apresenta de forma sucinta 04 (quatro) técnicas de recuperação, sendo estabilização de taludes e correção da drenagem com dissipadores de energia, de natureza geomorfológica, descompactação do solo, de natureza edáfica, e revegetação, de natureza ecológica. A revegetação cita a adoção de hidrossemeadura para gramíneas e plantio de mudas para espécies arbustivas e arbóreas, sem apresentar recomendação de espécies. Cita a necessidade de monitoramento, como monitorar processos erosivos, sucesso da germinação de sementes, falhas de cobertura e controle de pragas, mas sem apresentar indicadores.

e. RELATO DE CAMPO

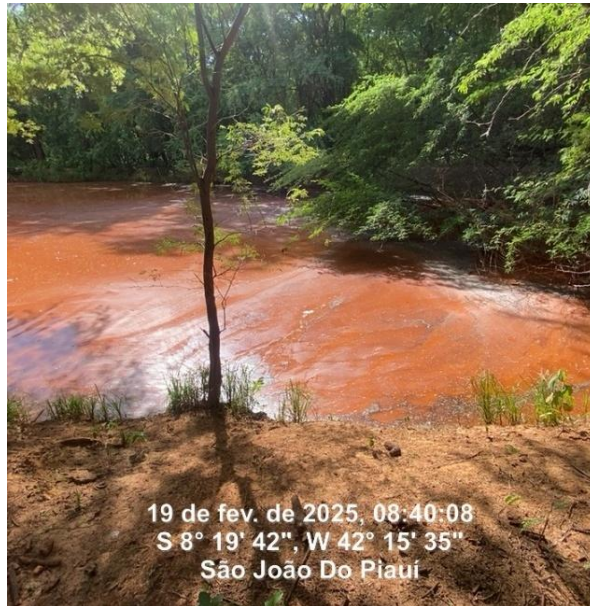
A área possui indícios de exploração mineral, apresentando alterações geomorfológicas e de interrupção da sucessão ecológica, verificáveis através da análise da paisagem, e ainda de manutenção e agravamento da degradação. A extração de argila modificou significativamente a dinâmica geomorfológica da área, ocasionando erosão que avançou sobre terrenos vizinhos, com evidências de processos de desestabilização.

O entorno imediato apresenta cobertura dominada quase exclusivamente por algaroba (*Prosopis juliflora*), espécie exótica invasora que reduziu drasticamente a diversidade local e interrompeu o processo de sucessão natural. O solo, em condição úmida, revelou a presença de edafofauna, indicando algum nível de atividade biológica residual.

Em entrevista realizada com moradores vizinhos, foi relatado que a exploração de argila teria provocado alterações no curso d'água e na drenagem natural, o que se confirma pela observação das feições alteradas no terreno. Cita-se a inexistência de registro de fogo recente. Não foram identificadas técnicas de recuperação de áreas degradadas voltadas para a suavização do relevo, o que agrava a instabilidade geomorfológica e reforça a predominância da espécie exótica sobre a regeneração natural da área.

f. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 29 – Área de lavra abandonada, com represamento de água na cava de exploração



Fonte: Autor (2025)

Figura 30 – Propriedade vizinha impactada pela erosão e perda de solo causada pela degradação



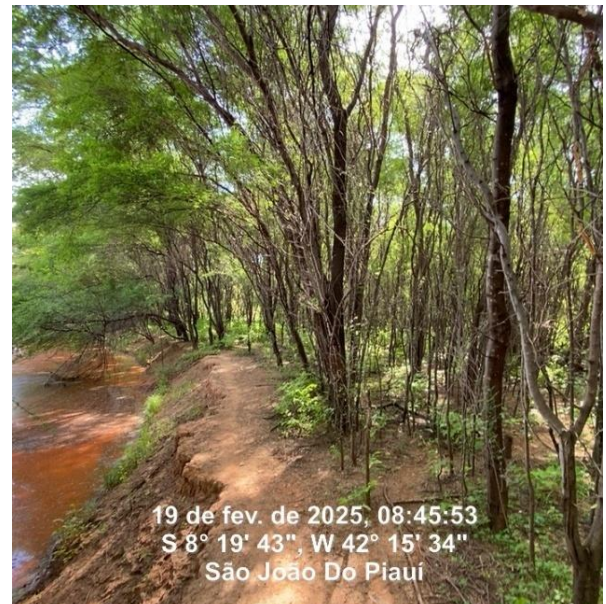
Fonte: Autor (2025)

Figura 31 – Solo pobre em serrapilheira e baixa cama de matéria orgânica



Fonte: Autor (2025)

Figura 32 – Entorno de vegetação dominado por espécie exótica



Fonte: Autor (2025)

Figura 33 – Área degradada isolada por risco de acidentes; impacto na drenagem natural das microbacias



Fonte: Autor (2025)

Figura 34 – Paisagem alterada da área de degradação por exploração mineral de argila



Fonte: Autor (2025)

3.1.7. Área 07 - São João Do Piauí – Agreste

a. RELATÓRIO PROCESSO DE LICENCIAMENTO

PROCEDIMENTO OEMA: Licenciamento ambiental trifásico (LP; LI; LO)

ATIVIDADE: Extração de areia para utilização imediata na construção civil

VOLUME DE EXPLORAÇÃO: 12.000 m³

ÁREA: 49,73 ha

LOCALIZAÇÃO: Localidade “Estação”, zona rural de São João do Piauí; 8°16'10.00"S, 42°10'30.00"W

DATA SOLICITAÇÃO: SETEMBRO 2011

b. POSICIONAMENTO DO ÓRGÃO AMBIENTAL

Processo abandonado, sem complementação e sem licença ambiental. Emissão de parecer condicional, solicitando a apresentação de documentos complementares necessários para prosseguimento da análise. Aponta que o empreendimento não se manifestou sobre a supressão de vegetação no local, não foi apresentada planta baixa ou projeto, ausência dos estudos em meio digital e do Cadastro Técnico Federal de Atividades Poluidoras do empreendedor. Ainda indica inconsistências nos estudos

ambientais. O parecer técnico não se manifestou sobre nenhum elemento dos estudos técnicos de recuperação ambiental.

c. ANÁLISE DOS DOCUMENTOS TÉCNICOS APRESENTADOS PARA PROPOSIÇÃO DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

O interessado apresentou Plano de Controle Ambiental (PCA) e Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD) para fundamentar o pedido de licenciamento. Basicamente o PCA apresenta capítulo de descrição do empreendimento, diagnóstico, avaliação ambiental e conclusões. O PRAD apresenta generalidades sobre a atividade de exploração mineral, informações sobre impactos causados, métodos de controle da mineração e proposta de recuperação de área degradada. Ambos os estudos utilizam apenas dados secundários, não apontando quaisquer informações metodológicas sobre levantamentos realizados no local, sem relato de coleta para diagnóstico ambiental. Chama a atenção que nenhuma dos estudos possui fotografia ou imagens, descrição do relevo ou da vegetação, referindo-se que a área de diagnóstico abrangeu apenas área de influência. De modo geral os estudos não discutem as informações apresentadas, apenas reúnem compilações de dados diversos sobre o território municipal. Apresentou apenas 8 (oito) medidas de gerenciamento dos impactos, sendo 6 (seis) mitigadoras de impactos adversos e 02 (duas) potencializadoras de impactos benéficos.

d. PROPOSTAS DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA DEGRADADA

O PRAD apresenta de forma sucinta 03 (três) técnicas de recuperação da área degradada, sendo 02 (duas) geomorfológicas, suavização de taludes e dissipadores de energia, e 01 (uma) ecológica, revegetação por plantio de mudas e hidrossemeadura. A sessão sobre revegetação não indicou espécies ou cultivares para plantio, espaçamento, nem medidas de acompanhamento da qualidade ambiental.

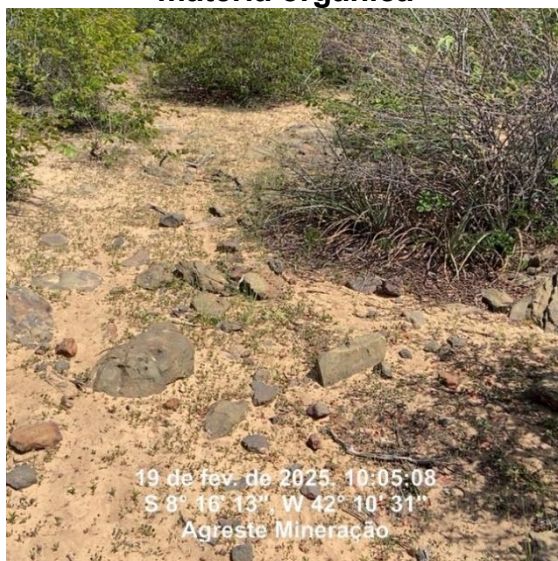
e. RELATO DE CAMPO

A área não possui indícios de exploração mineral, não apresentando alterações geomorfológicas nem de interrupção da sucessão na paisagem. É possível, entretanto, identificar ocorrência de supressão de vegetação em porção linear da área

relativa a linhas de transmissão de energia. Visualmente é possível perceber solo arenoso exposto e aflorações rochosas. Vegetação arbustiva e xeromórfica, savana estépica com presença de espécies pioneiras em áreas com indício de ocorrência de fogo. Conclui-se que não foram adotadas medidas de RAD por ausência da exploração da atividade.

f. REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 35 – Solo rochoso, arenoso e pouca camada superficial de matéria orgânica



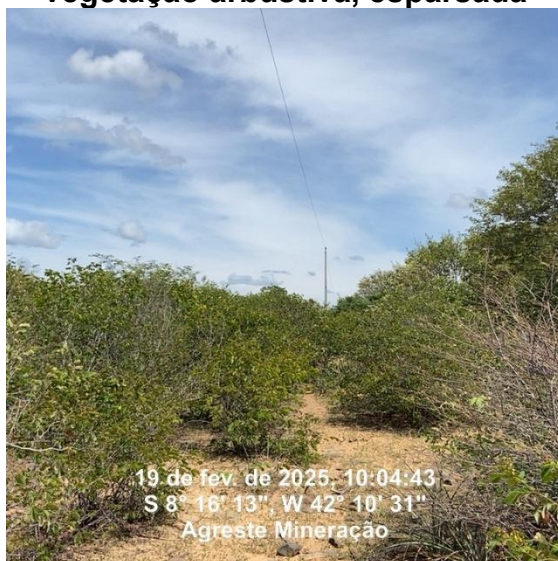
Fonte: Autor (2025)

Figura 36 – Aspecto geral da vegetação



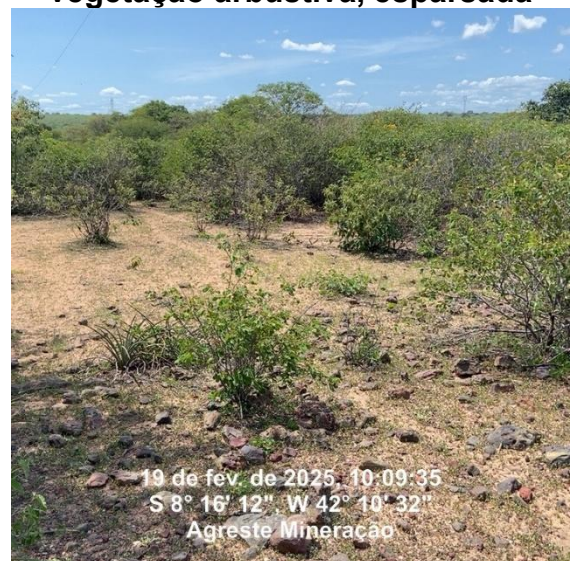
Fonte: Autor (2025)

Figura 37 – Aspecto geral da vegetação arbustiva, esparsa



Fonte: Autor (2025)

Figura 38 – Aspecto geral da vegetação arbustiva, esparsa



Fonte: Autor (2025)

3.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos processos de licenciamento ambiental das atividades de extração mineral em áreas de Caatinga apresenta como padrão a fragilidade metodológica e a baixa efetividade das propostas de recuperação.

Embora os Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADs) e os Planos de Controle Ambiental (PCAs) contemplem formalmente medidas de mitigação e recuperação, os relatórios de campo demonstram que em praticamente todos os casos, as áreas foram abandonadas após a exploração, sem execução das técnicas previstas.

As técnicas de recuperação de áreas degradadas propostas nos estudos analisados foram sistematizadas no Quadro X, que apresenta a frequência de ocorrência de cada uma delas. Observa-se que as medidas mais recorrentes se concentram em ações de caráter geomorfológico e ecológico, como a estabilização de taludes, a revegetação e a instalação de dissipadores de energia, cada uma registrada em mais da metade dos processos avaliados.

Quadro 01 – Ocorrência das técnicas de RAD nos estudos analisados

NATUREZA	TÉCNICA	OCORRÊNCIA
Ecológica	Revegetação	7
Geomorfológica	Estabilização de taludes	7
Geomorfológica	Dissipadores de energia	6
Edáfica	Descompactação do solo	5
Edáfica	Reserva de topsoil	1
Geomorfológica	Formação de reservatório escavado	1
Ecológica	Enleiramento com restos vegetais	1
Edáfica	Correção da fertilidade do solo	1
Ecológica	Transplante de serapilheira	1

Em seguida aparecem intervenções de natureza edáfica, como a descompactação do solo, citada em cinco processos. Técnicas mais específicas, como a reserva de *topsoil*, o transplante de serapilheira, o enleiramento com restos vegetais, a correção da fertilidade e a formação de reservatórios escavados,

aparecem apenas uma vez cada, revelando que a diversidade de alternativas metodológicas ainda é pouco explorada. Esse padrão evidencia a predominância de soluções genéricas, muitas vezes replicadas sem adequação às condições particulares de cada área, em detrimento de propostas mais inovadoras ou adaptadas ao contexto da Caatinga.

Com base nisso verifica-se, em primeiro lugar, a distância entre a teoria e a prática. Os estudos apresentados limitam-se a compilar informações secundárias, com diagnósticos genéricos e ausência de indicadores de monitoramento, fotos, descrições detalhadas de relevo ou vegetação. Não há registro de levantamentos in loco nos documentos técnicos, embora os pareceres condicionassem o prosseguimento dos processos à complementação dessas informações. Nos relatos de campo, constatou-se que quase nenhuma das técnicas propostas foi implementada. A única exceção registrada ocorreu na área 03, onde foi observada a prática de enleiramento de restos vegetais e algumas medidas de recomposição topográfica. Ainda assim, essas ações mostraram-se insuficientes para desencadear um processo consistente de restauração ecológica, funcionando apenas como paliativos de caráter edáfico e geomorfológico.

Esse cenário revela um paradoxo em que nenhum PRAD analisado propôs a regeneração natural como alternativa oficial, entretanto, na prática, o que predominou foi o abandono, com a expectativa de que o próprio ecossistema pudesse recompor-se espontaneamente. Trata-se, portanto, de uma “recuperação passiva” não planejada, em que o pousio e a resiliência parcial da Caatinga foram tratados tacitamente como soluções únicas. Essa escolha implícita reforça a distância entre o discurso formal dos estudos ambientais e a realidade observada em campo.

A consequência desse descompasso é visível na paisagem. Os registros apontam erosão acelerada, ravinamentos, voçorocas, alterações de drenagem natural e desestabilização de terrenos vizinhos. Em algumas áreas, a introdução ou expansão de espécies exóticas, como a algaroba, interrompeu a sucessão natural ao reduzir a diversidade florística e dificultar os processos regenerativos.

Entretanto, é importante reconhecer que, quando manejada de forma planejada, espécies exóticas podem desempenhar um papel de contenção inicial, contribuindo

para a redução da degradação e oferecendo sombreamento e aporte de biomassa. O problema não está na presença isolada de exóticas, como a algaroba, mas na forma como ela se estabelece sem controle, favorecendo a homogeneização da paisagem e bloqueando a recomposição de espécies nativas.

Além disso, em outros pontos, a presença de gado, o fogo e o pisoteio podem intensificar a compactação do solo, inibindo a instalação de regenerantes e perpetuando os processos de degradação. Do ponto de vista metodológico, a ausência de monitoramento sistemático, de parâmetros de avaliação e de responsabilização efetiva dos empreendedores revela fragilidades institucionais do sistema de licenciamento como vetor de desenvolvimento sustentável na Caatinga.

Os pareceres técnicos, em geral, arquivaram ou indeferiram os processos por inconsistências formais (falta de projeto de lavra, ausência de cadastro federal, inexistência de autorização de supressão vegetal), sem maior aprofundamento na análise da qualidade dos PRADs. Isso reforça a percepção de que o licenciamento ambiental, especialmente no setor mineral da Caatinga, tem se restringido a uma formalidade burocrática, em que a exigência de estudos não se traduz em efetiva aplicação das medidas propostas.

Os resultados justificam a necessidade de se estabelecer protocolos claros e consistentes de recuperação de áreas degradadas voltados para a realidade da Caatinga. Considerando sua diversidade biológica, complexidade ecológica e particularidades edafoclimáticas, tais protocolos devem orientar não apenas a escolha das técnicas de intervenção, mas também a definição de metas progressivas de reparação. Quando a restauração ecológica plena, orientada para o clímax sucessional, não for técnica ou financeiramente viável, é imprescindível adotar medidas que interrompam os processos de degradação ativa e favoreçam o povoamento ecológico inicial. Intervenções como estabilização geomorfológica, controle da erosão, descompactação mínima do solo e manejo de exóticas já constituem passos fundamentais para criar condições mínimas de regeneração primária e permitir a evolução dos estágios sucessionais.

A análise crítica evidencia que a simples exigência documental nos processos de licenciamento ambiental não tem sido suficiente para garantir a recuperação efetiva. Em muitos casos, a recuperação permanece no plano discursivo, e as áreas

degradadas são deixadas em abandono. Ainda assim, experiências de execução parcial demonstram que intervenções mínimas são possíveis, mas sua efetividade depende de maior robustez técnica e de monitoramento contínuo.

Esse monitoramento deve ser orientado por indicadores objetivos, mensuráveis e verificáveis, como taxas de cobertura vegetal, indicadores de solo, diversidade florística e sobrevivência de mudas, fornecendo evidências concretas sobre o desempenho da recuperação. O futuro da RAD na Caatinga depende, portanto, de superar a prática do abandono e consolidar protocolos de manejo que assegurem, no mínimo, a cessação da degradação ativa e a abertura de condições adequadas à sucessão ecológica.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa partiu da hipótese de que a recuperação de áreas degradadas na Caatinga, especialmente em contextos de mineração, tem sido marcada pela predominância do abandono e do pousio como estratégias de fato, ainda que não formalizadas nos documentos de licenciamento, e de que existem fragilidades evidentes na definição de parâmetros de análise e monitoramento.

A investigação confirmou essa hipótese de modo parcial: embora o abandono das áreas, com a expectativa de regeneração natural espontânea, seja prática recorrente, em alguns casos identificaram-se iniciativas mínimas de condução da regeneração. Tais medidas, contudo, mostraram-se insuficientes diante da complexidade do bioma e da intensidade das pressões antrópicas.

Os produtos desenvolvidos devem ser entendidos como partes interdependentes de um mesmo esforço de análise crítica e proposição metodológica. O primeiro produto, o artigo de revisão bibliográfica “Recuperação de áreas na Caatinga como estratégia de estocagem de carbono e mitigação climática”, evidenciou o potencial do bioma como sumidouro de carbono e discutiu suas limitações em cenários de alta degradação e pressão antrópica, apontando a necessidade de estratégias de manejo mais robustas.

O segundo produto, o artigo científico “Carbono do solo e pousio como vetores de recuperação em áreas de mineração da Caatinga”, trouxe a dimensão empírica, demonstrando a sensibilidade dos indicadores edáficos, em especial o carbono do solo, como métricas objetivas para avaliação da qualidade ambiental em áreas mineradas e em pousio.

O terceiro produto, o Protocolo de Avaliação da Regeneração Natural, constituiu uma resposta metodológica às fragilidades identificadas, ao propor critérios claros e verificáveis que integram indicadores de vegetação e solo, com aplicabilidade prática tanto para o monitoramento de iniciativas de recuperação quanto para subsidiar políticas públicas e processos de licenciamento ambiental.

Os resultados permitiram confirmar parcialmente a hipótese principal, ao demonstrar a existência de fragilidades metodológicas significativas nos parâmetros

de análise, no monitoramento e no acompanhamento das iniciativas de recuperação da Caatinga. Constatou-se que os procedimentos burocráticos e formais adotados no âmbito do licenciamento ambiental não são suficientes para assegurar a efetividade das propostas de restauração, sobretudo pela ausência de critérios objetivos, de indicadores ecológicos consistentes e de instrumentos de avaliação contínua.

Quanto à hipótese complementar, os achados confirmam sua validade, evidenciando que o carbono do solo constitui um indicador ambiental objetivo e relevante para monitorar a qualidade da recuperação. A análise empírica mostrou que esse parâmetro é sensível às alterações provocadas pelo uso antrópico e pelos processos de regeneração, revelando-se uma métrica confiável tanto para mensurar a efetividade da regeneração natural quanto para orientar estratégias de manejo e políticas públicas voltadas ao bioma Caatinga.

Do ponto de vista das contribuições, a pesquisa demonstra que a recuperação de áreas degradadas na Caatinga não pode se limitar a relatórios burocráticos ou ao abandono das áreas, mas requer protocolos claros capazes de interromper os processos de degradação e criar condições para a regeneração natural. Isso implica compreender a recuperação não apenas como exigência legal, mas como estratégia de resiliência climática e transição ecológica, inserida em um contexto mais amplo de mitigação das mudanças climáticas e de manutenção dos serviços ecossistêmicos do semiárido.

Nesse sentido, o trabalho propõe uma metodologia de avaliação integrada, articulando indicadores de solo e vegetação. Em perspectiva social e política, reforça a urgência de revisar os critérios de licenciamento ambiental, de modo a assegurar que a exigência de PRADs seja acompanhada por monitoramento efetivo, baseado em métricas objetivas. Como limitação, destaca-se a dificuldade de acesso a dados consistentes de campo em processos antigos e a necessidade de acompanhamento temporal prolongado para avaliar a efetividade do pousio como estratégia de longo prazo.

Por fim, a noção de recaatingamento se apresenta como horizonte conceitual para orientar o futuro do único bioma exclusivamente brasileiro e tipicamente nordestino. Mais que uma técnica, trata-se de um paradigma de gestão ambiental que reconhece simultaneamente a singularidade, a resiliência e as fragilidades da

Caatinga. Entendido como prática integrada e de longo prazo, o recaatingamento articula conhecimento científico, políticas públicas e ação social, configurando-se como caminho necessário de resistência e resiliência socioecológica do semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, L. A. et al. Natural capital protection indicators: measuring performance in achieving the sustainable development goals for green growth transition. **Environmental And Sustainability Indicators**, v. 8, p. 100069, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100069>. Acesso em 10 set 2024.
- ADEKOMAYA, Oludaisi; MAJOZI, Thokozani. Promoting natural cycle and environmental resilience: a pathway toward sustainable development. **South African Journal Of Chemical Engineering**, v. 42, p. 229-240, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.09.002>
- AGUIAR, R. B.; GOMES, J. R. C. (org.). **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea**: diagnóstico do Município de Marcolândia. Fortaleza: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2004. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/16182/1/Rel_Marcolandia.pdf. Acesso em: 22 set. 2024.
- AGUIAR, R. B.; GOMES, J. R. C. (org.). **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea**: diagnóstico do Município de Jaicós. Fortaleza: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2004. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/bitstream/doc/16050/1/Rel_Jaicos.pdf. Acesso em: 22 set. 2024.
- ALMEIDA, D.S. Histórico e tendências atuais da recuperação ambiental. In: **Recuperação ambiental da Mata Atlântica** [online]. 3rd ed. rev. and enl. Ilhéus, BA: Editus, 2016, pp. 18-21. ISBN 978-85- 7455-440-2. SciELO Books
- AMBUSHE, A.A.; GEBRE, G.G.; MAMO, G.S. Does exclosure restore woody species regeneration in degraded lands? The case of Loma Bosa District of Dawuro zone, Southwestern Ethiopia. **BMC Ecology and Evolution**, v. 22, n. 111, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12862-022-02067-w>. Acesso em: 15 set. 2024.
- ANTUNES, Verônica Nascimento Brito; SILVA, Michêlda Santana da. Danos ambientais e subsidência de mineração: lições extraídas de uma revisão sistemática da literatura. **Confins**, [s. l.], n. 64, 2024. Disponível em: <http://journals.openedition.org/confins/58956>. Acesso em: 7 set. 2025. DOI: <https://doi.org/10.4000/12f3d>
- ANM. **SIGMINE – Sistema de Informações Geográficas da Mineração** – Brasília: ANM, 2024. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908> Acesso em: 15 set. 2024.
- BAKE, O. A.; SALES, F. C. V.; BAKKE, I. A. **Regeneração natural e semeadura de espécies florestais nativas em áreas degradadas de Caatinga**. In: SILVA, F. B. P. M.; SILVA, J. V. (org.) **Restauração na caatinga**. 2. ed. rev. e amp. Maceió, AL: EDUFAL, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/bitstream/123456789/9074/1/Restaura%C3%A7%C3%A3o%20na%20Caatinga%20-%202%20ed.%20e-book.pdf> Acesso em 27 jun 2023.

BARROS FILHO, Cesar Negreiros. *Plano de Controle Ambiental e Plano de Recuperação de Áreas Degradadas* [Estudo ambiental]. Processo SEMARH-PI AA.130.1.004858/13. Teresina, jun. 2013.

BATISTA, Valmir. *Plano de Controle Ambiental e Plano de Recuperação de Áreas Degradadas* [Estudo ambiental]. Processo AA.130.1.000230/14-42. Teresina, dez. 2013.

BERNARDES, N. **As caatingas**. *Estudos Avançados*, v. 13, n. 36, p. 69–78, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-40141999000200004>. Acesso em 01 ago 2024.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF:Presidente da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em 19 jun. 2023.

BRASIL. **Lei Ordinária nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em 20 jun. 2023.

CARVALHO, P. E. R. Técnicas de recuperação e manejo de áreas degradadas. São Paulo: Embrapa, 2000. Disponível em <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/299368/1/Cap14TecnicasRecuperaçao0001.pdf>. Acesso em: 23 jun 2023.

CHAZDON, R. L. **Renascimento de florestas: regeneração na era do desmatamento**. Tradução: Nino Amazonas, Ricardo Cesar. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

COSTA, M. S. F. da; ALBUQUERQUE, H. N. de. O licenciamento ambiental no Brasil e os seus desafios na proteção do meio ambiente. **Revista Saúde e Meio Ambiente – RESMA** - UFMS-Três Lagoas, v. 12, n. 02, p. 101-115, 2021. ISSN: 2447-8822. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/sameamb/article/view/10171/9016>. Acesso em 15 set 2024.

DA SILVA, Leovandes Soares; COSTA, Thaís Ribeiro; SALOMÃO, Natália Viveiros; ALVES, Allyson Rocha; SANTOS, Tatiano Ribeiro; MACHADO, Evandro Luiz Mendonça. Mudanças temporais na estrutura vegetacional de um fragmento de Caatinga, sul do Piauí. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 16, n. 2, 2020. DOI: 10.14808/sci.plena.2020.020203. Disponível em: <https://www scientiaplenua.org.br/sp/article/view/5273>. Acesso em: 20 set. 2024.

FAISAL, Abdullah-Al- et al. Assessing and predicting land use/land cover, land surface temperature and urban thermal field variance index using Landsat imagery for Dhaka Metropolitan area. **Environmental Challenges**, v. 4, p. 100192, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100192>

FERNANDES, S. P. DOS S. et al.. Survival and growth of planted and naturally established trees in a degraded caatinga area. **Revista Caatinga**, v. 37, p. e11788, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3711788rc>. Acesso em: 11 set. 2024.

GIRÃO, O. et. al. O papel do clima dos estudos de prevenção e diagnóstico de riscos geomorfológicos em bacias hidrográficas na Zona da Mata Sul de Pernambuco. In: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. do C. O. (org). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p.126-159

GUERRA, A. et al. Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. **Forest Ecology and Management**, v. 458, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117802>. Acesso em: 21 set. 2024.

HORSTMANN, Natanna; SEVILHA, Anderson Cássio; VIEIRA, Daniel Luis Mascia. Graminoid-led natural regeneration of dry savannas after severe degradation. **Ecological Engineering**, v. 187, 2023, p. 106850. ISSN 0925-8574. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106850>. Acesso em: 21 set. 2024.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2024.

IBGE. **Mapa da Área de Aplicação da Lei nº 11.428 de 2006**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008. Escala 1:5.000.000. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/estudos_ambientais/biomas/mapas/lei11428_mata_atlantica.pdf Acesso em 15 jul 2024

IBGE. **Mapa de Vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/10872-vegetacao.html>. Acesso em: 10 mar. 2024

KILL, L. H. P.; PORTO, D. D. Bioma Caatinga: oportunidades e desafios de pesquisa para o desenvolvimento sustentável. In: VILELA, E. F.; CALLEGARO, G. M.; FERNANDES, G. W. (Org.). **Biomas e agricultura: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciência: FAPEMIG, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1108577/1/Kiill.pdf>. Acesso em 27 jun 2023.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. **Ecologia e Conservação da Caatinga**. Recife – PE: Ed. Universitária da UFPE, 2003.

LEINFELDER, R. R.; IRAMINA, W. S.; ESTON, S. M. DE .. **Mining as a tool for reclamation of a Degraded Area**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 68, n. 2, p. 215–220, abr. 2015. Acesso em 15 jul 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0370-44672015680127>

MACÊDO, M. S.; MENEZES, B. S.; LEDRU, M. P.; MAS, J.-F.; SILVA, F. K. G.; CARVALHO, C. E.; COSTA, R. C.; ZANDAVALLI, R. B.; SOARES, A. A.; ARAÚJO, F. S.. **Everything's not lost: Caatinga areas under chronic disturbances still have well-preserved plant communities**. Journal of Arid Environments, v. 222, 2024, 105164. ISSN 0140-1963. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105164>.

MAIA, A. V. F.; SILVA, T. H. C.; JORDÃO, L. R. MINERAL BUSINESS AND RISKS IN BRAZIL: THE IRRATIONALITY OF ENVIRONMENTAL LICENSING AND RESPONSIBILITY FOR DISASTERS. **Journal of Law and Sustainable Development**, São Paulo (SP), v. 8, n. 2, p. 190–209, 2020. DOI: 10.37497/sdgs.v8i2.38. Disponível em: <https://ojs.journalsdg.org/jlss/article/view/38>. Acesso em: 20 sep. 2024.

MARTINS, E. (ed.) Caderno de casos: semiárido brasileiro: sertão do São Francisco - **Bahia: recaatingamento: recuperação e manutenção da caatinga em pé**. Bahia: DAKI - Semiárido Vivo, 2022. Disponível em: <https://bibliotecasemiariados.ufv.br/jspui/handle/123456789/308> Acesso em 28 jun 2023

NOUTCHEU, Ronald; OLIVEIRA, Fernanda M. P.; WIRTH, Rainer; TABARELLI, Marcelo; LEAL, Inara R. Chronic human disturbance and environmental forces drive the regeneration mechanisms of a Caatinga dry tropical forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 22, n. 1, p. 79-92, 2024. ISSN 2530-0644. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2024.01.002>. Acesso em:

PASSOS, Manuela Gazzoni dos; PRADO, Geisa Percio do; FONTANA, Claudia; ZONTA, Edilvane Ines; BIANCHINI, Edmilson. Natural regeneration in a mixed ombrophilous forest remnant in southern Brazil. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 16, n. 1, p. 167-183, 2021. ISSN 2236-777. Disponível em: <https://doi.org/10.3897/neotropical.16.e58188>. Acesso em: 11 ago 2024

PENNINGTON, R. T. et al. **Historical climate change and speciation: neotropical seasonally dry forest plants show patterns of both Tertiary and Quaternary diversification**. Philosophical Transactions: Biological Sciences, v.359, n.1443, p.515-538, 2004. DOI 10.1098/rstb.2003.1435. Acesso em: Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1693336/pdf/15212100.pdf>

PFALTZGRAFF, P. A. dos S. (org.) Geodiversidade do Estado do Piauí. – Recife: CPRM, 2010. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/16772/1/Geodiversidade_PI.pdf. Acesso em 27 jun 2023.
PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção Caatinga da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2023. Disponível em: <https://x.gd/lyWPG>. Acesso em: 23 jun 2023.

RÉGIS, J. S. **Licenciamento Ambiental da Mineração** - Belo Horizonte: Editora Dialética, 2021. p. 112-272

ROCHA, Amanda Macêdo et al. **Levantamento florístico de espécies arbóreas em uma área de caatinga no semiárido piauiense**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO – CONIDIS, 1., 2021, Campina Grande. *Anais...* Campina Grande: Ed. Realize, 2021. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/23942>. Acesso em: 09 set. 2024.

RODRIGUES, A. B. M.; GIULIATTI, N. M.; PEREIRA JUNIOR, A.. **Aplicação de metodologias de recuperação de áreas degradadas nos biomas brasileiros**.

Brazilian Applied Science Review. v. 4, n. 1, p. 333-369. Jan/fev 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv4n1-021> Acesso em 18 jun 2023.

RODRIGUES, A. B. M.; GIULIATTI, N. M.; PEREIRA JUNIOR, A.. Aplicação de metodologias de recuperação de áreas degradadas nos biomas brasileiros. **Brazilian Applied Science Review**. v. 4, n. 1, p. 333-369. Jan/fev 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv4n1-021> Acesso em 18 jun 2023.

RODRIGUES, J. J.; EUZEBIO, U.; MOREIRA, A. L. da C.. **Representações de valoração do bioma Caatinga como processo de formação e indicação para conservação**. Conjecturas, [S. l.], v. 22, n. 8, p. 824–846, 2022. Disponível em: <http://conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/1258>. Acesso em: 27 jun. 2023

ROTTA, Cláudia Marisse dos Santos. **Estudo da recuperação de áreas degradadas por processos erosivos: procedimentos e eficiência dos métodos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. doi:10.11606/D.18.2012.tde17062013-162539. Acesso em: 2023-06-23.

SAMPAIO, E. V. S. B.; FREITAS, A. D. S.. **Caatinga**: descrição geral. In: SILVA, F. B. P. M.; SILVA, J. V. (org.) Restauração na caatinga. 2. ed. rev. e amp. Maceió, AL: EDUFAL, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/bitstream/123456789/9074/1/Restaura%C3%A7%C3%A3o%20na%20Caatinga%20-%202%20ed.%20e-book.pdf> Acesso em 27 jun 2023.

SANTOS ROCHA SOUSA, V.; INEZ GERMANI, G.; ZENHA ANTONINO, L. Uma Geografia da pesquisa sobre a mineração no Brasil no campo da análise geográfica (1987-2020). **AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 77–106, 2021. DOI: 10.48075/amb.v3i2.28606. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/ambientes/article/view/28606>. Acesso em: 20 set. 2024.

SARAIVA, E. S. **Estudo de de biotransformações enantiosseletivas a partir de micro-organismos do solo da caatinga piauiense**. 2018. 106 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Piauí, 2018. Acesso em: Disponível em: <http://repositorio.ufpi.br:8080/bitstream/handle/123456789/1673/DISSERTA%c3%87%c3%83O-%20ESPEDITO-%202018-%20VERS%c3%83O%20FINAL.pdf?sequence=1>. Acesso em: 17 ago. 2024.

SILVA, A. C. da C.; PRATA, A. P. do N.; SOUTO, L. S.; MELLO, A. A. de. Aspectos de ecologia de paisagem e ameaças à biodiversidade em uma unidade de conservação na Caatinga, em Sergipe. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 479-490, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300011>. Acesso em: 08 set. 2024

SILVA, M. L. O.; LOPES, K. P. L.; LEITE, M. I. A.; CAMPOS, K. W. N.; SOARES, A. K. F.; Áreas degradadas no Semiárido: Causas, situação e alternativas de recuperação. Cap. 2 p.22-37. in: REDIN, E. (org.). **Ciências Rurais em Foco**. vol. 3. Belo Horizonte: Poisson, 2021. Disponível em: https://www.poisson.com.br/livros/Ciencias_Rurais/volume3/Ciencias_Rurais_vol3.pdf#page=22. Acesso em 18 set. 2024.

SILVA, I. I. M. **Efeito da regeneração natural de uma floresta seca da Caatinga sobre a comunidade de nematoides do solo**. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas com ênfase em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife , 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/48017/1/TCC%20Italo%20Ian%20Monteiro%20da%20Silva.pdf>. Acesso em: 21 set. 2024

TRENNEPHOL, C.; e TRENNEPOHL, T.. **Licenciamento ambiental**. 9. ed. rev., atual. e ampl. São Paulo: Thomson Reuters Brasil, 2022.

APÊNDICE A – ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

RECUPERAÇÃO DE ÁREAS NA CAATINGA COMO ESTRATÉGIA DE ESTOCAGEM DE CARBONO E MITIGAÇÃO CLIMÁTICA

Daniel Guimarães Gonçalves, mestrando MAPEPROF, e-mail: danielguimaraesgoncalves@gmail.com
Bruna de Freitas Iwata, profa. Orientadora MAPEPROF, e-mail: iwata@ifpi.edu.br

RESUMO

A Caatinga é reconhecida entre as maiores florestas tropicais secas do mundo, abrigando elevada biodiversidade e relevância socioambiental, mas apresenta forte histórico de degradação, com perda de cobertura vegetal, desertificação e pressões antrópicas. Este artigo de revisão analisa estratégias de recuperação de áreas degradadas no bioma, com ênfase na regeneração natural e na estocagem de carbono. São discutidos os mecanismos de regeneração, suas limitações e a necessidade de condução e monitoramento para distinguir recuperação efetiva de simples abandono. A análise destaca o potencial da Caatinga como sumidouro de carbono, evidenciando que áreas preservadas ou em restauração apresentam maior eficiência na assimilação de CO₂ e melhor desempenho dos serviços ecossistêmicos. Aponta-se a importância de protocolos de avaliação que integrem métricas de paisagem, indicadores de carbono no solo e medidas de proteção externas, como cercamento e aceiros. Conclui-se que a combinação entre estratégias ativas e passivas, associada a sistemas de acompanhamento territorializado, é essencial para ampliar a escala de recuperação e fortalecer a resiliência climática do semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Caatinga. Recuperação de áreas degradadas. Regeneração natural. Estoque de carbono. Restauração ecológica.

1. INTRODUÇÃO

A Caatinga, maior floresta tropical seca da América do Sul, constitui um bioma de elevada relevância ecológica e social, mas que permanece entre os mais degradados e menos estudados do Brasil, sendo impactado ao longo do tempo pela intensificação de atividades como agricultura extensiva, extração de madeira e mineração, comprometendo a resiliência ecológica do semiárido. Nesse cenário, a recuperação de áreas degradadas se destaca como estratégia prioritária para conter

a perda de biodiversidade, restaurar funções ecossistêmicas e ampliar a contribuição do bioma para a mitigação das mudanças climáticas.

Embora iniciativas de regeneração natural sejam amplamente empregadas, ainda há controvérsias quanto à sua efetividade, sobretudo quando confundidas com o simples abandono de áreas impactadas. A diversidade de metodologias e estratégias para facilitar a sucessão ecológica e o retorno dos serviços ecossistêmicos contribui para uma compreensão integrada do papel da recuperação ambiental frente à resiliência e adaptação climática.

O presente artigo de revisão objetiva reunir e analisar as evidências disponíveis sobre estratégias de recuperação da Caatinga, com ênfase na regeneração natural e na estocagem de carbono. Busca-se compreender como diferentes técnicas têm sido aplicadas, quais resultados têm sido observados e quais lacunas permanecem na literatura científica.

Ao discutir a interface entre recuperação de áreas degradadas e mitigação climática, pretende-se destacar a relevância de protocolos de acompanhamento que incorporem métricas de avaliação da condução de estratégias de recuperação com foco na estocagem de carbono. Essa perspectiva é especialmente importante em regiões semiáridas, onde as pressões antrópicas se somam às vulnerabilidades impostas pelas mudanças climáticas globais.

Dessa forma, este artigo apresenta uma trilha analítica que se inicia com a contextualização ecológica e socioambiental da Caatinga, avança para a discussão das técnicas de recuperação aplicadas ao bioma e, por fim, apresenta a estocagem de carbono como indicador-chave para mensurar a efetividade das iniciativas. Ao reunir esse corpo de evidências, busca-se oferecer subsídios teóricos e práticos para o aprimoramento das estratégias de restauração no semiárido brasileiro.

2. METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo, orientada para reunir e analisar evidências científicas sobre a recuperação de áreas degradadas na Caatinga, com ênfase na estocagem de carbono e na mitigação

climática. Foram selecionados artigos publicados preferencialmente nos últimos cinco anos, de modo a contemplar os avanços mais recentes da literatura especializada.

A busca foi realizada nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *SciELO*, complementada por consultas a fontes institucionais oficiais (como IBGE, Embrapa e Ministério do Meio Ambiente), consideradas essenciais para compor o panorama técnico-normativo do tema.

As palavras-chave utilizadas, foram: *recovery of the Caatinga forest*, *dry tropical forest*, *carbon retention*, *carbon absorption* e *climate resilience*. A seleção dos estudos obedeceu a critérios de inclusão e exclusão previamente definido. Foram incluídos trabalhos que abordassem, de forma concomitante, ao menos dois dos seguintes temas: ou carbono, e/ou recuperação de áreas degradadas (RAD), e/ou Caatinga.

Foram priorizadas publicações revisadas por pares, tendo sido excluídos artigos que tratassem exclusivamente de florestas secas temperadas ou situadas fora da faixa tropical, bem como estudos com enfoque estritamente sociobiológico e/ou etnobiológico, sem relação direta com a recuperação regenerativa.

A análise do material seguiu uma abordagem qualitativa, baseada em leitura crítica e interpretação temática. Para organizar o corpo de evidências, foram estabelecidas cinco categorias analíticas: caracterização da Caatinga, técnicas de recuperação de áreas degradadas, RAD no bioma Caatinga, relação entre absorção de carbono e Caatinga; e resiliência climática de florestas secas.

A análise buscou identificar nexos entre os diferentes autores, comparando conceitos e resultados a partir das categorias propostas. Essa estratégia permitiu evidenciar convergências, divergências e lacunas na literatura, oferecendo subsídios teóricos para a discussão sobre a efetividade da recuperação ambiental como instrumento de mitigação climática na Caatinga.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO E FUNDAMENTOS DA CAATINGA

A Caatinga brasileira é reconhecida como a maior floresta tropical seca da América do Sul, com aproximadamente 800 mil km², abrangendo mosaicos de vegetação arbustiva e arbórea adaptada às condições semiáridas. (DE PAULA et al.

2025). É a maior e mais diversa floresta seca do mundo, caracterizada por condições climáticas extremas, como altas temperaturas e chuvas escassas e irregulares, mas com solos relativamente férteis. (NOUTCHEU et. al., 2024).

O bioma apresenta comunidades vegetais de baixa estatura, com predomínio de Fabaceae e Euphorbiaceae, desenvolvidas em solos arenosos, profundos, classificados como Ferralsolos, Regossolos e Planossolos, que apresentam textura arenosa, baixa fertilidade e elevada suscetibilidade à erosão quando degradados, regidos sob regime climático semiárido, com temperaturas médias anuais de 23 °C e precipitação variando entre 480 e 1.000 mm. (BIELUCZYK et al., 2025; DE PAULA et al. 2025).

Segundo o Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004), o bioma se manifesta, predominantemente, na forma de Savana-Estépica, majoritariamente arbustiva, havendo ainda a ocorrência significativa em fisionomias florestais.

A expressão Savana-Estépica foi originalmente cunhado para designar vegetação tropical de características estépicas ao norte do continente africano, sendo empregada no Brasil para designar tipologias vegetais campestres com estrato lenhoso decidual e espinhoso, tendo como área de principal expressão a Caatinga do Sertão Árido Nordestino, de clima caracterizado por dois períodos secos anuais: um longo, seguido de chuvas intermitentes, e outro curto, que pode se tornar torrencial. Essas chuvas são imprevisíveis e podem faltar por anos consecutivos (IBGE, 2012).

Suas espécies desenvolveram adaptações ecofisiológicas notáveis, como caducifolia, elevada densidade de madeira, armazenamento hídrico em caules e folhas recobertas por ceras epicuticulares, garantindo elevada eficiência no uso da água e sobrevivência em ambientes com déficit hídrico prolongado. (SANTOS et al., 2014). Apesar de frequentemente caracterizada como um ambiente pobre em espécies, estudos recentes revelam elevado endemismo, incluindo 54% dos peixes, 48% dos lagartos, 23% das plantas, 20% dos anfíbios e 6% dos mamíferos (NIEMEYER; VALE, 2022)

Sua vegetação é xeromórfica, composta por cactáceas, arbustos espinhosos e árvores decíduas que perdem as folhas durante a estação seca, compondo mosaicos de formações arbustivas e florestais (JUSTINO et al., 2025). Abriga cerca de 4.963

espécies de plantas, das quais 827 já avaliadas quanto ao estado de conservação, sendo mais de 30% ameaçadas de extinção, de forma que a recuperação ainda carece de metodologias bem estabelecidas e de maior produção científica. (GOMES; DA SILVA, 2023)

Suas matas são descritas como a floresta sazonalmente seca mais diversa do mundo e o mais populoso ecossistema de terras secas do planeta, mas paradoxalmente é um dos biomas menos estudados e protegidos, com apenas 7,1% de seu território em unidades de conservação e menos de 1% sob proteção integral. (NIEMEYER; VALE, 2022; SANTOS et al., 2014). A Caatinga permanece sub-representada em pesquisas científicas sobre recuperação ambiental, revelando a urgência de investimentos em ecologia da restauração e no uso de espécies nativas em programas de revegetação. (GOMES; DA SILVA, 2023)

Tendo perdido cerca de 50% de sua cobertura original, a Caatinga é considerado um dos biomas mais degradados do Brasil. Estima-se que 94% de sua área apresenta risco moderado a alto de desertificação, agravado pelo uso intensivo de recursos naturais, pela exploração madeireira e pelo manejo inadequado do solo. (GOMES; DA SILVA, 2023)

Historicamente submetida a perturbações crônicas, como agricultura itinerante, criação de caprinos e extração de lenha, a vegetação catingueira apresenta fisionomia variável entre formações abertas, intermediárias e fechadas, o que reflete a intensidade do uso humano. (MACEDO et al., 2024)

Proficiente em superlativos, a Caatinga é uma das regiões semiáridas mais populosas do mundo, com aproximadamente 27 milhões de habitantes (SANTOS et al., 2014). A população local depende fortemente dos recursos naturais para subsistência, o que resulta em práticas comuns de degradação, como agricultura de corte e queima, extração de madeira, extração mineral, exploração de produtos florestais não madeireiros e pecuária. Essas atividades têm um impacto significativo nos ecossistemas florestais remanescentes. (NOUTCHEU et. al., 2024).

O espaço territorial do bioma abriga uma população significativa, com 59% dos brasileiros em situação de extrema pobreza residindo em áreas rurais sob escassez hídrica (NIEMEYER; VALE, 2022). A agricultura familiar em áreas catingueiras reúne

cerca de 1,7 milhão de famílias em minifúndios intensivos, responsáveis por 60% da produção de alimentos, com forte potencial para avanço de práticas mais sustentáveis, apoiadas pela agroecologia e por tecnologias sociais de convivência com o semiárido (MATTOS et al., 2024)

Historicamente, registros dos séculos XVIII e XIX descrevem caatingas de extensas florestas secas de alta biodiversidade, mas séculos de uso intensivo resultaram em uma drástica redução da cobertura florestal, hoje limitada a apenas 4,3% de sua área potencial (ARAUJO et al., 2023). Entre 1985 e 2020, a Caatinga perdeu aproximadamente 15 milhões de hectares de vegetação nativa, sobretudo devido à extração de madeira, queimadas e expansão de pastagens degradadas (BIELUCZYK et al., 2025). Essa conversão tem provocado alterações no microclima, redução da umidade e perda de resiliência ecossistêmica, acelerando processos de desertificação (JUSTINO et al., 2025)

A combinação entre chuvas cada vez mais irregulares, temperaturas médias elevadas e pressão antrópica intensa reforça a necessidade de políticas públicas de conservação, restauração e manejo sustentável, apoiadas por tecnologias de sensoriamento remoto para o monitoramento contínuo da degradação (JUSTINO et al., 2025). A variação anual da biomassa acompanha a irregularidade das chuvas, refletindo a forte dependência da Caatinga da disponibilidade hídrica (SOUSA JÚNIOR et al., 2023)

O bioma consiste, hoje, em um grande mosaico de pequenos trechos de áreas com diferentes estágios de regeneração e sucessão, de modo que caatingas preservadas sem grandes impactos antrópicos há mais de cinco décadas são raras, mesmo em unidades de conservação, que são poucas, em geral pequenas e quase todas recém estabelecidas. (SAMPAIO, FREITAS, 2021)

O conhecimento da vegetação é crucial para a recuperação de áreas degradadas, avaliação de impactos ambientais e criação de planos de manejo e a identificação correta das espécies e a preservação de amostras em herbários são passos iniciais desse processo. Na Caatinga, a flora é pouco estudada e sua diversidade ainda não foi completamente mapeada, especialmente pela falta de dados

quantitativos; entender a flora é vital para desenvolver estratégias eficientes de recuperação ambiental (ROCHA et al.2021).

4. ESTRATÉGIAS E TECNOLOGIAS PARA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

A regeneração de florestas secas é um processo complexo que depende da interação de diversos mecanismos de restauração natural. Entre eles, destacam-se a chuva de sementes, os bancos de sementes no solo, as mudas em desenvolvimento e a capacidade de rebrote de plantas. Esses mecanismos atuam de forma simultânea, cada um desempenhando um papel crucial na recuperação das áreas degradadas. No entanto, a contribuição relativa de cada um desses processos, bem como os fatores que os impulsionam e regulam, ainda são pouco compreendidos (NOUTCHEU et. al., 2024).

No Brasil, há uma tendência a usar abordagens generalizadas em projetos de recuperação ambiental, o que os leva ao fracasso, sendo necessário considerar a reestruturação física da área a ser recuperada, selecionar espécies adequadas e utilizar informações sobre flora e estrutura geomorfológica, e ainda é importante escolher a forma de propagação das espécies e estabelecer um cronograma adaptado à realidade climática (ALMEIDA, 2016).

A recuperação ambiental exige uma integração de conhecimentos das ciências exatas, biológicas e sociais. Para o sucesso das ações que visam interromper a degradação dos recursos naturais, é necessário aplicar técnicas e metodologias das engenharias, ecologia, zoologia, botânica, geografia, sociologia e ciências jurídicas.

Fatores como condições climáticas, qualidade do solo, biodiversidade local e atividades humanas podem influenciar diretamente a eficácia desses mecanismos de regeneração, tornando o estudo desse ecossistema desafiador e essencial para o desenvolvimento de estratégias de conservação e restauração. Estudos de longa duração apontam que apenas a partir de uma década de recondução monitorada as taxas de sobrevivência de mudas de espécies nativas aumentam 50% (FERNANDES, 2024).

Tal complexidade se justifica pelo desafio de encontrar respostas assertivas ao desafio da degradação ambiental. Nas últimas décadas, a exploração insustentável dos recursos naturais na Caatinga aumentou devido ao consumo ilegal de lenha nativa, a exploração mineral, o uso de pastagem além da capacidade de suporte e conversão de usos do solo para agricultura, resultando em danos à diversidade biológica da flora e da fauna, na erosão do solo, queda da fertilidade e desertificação em certas áreas do bioma (KILL; PORTO, 2019).

Esclarecer os conceitos de "recuperação" e "degradação", bem como a forma como eles se interrelacionam, é importante para pesquisas sobre o tema deste estudo, uma vez que esses termos são frequentemente usados fora do contexto técnico e há divergências na literatura a respeito (LEINFELDER et. al. 2015). O SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação define recuperação como restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original (BRASIL, 2000).

A degradação ambiental ocorre devido à perda de biodiversidade, emissão de ar e emissões de gases de efeito estufa. Isso compromete a capacidade do capital natural de se regenerar e prejudicar o bem-estar humano, causando impactos negativos na qualidade do ar, na pesca marinha e na biodiversidade (ACOSTA et. al. 2020).

Resultante do uso não sustentável do solo, a degradação leva ao aumento da temperatura, diminuição da precipitação e outros efeitos negativos no meio ambiente, envolvendo danos ao capital natural, como perda de biodiversidade e qualidade do ar e água comprometida (FAISAL et. al. 2021). A degradação ambiental é evidenciada por meio de atividades humanas que levam ao esgotamento e deslocamento do ecossistema, ocorrendo em desequilíbrio ambiental, aumento da temperatura ambiente, inundações, emissões de gases de efeito estufa e perda de biodiversidade (ADEKOMAYA; MAJOZI, 2022)

A perturbação antrópica crônica refere-se à remoção de biomassa florestal por meio de diferentes atividades, como coleta de lenha, exploração de produtos florestais não madeireiros, criação de gado e caça, entre outras formas de uso dos recursos naturais. Em combinação com a agricultura de corte e queima este tipo de perturbação

pode levar à interrupção da sucessão, limitando ou interrompendo completamente os processos ecológicos essenciais para a regeneração florestal. A perturbação crônica é particularmente comum em florestas secas habitadas por pessoas dependentes da floresta (NOUTCHEU et. al., 2024).

Considera-se área degradada aquela que, após distúrbio, teve eliminado os seus meios de regeneração natural, apresentando baixa resiliência. Diferentemente, considera-se área perturbada aquela que sofreu algum distúrbio, mas manteve meios de regeneração biótica. A recuperação plena de ecossistemas degradados deve ser com espécies nativas, de modo que se o terreno estiver degradado, pode haver uma fase prévia de recuperação, com a possibilidade de as espécies serem nativas ou exótica (CARVALHO, 2000).

A degradação da qualidade ambiental é decorrente, principalmente, da falta de planejamento pelo ser humano para o uso dos recursos naturais, de tal forma que, quando essa degradação ambiental ocorre além da capacidade natural de regeneração, é desencadeada uma relação de desequilíbrio, sendo necessária a intervenção antrópica para auxiliar na recuperação das áreas degradadas e, com isso, do equilíbrio ambiental, sendo essencial o desenvolvimento de métodos e técnicas que, utilizadas ou não, em conjunto, e se adaptem a diferentes condições físico-químicas, biológicas e sociais e tenham custos reduzidos. (RODRIGUES et. al., 2020).

A região semiárida ocupa 11% do território nacional e abriga 12% da população brasileira, mas sofre historicamente com degradação ambiental, pobreza rural e secas recorrentes. O déficit hídrico médio ultrapassa 60% ao ano, reflexo da alta evapotranspiração, da baixa disponibilidade de águas permanentes (apenas 3% do total nacional) e da forte irregularidade das chuvas. (NIEMEYER; VALE, 2022)

As modificações dos componentes naturais derivadas das perturbações humanas na dinâmica do meio físico levam à intensificação de eventos naturais como processo erosivos e movimentos de massa, de modo de novos processos não se criam, mas a expansão das paisagens culturais acaba por promover a aceleração de processos superficiais e o aumento da suscetibilidade a riscos para a sociedade. (GIRÃO et al. 2013).

Para a ciência florestal o termo “regeneração” é comumente empregado para descrever a recuperação após um distúrbio florestal em qualquer escala, de forma análoga à regeneração, recuperação ou reconstituição de tecidos ou órgãos depois de danos à integridade física, de modo que regeneração natural pode referir-se a uma única árvore ou a uma população, uma comunidade ou ecossistema, relacionando-se ao reestabelecimento dessas entidades (CHAZDON, 2016).

No Brasil, o primeiro registro de tentativa de restauração de áreas degradadas é do século XIX, quando em 1886 o Major Manuel Gomes Archer iniciou o reflorestamento da floresta da Tijuca, utilizando uma mistura de plantas nativas e exóticas, incluindo eucaliptos. Mais tarde, em 1955, a literatura aponta o reflorestamento na região de mata atlântica, com a recomposição de um trecho de mata ciliar em Cosmópolis, São Paulo (ALMEIDA, 2016).

A literatura avança diversas metodologias de recuperação de áreas degradadas, principalmente: a regeneração natural; o plantio adensado; o plantio de leguminosas; o plantio em módulos; a semeadura direta; o plantio direto; o plantio em linhas; o plantio de mudas; os sistemas integrados; o sistema agroflorestal; a nucleação; os poleiros; a revegetação; o terraceamento; as barreiras de galhos; as caixas de infiltração; os muros de contenção; os cordões de nível; o retadulamento; e as obras de drenagem. (RODRIGUES, 2020; ROTTA, 2012).

Entre elas, a regeneração natural está ligada à capacidade das espécies de se estabelecerem e se desenvolverem após perturbações naturais ou antrópicas, cuja análise permite avaliar o estado de conservação dos fragmentos e estimar parâmetros populacionais (PASSOS et. al., 2021). A rápida regeneração da Caatinga após distúrbios, como desmatamento e queimadas, é um fenômeno mediado pela presença de espécies adaptadas a esses eventos, que promovem o restabelecimento do ecossistema. (DE PAULA et al. 2025)

Estudos demonstram que os mecanismos de regeneração na Caatinga são negativamente impactados pela agricultura de corte e queima, criação de gado livre e herbivoria de formigas cortadeiras. Como resultado, a área pode apresentar baixa densidade de mudas, jovens e rebrotos, além de diversidade reduzida, com a rebrota desempenhando papel crucial na sucessão ecológica e resiliência da floresta. Nesse

contexto, a Caatinga oferece uma oportunidade valiosa para estudar a regeneração natural de florestas secas em paisagens alteradas pelo homem (NOUTCHEU et. al., 2024).

Entretanto, a gravidade da aplicação em grande escala da modalidade “regeneração natural” reside na sua corriqueira confusão com uma espécie de abandono ambiental, uma vez que grande parte dos empreendimentos obrigados a apresentar alternativa de recuperação de áreas degradadas simplesmente abandona a área explorada ao final da atividade, sem que seja aplicada qualquer alternativa ambiental reparadora, restando crateras e encostas descascadas cuja reparação deveria ser fiscalizada pelo órgão ambiental licenciador. (TRENNEPOHL e TRENNEPOHL, 2022).

A dinâmica de regeneração é fortemente influenciada pela disponibilidade hídrica e pela intensidade de perturbações crônicas, como agricultura de corte-e-queima, coleta de lenha e pastejo de caprinos, que afetam diretamente a estrutura e composição das assembleias vegetais (DE PAULA et al. 2025). Por outro lado, iniciativas de regeneração natural apresentam baixa diversidade de espécies, de modo que a proteção da área, com cercamento, e plantio de poucas mudas podem não garantir a restauração completa da comunidade ecológica (FERNANDES, 2024).

No entanto, em regiões onde florestas secas deram lugar a áreas arbustivas degradadas, a baixa disponibilidade de água e nutrientes dificulta a recuperação herbácea, mas a regeneração conduzida através do isolamento prolongado e ciclos de chuvas intensas podem reativar o processo de regeneração (COTRONEO, 2021).

O pousio, seja por regeneração natural monitorada ou por abandono da área pela desistência do uso alternativo do solo, configura-se como um desafio ecológico nas áreas de Caatinga, se destacando, entretanto, pela baixa exigência de investimentos e pela primazia dos processos naturais endêmicos.

Se por um lado a regeneração natural não favorece o clímax da comunidade ecológica, o descanso de uso das áreas parece, pelo menos, facilitar a interrupção dos processos de degradação e o retorno de algum dos serviços ecossistêmicos.

Práticas como a isolamento de pastejo, por cercamento, e a condução da regeneração natural podem favorecer a recuperação estrutural e funcional dos biomas secos, ainda que de forma lenta e dependente de condições climáticas favoráveis (COTRONEO, 2021).

O pousio pode ser considerado como a prática de excluir agentes degradantes (animais de pasto e intervenção humana) de terras degradadas para sua reabilitação natural, tendo ganhado popularidade recentemente. Embora apresente desafios para sua plena implementação, é visto como uma solução acessível e parcialmente eficiente, especialmente em países com recursos limitados. Atualmente, o pousio é amplamente utilizado na restauração ecológica, promovendo a sucessão natural, a regeneração da diversidade de plantas, o aumento da produtividade, a redução da erosão e do escoamento do solo, além de contribuir para a estabilização agroecológica (AMBUSHE et. al., 2022).

A prática de pousio é uma técnica utilizada para a recuperação de áreas degradadas, que ocorre de forma mais lenta e requer um acompanhamento ao longo do tempo para avaliar seu progresso. Uma das vantagens do pousio é que ele não demanda investimentos de alto custo, sendo um método econômico para a recuperação da qualidade do solo e da cobertura vegetal, aproveitando o potencial de resiliência do ambiente, além de excluir o uso de componentes exógenos ou sintéticos (SILVA et. al., 2021)

Compreender os mecanismos de regeneração natural e o desenvolvimento e a organização das espécies após a degradação é essencial para avaliar a regeneração como um método de restauração, capaz de apoiar a compreensão de métodos de restauração ativa como as funções das espécies e suas respostas a ambientes degradados (HORSTMANN et. al., 2023).

A regeneração natural é a técnica de recuperação utilizada em aproximadamente 30% das iniciativas no Brasil, destacando-se no Cerrado (33%) e no Pantanal (100%), além de ser amplamente empregada na Mata Atlântica (32%) e na Amazônia (19%). Na Caatinga, o plantio de mudas continua sendo a abordagem predominante, representando 50% das iniciativas. Em ambientes não florestais, a técnica mais comum é a semeadura direta (GUERRA et. al., 2020)

Áreas de pousio na vegetação da Caatinga tem sido combinada com práticas de manejo florestal sustentável para geração de renda. Após o uso intensivo para fins comerciais, as áreas são submetidas a uma temporada de pousio, permitindo a regeneração natural da vegetação. Estudos mostram que o solo em pousio, além de apresentar maior infiltração de água devido à maior porosidade, também é mais rico em matéria orgânica, o que favorece a formação de agregados e aumenta o número de macroporos, essenciais para a recuperação do solo e da vegetação (SILVA et. al., 2021)

Certamente o recaatingamento demanda estratégias complexas e complementares, como enriquecimento com espécies de maior valor ecológico, adubação verde e manejo adaptado para as realidades locais, de forma a garantir resiliência climática às áreas em recuperação (FERNANDES, 2024). A regeneração natural, impulsionada por espécies pioneiras, pode ser uma estratégia eficaz e de baixo custo para a restauração, o que se alinha aos objetivos de recuperação de áreas degradadas. (DE PAULA et al. 2025)

No entanto, as estratégias de recuperação de áreas degradadas devem ser concebidas a partir do reconhecimento dessa resiliência intrínseca, utilizando-a como base para o planejamento de ações que potencializem a regeneração e a acumulação de biomassa. (SANTOS et al., 2014)

Apesar do quadro recorrente de degradação e desertificação, a Caatinga demonstra notável resiliência, já que áreas submetidas a distúrbios crônicos ainda podem manter comunidades vegetais bem preservadas, com riqueza e diversidade comparáveis às de fragmentos não degradados, funcionando como reservatórios biológicos para a regeneração natural (MACEDO et al., 2024). Além disso, a recuperação efetiva do solo requer estratégias ativas, como plantio de árvores nativas e adubação verde, para acelerar o processo de restauração e aumentar a resiliência ecossistêmica. (BIELUCZYK et al., 2025)

A presença de espécies adaptadas, capazes de regenerar-se por brotamento de tocos e raízes, desafia a ideia de perda total após a degradação e evidencia a importância de análises fitossociológicas detalhadas no diagnóstico ambiental. Esses achados indicam que a recuperação ecológica pode ser acelerada por manejos que

favoreçam a regeneração de espécies já existentes, reduzindo a necessidade de processos completos de recolonização (MACEDO et al., 2024).

A dinâmica da Caatinga, embora intrinsecamente ligada à variabilidade climática e aos regimes pluviométricos, é moldada de forma decisiva pelas pressões antrópicas, de forma que é o fator humano, e não as condições climáticas, é o principal motor das mudanças na vegetação em larga escala. (ARAUJO et al., 2023)

A conversão de áreas de mata densa para pastagem, e o uso subsequente para pastoreio, resulta na compactação do solo e na redução significativa de nutrientes essenciais, como o nitrogênio e o carbono, além de comprometer a biomassa microbiana (BIELUCZYK et al., 2025).

Em áreas de floresta seca, o grau de degradação da vegetação controla diretamente a fertilidade e a umidade do solo, por meio da cobertura arbórea e do aporte de serapilheira (COTRONEO, 2021). Além disso, a regeneração de gramíneas segue um padrão, com predominância de espécies colonizadoras nas áreas mais degradadas e uma dominância compartilhada entre colonizadoras e espécies com rebrota subterrânea e capacidade de recrutamento de plântulas em áreas menos degradadas. (HORSTMANN et. al., 2023).

Esse padrão é similar ao de pradarias e savanas temperadas e subtropicais, onde gramíneas dispersas por vento ou animais colonizam rapidamente, enquanto gramíneas perenes, com dispersão limitada, estabelecem-se mais lentamente ao longo dos anos. (HORSTMANN et. al., 2023).

A distribuição espacial dos fragmentos remanescentes da caatinga, resultante principalmente da diversidade de práticas de uso do solo, favorece a regeneração natural, especialmente em áreas onde remanescentes bem preservados estão próximos às regiões mais degradadas. A proximidade desses fragmentos conservados acelera a recuperação das áreas degradadas, uma vez que a configuração espacial da paisagem, incluindo o tamanho e o estágio sucessiona da vegetação ao redor, desempenha um papel crucial na restauração da biomassa, da riqueza de espécies e da composição florística (MACÊDO et. al., 2024)

Em regiões de floresta tropical seca, tomando comparação com áreas de floresta aberta e terra aberta degradada, áreas de pousio com cercamento possuem melhores resultados em termos de presença de espécies lenhosas e de diversidade geral de espécies vegetais, de modo que a densidade excede significativamente quando comparada com áreas abertas (AMBUSHE et. al., 2022).

Ainda é importante destacar que o pousio para regeneração natural não apresenta resultados uniformes para todas as situações. Áreas severamente degradadas pela mineração possuem apresentam maior dificuldade de regeneração natural do que áreas de plantio e remoção de florestas comerciais (HORSTMANN et. al., 2023).

No contexto da Caatinga, estudos indicam que esse ecossistema apresenta um elevado índice de resiliência, com uma capacidade de regeneração superior à de florestas úmidas, devido às árvores de baixa estatura, alta capacidade de rebrota, e a presença de muitas sementes pequenas e secas, na maioria das plantas, com grande potencial de dispersão pelo vento. No entanto, fatores limitantes, como a sazonalidade, a disponibilidade de água, a irregularidade das chuvas, a baixa produtividade e a dependência da polinização por animais, restringem os processos ecológicos, desafiando a ideia de que se trata de um ecossistema plenamente resiliente (SILVA, 2022, p. 15)

A rápida ocupação de espécies exóticas invasoras reduz a cobertura das camadas herbáceo-arbustivas nas áreas degradadas em pousio para regeneração natural. Em regiões semiáridas, entretanto, devido ao estresse hídrico, a pouca disponibilidade de água e a profundidade do lençol freático podem reduzir a propagação invasoras exóticas (HORSTMANN et. al., 2023).

5. ESTOCAGEM DE CARBONO E RESILIÊNCIA CLIMÁTICA DA CAATINGA

A Caatinga tem se consolidado como um dos principais sumidouros de carbono do Brasil, respondendo em 2022 por quase 50% das remoções nacionais de gases de

efeito estufa (DA COSTA et al., 2025). Esse desempenho está diretamente associado à variabilidade climática, uma vez que o sequestro de carbono no bioma aumenta em períodos de maior precipitação, quando a intensificação da fotossíntese amplia a resiliência da vegetação. Em contrapartida, durante a estação seca, observa-se forte redução dos fluxos de CO₂, o que revela a alta sensibilidade do ecossistema ao regime hídrico (ORESCA et al., 2024; DA COSTA et al., 2025).

Essa oscilação decorre da diminuição da disponibilidade de água no solo e da menor eficiência no uso hídrico pela vegetação remanescente, reforçando a interdependência entre os ciclos da água e do carbono e demonstrando que a degradação compromete funções ecossistêmicas essenciais, entre elas o próprio sequestro de carbono (OLIVEIRA et al., 2021).

Nesse contexto, áreas em processo de recuperação apresentam ganhos significativos no estoque de carbono em comparação às degradadas. A recuperação ativa mostra-se mais eficaz na recomposição da biomassa aérea e subterrânea do que a regeneração natural passiva, e áreas de floresta densa preservada demonstram maior capacidade de retenção de carbono e nutrientes, confirmando o potencial da vegetação nativa como elemento-chave para a resiliência ecológica do semiárido. (BIELUCZYK et al., 2025; MORAIS et al., 2017). Em contraste, a conversão de formações florestais nativas em pastagens e lavouras reduz drasticamente a biomassa, fragiliza a capacidade de estocagem de carbono e intensifica os riscos de desertificação (SOUZA JÚNIOR et al., 2023).

A adoção de estratégias integradas de manejo, como o pousio e a recomposição florestal, amplia a resiliência do semiárido e reforça a contribuição da Caatinga para o cumprimento das metas climáticas nacionais, demonstrando que sua função como sumidouro de carbono não depende apenas de áreas preservadas, mas também de iniciativas de recuperação ecológica (MORAIS et al., 2017).

Evidências apontam que áreas florestadas densas, em comparação às antropizadas, apresentam microclima mais ameno, solos mais protegidos e maior eficiência no uso da água, chegando a estocar até 2,5 vezes mais carbono do que formações esparsas (OLIVEIRA et al., 2021).

Assim, a Caatinga deve ser compreendida como um ecossistema dinâmico, cujas respostas adaptativas a distúrbios e ao estresse hídrico evidenciam não apenas sua capacidade de estocar carbono, mas também de prover outros serviços ecossistêmicos fundamentais à mitigação das mudanças climáticas e à manutenção da resiliência socioambiental (SANTOS et al., 2014).

O estudo de Oliveira et al. (2021) analisou os efeitos da degradação do solo induzida pelo uso humano sobre os fluxos de carbono e água em áreas de Caatinga. Os resultados demonstraram que, em áreas degradadas, a produção primária bruta (PPB), que representa a absorção de carbono pela vegetação, é significativamente menor do que em áreas com cobertura vegetal mais densa.

A respiração do solo é um dos principais processos do ciclo global do carbono, representando a soma da atividade microbiana e da respiração radicular. No contexto da Caatinga, esse processo está diretamente associado à variação sazonal das chuvas, à textura arenosa predominante dos solos e à cobertura vegetal (FERREIRA et al, 2018)

Solos de Caatinga preservada apresentam maior teor de carbono orgânico total e fluxos de CO₂ mais responsivos à sazonalidade, quando comparados a áreas de pastagem. Essa dinâmica evidencia a relevância da vegetação nativa na manutenção da fertilidade e no equilíbrio das trocas gasosas solo-atmosfera no semiárido vegetal (FERREIRA et al, 2018).

Os ecossistemas semiáridos desempenham papel estratégico no ciclo global do carbono, influenciando tanto a tendência quanto a variabilidade interanual dos sumidouros terrestres, responsáveis por absorver cerca de 30% das emissões antrópicas de CO₂. Essa dinâmica está diretamente associada às variações de precipitação e temperatura controladas pela circulação atmosférica, o que reforça a relevância desses ambientes para a regulação climática global (MENDES et al., 2025).

A conversão da vegetação nativa da Caatinga em pastagens extensivas altera profundamente os fluxos de carbono do solo, reduzindo o carbono orgânico total e a biomassa microbiana. (ORESCA et al., 2024)

O superpastejo é causa de forte degradação dos solos na Caatinga, reduzindo a multifuncionalidade do solo e acarretando perdas significativas de carbono (até 14,7 Mg C ha⁻¹), de modo que três anos de exclusão do pastoreio não foram suficientes para restaurar o estoque de carbono ou a saúde do solo, evidenciando a lentidão dos processos de recuperação passiva.(BIELUCZYK et al., 2025)

A vegetação da Caatinga é composta por espécies arbóreas e arbustivas que desempenham papéis distintos, mas complementares, na dinâmica do ciclo do carbono. O trabalho de Silva et al. (2025) quantificou o potencial de sequestro de carbono em espécies lenhosas comumente encontradas em áreas de Caatinga, revelando a existência de taxas de acúmulo de carbono diferenciadas.

Os resultados demonstraram que a estrutura e a composição florística da Caatinga, além de refletirem adaptações ecofisiológicas às condições de seca, determinam diretamente sua capacidade de estocar carbono e mitigar os efeitos das mudanças climáticas, considerando a relevância da diversidade vegetal para a resiliência do bioma. (SILVA et al., 2025)

Tais resultados reforçam a importância de uma abordagem direcionada no planejamento da recuperação de áreas, onde a seleção de espécies é um fator determinante para o sucesso das iniciativas de sequestro de carbono.

Apesar dessa resiliência ecológica, a Caatinga figura entre os biomas brasileiros mais vulneráveis às mudanças climáticas e às pressões antrópicas, sendo que 62% das áreas suscetíveis à desertificação do país encontram-se em seu território. Essa condição evidencia a urgência de medidas de preservação e recuperação, de modo a assegurar tanto os serviços ecossistêmicos quanto a subsistência das populações locais. (SANTOS et al., 2014)

94% da Caatinga apresenta risco moderado a alto de desertificação, configurando-a como um dos ecossistemas mais sensíveis às mudanças climáticas globais. O avanço de atividades agropecuárias insustentáveis, aliado a políticas historicamente centradas em obras hidráulicas, intensificou a vulnerabilidade socioambiental, gerando perda de biodiversidade, insegurança hídrica e êxodo rural. (NIEMEYER; VALE, 2022)

A identificação de áreas climaticamente estáveis desponta como critério espacial prioritário para conservação e restauração na Caatinga, orientando decisões sobre ampliação/recategorização de UCs e a criação de corredores que reduzam o risco de isolamento populacional em cenários de aquecimento e aridização (GONÇALVES et al., 2023).

Iniciativas de recuperação não devem considerar apenas critérios locais, como estoque de serapilheira e densidade de regenerantes, mas também critérios regionais de resiliência, incluindo estabilidade climática, conectividade estrutural e funcional, inserção em redes de refúgios e proximidade de remanescentes. (GONÇALVES et al., 2023)

A integração entre modelagem de nicho, análise de lacunas e diagnósticos de campo — solo, fogo, compactação e espécies exóticas — orienta a seleção de áreas prioritárias, a criação de corredores em matrizes produtivas e o planejamento de medidas adaptativas diante das mudanças climáticas na Caatinga (GONÇALVES et al., 2023)

6. PROTOCOLOS DE ACOMPANHAMENTO DA RECUPERAÇÃO ECOLÓGICA E ESTOCAGEM DE CARBONO

A diversidade de fisionomias e de condições edafoclimáticas torna complexa a definição de padrões para a recuperação da Caatinga. Ainda assim, esse desafio não pode ser adiado. Guias e manuais de recuperação ambiental já existem, inclusive específicos para o bioma, e oferecem referências iniciais para orientar intervenções. Esses instrumentos, embora limitados, reforçam a necessidade de metodologias adaptadas às particularidades ecológicas e sociais da região.

Grande parte das propostas disponíveis concentra-se na recuperação ativa, baseada na introdução de elementos exógenos, nativos ou exóticos, em áreas degradadas. Técnicas desse tipo têm mostrado maior eficácia na reconstrução da estrutura ecológica. Exemplos incluem técnicas ecológicas, como o plantio de mudas em alta diversidade, a nucleação, o uso de poleiros artificiais, a adição de galharias, além de práticas geomorfológicas como dissipadores de energia, contenção de encostas, biomantas e geotêxteis. Essas intervenções, ao facilitarem e acelerarem o

reestabelecimento de condições ecológicas robustos, devem ser a primeira escolha quando se busca a restauração ecológica.

No entanto, o porte territorial da Caatinga, a intensidade histórica da ocupação humana e a gravidade de sua degradação impõem limites práticos ao uso exclusivo de técnicas ativas. Nesse contexto, soluções mais acessíveis e economicamente viáveis tornam-se necessárias. Embora não alcancem sempre a complexidade ecológica desejada, essas alternativas podem garantir a recuperação dos serviços ecossistêmicos básicos da floresta tropical seca. Assim, a combinação de estratégias, equilibrando efetividade e viabilidade, mostra-se essencial para ampliar a escala da recuperação no bioma.

Em contrapartida, não parece razoável adotar como postura habitual confiar ao acaso a regeneração natural, esperando que esta, por si só, produza resultados satisfatórios na cessação da degradação ecológica. É necessário considerar, mais uma vez, a diversidade de condições e paisagens da Caatinga, cujos atributos devem ser controlados e monitorados de forma adequada, de modo a conduzir processos de regeneração que, ainda que não restitua plenamente a condição clímax dos elementos ecológicos, e assegurem pelo menos a manutenção dos serviços ecossistêmicos.

A avaliação da recuperação de áreas degradadas na Caatinga executadas pela condução da regeneração natural pode se beneficiar de protocolos que combinem métricas da paisagem e indicadores objetivos do solo.

A análise da cobertura vegetal, da diversidade estrutural e da funcionalidade da paisagem permite acompanhar o avanço da regeneração ao longo do tempo, revelando padrões espaciais e de conectividade ecológica. Esses parâmetros oferecem uma leitura ampla do processo de recomposição, mas devem ser complementados por indicadores de maior precisão e confiabilidade.

Nesse sentido, o estoque de carbono no solo surge como métrica central, capaz de quantificar a retomada de funções ecossistêmicas e de estabelecer bases comparáveis em diferentes escalas temporais e espaciais. O binômio entre análise da paisagem e análise do carbono garante, portanto, uma abordagem integrada, unindo

a visão estrutural do ecossistema e a robustez de um indicador mensurável e verificável.

A efetividade desse acompanhamento depende, contudo, da proteção mínima das áreas em regeneração contra novas perturbações. O cercamento das áreas sob recuperação, ao isolar a vegetação em recuperação do pisoteio por animais e da ação direta de comunidades vizinhas, constitui condição indispensável para o sucesso da regeneração conduzida. Da mesma forma, a instalação de aceiros funciona como barreira preventiva contra incêndios, reduzindo riscos de retrocessos significativos nos processos de restauração. Esses elementos, ainda que externos ao sistema ecológico, não introduzem componentes exógenos nem alteram as condições geomorfológicas, mas garantem a estabilidade necessária para que os processos naturais de regeneração possam ocorrer sem interrupções.

Nesse mesmo contexto, destaca-se a oportunidade de se estabelecer um protocolo de avaliação específico para a regeneração natural conduzida na Caatinga. Esse protocolo deve ser capaz de monitorar, de forma contínua, se áreas em pousio apresentam recuperação efetiva ou apenas feições superficiais que mascaram a persistência da degradação. A definição de critérios claros, baseados na evolução temporal da paisagem, nos níveis de carbono do solo e em parâmetros complementares de diversidade funcional e qualidade edáfica, assegura que a recuperação seja distinguida de meros estágios de abandono.

Esse tipo de monitoramento permite orientar políticas públicas, direcionar investimentos e, sobretudo, conferir legitimidade científica às práticas de regeneração natural no semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS

DE PAULA, Alexandre S.; TABARELLI, Marcelo; TRINDADE, Diego P. F.; BARROS, Maria Fabiola; RITO, Kátia F.; SOUZA, Danielle G.; SFAIR, Julia C. The rapid recovery of a Caatinga dry forest is mediated by disturbance-adapted species. **Biotropica**, v. 57, n. 4, e70056, jul. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/btp.70056>

NOUTCHEU, Ronald; OLIVEIRA, Fernanda M. P.; WIRTH, Rainer; TABARELLI, Marcelo; LEAL, Inara R. Chronic human disturbance and environmental forces drive the regeneration mechanisms of a Caatinga dry tropical forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 22, n. 1, p. 79-92, 2024. ISSN 2530-0644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2024.01.002>.

BIELUCZYK, Wanderlei; SOUZA, Pablo Acácio dos Santos; OLIVEIRA, Andressa Silva de; SAMPAIO, Regina Maria Barreto Campello; FERREIRA, Juscélia da Silva; DANTAS, Edilândia Farias; LAMBAIS, George Rodrigues; et al. From overgrazed land to forests: assessing soil health in the Caatinga biome. **Journal of Environmental Management**, v. 374, 124022, 2025. ISSN 0301-4797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.124022>

IBGE. **Mapa de Vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/10872-vegetacao.html>. Acesso em: 10 mar. 2024

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SANTOS, M. G.; OLIVEIRA, M. T.; FIGUEIREDO, K. V.; et al. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 83-99, mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0008-0>

NIEMEYER, Julia; VALE, Mariana M. Obstacles and opportunities for implementing a policy-mix for ecosystem-based adaptation to climate change in Brazil's Caatinga. **Land Use Policy**, v. 122, 106385, 2022. ISSN 0264-8377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106385>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837722004124>. Acesso em: 18 fev 2025

JUSTINO, Sérgio Tulio Pereira; PAGANINI, Enzo Antonio Lecciolle; SILVA, Rafael Barroca; SILVA, Roberta Patrícia de Sousa; ZABOTTO, Alessandro Reinaldo; RODER, Ludmila Ribeiro. Spatial-temporal analysis of vegetation cover and soil degradation from Landsat time-series – a case study in the Caatinga, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 160, 105528, 2025. ISSN 0895-9811. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105528>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089598112500190>. Acesso em 21 jul 2025

GOMES, Joao Paulo Silva; DA SILVA, Valdenildo Pedro. Recovery of degraded areas in the Caatinga biome: a bibliometric analysis. **Geoambiente On-line**, n. 46, p. 36-55, maio/ago. 2023. Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/download/75233/40015/371564>. Acesso em: 31 ago. 2025.

MACÊDO, Maria Soraya; MENEZES, Bruno Sousa; LEDRU, Marie Pierre; MAS, Jean-François; SILVA, Fernanda Kelly Gomes; CARVALHO, Carlos Eduardo; COSTA, Rafael Carvalho; et al. Everything's not lost: Caatinga areas under chronic disturbances still have well-preserved plant communities. **Journal of Arid Environments**, v. 222, 105164, 2024. ISSN 0140-1963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105164>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196324000442>. Acesso em 14 ago 2025.

MATTOS, Vanina Zini Antunes de; BARRETO, Renata da Costa; FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de. Implantação de tecnologias agrícolas de baixo carbono na Caatinga: Projeto Rural Sustentável Caatinga. **Nativa – Pesquisas Agrárias e**

Ambientais, v. 12, n. 4, p. 682-692, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31413/nat.v12i4.18035>.

ARAUJO, H. F. P.; CANASSA, N. F.; MACHADO, C. C. C.; et al. Human disturbance is the major driver of vegetation changes in the Caatinga dry forest region. **Scientific Reports**, v. 13, 18440, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45571-9>

JUSTINO, Sérgio Tulio Pereira; PAGANINI, Enzo Antonio Lecciolle; SILVA, Rafael Barroca; SILVA, Roberta Patrícia de Sousa; ZABOTTO, Alessandro Reinaldo; RODER, Ludmila Ribeiro. Spatial-temporal analysis of vegetation cover and soil degradation from Landsat time-series – A case study in the Caatinga, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 160, 105528, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105528>

SOUSA JÚNIOR, Vicente de Paula; SPARACINO, Javier; ESPINDOLA, Giovana Mira de; ASSIS, Raimundo Jucier Sousa de. Carbon Biomass Estimation Using Vegetation Indices in Agriculture–Pasture Mosaics in the Brazilian Caatinga Dry Tropical Forest. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 12, n. 354, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi12090354>

SAMPAIO, E. V. S. B.; FREITAS, A. D. S.. **Caatinga: descrição geral**. In: SILVA, F. B. P. M.; SILVA, J. V. (org.) *Restauração na caatinga*. 2. ed. rev. e amp. Maceió, AL: EDUFAL, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/bitstream/123456789/9074/1/Restaura%C3%A7%C3%A3o%20na%20Caatinga%20-%202%20ed.%20e-book.pdf> Acesso em 27 jun 2023

ROCHA, Amanda Macêdo et al. **Levantamento florístico de espécies arbóreas em uma área de caatinga no semiárido piauiense**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO – CONIDIS, 1., 2021, Campina Grande. Anais... Campina Grande: Ed. Realize, 2021. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/23942>. Acesso em: 09 set. 2024.

ALMEIDA, D.S. Histórico e tendências atuais da recuperação ambiental. In: **Recuperação ambiental da Mata Atlântica** [online]. 3rd ed. rev. and enl. Ilhéus, BA: Editus, 2016, pp. 18-21. ISBN 978-85- 7455-440-2. SciELO Books.

FERNANDES, S. P. dos S. et al. Survival and growth of planted and naturally established trees in a degraded caatinga area. **Revista Caatinga**, v. 37, p. e11788, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3711788rc>.

KILL, L. H. P.; PORTO, D. D. Bioma Caatinga: oportunidades e desafios de pesquisa para o desenvolvimento sustentável. In: VILELA, E. F.; CALLEGARO, G. M.; FERNANDES, G. W. (Org.). **Biomas e agricultura: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciência: FAPEMIG, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1108577/1/Kiill.pdf>. Acesso em 27 jun 2023.

LEINFELDER, R. R.; IRAMINA, W. S.; ESTON, S. M. DE. Mining as a tool for reclamation of a Degraded Area. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 68, n. 2, p. 215–220, abr. 2015. Acesso em 15 jul 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0370-44672015680127>

BRASIL. **Lei Ordinária nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em 20 jun. 2023.

ACOSTA, L. A. et al. Natural capital protection indicators: measuring performance in achieving the sustainable development goals for green growth transition. **Environmental And Sustainability Indicators**, v. 8, p. 100069, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100069>. Acesso em 10 set 2024.

FAISAL, Abdullah-Al- et al. Assessing and predicting land use/land cover, land surface temperature and urban thermal field variance index using Landsat imagery for Dhaka Metropolitan area. **Environmental Challenges**, v. 4, p. 100192, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100192>

ADEKOMAYA, Oludaisi; MAJOZI, Thokozani. Promoting natural cycle and environmental resilience: a pathway toward sustainable development. **South African Journal Of Chemical Engineering**, v. 42, p. 229-240, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.09.002>. Acesso em 09 set 2024.

CARVALHO, P. E. R. **Técnicas de recuperação e manejo de áreas degradadas**. São Paulo: Embrapa, 2000. Disponível em <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/299368/1/Cap14TecnicasRecuperao0001.pdf>. Acesso em: 23 jun 2023.

RODRIGUES, A. B. M.; GIULIATTI, N. M.; PEREIRA JUNIOR, A.. Aplicação de metodologias de recuperação de áreas degradadas nos biomas brasileiros. **Brazilian Applied Science Review**. v. 4, n. 1, p. 333-369. Jan/fev 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv4n1-021> Acesso em 18 jun 2023.

GIRÃO, O. et. al. O papel do clima dos estudos de prevenção e diagnóstico de riscos geomorfológicos em bacias hidrográficas na Zona da Mata Sul de Pernambuco. In: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. do C. O. (org). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p.126-159.

CHAZDON, R. L. **Renascimento de florestas: regeneração na era do desmatamento**. Tradução: Nino Amazonas, Ricardo Cesar. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

ROTTA, Cláudia Marisse dos Santos. **Estudo da recuperação de áreas degradadas por processos erosivos: procedimentos e eficiência dos métodos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. doi:10.11606/D.18.2012.tde17062013-162539. Acesso em: 2023-06-23.

PASSOS, Manuela Gazzoni dos; PRADO, Geisa Percio do; FONTANA, Claudia; ZONTA, Edilvane Ines; BIANCHINI, Edmilson. Natural regeneration in a mixed ombrophilous forest remnant in southern Brazil. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 16, n. 1, p. 167-183, 2021. ISSN 2236-777. Disponível em: <https://doi.org/10.3897/neotropical.16.e58188>. Acesso em: 11 ago 2024.

TRENNEPHOL, C.; e TRENNEPOHL, T.. **Licenciamento ambiental**. 9. ed. rev., atual. e ampl. São Paulo: Thomson Reuters Brasil, 2022.

FERNANDES, S. P. DOS S. et al.. Survival and growth of planted and naturally established trees in a degraded caatinga area. **Revista Caatinga**, v. 37, p. e11788, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3711788rc>. Acesso em: 11 set. 2024.

COTRONEO, S. M. et al. Forest degradation and short-term seasonal enclosure effects on biotic and abiotic factors linked to rangeland rehabilitation in semiarid Chaco, Argentina. **Arid Land Research and Management**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/15324982.2021.1946206>

AMBUSHE, A.A.; GEBRE, G.G.; MAMO, G.S. Does enclosure restore woody species regeneration in degraded lands? The case of Loma Bosa District of Dawuro zone, Southwestern Ethiopia. **BMC Ecology and Evolution**, v. 22, n. 111, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12862-022-02067-w>. Acesso em: 15 set. 2024.

SILVA, M. L. O.; LOPES, K. P. L.; LEITE, M. I. A.; CAMPOS, K. W. N.; SOARES, A. K. F.; Áreas degradadas no Semiárido: Causas, situação e alternativas de recuperação. Cap. 2 p.22-37. in: REDIN, E. (org). **Ciências Rurais em Foco**. vol. 3. Belo Horizonte: Poisson, 2021. Disponível em: https://www.poisson.com.br/livros/Ciencias_Rurais/volume3/Ciencias_Rurais_vol3.pdf f. Acesso em 18 set. 2024

HORSTMANN, Natanna; SEVILHA, Anderson Cássio; VIEIRA, Daniel Luis Mascia. Graminoid-led natural regeneration of dry savannas after severe degradation. **Ecological Engineering**, v. 187, 2023, p. 106850. ISSN 0925-8574. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106850>. Acesso em: 21 set. 2024.

GUERRA, A. et al. Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. **Forest Ecology and Management**, v. 458, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117802>. Acesso em: 21 set. 2024.

SILVA, I. I. M. **Efeito da regeneração natural de uma floresta seca da Caatinga sobre a comunidade de nematoides do solo**. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas com ênfase em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife , 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/48017/1/TCC%20Italo%20lan%20Monteiro%20da%20Silva.pdf>. Acesso em: 21 set. 2024

DA COSTA, Luis Miguel da; DAVITT, Aaron; VOLPATO, Gabriela; MENDONÇA, Gislaine Costa de; PANOSSO, Alan Rodrigo; LA SCALA, Newton. A comparative analysis of GHG inventories and ecosystems carbon absorption in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 958, 177932, 2025. ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177932> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724080896>

MORAIS, Y. C. et al. Análise do sequestro de carbono em áreas de Caatinga do semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 585–599, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786324007>.

ORESCA, Denizard et al. Impact of Conversion of the Caatinga Forest to Different Land Uses on Soil and Root Respiration Dynamics in the Brazilian Semiarid Region. **Sustainability**, v. 16, n. 10652, p. 1-19, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su162310652>.

OLIVEIRA, Michele L. de; SANTOS, Carlos A. C. dos; OLIVEIRA, Gabriel de; PEREZ-MARIN, Aldrin M.; SANTOS, Celso A. G. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. **Science of The Total Environment**, v. 792, 148458, 2021. ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148458>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721035300>

FERREIRA, C. R. P. C. et al.. Soil CO₂ Efflux Measurements by Alkali Absorption and Infrared Gas Analyzer in the Brazilian Semiarid Region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. e0160563, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160563>

MENDES, Keila R.; OLIVEIRA, Pablo E. S.; LIMA, José Romualdo S.; MOURA, Magna S. B.; SOUZA, Eduardo S.; PEREZ-MARIN, Aldrin M.; CUNHA, John Elton B. L.; et al. The caatinga dry tropical forest: a highly efficient carbon sink in South America. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 369, 110573, 2025. ISSN 0168-1923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110573>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192325001935>.

SILVA, Joélia Natália Bezerra da; SILVA, Jéssica Laís Bezerra; FERREIRA, Maria Leidiane; GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano. Estimativas do sequestro de carbono em espécies predominantes na vegetação de caatinga: compreendendo a dinâmica do carbono em um bioma semiárido. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, [S. l.], v. 13, n. 2, 2025. Disponível em: <https://www.revistabrasileiraademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/1879>. Acesso em: 31 ago. 2025.

GONÇALVES, G. S. R. et al. Multi-temporal ecological niche modeling for bird conservation in the face of climate change scenarios in Caatinga, Brazil. **PeerJ**, v. 11, e14882, 2023. DOI: 10.7717/peerj.14882. Disponível em: <https://peerj.com/articles/14882/>. Acesso em 16 ago 2025.

APÊNDICE B – ARTIGO DE ANÁLISE DE SOLO

CARBONO DO SOLO E POUSIO COMO VETORES DE RECUPERAÇÃO EM ÁREAS DE MINERAÇÃO DA CAATINGA

Daniel Guimarães Gonçalves, mestrando MAPEPROF, e-mail: danielguimaraesgoncalves@gmail.com

Bruna de Freitas Iwata, profa. Orientadora MAPEPROF, e-mail: iwata@ifpi.edu.br

RESUMO

Este estudo quantificou os efeitos do processo de mineração sobre a qualidade do solo em ambiente semiárido (Caatinga piauiense) a partir de indicadores edáficos sensíveis e de uma métrica extensiva do serviço ecossistêmico carbono no solo. Seis áreas (Agreste, Picos, Jaicós, Marco, Pio IX e Capivara) foram avaliadas em duas profundidades (0–5 e 5–10 cm) quanto a C, N, C/N, matéria orgânica (MOS) e textura (areia–silte–argila). O estoque de carbono (Mg ha^{-1}) foi estimado com base em densidade aparente média por área e a distribuição espacial do estoque foi representada por interpolação e krigagem com escala cromática comum, viabilizando comparações diretas entre áreas e camadas. Os resultados mostram hierarquia consistente entre áreas: Marco, Pio IX e Capivara apresentam estoques elevados e estratificação vertical discreta (0–5 $\approx$ 5–10 cm), indicando propagação e estabilização do carbono na subsuperfície; Agreste e Jaicós ocupam posição intermediária, com mosaicos contínuos intercalados por setores de menor acúmulo; Picos permanece com estoques baixos, alta fragmentação e fraca coerência vertical. Em conjunto, MOS e C exibem co-variação positiva e menor variância nas áreas com maior fração fina (silte+argila), coerente com maior capacidade de proteção organo-mineral e agregação; o N acompanha o C de modo mais conservador, e a C/N tende à estabilização nos sítios de melhor desempenho, sugerindo acoplamento biogeoquímico. As superfícies espaciais evidenciam que práticas de mineração associadas à remoção/retrabalhamento do horizonte superficial, exposição do regolito e compactação estão relacionadas a redução de C, N e MOS, maior heterogeneidade espacial e ruptura da coerência vertical, sobretudo em substratos mais arenosos; por contraste, áreas com maior silte+argila mantêm hotspots contíguos e variância reduzida. O estoque 0–10 cm emerge como indicador sintético e comparável da intensidade do impacto minerário sobre a qualidade do solo na Caatinga.

Palavras-chave: Degradação Ambiental. Estocagem de Carbono;

1 INTRODUÇÃO

A restauração ambiental de áreas de mineração na Caatinga precisa de um norte claro: comprovar a volta das funções do solo e, com elas, dos serviços ecossistêmicos que sustentam a paisagem. Nesse contexto, indicadores edáficos tornam-se centrais

porque traduzem, de forma precoce e integradora, se o ecossistema está retomando sua capacidade de infiltrar água, armazenar nutrientes, resistir à erosão e sustentar a revegetação. Entre esses indicadores, o carbono orgânico do solo (COS) ocupa posição estratégica.

O COS é a face mensurável da matéria orgânica do solo, conectada à formação e estabilidade de agregados, à retenção hídrica, à fertilidade e à resiliência frente a extremos climáticos. Em áreas mineradas, reacúmulos consistentes de carbono sinalizam recomposição estrutural, maior proteção contra perdas de solo e um solo mais “vivo”, capaz de apoiar a sucessão vegetal. Há ainda um co-benefício inequívoco: o carbono no solo é também estoque climático, fortalecendo a lógica de restauração com ganhos ambientais múltiplos.

A Caatinga impõe uma dinâmica própria ao carbono: longos períodos secos entrecortados por pulsos de chuva regulam entradas e saídas de matéria orgânica. Em ambientes degradados por mineração, onde a cobertura é rala e o microclima é mais severo, essa dinâmica fica ainda mais sensível. Por isso, acompanhar o retorno do carbono não é apenas medir “quanto” há, mas entender se ele está ganhando proteção (agregação, associações organominerais) e se a paisagem está caminhando para trajetórias de maior estabilidade funcional. Nesse debate, ganha destaque o pousio — o repouso produtivo da terra, típico dos sistemas regionais e hoje revalorizado como caminho de recuperação de baixo insumo.

Ao suspender distúrbios, o pousio favorece acúmulo de serapilheira, enraizamento, atividade biológica e formação de micro-habitats, condições que favorecem o acúmulo e a estabilização do carbono. Entender como diferentes áreas sob pousio respondem ao tempo de descanso, ao histórico de uso e à textura do solo é chave para prever trajetórias de recuperação e decidir onde e quando complementar com intervenções ativas (cobertura, barreiras contra erosão, adições orgânicas). Em síntese, avaliar a restauração na Caatinga minerada a partir do carbono do solo oferece uma leitura direta da qualidade ecológica em reconstrução.

O COS funciona como linguagem comum entre ecologia do solo, revegetação e gestão adaptativa: revela gradientes de recuperação, orienta priorização espacial e ajuda a comunicar resultados tangíveis — especialmente em áreas sob pousio, onde

o ritmo natural de retorno das funções depende de reconhecer, valorizar e acelerar os processos que o carbono torna visíveis.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido em seis áreas da Caatinga piauiense — Agreste (São João/Agreste), Picos, Jaicós, Marco (Marcolândia), Pio IX e Capivara (São João/Capivara) — situadas no centro-sudeste do estado sob clima semiárido com forte sazonalidade. Predomina o regime BSh (Köppen-Geiger), com chuvas concentradas em poucos meses, longos veranicos e temperaturas médias elevadas ao longo do ano; a alta insolação e a demanda evaporativa modulam a disponibilidade hídrica no solo e a dinâmica da matéria orgânica, tipicamente regidas por um comportamento pulso-reserva (curtos eventos de recarga hídrica intercalados por períodos secos prolongados). Em termos pedológicos, a região exibe grande heterogeneidade espacial em curta distância, com recorrência de Neossolos rasos e pedregosos (Litólicos/Regolíticos) sobre embasamento cristalino, além de Cambissolos e Luvisolos (muitas vezes Crômicos) e ocorrência local de Argissolos em posições mais suaves do relevo. As texturas variam de arenosas a franco-argilosas, frequentemente com alta saturação por bases em Luvisolos, risco de encrostamento superficial e erosão laminar em materiais mais arenosos quando a cobertura é baixa — condições que influenciam a estabilização do carbono (associações organo-minerais, microagregação) e a retenção de água.

Do ponto de vista biogeográfico, o bioma Caatinga manifesta-se em fisionomias arbustivo-arbóreas a abertas, marcadas por deciduidade na estação seca e rebrota rápida nas primeiras chuvas. São comuns adaptações xeromórficas (folhas reduzidas, espinhos, tecidos de armazenamento hídrico) e estratégias fisiológicas eficientes em água (p.ex., metabolismo CAM em cactáceas). Sobre solos rasos e pedregosos, a fisionomia tende a ser baixa e aberta; onde há maior teor de silte/argila ou relevo suavizado, surgem manchas mais densas e maior porte relativo. A paisagem regional forma um mosaico de trechos naturais, áreas sob uso antrópico/mineração e pousio.

Em áreas mineradas, a remoção/retrabalhamento do horizonte superficial, a exposição do regolito e a compactação local alteram a infiltração e a ciclagem de matéria orgânica, tornando o carbono do solo um indicador sensível da trajetória de restauração. O pousio — pausa no uso — assume papel central de recuperação passiva, pois favorece o acúmulo de serrapilheira, o enraizamento, a atividade biológica e a formação de micro-habitats, condições que impulsionam o acúmulo e a estabilização do carbono e sustentam a recomposição das funções edáficas.

2.2 Procedimentos metodológicos

O estudo realizou análises de parâmetros sensíveis ao estado de qualidade ambiental do solo, considerando áreas diferentes sob o uso da mineração e diferentes profundidades. Foram determinados o carbono orgânico do solo (C, em g kg^{-1}), o nitrogênio total (N, em g kg^{-1}) e, a partir deles, a razão C/N (adimensional), calculada como $\text{C/N} = \text{C} \div \text{N}$ por seu valor indicativo da qualidade do substrato e do balanço imobilização-mineralização. A matéria orgânica do solo (MO, em g kg^{-1}) foi interpretada em conjunto com o C; quando pertinente, utilizou-se a aproximação clássica $\text{MO} \approx 1,724 \times \text{C}$ para cotejo teórico. A granulometria foi obtida nas frações areia, silte e argila (g kg^{-1}) e convertida para percentuais pela relação $\% = (\text{g kg}^{-1}) \div 10$, assegurando a identidade $\% \text{areia} + \% \text{silte} + \% \text{argila} = 100\%$; a classe textural foi atribuída conforme o triângulo brasileiro (Embrapa), dada sua relevância para a proteção organomineral do carbono e a retenção hídrica.

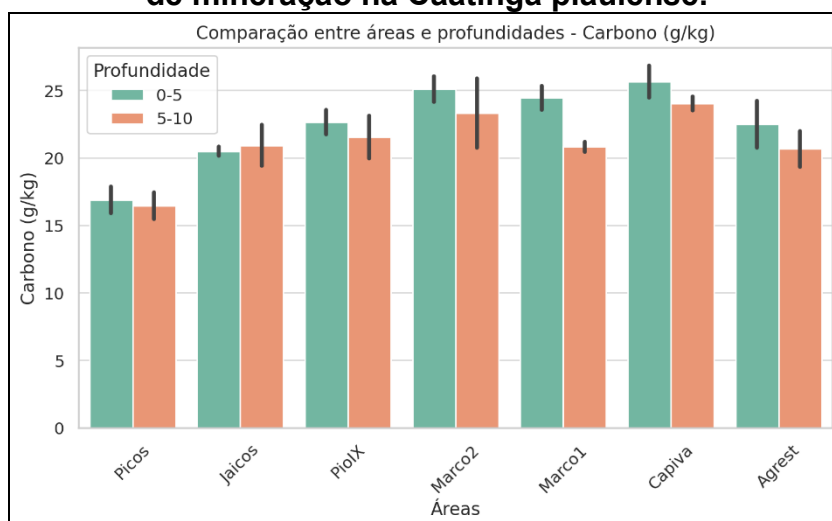
Para traduzir teores em uma métrica extensiva compatível com metas de restauração, estimou-se o estoque de carbono por camada (Mg ha^{-1}) combinando concentração, densidade e espessura, segundo a expressão: $\text{Estoque de C (Mg ha}^{-1}) = \text{C (g kg}^{-1}) \times \rho_{\beta} (\text{Mg m}^{-3}) \times z (\text{m}) \times 10$. Adotaram-se densidades aparentes médias por área (ρ_{β}) informadas no estudo — Agreste 1,5; Picos 1,3; Jaicós 1,3; Marco 1,5; Pio IX 1,5; Capivara 1,4 (Mg m^{-3}) — e espessura de camada $z = 0,05 \text{ m}$ para cada profundidade considerada (0–5 e 5–10 cm). O estoque total de 0–10 cm foi obtido pela soma das camadas, ou seja, $\text{Estoque}_{0-10} = \text{Estoque}_{0-5} + \text{Estoque}_{5-10}$. Para comunicar a organização espacial e apoiar a leitura comparativa entre áreas e profundidades, os resultados de estoque de C foram representados por superfícies contínuas geradas via interpolação determinística (método linear) e krigagem baseada em Processo

Gaussiano (kernel radial, RBF), mantendo-se uma escala cromática global comum a todos os mapas, de modo a evidenciar gradientes, hotspots/coldspots e padrões coerentes com a textura e a condição de pousio/uso — informações essenciais para priorização de manejo e monitoramento da restauração.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo verificou que, entre as áreas estudadas (Figura 1), observa-se um gradiente claro de desempenho (Marco/Capivara/Pio IX > Agreste/Jaicós > Picos), e uma estratificação vertical discreta (0–5 cm ligeiramente maior que 5–10 cm), o que é esperado em ambientes semiáridos onde o aporte superficial de serrapilheira e as janelas hidrológicas curtas (pulso–reserva) concentram a incorporação inicial de C na superfície, com propagação gradual para 5–10 cm à medida que a cobertura e a atividade biológica se restabelecem (NOY-MEIR, 1973; SCHWINNING; SALA, 2004). Como indicador integrador de restauração, o carbono do solo (COS) capta simultaneamente efeitos sobre estrutura, retenção hídrica e ciclagem, sendo recomendado para drylands (COSTANTINI et al., 2016).

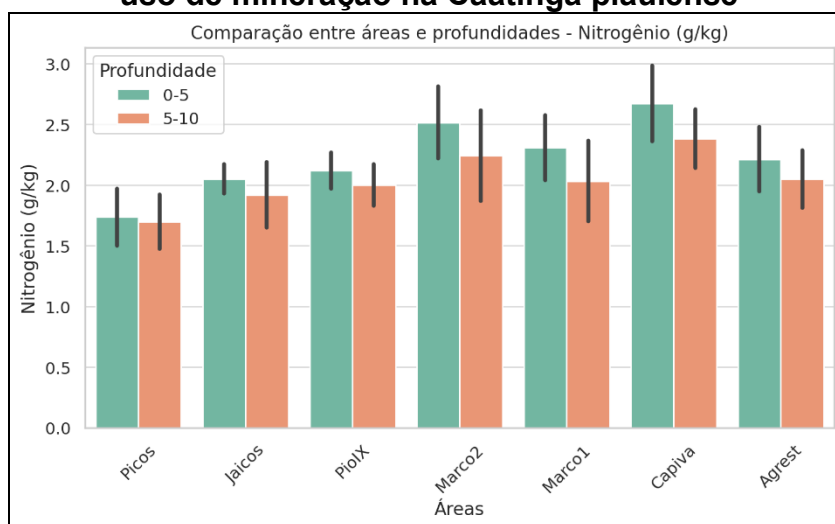
Figura 1. Carbono orgânico sob diferentes estágios de pousio em solo sob uso de mineração na Caatinga piauiense.



Na figura 2, o N total tende a acompanhar o padrão espacial já observado para o carbono: Marco, Pio IX e Capivara apresentam níveis relativamente mais altos, Agreste e Jaicós ficam em patamar intermediário, e Picos concentra os menores

valores. A diferença entre 0–5 cm e 5–10 cm costuma ser modesta, refletindo a natureza mais conservadora do nitrogênio em ambientes semiáridos: a maior parte do N está ligada à matéria orgânica e responde de forma mais lenta a mudanças de manejo do que o C. Em cenários de pousio, o aumento de cobertura e o retorno da atividade biológica favorecem a retenção de N e reduzem perdas por erosão e escoamento, o que explica a aproximação do perfil 5–10 cm aos valores superficiais nas áreas de melhor desempenho (ALMEIDA et al., 2017; COSTANTINI et al., 2016). Em contrapartida, onde o solo é mais arenoso/exposto (como em Picos), o N permanece baixo e espacialmente heterogêneo, coerente com relatos de solos em desertificação no semiárido brasileiro (SOUSA et al., 2012; MENEZES et al., 2012).

Figura 2. Nitrogênio do solo sob diferentes estágios de pousio em solo sob uso de mineração na Caatinga piauiense

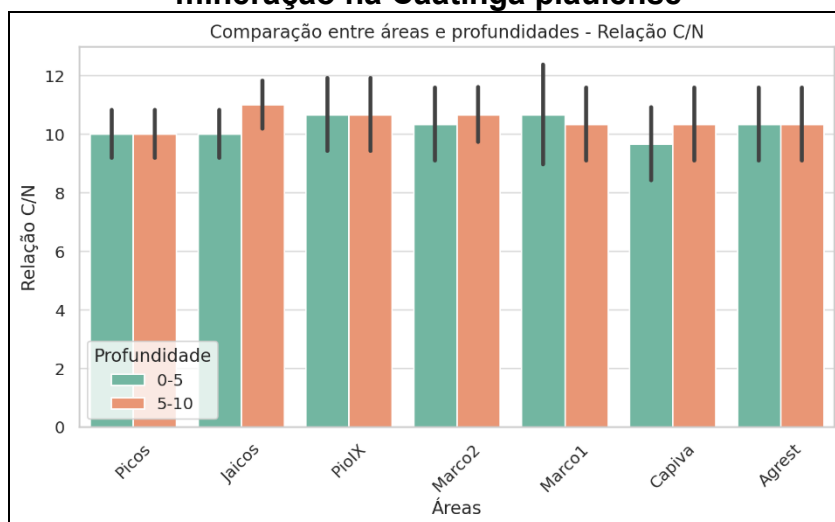


Mecanicamente, o N em drylands é fortemente controlado pela dinâmica pulso–reserva: pulsos de chuva geram “explosões” de mineralização e liberação de N (o chamado efeito Birch), seguidas de fases longas de limitação hídrica que restringem o processo; com mais cobertura e reagregação (pousio), parte desse N passa a ser imobilizado e protegido na MOS, atenuando oscilações (NOY-MEIR, 1973; SCHWINNING; SALA, 2004; KPEMOUA et al., 2023). Além disso, na Caatinga há contribuição, embora modesta, de fixação biológica de N (ordem de dezenas de kg N ha⁻¹ ano⁻¹), que tende a ser maior em vegetação secundária e pode ajudar a sustentar ganhos de N quando a cobertura se recompõe (MENEZES et al., 2012). Em termos de manejo, os resultados do seu gráfico sugerem que manter o pousio, elevar a cobertura morta, reduzir enxurradas e estimular componentes leguminosos (para

favorecer FBN) são estratégias consistentes para elevar e estabilizar o N — especialmente nas áreas atualmente mais frias (p.ex., Picos). (MENEZES et al., 2012; SOUSA et al., 2012; SCHWINNING; SALA, 2004).

Na figura 3, observa-se que a relação C/N do solo nos seus pontos mostra um estreitamento entre 0–5 e 5–10 cm nas áreas de melhor desempenho (Marco, Pio IX, Capivara) e valores mais altos e heterogêneos onde o sistema está mais exposto (Picos) — padrão coerente com a trajetória de pousio: primeiro aumenta o C superficial; com o aumento de cobertura e atividade microbiana, cresce a imobilização de N e a razão C/N tende a estabilizar em patamares moderados também em 5–10 cm. Em caatingas, a dinâmica do tipo pulso–reserva (chuvas curtas intercaladas por longas secas) favorece oscilações iniciais e, à medida que a cobertura se recompõe, a qualidade da MOS melhora e a C/N se ajusta, indicando acoplamento entre os ciclos de C e N (MENEZES et al., 2012; NOY-MEIR, 1973; SCHWINNING; SALA, 2004; COSTANTINI et al., 2016).

Figura 3. Relação C/N sob diferentes estágios de pousio em solo sob uso de mineração na Caatinga piauiense



Do ponto de vista mecanístico, a C/N sinaliza a direção líquida do N: resíduos e MOS com C/N estreita tendem à mineralização líquida de N, enquanto C/N ampla favorece imobilização — a “regra dos ~24–25:1” é útil para entradas orgânicas, embora a predição com base apenas na C/N seja limitada em solos, pois composição química (lignina/polifenóis) e matriz mineral modulam a estabilização (USDA/UC-Davis, 2011; GEISSELER, 2021; BENGTSSON et al., 2003). Assim, o fato de as áreas

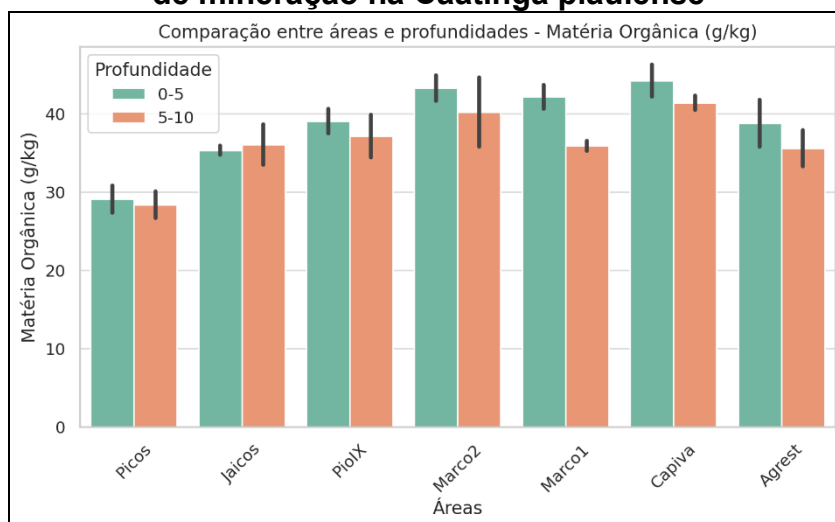
com maior fração fina (Marco, Pio IX, Capivara) exibirem C/N mais estável entre camadas sugere avanço para estados persistentes de SOM — com associação organo-mineral e microagregação sustentando tanto C quanto N — ao passo que Picos mantém C/N mais alta e variável, compatível com substrato arenoso, baixa proteção e maior risco de perdas entre pulsos (HASSINK, 1997; SIX et al., 2002). Em termos de manejo, manter o pousio, elevar cobertura morta e estimular fontes de N reativo (ex.: leguminosas) tendem a estreitar e estabilizar a C/N nas áreas mais frágeis.

Na figura 4, fica retratado que a MOS acompanha o comportamento do carbono orgânico (C) entre áreas e profundidades, com níveis mais altos e continuidade vertical nas áreas de melhor desempenho (as de maior fração fina e melhor cobertura) e valores menores e mais heterogêneos nas áreas mais arenosas/expostas. Esse padrão é esperado: a estabilização da MOS decorre (i) da proteção física por oclusão em microagregados e (ii) das associações organo-minerais em superfícies de silte + argila; logo, solos com mais fração fina tendem a armazenar e manter mais matéria orgânica, com menor variância espacial (SIX et al., 2002; HASSINK, 1997). Em contexto semiárido e sob pousio, a recomposição de cobertura e a maior atividade biológica favorecem o acúmulo e a persistência da MOS, reduzindo perdas por erosão e escoamento — tendência já demonstrada para a Caatinga (ALMEIDA et al., 2017). Em síntese, as diferenças que você observa entre áreas e camadas refletem mecanismos conhecidos de proteção da MOS e a efetividade do repouso produtivo em promover recuperação funcional do solo.

É válido lembrar que MOS e C não são sinônimos: muitos laboratórios reportam C e derivam MOS por um fator (clássico 1,724, assumindo 58% de C na MOS), porém esse fator não é universal e pode superestimar/subestimar conforme o método e a composição da matéria orgânica; quando possível, privilegie valores medidos ou discuta explicitamente a conversão (PRIBYL, 2010). Integrando essa cautela aos seus resultados, o aumento de MOS nas áreas sob pousio e com maior fração fina é coerente com a visão MEMS: entradas lábis podem produzir SOM mais estável quando a eficiência microbiana e a matriz mineral oferecem “sítios” de estabilização — exatamente o que diferencia as áreas de maior desempenho das mais arenosas (COTRUFO et al., 2013). Assim, a MOS na Figura 4 funciona como um sinal composto:

traduz aporte + estabilização, indica trajetória de restauração e ancora decisões de manejo (manter/conectar “hotspots”, tratar “coldspots” com cobertura e insumos orgânicos).

Figura 4. Matéria orgânica sob diferentes estágios de pousio em solo sob uso de mineração na Caatinga piauiense

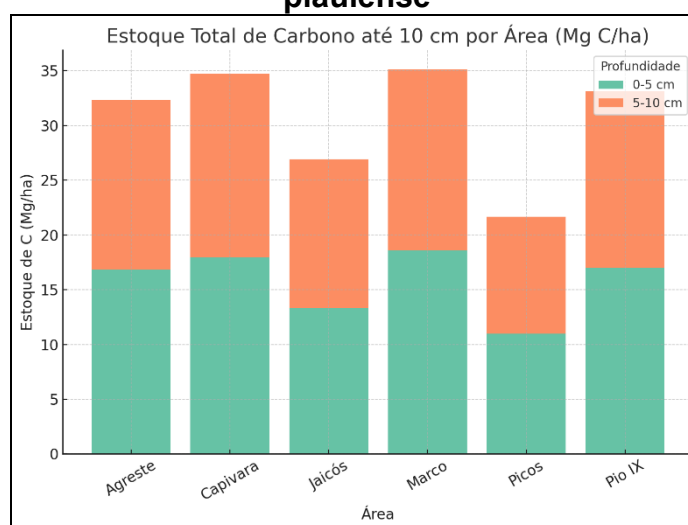


O estoque 0–10 cm consolida o gradiente entre áreas observado nos demais indicadores: Marco, Pio IX e Capivaraformam o bloco superior, com maiores estoques e pequena diferença entre as camadas (Figura 5); Agreste e Jaicós ocupam posição intermediária; Picos mantém a cauda, com distância nítida dos demais. Esse “empate técnico” no topo, somado à convergência vertical (0–5 $\approx$ 5–10 cm), sugere que os ganhos superficiais já estão estabilizados e propagados para 5–10 cm nesses três sítios; no grupo intermediário, a propagação é parcial; em Picos, ainda incipiente (Figura 5).

A análise integrada com os indicadores anteriores reforça o mecanismo: (i) a MOS (Fig. 4) acompanha o C e é mais alta/contínua onde há mais fração fina (silte+argila), elevando a capacidade de saturação e a proteção organo-mineral; (ii) o N (Fig. 2) co-varia com o C, mas responde de forma mais conservadora, aproximando-se do patamar superficial à medida que a cobertura e a agregação retornam; (iii) a relação C/N (Fig. 3) tende a estabilizar nos sítios de melhor desempenho, sinalizando acoplamento dos ciclos e qualidade da MOS; e (iv) as superfícies espaciais(krigagens/interpolações; Fig. 6) mostram que os hotspots de estoque são

amplos e contíguos em Marco–Pio IX–Capivara, médios e intermitentes em Agreste–Jaicós, e escassos/fragmentados em Picos. Em termos de manejo, o estoque 0–10 cm evidencia onde a restauração já está robusta (conservar e conectar hotspots), onde está em consolidação (direcionar facilitação pontual) e onde requer ação prioritária (Picos: aumentar cobertura, difusores de energia de enxurradas, aportes orgânicos), alinhando avaliação e MRV de PRADs.

Figura 5. Estoque total de carbono acumulado na camada de 10cm sob diferentes estágios de pousio em solo sob uso de mineração na Caatinga piauiense

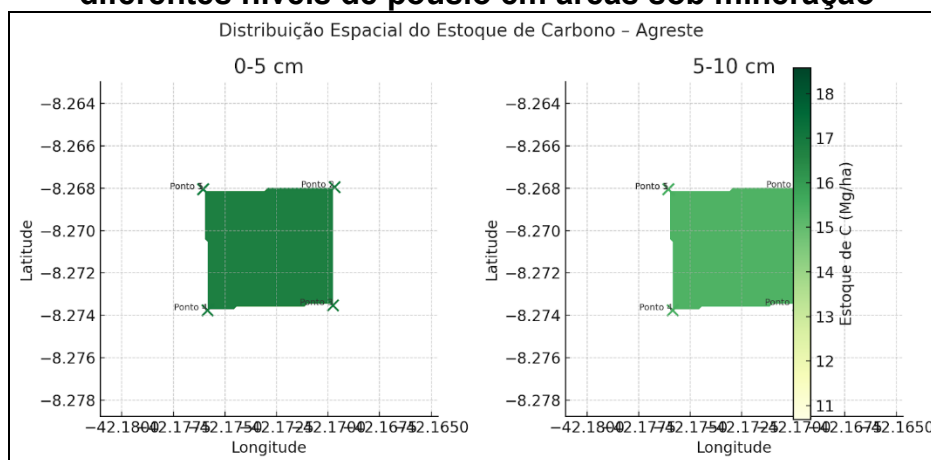


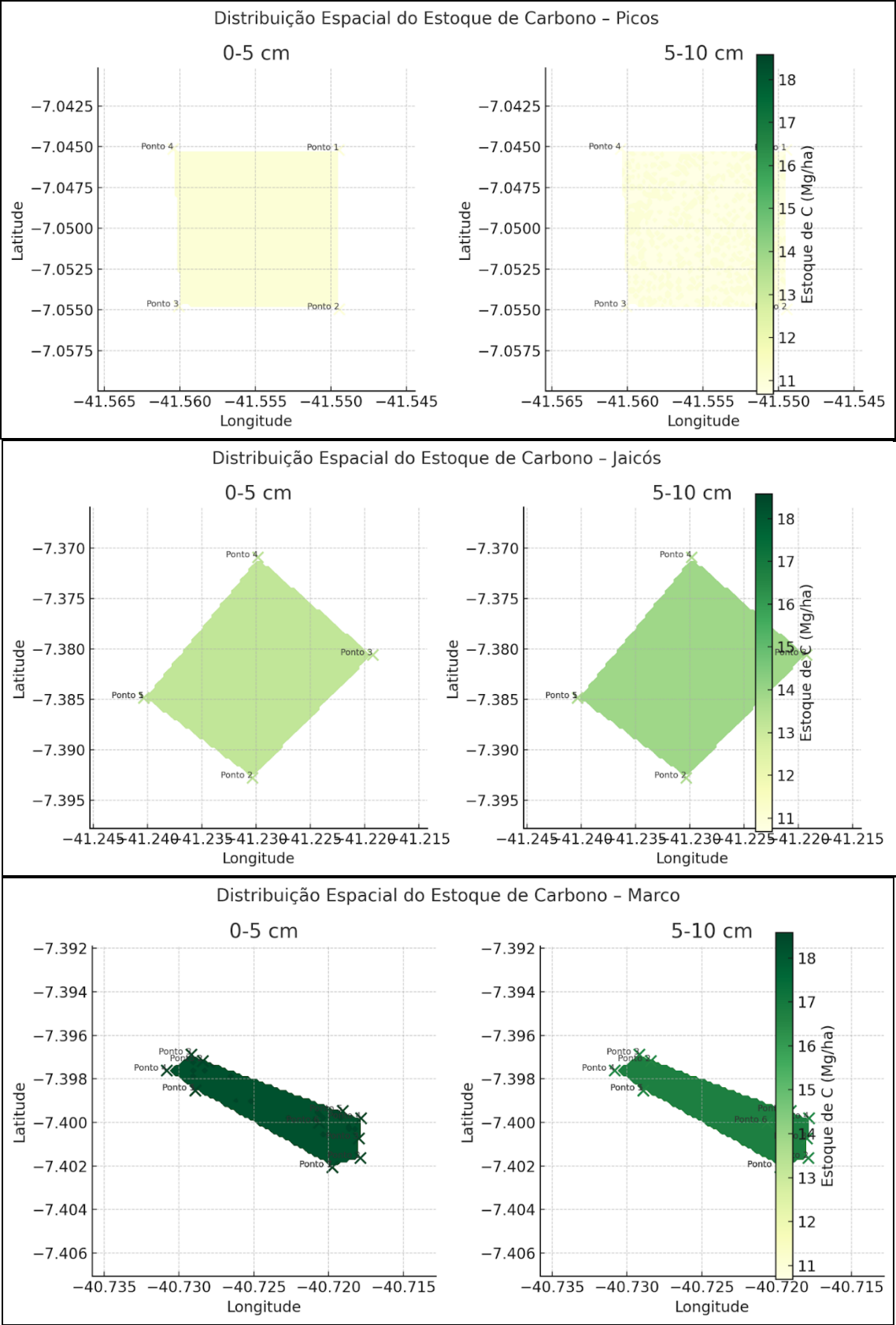
Referente a distribuição espacial do carbono, considerando a mesma escala de cores, as krigagens explicitam um continuum espacial de recuperação entre as áreas. No topo do gradiente, Marco, Pio IX e Capivara exibem hotspots extensos, transições graduais e consistência vertical entre 0–5 e 5–10 cm, sugerindo que o ganho superficial de carbono já está estabilizado e propagado na subsuperfície — cenário compatível com maior fração fina (mais sítios de sorção e microagregação) e com pousio efetivo reduzindo perdas por escoamento (HASSINK, 1997; SIX et al., 2002; ALMEIDA et al., 2017). Um resultado intermediário formado por Agreste e Jaicós apresenta mosaicos mistos: faixas contínuas de valores moderados interrompidas por coldspot residuais, coerentes com condições texturais intermediárias e/ou cobertura ainda heterogênea. Na base, Picos mantém fragmentação e predominância de valores baixos, com ilhas quentes pouco conectadas e fraca coerência entre camadas — padrão típico de substratos mais arenosos/expostos, onde a proteção organo-mineral é limitada e a dinâmica pulso–reserva acentua oscilações e perdas (NOY-MEIR, 1973;

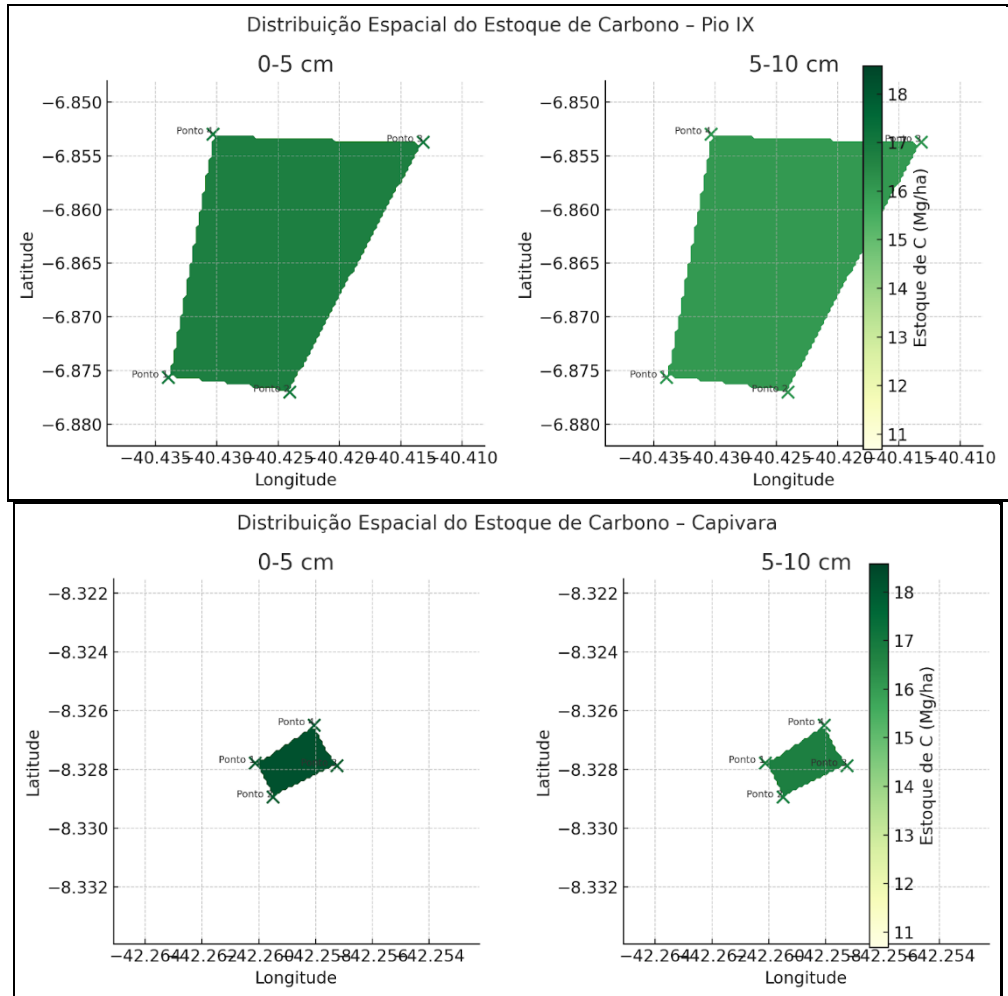
SCHWINNING; SALA, 2004). Do ponto de vista metodológico, a krigagem (ou GPR) suaviza ruído local e preserva tendências, permitindo comparação justa entre áreas quando se usa escala cromática global e apoiando inferências sob malhas amostrais parcimoniosas (McBRATNEY; MENDONÇA-SANTOS; MINASNY, 2003; OLIVEIRA; GREGO; BRANDÃO, 2016).

Em termos de gestão e MRV (medição, reporte e verificação), os mapas indicam onde conservar e conectar núcleos de alto estoque (Marco/Pio IX/Capivara), onde intensificar facilitação para fechar lacunas (Agreste/Jaicós: cobertura morta, adições orgânicas, dissipadores de energia em trechos frios) e onde priorizar ação para mudar de patamar (Picos). A leitura integrada com os demais indicadores do seu estudo reforça essa hierarquia: a MOS acompanha os hotspots (proteção físico-química), o N co-varia de modo mais conservador e a C/N tende a estabilizar nas áreas de melhor desempenho, sinalizando acoplamento dos ciclos e qualidade da SOM (COTRUFO et al., 2013; COSTANTINI et al., 2016). Para próximos ciclos de monitoramento, recomenda-se densificar amostras nas zonas de transição (maior incerteza), mapear incerteza/RMSE da krigagem e medir pb por ponto (não apenas por área) para refinar o cálculo de estoque — práticas consolidadas em Cartografia Digital de Solos e geoestatística aplicada (McBRATNEY; MENDONÇA-SANTOS; MINASNY, 2003; OLIVEIRA; GREGO; BRANDÃO, 2016).

Figura 6. Distribuição espacial de estoque de carbono por krigagem sob diferentes níveis de pousio em áreas sob mineração







Em termos de gestão e MRV (medição, reporte e verificação), os mapas indicam onde conservar e conectar núcleos de alto estoque (Marco/Pío IX/Capivara), onde intensificar facilitação para fechar lacunas (Agreste/Jaicós: cobertura morta, adições orgânicas, dissipadores de energia em trechos frios) e onde priorizar ação para mudar de patamar (Picos). A leitura integrada com os demais indicadores do seu estudo reforça essa hierarquia: a MOS acompanha os hotspots (proteção físico-química), o N co-varia de modo mais conservador e a C/N tende a estabilizar nas áreas de melhor desempenho, sinalizando acoplamento dos ciclos e qualidade da SOM (COTRUFO et al., 2013; COSTANTINI et al., 2016). Para próximos ciclos de monitoramento, recomenda-se densificar amostras nas zonas de transição (maior incerteza), mapear incerteza/RMSE da krigagem e medir pb por ponto (não apenas por área) para refinar o cálculo de estoque — práticas consolidadas em Cartografia Digital de Solos e

geoestatística aplicada (McBRATNEY; MENDONÇA-SANTOS; MINASNY, 2003; OLIVEIRA; GREGO; BRANDÃO, 2016).

4 CONCLUSÕES

Assinatura edáfica do impacto minerário: Observou-se redução de C, N e MOS, heterogeneidade espacial aumentada e quebra da coerência vertical (0–5 vs. 5–10 cm) nas áreas mais afetadas, com destaque para Picos, que apresentou baixos estoques e elevada fragmentação.

Controle textural da estabilização do carbono: A fração fina (silte+argila) modula a resposta do sistema: Marco, Pio IX e Capivara exibem estoques mais altos, menor variância e propagação vertical do C, indicando maior capacidade de estabilização organo-mineral; substratos arenosos amplificam perdas e descontinuidade.

Indicador extensivo de avaliação: O estoque 0–10 cm integra concentração, densidade e profundidade efetivamente afetada, constituindo métrica robusta e comunicável para avaliar a intensidade do impacto da mineração sobre a qualidade do solo em ambientes semiáridos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. L. de; ARAÚJO, J. C. de; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, A. M. M. de; ANDRADE, E. M. Fallow reduces soil losses and increases carbon stock in **Caatinga. Floresta e Ambiente**, v. 24, e20160175, 2017. Disponível em: <https://www.floram.org/article/doi/10.1590/2179-8087.017516>. Acesso em: 9 set. 2025. ResearchGate
- COSTANTINI, E. A. C.; BRANQUINHO, C.; NUNES, A.; SCHWILCH, G.; STAVI, I.; VALDECANTOS, A.; ZUCCA, C. Soil indicators to assess the effectiveness of restoration strategies in dryland ecosystems. **Solid Earth**, v. 7, p. 397–414, 2016. Disponível em: <https://se.copernicus.org/articles/7/397/2016/>. Acesso em: 9 set. 2025. SciELO
- KPEMOUA, T. P. I. et al. Accurate evaluation of the Birch effect requires continuous monitoring. **Soil Biology and Biochemistry**, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003807172300069X>. Acesso em: 9 set. 2025. ScienceDirect
- MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. M. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, supl. 3, p. 643–653, 2012. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/bjb/a/h5ZZj4G3qGY9mgbczwRW9rw/>. Acesso em: 9 set. 2025. SciELO

NOY-MEIR, I. Desert ecosystems: environment and producers. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, p. 25–51, 1973. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.es.04.110173.000325>. Acesso em: 9 set. 2025. PubMed

SCHWINNING, S.; SALA, O. E. Thresholds, memory, and seasonality: understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems. **Oecologia**, v. 141, p. 191–193, 2004. Disponível em: https://cales.arizona.edu/research/schwinn/downloads/Schwinn_et%202004a.pdf. Acesso em: 9 set. 2025.

SOUSA, F. P.; FERREIRA, T. O.; MENDONÇA, E. S.; ROMERO, R. E.; OLIVEIRA, J. G. B. Carbon and nitrogen in degraded Brazilian semi-arid soils undergoing desertification. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 148, p. 11–21, 2012. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/63334/1/2012_art_fpsousa.pdf. Acesso em: 9 set. 2025.

BENGTSSON, G.; BARKER, J.; RAIKAR, D. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification-rates as a function of soil C/N ratio and microbial growth. **Soil Biology and Biochemistry**, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071702002481>. Acesso em: 9 set. 2025.

COSTANTINI, E. A. C. et al. Soil indicators to assess the effectiveness of restoration strategies in dryland ecosystems. **Solid Earth**, v. 7, p. 397–414, 2016. Disponível em: <https://se.copernicus.org/articles/7/397/2016/>. Acesso em: 9 set. 2025.

GEISSELER, D. Nitrogen mineralization from organic fertilizers and composts: A systematic review. **Journal of Environmental Quality**, 2021. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jeq2.20295>. Acesso em: 9 set. 2025.

HASSINK, J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. **Plant and Soil**, v. 191, p. 77–87, 1997. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1004213929699>. Acesso em: 9 set. 2025.

MENEZES, R. S. C. et al. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, supl. 3, p. 643–653, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/h5ZZj4G3qGY9mgbczwRW9rw/>. Acesso em: 9 set. 2025.

NOY-MEIR, I. Desert ecosystems: environment and producers. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, p. 25–51, 1973. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.es.04.110173.000325>. Acesso em: 9 set. 2025. [annualreviews.org](https://www.annualreviews.org)

SCHWINNING, S.; SALA, O. E. Thresholds, memory, and seasonality: understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems. **Oecologia**, v. 141, p. 191–193, 2004. Disponível em: https://cales.arizona.edu/research/schwinn/downloads/Schwinn_et%20al2004a.pdf. Acesso em: 9 set. 2025.

SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155–176, 2002. Disponível em: <https://lter.kbs.msu.edu/citations/2579>. Acesso em: 9 set. 2025. ScienceDirect
USDA/UC-DAVIS. Carbon to Nitrogen Ratios in Cropping Systems. 2011. Disponível em: https://soilhealth.ucdavis.edu/application/files/6715/4222/0656/USDA_C_to_N_ratios.pdf. Acesso em: 9 set. 2025.

ALMEIDA, C. L. de; ARAÚJO, J. C. de; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, A. M. M. de; ANDRADE, E. M. Fallow reduces soil losses and increases carbon stock in Caatinga. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e20160175, 2017. Disponível em: <https://www.floram.org/article/doi/10.1590/2179-8087.017516>. Acesso em: 9 set. 2025.

COTRUFO, M. F.; WALLENSTEIN, M. D.; BOOT, C. M.; DENEFF, K.; PAUL, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization. **Global Change Biology**, v. 19, n. 4, p. 988–995, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.12113>. Acesso em: 9 set. 2025.

HASSINK, J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. **Plant and Soil**, v. 191, p. 77–87, 1997. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1004213929699>. Acesso em: 9 set. 2025.

PRIBYL, D. W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, v. 156, p. 75–83, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706110000388>. Acesso em: 9 set. 2025.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155–176, 2002. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1016125726789>. Acesso em: 9 set. 2025.

ALMEIDA, C. L. de; ARAÚJO, J. C. de; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, A. M. M. de; ANDRADE, E. M. Fallow reduces soil losses and increases carbon stock in Caatinga. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e20160175, 2017.

COSTANTINI, E. A. C.; BRANQUINHO, C.; NUNES, A. et al. Soil indicators to assess the effectiveness of restoration strategies in dryland ecosystems. **Solid Earth**, v. 7, p. 397–414, 2016.

COTRUFO, M. F.; WALLENSTEIN, M. D.; BOOT, C. M.; DENEFF, K.; PAUL, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization. **Global Change Biology**, v. 19, n. 4, p. 988–995, 2013.

HASSINK, J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. **Plant and Soil**, v. 191, p. 77–87, 1997.

McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On Digital Soil Mapping. **Geoderma**, v. 117, p. 3–52, 2003.

NOY-MEIR, I. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v. 4, p. 25–51, 1973.

OLIVEIRA, R. P. de; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. Geoestatística aplicada na Agricultura de Precisão utilizando o VESPER. Brasília, DF: Embrapa, 2016.

SCHWINNING, S.; SALA, O. E. Thresholds, memory and seasonality: understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems. **Oecologia**, v. 141, p. 191–193, 2004.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155–176, 2002.

APÊNDICE C - PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO DA REGENERAÇÃO NATURAL EM ÁREAS DE CAATINGA

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A Caatinga é reconhecida como um dos biomas brasileiros mais ameaçados, sofrendo históricas pressões de uso e degradação. Diferentemente de outros biomas, a principal causa de perda florestal na Caatinga tem sido a exploração intensiva de lenha por pequenas propriedades e indústrias locais, resultando em desmatamento difuso e processos de desertificação em áreas vulneráveis.

A remoção da vegetação nativa acarreta erosão do solo e perda de biodiversidade, agravando a fragilidade ecológica do bioma. Apesar deste cenário, estudos e iniciativas recentes demonstram que é possível recuperar a funcionalidade ecológica da Caatinga por meio de técnicas adequadas de restauração com espécies nativas. A regeneração natural desponta como um método de restauração potencialmente eficaz e de baixo custo em áreas onde há remanescentes vegetais e banco de sementes capazes de recompor a vegetação nativa ao longo do tempo. Esse método baseia-se no restabelecimento espontâneo da cobertura vegetal em terras degradadas ou abandonadas, formando florestas secundárias semeadas pelo próprio ambiente.

Entretanto, o sucesso da regeneração natural depende de diversos fatores ecológicos e antrópicos. Nas condições semiáridas da Caatinga, a disponibilidade hídrica intermitente e a alta incidência de calor impõem limites ao recrutamento e crescimento das plantas. Estresse hídrico e solos rasos e pobres em nutrientes são característicos do bioma, exigindo adaptações das espécies e influenciando o ritmo da sucessão ecológica. Além disso, o histórico de uso da área e a proximidade de fontes de propágulos (fragmentos florestais preservados nas adjacências) afetam diretamente a capacidade de regeneração.

Áreas que sofreram menor uso agropecuário e que possuem maior cobertura vegetal no entorno tendem a regenerar com mais qualidade e rapidez, muitas vezes dispensando intervenções humanas. Por outro lado, em locais onde a degradação eliminou o banco de sementes ou introduziu espécies exóticas invasoras (como

gramíneas africanas), a regeneração natural pode ser lenta ou insuficiente sem auxílio (e.g., controle de invasoras ou plantio facilitador).

Diante desses desafios, o monitoramento sistemático da regeneração natural torna-se essencial para avaliar o progresso da restauração e embasar decisões de manejo adaptativo. A definição de indicadores ecológicos mensuráveis permite verificar se a área em regeneração está caminhando em direção a uma condição desejável de estrutura e função ecológica. Em outras palavras, é preciso responder: a área degradada está efetivamente recuperando a densidade, diversidade e biomassa características de um ecossistema saudável? Para tal, este protocolo estabelece um conjunto de métricas de avaliação da regeneração natural em áreas de Caatinga, aliadas a procedimentos padronizados de coleta de dados em campo. Tais métricas oferecerão parâmetros quantificáveis do sucesso da restauração, permitindo comparações ao longo do tempo e entre áreas distintas.

Vale destacar que o uso de múltiplos indicadores é fundamental. Quando analisados isoladamente, indicadores de estrutura vegetal (como riqueza de espécies ou cobertura) podem levar a interpretações equivocadas sobre o grau de restabelecimento dos processos ecológicos. Por exemplo, uma área pode apresentar número de espécies próximo ao original, mas carecer de regeneração em certos estratos ou de funções ecológicas críticas (dispersão de sementes, ciclagem de nutrientes, etc.). Assim, combinar diversos indicadores oferece uma visão mais holística da sustentabilidade do ecossistema em recuperação. Este protocolo adota essa abordagem integrada, alinhada a propostas na literatura de restauração ecológica que enfatizam a avaliação conjunta de parâmetros de composição, estrutura e função do ecossistema (e.g., matriz de indicadores de Rigueira & Mariano-Neto).

Em síntese, a contextualização reforça a importância de se padronizar métodos de avaliação da regeneração natural na Caatinga. Além de gerar conhecimento científico sobre a trajetória sucessional no bioma, a aplicação desse protocolo orientará práticas de manejo adaptativo, identificando precocemente necessidades de intervenção (como enriquecimento com plantio, controle de espécies invasoras ou cercamento para exclusão de perturbações). Adicionalmente, resultados monitorados poderão subsidiar políticas públicas e cumprimento de obrigações legais de restauração. Indicadores claros conferem segurança técnica para atestar quando a

regeneração natural cumpriu seu papel como método de restauração, algo essencial para proprietários rurais, órgãos ambientais e projetos de compensação florestal.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste protocolo são estabelecer diretrizes padronizadas para a avaliação quantitativa e qualitativa da regeneração natural em áreas de Caatinga, de forma a apoiar o monitoramento ecológico e a tomada de decisões em projetos de restauração. Especificamente, busca-se:

- a. Padronizar métricas e métodos de campo para mensurar a regeneração natural, incluindo indicadores de composição (riqueza de espécies), estrutura (densidade de regenerantes, cobertura vegetal) e função ecossistêmica (acúmulo de biomassa e carbono).**
- b. Fornecer fórmulas e procedimentos para o cálculo de índices sintéticos;**
- c. Orientar a formatação de dados em tabelas e relatórios técnicos, garantindo consistência na apresentação dos resultados (ex.: densidade em ind/ha, biomassa em \$kg/ha\$, porcentagem de cobertura, etc.), com tabelas formatadas claramente com bordas e cabeçalhos descritivos.**
- d. Definir a periodicidade de monitoramento e os equipamentos necessários, facilitando a replicabilidade do protocolo por diferentes equipes em campo, e assegurando que as avaliações sejam comparáveis ao longo do tempo.**
- e. Subsidiar a avaliação adaptativa e o cumprimento de metas: ao comparar os valores obtidos com referências científicas ou metas predefinidas, permitir inferir se a área em regeneração alcançou condição satisfatória ou se requer ações corretivas. Isso contribui para atestar a eficácia da regeneração natural como método de restauração, alinhando-se a metas ambientais regionais e nacionais (e.g., compromissos de recuperação de vegetação nativa).**

Em suma, o protocolo objetiva servir como um guia técnico completo para profissionais e pesquisadores envolvidos na recuperação de áreas degradadas na Caatinga, assegurando rigor metodológico e confiabilidade nos dados obtidos. A seguir, são detalhados os métodos e indicadores propostos.

3. AVALIAÇÃO DA REGENERAÇÃO NATURAL: MÉTODOS E INDICADORES

Nesta seção são descritos os indicadores ecológicos selecionados para monitorar a regeneração natural na Caatinga, bem como os métodos de campo e fórmulas para seu cálculo. As principais métricas avaliadas incluem: densidade de regenerantes, riqueza de espécies, cobertura vegetal, o Índice de Sustentabilidade da Regeneração Natural (ISRN) e estimativas de estoque de carbono e biomassa de serrapilheira. Cada indicador é definido a seguir, com sua relevância ecológica, forma de medição e formulação matemática quando aplicável. As Tabela 1 e Tabela 2 (adiante) sintetizam respectivamente os indicadores e os detalhes operacionais (equipamentos e frequência) do monitoramento.

3.1. DENSIDADE DE REGENERANTES

Procedimento de Medição da Densidade de Regenerantes

Para a avaliação da densidade de regenerantes, devem ser demarcadas parcelas amostrais de área conhecida dentro do sítio em regeneração. Recomenda-se, por exemplo, o uso de parcelas de 100 m² (10 m × 10 m) ou outra dimensão adequada, distribuídas aleatoriamente ou sistematicamente conforme a heterogeneidade da área.

Dentro de cada parcela, contabilizam-se todos os indivíduos regenerantes arbustivo-arbóreos, utilizando critérios pré-definidos, como altura superior a 20 cm e diâmetro à altura do peito (DAP) inferior a 5 cm, excluindo-se as plantas herbáceas não lenhosas. Embora a identificação botânica dos regenerantes seja recomendável para a obtenção de outras métricas, no cálculo da densidade basta o registro numérico total.

Cálculo da Densidade de Regenerantes

A densidade de regenerantes foi expressa em número de indivíduos por hectare (ind/ha), o que permite comparações padronizadas entre áreas amostrais. O cálculo da densidade em cada parcela seguiu a fórmula:

$$DD_{\text{parcela}} = N_{\text{indivíduos}} / A_{\text{parcela}}$$

em que $N_{\text{indivíduos}}$ corresponde ao número de regenerantes observados na parcela e A_{parcela} representa a área da parcela em metros quadrados (m^2).

Para converter o valor obtido em ind/ha, multiplica-se o resultado por 10.000, visto que 1 hectare equivale a 10.000 m^2 :

$$DD_{\text{ha}} = (N_{\text{indivíduos}} / A_{\text{parcela}}) \times 10.000$$

Como exemplo, em uma parcela de 100 m^2 , onde foram registrados 30 regenerantes, a densidade extrapolada resulta em:

$$DD_{\text{ha}} = (30 / 100) \times 10.000 = 3.000 \text{ ind/ha}$$

Esse valor pode ser comparado a referências de densidade de ecossistemas saudáveis ou às metas estabelecidas para projetos de restauração. Densidades muito baixas (inferiores a 500 ind/ha após vários anos) podem indicar limitações na regeneração natural, enquanto densidades elevadas sugerem bom potencial de preenchimento do espaço por vegetação nativa.

3.2 RIQUEZA DE ESPÉCIES

A riqueza de espécies é a contagem do número de espécies vegetais nativas presentes entre os regenerantes amostrados. Trata-se de um indicador de diversidade florística fundamental: quanto maior o número de espécies, mais diversa e potencialmente resiliente é a comunidade em regeneração, pois um ecossistema biodiverso tende a ser funcionalmente equilibrado. Além disso, a presença de múltiplas espécies indica sucesso na chegada e estabelecimento de propágulos variados (via banco de sementes do solo ou dispersão alóctone).

Procedimento de medição:

Concomitantemente ao censo de regenerantes para densidade, realiza-se a identificação taxonômica dos indivíduos, atribuindo-os a espécies (ou gêneros/grupos ecológicos, caso a identificação precisa não seja possível em campo). Recomenda-

se que a identificação seja feita por um botânico ou mediante comparações com guias florísticos regionais. Todos os regenerantes arbustivo-arbóreos devem ser identificados, incluindo eventualmente aqueles não classificados como "árvores" tradicionais (lianas lenhosas, por exemplo), de modo a capturar a diversidade vegetal completa. Após a identificação, conta-se o total de espécies distintas na parcela ou no conjunto de parcelas.

A riqueza de espécies (S) geralmente é expressa como o número total de espécies encontradas por área (seja no nível de cada parcela ou em toda a área monitorada). Pode-se apresentar a riqueza média por parcela e a riqueza total do sítio. O cálculo não envolve fórmulas complexas, mas sim uma contagem distinta de categorias taxonômicas:

$$S = \text{número de espécies identificadas na amostra}$$

Por exemplo, se em uma parcela foram registrados indivíduos pertencentes a 8 espécies distintas, $S = 8$ para aquela parcela. Em 10 parcelas, pode-se obter, hipoteticamente, uma riqueza total de 15 espécies (considerando a composição combinada). É importante notar que a riqueza aumenta com a área amostrada (espécies raras podem aparecer em parcelas adicionais). Assim, a comparação entre áreas deve considerar esforços amostrais equivalentes.

Para fins de avaliação da regeneração, compara-se a riqueza observada com valores de referência esperados. Pesquisas indicam, por exemplo, que após 20 anos de regeneração em florestas tropicais, espera-se pelo menos 34 espécies por 100 indivíduos amostrados. Na Caatinga, bioma naturalmente menos diverso que a Amazônia, os números de referência podem ser inferiores. Ainda assim, a tendência esperada é de aumento contínuo na riqueza ao longo dos anos iniciais da sucessão, seguido de estabilização conforme o ecossistema amadurece.

3.3 COBERTURA VEGETAL

A cobertura vegetal expressa a proporção da área do solo que se encontra coberta pela projeção vertical da vegetação (copas de regenerantes, serapilheira acumulada, arbustos, etc.), em oposição a solo exposto. É um indicador simples da

estrutura física da regeneração, relacionado ao sombreamento, microclima e proteção do solo contra erosão. No contexto da regeneração natural, podemos desdobrar este indicador em dois componentes de interesse: cobertura do dossel nativo (pelas copas das espécies lenhosas em regeneração) e cobertura de gramíneas/herbáceas oportunistas. Uma alta cobertura de copas nativas é desejável, enquanto uma alta cobertura de gramíneas exóticas é indesejável, pois pode indicar competição e degradação persistente.

Procedimento de medição:

A avaliação da cobertura pode ser realizada por métodos diretos ou estimativas visuais. Três abordagens comuns são: (a) Fotografia aérea ou drone obtém imagens zenitais da área e calcula, via processamento digital, o percentual de solo coberto por vegetação; (b) Spherical densiometer ou canopy scope instrumentos ópticos manuais que estimam fração de cobertura do dossel olhando para o céu a partir do chão; (c) Método de pontos ou transectos lineares define-se uma série de pontos regularmente espaçados no solo ou ao longo de um transecto e registra-se em quantos pontos há cobertura vegetal acima (ponto "sombreado"). Este último método é simples: por exemplo, estica-se uma corda de 50 m no solo e, a cada 50 cm, anota-se se há ou não copa projetada naquele ponto. Se em 100 pontos 60 estiverem sombreados, estima-se 60% de cobertura.

Cálculo da Cobertura

De modo geral, a cobertura é expressa em porcentagem (%). Pode ser separada por estrato (cobertura arbórea vs. herbácea), caso seja de interesse para o monitoramento. Um método amplamente utilizado é o método de pontos:

$$\text{Cobertura(\%)} = (\text{n}^\circ \text{ de pontos com cobertura} / \text{n}^\circ \text{ total de pontos observados}) \times 100$$

No caso de estimativas visuais ou fotográficas, o cálculo é análogo, substituindo 'pontos com cobertura' pela área coberta medida e 'nº total de pontos' pela área total da foto.

Por exemplo, numa parcela de 10 m × 10 m, se visualmente estima-se que aproximadamente 40% do solo está sob a sombra das copas dos regenerantes, anota-se Cobertura do dossel = 40%. Paralelamente, pode-se estimar a cobertura por gramíneas invasoras: se gramíneas recobrem cerca de 20% do solo, esse valor indica pressão de competidores não desejados.

Uma tendência positiva na regeneração seria o aumento da cobertura arbórea nativa e a redução da cobertura de gramíneas exóticas ao longo do tempo. Idealmente, após anos de regeneração, o dossel das espécies nativas deve fechar significativamente, atingindo patamares comparáveis a áreas de referência, enquanto as clareiras dominadas por capim devem diminuir.

3.5 ESTOQUE DE CARBONO (BIOMASSA ARBÓREA)

O estoque de carbono em uma área em regeneração natural está diretamente relacionado à biomassa vegetal acumulada, especialmente na forma de troncos, galhos e raízes das espécies lenhosas. À medida que a vegetação regenera e cresce, ela incorpora carbono atmosférico em sua biomassa através do processo de fotossíntese, funcionando como um sumidouro de carbono e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Assim, a quantificação do carbono estocado é uma métrica de função ecossistêmica importante, indicando não apenas o progresso estrutural (aumento de biomassa) mas também o serviço ambiental prestado pelo ecossistema em recuperação.

Procedimento de medição:

A forma mais acurada de estimar biomassa e carbono em vegetação arbórea é por meio de equações alométricas que relacionam dimensões mensuráveis das plantas (diâmetro, altura, densidade da madeira) com a massa de matéria seca. No contexto de regeneração natural, geralmente os indivíduos são jovens e de porte relativamente menor, o que facilita medições diretas de altura e diâmetro do caule. Para cada parcela amostral, procede-se assim: mede-se o DAP (diâmetro à altura do peito, 1,30 m) de todos os indivíduos com DAP acima de um limiar (ex.: >3 cm), e/ou o diâmetro ao nível do solo para indivíduos menores; anota-se também a altura total de uma sub-amostra ou de todos indivíduos, conforme viabilidade. Com esses

dados e conhecendo-se a espécie (ou ao menos a densidade da madeira típica do grupo), aplica-se uma fórmula alométrica apropriada.

Estimativa de Biomassa

Para a Caatinga, podem ser utilizadas equações específicas desenvolvidas para florestas secas tropicais. Um exemplo de equação aplicada é:

$$\text{Biomassa acima do solo (kg)} = a \times (\text{DAP})^b$$

em que 'a' e 'b' são coeficientes determinados empiricamente para as espécies locais, tendo sido empregados em estudos regionais.

Outra abordagem consiste no uso de equações genéricas pan-tropicais (como as propostas por CHAVE et al., 2014), que incorporam o DAP, a altura e a densidade da madeira como variáveis.

Cálculo:

Uma vez estimada a biomassa seca total por indivíduo, soma-se a biomassa de todos os indivíduos da parcela para obter a biomassa aérea na parcela, e extrapola-se para hectare (assim como na densidade, multiplicando pelo fator de área). Por fim, converte-se biomassa em carbono multiplicando por um fator. Em geral, assume-se que aproximadamente 47-50% da biomassa seca é carbono (valor médio para tecidos lenhosos). Aqui adotaremos 50% por simplicidade de cálculo.

Exemplo de Estimativa de Biomassa e Carbono

Suponha que em uma parcela de 100 m² as estimativas alométricas resultaram em 8 kg de biomassa seca total de lenhosas. Extrapolando para hectare: 8 kg × 100 = 800 kg/ha de biomassa (ou 0,8 tonelada por hectare). O estoque de carbono correspondente é 50% disso, ou seja, 400 kg C/ha, equivalente a 0,4 t C/ha. Esse número tende a aumentar com a sucessão; em estágios avançados de regeneração na Caatinga, valores de dezenas de toneladas de biomassa por hectare podem ser alcançados.

Em florestas secundárias úmidas, como comparação, metas de 123 toneladas de biomassa por hectare após 20 anos foram sugeridas como indicativo de sucesso. Na Caatinga, os valores absolutos são menores devido ao porte das espécies, mas o princípio de acompanhamento é similar.

Para simplificar o monitoramento, caso os recursos sejam limitados, o protocolo permite usar dados de área basal como aproximação do carbono. A área basal (m^2/ha) é a soma das seções transversais dos troncos por hectare e pode ser correlacionada à biomassa.

Se não for possível aplicar equações alométricas em todas as campanhas, medir o DAP de cada árvore e obter a área basal total da parcela já fornece um proxy: aumentos na área basal ao longo do tempo indicam ganho de biomassa e carbono na regeneração.

Em resumo, o estoque de carbono é calculado a partir da biomassa aérea estimada e serve como indicador agregado do desenvolvimento estrutural e funcional da vegetação regenerante.

Tabela 1 - Indicadores de regeneração natural avaliados e suas definições

INDICADOR	DEFINIÇÃO (O QUE MEDE)	UNIDADE	RELEVÂNCIA NA RESTAURAÇÃO
Densidade de regenerantes	Número de indivíduos lenhosos regenerantes por área.	ind/ha	Indica o grau de ocupação do espaço e sucesso de estabelecimento.
Riqueza de espécies	Número de espécies nativas presentes entre os regenerantes.	contagem (espécies)	Reflete a diversidade florística e potencial de resiliência.
Cobertura vegetal	Percentual de solo coberto por	% (porcentagem)	Relaciona-se à estrutura do

	vegetação (dossel, etc.).		habitat e sombreamento do solo.
Cobertura de gramíneas*	Percentual de solo coberto por gramíneas/invasoras.	% (porcentagem)	Alto valor indica competição indesejada e risco de degradação.
Biomassa acima do solo	Massa seca da vegetação lenhosa por hectare (árvores).	Mg/ha (toneladas/ha)	Relaciona-se ao estoque de carbono e estrutura florestal.
Estoque de carbono	Carbono contido na biomassa vegetal (aprox. 50% da biomassa).	Mg C/ha	Indica serviços climáticos (sequestro de CO ₂) da restauração.

Obs.: A cobertura de gramíneas não é um indicador 'positivo' de restauração, mas sim um indicador de pressão adversa. É monitorada para assegurar que esteja em declínio (ou baixa) conforme a regeneração avança. Idealmente, não ultrapassar 10-20% do solo após os primeiros anos.

4. EQUIPAMENTOS E PERIODICIDADE DO MONITORAMENTO

Para a aplicação eficiente deste protocolo, são necessários alguns equipamentos básicos de campo, bem como o estabelecimento de uma periodicidade de monitoramento adequada. A tabela a seguir resume os principais itens e cronogramas recomendados:

Tabela 2 - Componentes de monitoramento, equipamentos, periodicidade e observações

Componente	Equipamentos e materiais	Periodicidade recomendada	Observações
------------	--------------------------	---------------------------	-------------

Delimitação de parcelas	Estacas, trena de 50 m, bússola/GPS, fita marcadora	Instalação única (início do monitoramento)	Demarcar parcelas permanentes para avaliações sucessivas.
Identificação de espécies	Guias florísticos, lupa, etiquetas/marcadores	Sempre que amostrar regenerantes	Coletar amostras botânicas se necessário (herbário auxiliar).
Densidade/Riqueza/Cobertura	Fichas de campo, prancheta, câmera fotográfica, densiômetro (opcional)	Anual, preferencialmente no fim da estação chuvosa (pós-surto de recrutamento)	Contagens e estimativas visuais devem ocorrer na mesma época todo ano para comparabilidade.
DAP e altura (Biomassa)	Fita diamétrica ou paquímetro, hipsômetro (ou régua telescópica)	Bianual (a cada 2 anos) ou anual, dependendo do crescimento	Em estágios iniciais, medições anuais podem mostrar pouca variação; bianual reduz esforço.
Registro de dados e fotos	Câmera/fotógrafo, GPS (georreferenciamento de pontos fotográficos)	Anual (ou semestral), junto com trabalhos de campo	Fotografias panorâmicas das parcelas ajudam na avaliação qualitativa visual do progresso.
Controle de interferências	Não se aplica – mas monitorar sinais de pastoreio, fogo, etc.	Contínuo (em visitas de rotina, junto com monitoramentos)	Registrar ocorrências de distúrbios que possam afetar a regeneração, para consideração na análise dos resultados.

EQUIPAMENTOS ADICIONAIS:

Além dos listados, é recomendável o uso de EPI (equipamento de proteção individual) para a equipe de campo: botas, perneiras (devido a vegetação espinhosa

da Caatinga), protetor solar, chapéu, água, etc. Uma caixa de ferramentas com facão, canivete, cordas e arame pode ser útil para abrir caminhos e marcar parcelas. Caso haja possibilidade, drones podem ser empregados para obter fotos aéreas complementares para análise de cobertura.

PERIODICIDADE E DURAÇÃO DO MONITORAMENTO:

Sugerimos que o monitoramento se estenda por pelo menos 5 anos, com avaliações anuais conforme indicado. Em muitos projetos de restauração, considera-se um horizonte de 5 a 10 anos para verificar o estabelecimento da vegetação e a necessidade (ou não) de intervenções adicionais. Monitoramentos por períodos mais longos são desejáveis, pois a sustentabilidade de um ecossistema restaurado só pode ser assegurada se seus processos ecológicos mantêm-se ao longo das décadas. No entanto, reconhecemos limitações práticas, portanto, um ciclo mínimo de 5 anos já fornece dados suficientes para avaliar tendências iniciais de sucesso ou estagnação da regeneração natural.

Durante cada campanha anual de monitoramento, é importante que a mesma metodologia seja repetida rigorosamente, para garantir comparabilidade temporal. Idealmente, a equipe de avaliação deveria incluir ou treinar os mesmos observadores para reduzir vieses (por exemplo, na estimativa visual de cobertura). Qualquer mudança de protocolo ou critérios ao longo do tempo deve ser documentada no relatório técnico.

Por fim, ressalta-se que os resultados do monitoramento devem ser periodicamente analisados e discutidos à luz dos objetivos. Por exemplo, se após 3 anos a riqueza de espécies estacionou bem abaixo do esperado, pode-se cogitar enriquecimento com mudas ou semeadura direta de espécies ausentes. Se a cobertura de invasoras permanece alta, pode-se intensificar seu controle. O protocolo, portanto, não é apenas descritivo, mas instrumental para retroalimentar o manejo adaptativo, aumentando as chances de sucesso da restauração ecológica na Caatinga

REFERÊNCIAS

GILES, A. L. et al. Simple ecological indicators benchmark regeneration success of Amazonian forests. **Communications Earth & Environment**, v. 5, p. 780, 2024.

LIMA, P. A. F. et al. **Indicadores ecológicos: ferramentas para o monitoramento do processo de restauração ecológica**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2015. 46 p. (Documentos, 327).

RESENDE, A. S.; CHAER, G. M. (Ed.). **Manual para recuperação de áreas degradadas por extração de piçarra na Caatinga**. Seropédica, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2010. 78 p.

RIGUEIRA, D. M. G.; MARIANO-NETO, E. Monitoramento: uma proposta integrada para avaliação do sucesso em projetos de restauração ecológica em áreas florestais brasileiras. **Revista Caititu**, v. 1, n. 1, p. 73-88, 2013.

RODRIGUES, R. R. et al. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica**: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal. São Paulo: LERF/ESALQ; Instituto BioAtlântica, 2009.

RUIZ-JAEN, M. C.; AIDE, T. M. Restoration success: how is it being measured?. **Restoration Ecology**, v. 13, n. 3, p. 569-577, 2005.

SCIELO BRAZIL. Potencial da regeneração natural como método de restauração do entorno de nascente perturbada. **Cerne**. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cerne/a/9HgpwdwG35NzZh9CvNyMJBC/>>. Acesso em: 8 set. 2025.

SCIELO BRAZIL. Aporte e decomposição da serrapilheira na Caatinga no sul do Piauí. **Floresta e Ambiente**. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/floram/a/vrxvNKFZ3bhDDHDXnw7cKnS/>>. Acesso em: 8 set. 2025.

EMBRAPA. Pesquisa propõe indicadores simples para avaliar a regeneração da Floresta Amazônica. **Portal Embrapa**, 2024. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/98312777/pesquisa-propoe-indicadores-simples-para-avaliar-a-regeneracao-da-floresta-amazonica>>. Acesso em: 8 set. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC. Indicadores para monitorar regeneração natural propostos por pesquisa da UFSC ajudam recuperação da Amazônia. **Notícias UFSC**, 2025. Disponível em: <<https://noticias.ufsc.br/2025/01/indicadores-para-monitorar-regeneracao-natural-propostos-por-pesquisa-da-ufsc-ajudam-recuperacao-da-amazonia/>>. Acesso em: 8 set. 2025.