INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAPÁ
CURSO DE TECNOLOGIA EM MINERAÇÃO
CAMPUS MACAPÁ

ANDRIELLY STHEFANI DA SILVA MARTINS
JEAN CARLOS LEÃO SOBRINHO

IMPACTOS AMBIENTAIS E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS EM MINERAÇÃO: estudo preliminar aplicado a empreendimentos de mineração

MACAPÁ
2026

ANDRIELLY STHEFANI DA SILVA MARTINS
JEAN CARLOS LEÃO SOBRINHO

IMPACTOS AMBIENTAIS E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS EM MINERAÇÃO: estudo preliminar aplicado a empreendimentos de mineração

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Mineração como requisito avaliativo para obtenção de título de Tecnólogo em Mineração.

Orientador: Esp. Vitor Lucas da Cunha Carneiro
Coorientador: Esp. Jefferson Gonçalves Farias

MACAPÁ
2026

Biblioteca Institucional - IFAP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L437i Leão Sobrinho, Jean Carlos

Impactos ambientais e recuperação de áreas degradas em mineração: estudo preliminar aplicado a empreendimentos de mineração / Jean Carlos Leão Sobrinho, Andrielly Sthefani da Silva Martins. - Macapá, 2026.
55 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá, Campus Macapá, Tecnologia em Mineração, 2026.

Orientador: Esp. Vitor Lucas da Cunha Carneiro.
Coorientador: Esp. Jefferson Gonçalves Farias.

1. Impactos ambientais. 2. Recuperação de áreas degradadas. 3. Sustentabilidade. I. Martins, Andrielly Sthefani da Silva. I. Carneiro, Esp. Vitor Lucas da Cunha , orient. II. Farias, Esp. Jefferson Gonçalves , coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica do IFAP com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

ANDRIELLY STHEFANI DA SILVA MARTINS
JEAN CARLOS LEÃO SOBRINHO

IMPACTOS AMBIENTAIS E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS EM MINERAÇÃO: estudo preliminar aplicado a empreendimentos de mineração

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Mineração como requisito avaliativo para obtenção de título de Tecnólogo em Mineração.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br VITOR LUCAS DA CUNHA CARNEIRO
Data: 18/03/2026 16:23:22-0300
verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador
Esp. Vitor Lucas da Cunha Carneiro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá

Documento assinado digitalmente
gov.br JEFFERSON GONCALVES FARIAS
Data: 18/03/2026 22:29:15-0300
verifique em https://validar.iti.gov.br

Coorientador
Esp. Jefferson Gonçalves Farias
Agência Nacional de Mineração

Documento assinado digitalmente
gov.br FRANCIOLLI DA SILVA DANTAS DE ARAUJO
Data: 11/03/2026 13:15:16-0300
verifique em https://validar.iti.gov.br

Avaliador
Dr. Franciolli Da Silva Dantas de Araújo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá

Avaliadora
Me. Lídia Dely Alves de Sousa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá

Apresentado em: 09/ 02/ 2026.

Conceito/Nota: 7,5

RESUMO

A mineração tem papel significativo na economia brasileira, especialmente em regiões interioranas e de menor desenvolvimento industrial. No entanto, essa atividade também é marcada por impactos ambientais consideráveis, tais como degradação do solo, contaminação hídrica, supressão da vegetação nativa e comprometimento da biodiversidade. Este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo analisar os principais impactos ambientais e identificar estratégias de recuperação de áreas degradadas, com ênfase em empreendimentos de pequeno porte. Para isso, foi realizada uma pesquisa de natureza qualitativa, com abordagem descritiva, baseada em revisão bibliográfica e documental, incluindo legislações, manuais técnicos e artigos científicos. Verificou-se que, apesar da obrigatoriedade legal de elaboração de Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), muitos empreendimentos ainda operam à margem da legislação ambiental, o que agrava o passivo ecológico. Dentre as técnicas mais eficazes de recuperação, destacam-se o uso do topsoil, a revegetação com espécies nativas, a recomposição topográfica e o monitoramento por geotecnologias. Conclui-se que, para consolidar uma mineração sustentável, é essencial integrar ações técnicas, políticas públicas, marcos legais atualizados e participação social efetiva. A adoção de um modelo minerário responsável, com planejamento ambiental desde o início das operações, não apenas minimiza os impactos negativos, como também transforma áreas degradadas em territórios produtivos e ecologicamente equilibrados. O estudo reforça a importância da governança ambiental e da transparência na atividade minerária, sobretudo quando associada a pequenos empreendimentos, cujo impacto cumulativo pode ser expressivo.

Palavras-chave: impactos ambientais; recuperação de áreas degradadas; sustentabilidade; PRAD.

ABSTRACT

Small-scale mining focused on the extraction of Construction aggregates minerals plays a significant role in the Brazilian economy, especially in inland regions with limited industrial development. However, this activity is also marked by considerable environmental impacts, such as soil degradation, water contamination, loss of native vegetation, and biodiversity reduction. This Final Course Paper aimed to analyze the main environmental impacts caused by Construction aggregates mining and to identify effective strategies for the recovery of degraded areas, particularly in small-scale enterprises. A qualitative and descriptive research approach was adopted, based on a literature and document review, including environmental laws, technical manuals, and scientific articles. It was found that, although the elaboration of a Recovery Plan for Degraded Areas (PRAD) is legally required, many small mining operations still function outside legal compliance, worsening the environmental liabilities. Among the most effective recovery techniques are the use of topsoil, revegetation with native species, topographic reconfiguration, and the use of geotechnology for monitoring. The study concludes that achieving sustainable mining requires integrating technical measures, updated environmental policies and legislation, and active social participation. When adequately planned from the outset, mining activities can not only reduce environmental damage but also promote the productive and ecological requalification of degraded areas. This research highlights the importance of environmental governance and transparency, especially in small-scale mining projects where cumulative impacts can be significant.

Keywords: environmental impacts; recovery of degraded areas; sustainability; PRAD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do estado do Amapá com localização da área de estudo. 15
Figura 2 - Ciclo da atividade minerária e principais impactos ambientais associados..... 23
Figura 3 - Jazida Mármore Paraná. 25
Figura 4 - Caminhões realizando controle de poeira. 30
Figura 5 - Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). 30
Figura 6 - Esquema sobre o mercado de carbono e recuperação de áreas degradadas..... 31
Figura 7 - Revegetação de taludes. 35
Figura 8 - Reconstrução das encostas de barragem de mineração realizado pela Embrapa. 40
Figura 9 - Biomanta para a estabilização de taludes. 41
Figura 10 - Cobertura vegetal nas áreas IV Beluno e II Ex-Patrimônio. 41
Figura 11 - Sistemas agroflorestais para recuperar solos degradados. 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos principais impactos ambientais da mineração. 23
Tabela 2 - Checklist técnico para execução do PRAD. 45
Tabela 3 – Síntese dos resultados esperados com a recuperação ambiental. 46
Tabela 4 - Detalhamento dos resultados esperados e indicadores de sucesso. 48

LISTA DE SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
APP	Área de Preservação Permanente
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração Mineral
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAM	Drenagem Ácida de Mina
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
ESG	Environmental, Social and Governance
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
MMA	Ministério do Meio Ambiente
ONG	Organização Não Governamental
PRAD	Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10

2 OBJETIVOS 13

2.1 Objetivo Geral 13

2.2 Objetivos específicos 13

3 METODOLOGIA 14

4 JUSTIFICATIVA 16

4.1 Avaliação dos impactos ambientais 16

5 REFERENCIAL TEÓRICO 18

5.1 Mineração e sua importância socioeconômica 18

5.2 Classificação dos bens minerais 20

5.3 Impactos decorrentes da mineração 22

5.4 Processos de degradação ambiental e métodos de mitigação 28

5.4.1 Medidas mitigatórias dos impactos da mineração 29

5.5 Estratégias de recuperação de áreas degradadas 34

5.6 Perspectivas futuras para uma mineração mais consciente 36

5.7 Técnicas de recuperação ambiental 39

5.8 Projeto de recuperação 43

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS ESPERADOS 46

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 52

REFERÊNCIAS 54

1 INTRODUÇÃO

A mineração representa uma das principais atividades econômicas do Brasil, sendo responsável por expressiva geração de empregos, arrecadação tributária e fornecimento de insumos para diversas cadeias produtivas. No entanto, essa atividade também se destaca pelos profundos impactos que provoca no meio ambiente, afetando negativamente os solos, corpos hídricos, biodiversidade e comunidades vizinhas às áreas de exploração (Bacci et al., 2006; CPRM, 2002). A Resolução CONAMA nº 01/86 define impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causadas por ações antrópicas que resultam em efeitos adversos sobre a saúde, o bem-estar e a segurança da população (Brasil, 1986). Tal definição se aplica com clareza ao setor minerário, cuja interferência sobre os ecossistemas naturais é expressiva e duradoura.

O problema ambiental gerado pela mineração está diretamente relacionado à remoção da cobertura vegetal, escavações intensivas e à disposição de rejeitos e estéreis, que modificam profundamente o relevo e os fluxos hídricos locais. Dentre os impactos mais graves está a contaminação de recursos hídricos por metais pesados, como mercúrio, chumbo e arsênio, os quais apresentam alta toxicidade e potencial de bioacumulação, afetando cadeias tróficas inteiras (IBRAM, 2022; ANM, 2023). Esse processo é agravado pela drenagem ácida de mina (DAM), fenômeno que ocorre quando minerais sulfetados entram em contato com a água e o oxigênio, resultando na liberação de íons metálicos altamente solúveis e em um ambiente de pH extremamente ácido (Environmental Protection Agency, 2006).

A degradação do solo também é uma consequência inevitável da atividade minerária, especialmente quando há a completa remoção da camada superficial, rica em matéria orgânica e microrganismos. Essa camada é essencial para a regeneração natural do ambiente, sendo a sua ausência um entrave à recuperação espontânea das áreas afetadas (Barreto, 2001). Conforme observa Amaral (2013), a estratégia de reutilização do topsoil quando disponível tem se mostrado eficiente na restauração de funções ecológicas básicas do solo, como retenção hídrica, ciclagem de nutrientes e suporte à vegetação nativa.

Nesse contexto, torna-se fundamental compreender a classificação dos bens minerais explorados no país, especialmente os que englobam os de uso imediato na construção civil. Segundo o Código de Mineração (Decreto-Lei nº 227/1967) e regulamentações da Agência Nacional de Mineração (ANM), esses minerais englobam substâncias como calcário, argila, areia, saibro e cascalho, geralmente empregadas na construção civil, agricultura e correção de solos. Por serem explorados, em grande parte, por empreendimentos de pequeno porte e

sob o regime de licenciamento têm menor visibilidade em estudos técnicos aprofundados, apesar de seu expressivo impacto cumulativo sobre o meio ambiente, sobretudo em regiões onde a atividade minerária é recorrente e pouco fiscalizada.

Neste estudo, o foco recai sobre os agregados minerais utilizados na construção civil, especialmente areia e seixo, classificados como substâncias minerais de emprego imediato conforme o Código de Mineração brasileiro. Esses materiais apresentam grande importância econômica, pois são amplamente utilizados na produção de concreto, argamassa, pavimentação e outras obras de infraestrutura. Apesar do baixo valor unitário, o elevado volume de produção e consumo torna esses agregados fundamentais para o desenvolvimento urbano e regional (Valverde, 2001; ANEPAC, 2016).

Diante da gravidade dos impactos causados pela mineração, torna-se urgente compreender os desafios enfrentados na execução de medidas de recuperação ambiental, especialmente em territórios onde a atividade mineral foi intensa e prolongada. Um dos principais instrumentos legais nesse processo é o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), exigido por força da Instrução Normativa IBAMA nº 04/2011. Esse plano deve apresentar, de forma detalhada, as ações de contenção de danos, recomposição da vegetação e monitoramento ambiental, considerando as especificidades de cada local (Almeida, 2016).

Além da reabilitação física e biológica dos ecossistemas minerados, há também um debate crescente sobre a viabilidade técnica e econômica dessas ações. Estudos recentes apontam para a necessidade de integrar aspectos sociais e jurídicos no planejamento do fechamento de minas, visando reduzir os passivos ambientais e assegurar o uso futuro do solo em conformidade com os princípios da sustentabilidade (Sánchez; Silva-Sánchez, 2013; Marina, 2021). Nessa perspectiva, a recuperação não deve se limitar à recomposição paisagística, mas sim promover a resiliência ecológica e a valorização social dos espaços afetados.

A legislação ambiental brasileira, ancorada na Constituição Federal de 1988, reforça o dever do Estado e da sociedade de garantir um meio ambiente ecologicamente equilibrado para as presentes e futuras gerações (Brasil, 1988). Com base nesse preceito, normas como a Lei nº 6.938/1981 e o Decreto nº 97.632/1989 consolidam a obrigatoriedade de práticas sustentáveis e o licenciamento ambiental como pré-requisito à exploração mineral. Todavia, a efetividade dessas normas ainda depende da fiscalização adequada e do comprometimento das empresas com a mitigação dos danos provocados (Brasil, 1989; Brasil, 1997).

Nos últimos anos, pesquisadores têm voltado sua atenção à avaliação da eficiência dos

métodos aplicados na reabilitação de áreas mineradas. Simoni (2017), por exemplo, propõe o uso de análise multicritério para mensurar o desempenho ambiental de áreas recuperadas, levando em consideração variáveis ecológicas, sociais e econômicas. Nesse sentido, a abordagem integrada é essencial para garantir que a recuperação ambiental atinja níveis satisfatórios de funcionalidade ecológica e aceitação social.

Assim, este trabalho propõe-se a discutir os principais impactos causados pela mineração e analisar criticamente as estratégias adotadas para a recuperação de áreas degradadas, à luz da legislação vigente e das práticas mais recentes de restauração ambiental. Ao abordar essa problemática, busca-se evidenciar os entraves técnicos, legais e institucionais enfrentados por gestores e órgãos ambientais, bem como apontar caminhos possíveis para a consolidação de uma mineração mais sustentável e comprometida com a conservação ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar, de forma preliminar, os impactos ambientais decorrentes, e identificar práticas e técnicas de recuperação de áreas degradadas, com ênfase na conservação do solo e revegetação com espécies nativas.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar os principais impactos ambientais associados à atividade minerária, com ênfase na extração de agregados no estado do Amapá;
- Analisar as características da exploração de areia e seixo no município de Porto Grande, considerando seus efeitos socioambientais;
- Apresentar métodos e técnicas utilizados na recuperação de áreas degradadas pela mineração;
- Discutir a importância do planejamento ambiental e da sustentabilidade na atividade minerária no contexto regional amazônico;
- Refletir sobre perspectivas e boas práticas para a mitigação dos impactos ambientais da mineração no estado do Amapá.

3 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, com abordagem exploratória e caráter descritivo, pautada em uma revisão bibliográfica e documental. A metodologia adotada visa reunir e analisar conceitos, normas e práticas relacionadas aos impactos ambientais provocados pela mineração, bem como às técnicas de recuperação ambiental aplicáveis a essas áreas.

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento de literatura técnico-científica disponível em livros, artigos acadêmicos, dissertações, teses, legislações ambientais e documentos oficiais de órgãos como a Agência Nacional de Mineração (ANM), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA).

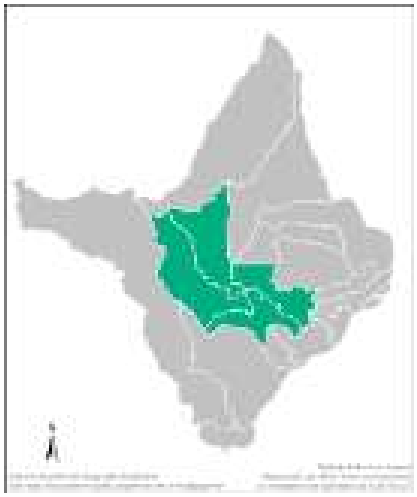
Além disso, foram consultados estudos de caso e manuais técnicos que abordam práticas de recuperação de áreas degradadas, com ênfase na conservação do solo e revegetação com espécies nativas. A análise dos dados teve como objetivo identificar os principais impactos ambientais associados à mineração de pequeno porte e sistematizar as estratégias e instrumentos mais utilizados para mitigação e recuperação dessas áreas. Por se tratar de um estudo preliminar, não foram realizadas coletas de campo ou análises laboratoriais, mas sim uma sistematização conceitual que possa fundamentar estudos futuros de caráter mais aplicado.

3.1 Caracterização da área de estudo

O estado do Amapá localiza-se na região Norte do Brasil e apresenta grande diversidade geológica associada ao Escudo das Guianas e a depósitos sedimentares recentes. A mineração no estado ocorre principalmente em depósitos aluvionares e lateríticos, sendo explorados recursos como ouro, ferro e agregados minerais utilizados na construção civil.

No contexto da mineração de agregados, destacam-se depósitos de areia e seixo presentes em sistemas fluviais, especialmente em municípios próximos aos centros urbanos. O município de Porto Grande destaca-se como um importante polo de extração desses materiais, contribuindo para o abastecimento da construção civil nas cidades de Macapá e Santana (ANM, 2023; CPRM, 2022).

Figura 1 - Mapa do estado do Amapá com localização da área de estudo.



Fonte: IBGE.

Do ponto de vista geológico e ambiental, determinadas regiões do estado apresentam elevada vulnerabilidade ambiental, sobretudo em áreas associadas a depósitos sedimentares recentes e sistemas fluviais. Nessas áreas, atividades minerárias mal planejadas podem intensificar processos erosivos, assoreamento de cursos d'água e degradação da cobertura vegetal, exigindo maior rigor no planejamento ambiental e na aplicação de medidas de controle e recuperação.

4 JUSTIFICATIVA

A mineração é uma atividade essencial para o desenvolvimento econômico e social, estando presente em diversos aspectos do cotidiano da sociedade moderna. No entanto, quando realizada sem o devido planejamento e controle ambiental, especialmente por empreendimentos de pequeno porte, pode causar sérios impactos ao meio ambiente, como degradação do solo, perda da cobertura vegetal, alteração de corpos hídricos e prejuízos à biodiversidade local.

Os minerais, apesar de geralmente serem associados a atividades de menor escala, representam uma parcela significativa da produção mineral brasileira e frequentemente estão ligados a áreas rurais e comunidades com recursos técnicos limitados para gestão ambiental. Por esse motivo, a compreensão dos impactos causados por esses empreendimentos e a disseminação de práticas eficazes de recuperação ambiental são fundamentais para a promoção de uma mineração mais sustentável.

Diante disso, este trabalho justifica-se pela necessidade de reunir, de forma sistematizada, conceitos e informações relevantes sobre os impactos ambientais e as possibilidades de recuperação de áreas degradadas em empreendimentos de pequeno porte, com foco na conservação do solo e revegetação com espécies nativas. Além de contribuir para a formação de uma base conceitual sólida, a pesquisa também pode servir de referência para gestores, técnicos e estudantes da área, incentivando práticas ambientalmente responsáveis no setor mineral.

4.1 Avaliação dos impactos ambientais

A avaliação dos impactos ambientais associados à atividade minerária foi realizada por meio de análise qualitativa baseada em revisão bibliográfica e aplicação de métodos de identificação de impactos ambientais utilizados em estudos ambientais. Entre esses métodos destaca-se a listagem de controle (checklist), que permite identificar de forma sistemática os principais impactos decorrentes das atividades de mineração.

Esse método consiste na identificação das etapas da atividade minerária e na análise dos possíveis efeitos sobre os componentes ambientais, incluindo solo, água, ar, fauna e flora. A aplicação dessa metodologia possibilita compreender as relações entre as atividades de extração mineral e os impactos ambientais associados, contribuindo para proposição de medidas mitigadoras e estratégias de recuperação ambiental.

A utilização de métodos sistemáticos de avaliação de impactos ambientais é amplamente recomendada em estudos relacionados à mineração, pois permite organizar as informações de forma estruturada e apoiar a tomada de decisões voltadas à gestão ambiental e ao planejamento da recuperação de áreas degradadas (Sánchez, 2013; IBRAM, 2022).

5 REFERENCIAL TEÓRICO

5.1 Mineração e sua importância socioeconômica

A mineração desempenha papel estratégico na economia brasileira, contribuindo com a geração de empregos, arrecadação de tributos e fornecimento de matérias-primas essenciais para diversas cadeias produtivas. Dentre os diferentes tipos de recursos explorados, como areia, argila, calcário e cascalho se destacam pelo grande volume de produção e pela sua aplicação direta em setores fundamentais como a construção civil, a agricultura e a indústria de base (ANM, 2022).

Esses minerais são essenciais para a produção de cimento, tijolos, telhas, concretos e corretivos agrícolas. O calcário, por exemplo, é amplamente utilizado para a correção da acidez do solo, sendo indispensável para a prática da agricultura em grandes extensões territoriais, sobretudo em regiões com solos naturalmente ácidos, como o Cerrado brasileiro (Santos; Vanderlei, 2024). Já a areia e a argila são insumos fundamentais para a construção civil e a fabricação de cerâmicas, refletindo diretamente no crescimento urbano e habitacional.

Mesmo sendo classificados como de baixo valor agregado, os minerais possuem grande importância econômica local. Em muitos municípios de pequeno e médio porte, essas atividades representam a principal fonte de renda e arrecadação tributária, especialmente por meio da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM), que incide também sobre substâncias utilizadas na construção civil (ANM, 2023).

Contudo, a exploração desses recursos, quando realizada sem critérios técnicos e sem fiscalização adequada, pode gerar sérios impactos socioambientais. As operações de mineração de areia, por exemplo, frequentemente causam assoreamento de rios, destruição de matas ciliares, alteração no curso natural das águas e degradação da fauna aquática, especialmente quando realizadas em áreas de preservação permanente (Silva; Santos; Oliveira, 2020).

A informalidade é um desafio recorrente nesse segmento. Muitos empreendimentos de pequeno porte não possuem licenciamento ambiental, plano de recuperação de áreas degradadas ou relatórios de impacto ambiental, o que compromete a gestão adequada dos passivos gerados (Pires; Amaral, 2021). Essa situação é comum sobretudo em zonas rurais e regiões economicamente vulneráveis, onde a fiscalização é deficiente ou inexistente.

Mesmo em empreendimentos licenciados, a degradação ambiental pode ocorrer em

função da intensidade da atividade e da falta de medidas de contenção e recuperação. Em estudo realizado na bacia do rio São João (RJ), Nunes (2022) demonstrou que a mineração de areia comprometeu a dinâmica do ecossistema aquático e intensificou o processo erosivo das margens fluviais, afetando inclusive a captação de água para abastecimento humano.

O impacto cumulativo também deve ser considerado. Diversas operações de pequeno porte, quando somadas em um mesmo território, podem gerar efeitos significativos sobre o uso do solo, a cobertura vegetal e a disponibilidade hídrica, conforme evidenciado por Martins, Souza e Almeida (2023) em levantamento sobre alterações no uso da terra em áreas de mineração no estado de Pernambuco.

Além dos danos ecológicos, os impactos sociais também são significativos. A proximidade entre áreas urbanas e zonas de mineração frequentemente gera conflitos com as comunidades locais, que enfrentam problemas como poeira, ruído, trânsito de veículos pesados e desvalorização imobiliária (Fagundes; Souza, 2024). Esses efeitos são agravados pela ausência de processos participativos na concessão de licenças e na definição das áreas de extração.

O Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) é apontado como instrumento fundamental para orientar a expansão da atividade minerária em consonância com os limites ecológicos e as vocações territoriais. A aplicação do ZEE no Mato Grosso do Sul demonstrou que a compatibilização entre conservação ambiental e desenvolvimento mineral é viável quando há planejamento intersetorial e mapeamento das fragilidades ecológicas (Freitas; Oliveira; Santos, 2023).

Além do ordenamento territorial, é essencial promover a capacitação técnica dos pequenos mineradores. Programas de extensão rural e assistência técnica podem contribuir significativamente para a adoção de boas práticas, como a recuperação de áreas exploradas, o manejo adequado do solo e a contenção da erosão (Costa; Silva; Oliveira, 2024). Essas ações reduzem os impactos negativos e aumentam a produtividade da atividade.

A utilização de tecnologias geoespaciais também se mostra eficiente para o monitoramento ambiental de lavras em operação. O uso de imagens de satélite e análise espectral tem permitido identificar alterações no uso do solo e vegetação em áreas sob influência da mineração, o que contribui para a fiscalização e planejamento ambiental (Almeida et al., 2023).

A legislação ambiental brasileira estabelece que a exploração mineral deve ser precedida de estudo de impacto ambiental e da devida regularização junto aos órgãos

competentes. No entanto, conforme demonstra Menezes (2024), muitos casos de passivos ambientais relacionados à mineração civil não são objeto de compensação ou responsabilização adequada, resultando em áreas degradadas de difícil recuperação.

A situação se agrava quando há sobreposição de áreas mineradas com Áreas de Preservação Permanente (APPs) e reservas legais, desrespeitando dispositivos legais como o Código Florestal. Em tese de doutorado, Menezes (2024) reforça que a ausência de planejamento e fiscalização efetiva perpetua a degradação e compromete a função ecológica dessas áreas.

Do ponto de vista da saúde pública, a exposição a poeira mineral, ruídos e águas contaminadas por sedimentos afeta diretamente as comunidades do entorno. Estudos apontam que a poluição do ar por partículas em suspensão, comum em áreas de mineração de argila e areia, contribui para o aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares (Rigotto, 2020).

É necessário reforçar que a mineração pode ser conduzida de forma ambientalmente sustentável, desde que sejam respeitados os princípios do planejamento territorial, da participação social e da recuperação ambiental. A consolidação de políticas públicas eficazes, associadas à governança participativa, é o caminho para equilibrar os benefícios socioeconômicos da mineração com a conservação dos recursos naturais (Oliveira; Santos; Silva, 2020).

5.2 Classificação dos bens minerais

A areia e o cascalho são utilizados, sobretudo, na fabricação de concreto, asfalto e argamassas. A argila, por sua vez, é base para a produção de blocos cerâmicos, telhas e pisos. Já o calcário agrícola é essencial para a correção da acidez do solo, promovendo o aumento da produtividade na agricultura nacional (Santos; Vanderlei, 2024).

Os agregados minerais correspondem principalmente à areia, ao seixo e à pedra britada. Esses materiais são considerados essenciais para a indústria da construção civil, sendo utilizados na produção de concreto, argamassa, pavimentação e diversas obras de infraestrutura. Em função do crescimento urbano e da expansão das atividades construtivas, a demanda por agregados minerais tem aumentado significativamente nas últimas décadas (PINHEIRO, 2016). Entre os principais agregados utilizados na construção civil destacam-se a areia e o seixo.

A areia é um material granular de origem mineral composto predominantemente por

quartzo, sendo classificada de acordo com sua granulometria em areia fina, média e grossa. Já o seixo corresponde a fragmentos de rochas geralmente arredondados ou semi-arredondados, resultantes de processos naturais de transporte e desgaste, sendo amplamente empregados em obras de drenagem, pavimentação e infraestrutura (VALVERDE, 2001; PINHEIRO, 2016).

Apesar de serem considerados recursos de baixo valor agregado, esses minerais são explorados em grande volume e com frequência em áreas próximas a centros urbanos. Sua extração depende menos de tecnologia sofisticada e mais da acessibilidade geográfica e logística, o que os torna atrativos para pequenos empreendimentos (Bezerra et al., 2020).

De acordo com dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), a maior parte dos processos minerários ativos no país refere-se à lavra, com destaque para areia, brita e argila. O Anuário Mineral Brasileiro de 2022 indica que esses bens representaram mais de 70% dos requerimentos de lavra nos estados do Sudeste e Nordeste (ANM, 2022).

Esses minerais são regulados de forma diferenciada em relação aos minérios metálicos. Por serem insumos de baixo valor unitário, o processo de licenciamento tende a ser mais simplificado, embora ainda exija estudos ambientais, outorga de uso da água (quando aplicável) e Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) (Freitas; Oliveira; Santos, 2023).

O problema é que, apesar da exigência legal, muitos mineradores não cumprem integralmente as etapas do processo de regularização, seja por desconhecimento, falta de assistência técnica ou tentativa deliberada de evitar custos operacionais. Esse cenário contribui para a informalidade e para o aumento do passivo ambiental da mineração de Classe II (Pires; Amaral, 2021).

Do ponto de vista técnico, a classificação dos bens minerais também leva em conta suas propriedades físicas e químicas. Os minerais tendem a apresentar baixo valor específico, alta densidade de extração e são, em geral, comercializados em função do volume e não do teor de substâncias de interesse, como ocorre com minérios metálicos (Silva; Santos; Oliveira, 2020).

Como são formados por processos sedimentares ou intempéricos, encontram-se em diversas regiões do território brasileiro, o que facilita sua exploração por pequenos produtores. No entanto, essa ampla distribuição não isenta a atividade dos riscos ambientais associados (Martins; Souza; Almeida, 2023).

A lavra desses bens pode gerar impactos diretos sobre a paisagem, os recursos hídricos e a biodiversidade. Estudos demonstram que a mineração de areia em leitos de rios altera o equilíbrio hidráulico e morfológico dos cursos d’água, enquanto a retirada de argila expõe o

solo à erosão e à compactação (Nunes, 2022).

Esses efeitos tornam evidente que a classificação de um bem mineral não deve ser tomada apenas pelo seu valor de mercado, mas também pelo potencial de dano associado à sua exploração. O risco ambiental de uma pequena pedreira mal manejada pode ser tão grave quanto o de uma grande mina metálica em operação (Fagundes; Souza, 2024).

Nesse sentido, a utilização de ferramentas de geotecnologia para o mapeamento e monitoramento de áreas mineradas tem se mostrado eficaz. A classificação espacial dos tipos de mineração em imagens de satélite tem permitido prever e mensurar impactos ambientais com maior precisão (Almeida et al., 2023).

Além disso, o estudo das propriedades físico-químicas desses minerais é fundamental para determinar sua viabilidade econômica e ambiental. A avaliação correta do tipo de argila ou calcário disponível em uma região permite selecionar métodos de extração menos impactantes e mais eficientes (Costa; Silva; Oliveira, 2024).

Nesse contexto, a atuação conjunta entre órgãos de controle, universidades e produtores é essencial para garantir que a mineração contribua para o desenvolvimento sem comprometer a integridade dos ecossistemas (Oliveira; Santos; Silva, 2020). A classificação adequada e o controle sobre a exploração dos bens minerais são, portanto, etapas fundamentais para a consolidação de uma atividade mineradora sustentável. A transparência nos processos, o planejamento ambiental e o cumprimento da legislação são pilares indispensáveis para que os minerais cumpram sua função econômica sem ampliar os passivos ambientais do país (Menezes, 2024).

No contexto da legislação mineral brasileira, substâncias como areia, cascalho, argila e saibro são classificadas como minerais de emprego imediato na construção civil. Esses materiais possuem baixo valor unitário, porém apresentam elevada demanda e grande volume de produção, sendo essenciais para obras de infraestrutura, habitação e desenvolvimento urbano. Devido à sua ampla distribuição geográfica e facilidade de extração, esses minerais são frequentemente explorados por empreendimentos de pequeno porte, o que exige maior atenção dos órgãos ambientais quanto ao controle e à fiscalização das atividades minerárias (ANM, 2023).

5.3 Impactos decorrentes da mineração

A mineração, embora essencial para o desenvolvimento econômico e tecnológico, é uma das atividades que mais provoca alterações ambientais em todas as suas fases

operacionais. Desde a prospecção e lavra até o beneficiamento e o fechamento da mina, diversas consequências ambientais são observadas, como a remoção da vegetação, a modificação do relevo, a poluição atmosférica, a contaminação hídrica e a degradação do solo (Silva; Santos; Oliveira, 2020; Costa; Silva; Oliveira, 2024). O uso de explosivos no desmonte de rochas, por exemplo, gera sobrepressão atmosférica, ruídos e a liberação de gases como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), os quais contribuem diretamente para o agravamento do efeito estufa (Environmental Protection Agency, 2006).

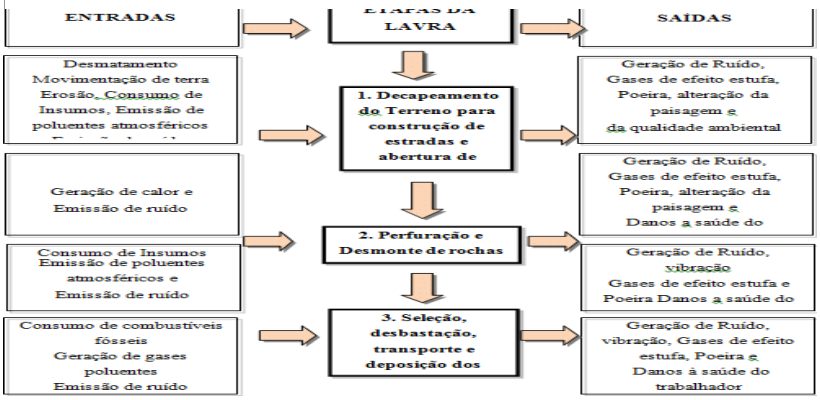
A atividade de extração de agregados minerais pode provocar diferentes impactos ambientais, especialmente quando realizada de forma inadequada ou sem planejamento ambiental. Entre os principais impactos associados à mineração de areia e seixo destacam-se a alteração da paisagem natural, a supressão da vegetação, o aumento da emissão de poeira decorrente do tráfego de caminhões e máquinas, além do assoreamento de cursos d'água e alterações na dinâmica dos solos (PINHEIRO, 2016).

Tabela 1 - Classificação dos principais impactos ambientais da mineração.

Tipo de impacto	Caracterização	Exemplos na mineração
Impactos físicos	Alterações nas características físicas do ambiente	alteração do relevo, erosão, assoreamento
Impactos químicos	Alterações na composição química do solo ou da água	contaminação por metais pesados, drenagem ácida de mina
Impactos biológicos	Alterações na fauna e flora	perda de biodiversidade, fragmentação de habitats
Impactos atmosféricos	Emissão de partículas e gases	poeira mineral, emissão de gases
Impactos socioeconômicos	Mudanças nas condições sociais e econômicas	geração de empregos, conflitos territoriais

Fonte: dos autores.

Figura 2 - Ciclo da atividade minerária e principais impactos ambientais associados.



Fonte: Adaptado de Sánchez (2013) e IBRAM (2022).

Os impactos ambientais decorrentes da atividade minerária podem ser classificados em diferentes categorias, conforme o componente ambiental afetado. Essa classificação permite compreender de forma sistemática os efeitos da mineração sobre o meio físico, biológico e socioeconômico. A identificação e organização desses impactos são fundamentais para o planejamento ambiental e para a definição de medidas mitigatórias e de recuperação de áreas degradadas (Sánchez, 2013; IBRAM, 2022).

A atividade minerária pode ser compreendida como um ciclo que envolve diferentes etapas, desde a prospecção mineral até o fechamento da mina e a recuperação da área explorada. Em cada uma dessas fases ocorrem diferentes tipos de impactos ambientais, que podem afetar o solo, a água, o ar e a biodiversidade. A identificação dessas etapas é fundamental para o planejamento ambiental e para a implementação de medidas mitigatórias adequadas, permitindo reduzir os impactos negativos e promover a recuperação das áreas degradadas ao final da atividade minerária (Sánchez, 2013; IBRAM, 2022).

Nesse contexto, os impactos decorrentes da atividade minerária podem ser observados em diferentes regiões do Brasil, inclusive no estado do Amapá, onde determinadas áreas apresentam processos de degradação ambiental associados principalmente à fragilidade ou à inexistência de fiscalização ambiental.

A degradação ambiental em determinadas áreas do estado do Amapá está associada, sobretudo, à fragilidade ou à inexistência de fiscalização ambiental. Esse cenário favorece a intensificação do garimpo ilegal, do desmatamento voltado à grilagem de terras e das ocupações irregulares, impactando de forma direta as unidades de conservação. Embora o Amapá se destaque no cenário nacional por apresentar baixos índices de desmatamento em grande parte de seu território, observa-se que o avanço do garimpo ilegal tem provocado danos significativos a áreas ambientalmente protegidas, como a Floresta Estadual do Amapá (Flota), além de comprometer o entorno de corpos hídricos, a exemplo do rio Cupixi, em razão do uso intensivo de maquinário pesado.

O Areal do Santo Antônio da Pedreira, localizado às margens da rodovia AP-070, no sentido do município de Tartarugalzinho, caracteriza-se como uma área destinada à extração de areia, atividade vinculada ao setor da construção civil. Em escala estadual, a exploração de recursos minerais dessa natureza ocorre também em municípios como Porto Grande e Ferreira Gomes, com destaque para áreas como o Morro Branco, onde se observa a presença de areais em operação.

A atividade de extração de areia, quando realizada de forma irregular ou sem o devido licenciamento ambiental, pode ocasionar diversos impactos ambientais, tais como a

degradação do solo, a alteração da paisagem, a supressão da vegetação, o assoreamento de cursos d'água e a intensificação de processos erosivos. Diante desse cenário, a extração ilegal de areia no estado do Amapá tem sido alvo de ações de fiscalização e repressão por parte da Polícia Federal, em conjunto com outros órgãos ambientais competentes, visando ao cumprimento da legislação ambiental vigente, especialmente no que se refere ao licenciamento ambiental e à proteção dos recursos naturais.

Diante disso, há a necessidade de futuras investigações que possibilitem a análise aprofundada da dinâmica da atividade de extração de areia no estado, bem como de seus impactos ambientais, socioeconômicos e legais. Nesse sentido, estudos posteriores poderão contribuir para a produção de dados técnicos e científicos que subsidiem o planejamento ambiental, o fortalecimento das políticas públicas e o aprimoramento das ações de fiscalização e gestão dos recursos naturais na região.

A abertura de cavas em empreendimentos minerários provoca impactos visuais e ecológicos relevantes, principalmente devido à supressão da cobertura vegetal e à exposição de solos e rochas, fatores que favorecem processos erosivos e o assoreamento de corpos hídricos (CPRM, 2022; ANM, 2023). Na Figura 3 observa-se um exemplo de área minerada com taludes e bancadas resultantes do processo de extração mineral.

Figura 3 - Jazida Mármore Paraná.



Fonte: PR Grupo Paraná, 2021.

Além disso, o transporte de minério e os processos de britagem e moagem liberam grandes quantidades de material particulado, alterando a qualidade do ar e podendo agravar problemas respiratórios em populações próximas (Simoni, 2017). No contexto da biodiversidade, os efeitos da mineração em larga escala são ainda mais severos. A supressão

de vegetação nativa implica na redução e fragmentação de habitats naturais, o que pode levar ao desaparecimento de espécies, muitas vezes endêmicas ou ameaçadas de extinção (Sánchez, 2013; IBRAM, 2022). A revegetação deve ser considerada uma etapa fundamental do processo de recuperação ambiental, pois permite a recomposição da cobertura vegetal e o restabelecimento gradual das funções ecológicas do ambiente degradado (IBRAM, 2022; CPRM, 2022).

A degradação do solo, por sua vez, está fortemente associada à retirada da camada superficial rica em matéria orgânica, essencial para a fertilidade e a estrutura física do solo. Essa retirada prejudica não apenas o desenvolvimento vegetal, mas também a microbiota edáfica, fundamental para os processos de decomposição e ciclagem de nutrientes (Almeida, 2016).

Além disso, os impactos ambientais da mineração estendem-se ao meio social. O aumento do tráfego de veículos pesados, a poluição sonora e a poeira impactam negativamente comunidades vizinhas, alterando sua qualidade de vida. Estudos como os de Mechi e Sanches (2010) destacam a relação entre essas alterações e o aumento de doenças respiratórias, estresse e distúrbios do sono em populações expostas continuamente à atividade mineral.

A poluição da água e do solo é uma das consequências mais diretas na biodiversidade local, pois são dois recursos-chave para a manutenção do ecossistema (Silva; Andrade, 2017) e, consequentemente, na sustentação dos serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar humano. A liberação de metais pesados oriundos da atividade minerária, como mercúrio, arsênio e chumbo, acarreta efeitos tóxicos severos à fauna e à flora aquática, afetando diretamente a qualidade da água e comprometendo cadeias tróficas (Bacci et al., 2006). Esses elementos, quando acumulados no ambiente, podem promover a biomagnificação, ampliando seu impacto nos níveis mais altos da cadeia alimentar, inclusive atingindo populações humanas por meio do consumo de água e pescado contaminados (Griffith, 1980; Sánchez, 2013).

No solo, os impactos são igualmente preocupantes. A remoção da camada superficial rica em matéria orgânica durante o processo de extração mineral resulta em alterações drásticas na estrutura e na fertilidade dos solos. Essa condição afeta diretamente a capacidade de regeneração da vegetação nativa e dificulta qualquer tentativa de revegetação espontânea (Almeida, 2016). A perda de microrganismos do solo compromete processos naturais como a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes, essenciais para o equilíbrio ecológico (Silva, Campagna e Lipp-Nissinen, 2018).

A degradação dos serviços ecossistêmicos decorrente dessas alterações afeta, inclusive, a recarga dos aquíferos subterrâneos e o regime hídrico da região afetada. A compactação do solo, somada à impermeabilização causada por resíduos e rejeitos, reduz a infiltração da água da chuva, ampliando os riscos de assoreamento e erosão, além de comprometer o abastecimento hídrico de comunidades locais (CPRM, 2022; ANM, 2023). Isso é ainda mais preocupante em regiões tropicais, onde a vegetação e o solo possuem papéis fundamentais na manutenção da umidade e no controle térmico (Barreto, 2001).

Um dos efeitos mais críticos da atividade mineradora é a formação da drenagem ácida de mina (DAM), que ocorre quando minerais sulfurados, como a pirita, entram em contato com água e oxigênio, gerando ácido sulfúrico e liberando metais pesados no meio ambiente (Sánchez, 2013). Esse processo, além de ser difícil de conter, tende a se perpetuar por décadas após o encerramento da atividade mineral, exigindo monitoramento constante e ações corretivas permanentes (Environmental Protection Agency, 2006).

A contaminação das águas por metais pesados afeta diretamente a fauna aquática, interferindo na reprodução, alimentação e sobrevivência das espécies. Espécies bioindicadoras, como peixes e macroinvertebrados bentônicos, sofrem impactos imediatos e severos, sendo extintas localmente ou substituídas por espécies mais resistentes, o que reduz a diversidade e empobrece o ecossistema (Silva et al., 2004). Além disso, a ingestão de água contaminada ou alimentos provenientes de áreas afetadas expõe populações humanas a doenças como intoxicação crônica, problemas neurológicos e câncer (Sánchez, 2013; IBRAM, 2022).

A poluição do solo, por sua vez, compromete o uso futuro da área para atividades produtivas, como agricultura e reflorestamento. Muitos dos metais pesados se acumulam em camadas mais profundas, atingindo o lençol freático e permanecendo ativos por longos períodos, o que torna a recuperação dessas áreas mais complexa e custosa (Simoni, 2017). Nesses casos, o planejamento e a execução do PRAD tornam-se essenciais para a reabilitação ambiental e a prevenção de novos danos (IBAMA, 2011).

As populações que vivem nas proximidades de áreas mineradas, principalmente aquelas em situação de vulnerabilidade socioeconômica, são as mais afetadas pelos impactos ambientais. Além da exposição a contaminantes, essas comunidades podem enfrentam perda de território, insegurança alimentar, escassez hídrica e danos à saúde física e mental (Souza, 2019). A degradação ambiental acarreta, portanto, não apenas danos ecológicos, mas também violações a direitos humanos fundamentais, como o direito ao meio ambiente equilibrado e à qualidade de vida (BRASIL, 1988).

Diante desse cenário, torna-se imprescindível que os empreendimentos minerários cumpram com as exigências legais estabelecidas pela Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981), que obriga o controle e mitigação dos impactos ambientais decorrentes de suas atividades (Brasil, 1981). Além disso, a Resolução CONAMA nº 237/1997 reforça a obrigatoriedade do licenciamento ambiental e do cumprimento dos condicionantes definidos pelos órgãos ambientais competentes (BRASIL, 1997).

Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de uma atuação mais eficaz por parte dos empreendimentos minerários, que devem incorporar à sua rotina operacional práticas que vão além do mero cumprimento normativo. A sustentabilidade ambiental demanda ações integradas e contínuas, pautadas na prevenção de danos, na correção de passivos ambientais e na promoção de soluções que assegurem o equilíbrio dos ecossistemas impactados. Tais ações requerem planejamento técnico, engajamento institucional e investimentos em soluções que promovam a recomposição ambiental, restaurando, na medida do possível, as condições naturais dos ambientes degradados.

5.4 Processos de degradação ambiental e métodos de mitigação

A degradação ambiental decorrente da mineração ocorre quando as atividades de extração provocam alterações significativas nas características físicas, químicas ou biológicas do ambiente. Essas alterações podem resultar na perda da cobertura vegetal, na redução da fertilidade do solo, na instabilidade geomorfológica e na alteração dos recursos hídricos, comprometendo o equilíbrio ecológico das áreas afetadas (RODRIGUES et al., 2009; PINHEIRO, 2016). A atividade minerária provoca diferentes processos de degradação ambiental, resultantes principalmente da remoção da cobertura vegetal, movimentação de solo e alteração do relevo natural. Esses processos podem gerar impactos significativos sobre os componentes físicos, químicos e biológicos do meio ambiente.

A identificação e avaliação dos impactos ambientais podem ser realizadas por meio de diferentes metodologias utilizadas na Avaliação de Impacto Ambiental (AIA). Entre os métodos mais utilizados destacam-se a listagem de controle (checklist), as matrizes de interação e a matriz de Leopold, que permitem relacionar as ações do empreendimento com os fatores ambientais afetados, contribuindo para a identificação e análise dos impactos positivos e negativos gerados pela atividade minerária (CARVALHO; LIMA, 2010; PINHEIRO, 2016).

Entre os principais impactos ambientais associados à mineração destacam-se a supressão da vegetação nativa, alteração da paisagem, compactação do solo, erosão,

assoreamento de cursos d'água e emissão de partículas atmosféricas provenientes do transporte de material. Em áreas de extração de agregados minerais, como areia e seixo, esses impactos estão frequentemente associados à exploração de depósitos aluvionares e à movimentação de grandes volumes de sedimentos.

Para minimizar esses efeitos, diferentes metodologias de controle e mitigação ambiental são aplicadas durante o planejamento e operação da atividade minerária. Entre essas medidas destacam-se a implementação de sistemas de drenagem superficial, controle de poeira por aspersão de água, revegetação de áreas degradadas, monitoramento ambiental e elaboração do PRAD.

Essas metodologias têm como objetivo reduzir os impactos ambientais da mineração e promover a recuperação das áreas exploradas, garantindo condições adequadas para o restabelecimento das funções ecológicas do ambiente afetado (Sánchez, 2013; IBRAM, 2022).

5.4.1 Medidas mitigatórias dos impactos da mineração

A adoção de medidas mitigatórias no contexto da mineração é fundamental para reduzir os impactos ambientais decorrentes da exploração de recursos minerais. Essas medidas devem ser planejadas e executadas desde a fase inicial dos empreendimentos, considerando o diagnóstico ambiental da área afetada, os riscos envolvidos, e as particularidades ecológicas e sociais do entorno. A legislação ambiental brasileira, especialmente a Lei nº 6.938/1981, estabelece a obrigatoriedade de ações voltadas à preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental, reforçando a necessidade de que os empreendimentos desenvolvam estratégias eficazes para minimizar seus efeitos negativos (BRASIL, 1981).

Entre as medidas mitigatórias mais comuns, destacam-se o controle de emissão de poeira, a contenção de resíduos sólidos, o tratamento de efluentes líquidos, o isolamento de áreas contaminadas e a revegetação de taludes e áreas expostas. Tais ações são orientadas tanto pelas normas técnicas específicas quanto pelos estudos de impacto ambiental, como o EIA/RIMA, exigido no processo de licenciamento (BRASIL, 1997). A Resolução CONAMA nº 237/1997, por exemplo, reforça que o licenciamento deve contemplar medidas de mitigação e compensação ambiental previamente definidas e monitoradas pelos órgãos competentes, sendo o controle de poeira e o tratamento de efluentes líquidos práticas amplamente adotadas na atividade minerária, conforme exemplificado nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - Caminhões realizando controle de poeira.



Fonte: Feito com IA.

Figura 5 - Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).



Fonte: Feito com IA.

É imprescindível que os empreendedores minerários elaborem e executem o PRAD, instrumento técnico obrigatório que define, com base em diagnósticos ambientais, as ações necessárias para reabilitar ecossistemas impactados. Conforme destaca o IBAMA (2011), esse plano deve "incluir medidas de isolamento de áreas contaminadas, controle de erosão, recomposição da cobertura vegetal e monitoramento ambiental contínuo". O PRAD deve ser compatível com os objetivos de uso futuro da área, podendo abranger a restauração ecológica total ou a reconversão da área para outro uso sustentável.

A recuperação vegetal é uma das estratégias mais utilizadas na mitigação de impactos da mineração. A revegetação, quando planejada com espécies nativas e técnicas adequadas ao solo e clima da região, contribui para a estabilização do solo, o controle da erosão, a

reconstituição da biodiversidade local e a recuperação dos ciclos hidrológicos. Como afirmam Silva, Campagna e Lipp-Nissinen (2018), “a revegetação deve ser vista como uma etapa inicial e indispensável do processo de sucessão ecológica, permitindo que a natureza recupere gradualmente as funções ecológicas perdidas”. Nesse contexto, a recuperação de áreas degradadas também se relaciona a mecanismos de compensação ambiental, como o mercado de carbono, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema sobre o mercado de carbono e recuperação de áreas degradadas.



Fonte: Feito com IA.

Nesse sentido, uma citação direta longa que ilustra a importância das medidas mitigatórias pode ser extraída de Marina (2021), que afirma:

> “A mitigação de impactos ambientais não se resume ao cumprimento de normas legais, mas exige um compromisso ético e técnico por parte dos empreendimentos minerários. As ações de mitigação devem ser planejadas de forma integrada, contemplando desde a supressão vegetal até a destinação adequada dos resíduos, passando pela participação das comunidades afetadas e pelo monitoramento contínuo dos indicadores ambientais” (Marina, 2021, p. 88).

O envolvimento das comunidades locais na elaboração e execução de medidas mitigatórias tem se mostrado um fator determinante para o sucesso das ações ambientais. Quando incluídas no processo de tomada de decisões, as populações afetadas tendem a colaborar mais efetivamente com a preservação e o uso sustentável dos recursos naturais recuperados. Segundo Bacci et al. (2006), “a participação social fortalece o controle ambiental e amplia o compromisso com a continuidade das medidas de mitigação após o encerramento

das atividades minerárias".

Para além das ações técnicas, é essencial a construção de indicadores de desempenho que permitam avaliar os resultados das medidas mitigatórias. Esses indicadores devem ser objetivos, mensuráveis e compatíveis com os objetivos de recuperação da área. Como exemplifica Simoni (2017):

> "A análise multicritério permite comparar diferentes estratégias de recuperação e verificar seu desempenho ambiental, social e econômico ao longo do tempo. Essa abordagem oferece uma visão abrangente e subsidia a tomada de decisão baseada em evidências científicas e critérios sustentáveis" (Simoni, 2017, p. 113).

A reabilitação plena de áreas mineradas pode levar décadas, dependendo do tipo de solo, do clima, da intensidade da degradação e da eficácia das medidas adotadas. É nesse cenário que o compromisso institucional e a fiscalização ambiental tornam-se essenciais para assegurar que os impactos sejam de fato mitigados e que o meio ambiente retome, na medida do possível, suas funções originais. Como conclui Sánchez e Silva-Sánchez (2013):

> "O planejamento do fechamento de mina e das ações mitigatórias deve ser antecipado e articulado com os objetivos de desenvolvimento sustentável, considerando os riscos e oportunidades de reconversão do espaço impactado. Isso implica integrar desde o início do ciclo do empreendimento uma visão de longo prazo que contemple não apenas a minimização dos impactos negativos, mas também a maximização dos benefícios socioambientais, promovendo soluções que envolvam a participação das comunidades e a valorização dos ecossistemas locais. A antecipação dessas ações reduz custos, conflitos e amplia a efetividade dos processos de recuperação e monitoramento" (Sánchez; Silva-Sánchez, 2013, p. 45).

A efetividade das medidas mitigatórias está diretamente relacionada à qualidade técnica dos estudos ambientais preliminares, que devem levantar com precisão os possíveis impactos da atividade minerária. Tais estudos incluem o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA), exigidos para empreendimentos considerados de significativo potencial poluidor. Conforme argumenta Sánchez (2008), a correta identificação dos impactos é o que determina a qualidade das ações de mitigação, pois "medidas bem-sucedidas estão atreladas à clareza dos objetivos ambientais definidos desde o início do projeto".

Além da avaliação de impactos, o monitoramento ambiental contínuo se mostra essencial para acompanhar a eficácia das ações implantadas e promover correções quando

necessário. As variáveis monitoradas geralmente incluem qualidade da água, qualidade do ar, estabilidade de taludes, regeneração vegetal e presença de fauna. Esses indicadores não apenas garantem o cumprimento das condicionantes ambientais, mas também subsidiam a transparência do empreendimento frente à sociedade e aos órgãos fiscalizadores (IBAMA, 2011).

É importante destacar que, mesmo com o rigor legal e o avanço técnico, muitos empreendimentos ainda enfrentam dificuldades para implementar as medidas mitigatórias de forma eficiente. Entre os principais entraves estão a falta de capacitação técnica, o subdimensionamento dos impactos, a limitação de recursos financeiros e a baixa articulação entre os setores público e privado. Segundo Bacci et al. (2006), “a mitigação dos impactos ambientais da mineração deve ser entendida como uma responsabilidade compartilhada, que exige o engajamento de todos os agentes envolvidos, inclusive da sociedade civil”.

Em algumas situações, as medidas mitigatórias não conseguem, por si só, restabelecer as condições originais do ambiente degradado. Nesses casos, é necessário recorrer a ações de compensação ambiental ou de recuperação intensiva, que envolvem técnicas mais complexas de engenharia ambiental e ecologia aplicada. A compensação pode incluir, por exemplo, a preservação de outras áreas de valor ecológico equivalente ou superior, enquanto a recuperação pode demandar intervenções como correção da acidez do solo, reintrodução de espécies nativas ou controle biológico de espécies invasoras (IBAMA, 2011).

às ações mitigatórias previstas desde o início do empreendimento. A fase final da mineração, caracterizada pelo fechamento da mina, é uma das mais críticas para a aplicação eficaz das medidas mitigatórias. Segundo Almeida (2006), o fechamento precisa ser planejado com antecedência e executado de maneira integrada, considerando não apenas o encerramento das atividades operacionais, mas também a destinação futura da área e os riscos remanescentes. É nesse estágio que se observa o verdadeiro comprometimento ambiental da empresa mineradora.

Com o encerramento das atividades extrativas, torna-se necessário garantir a estabilidade geotécnica das estruturas deixadas, como cavas, taludes e pilhas de rejeitos, além da segurança hídrica e química das áreas impactadas. De acordo com Pinto (2017), a ausência de planejamento adequado nessa fase pode resultar em passivos ambientais graves, com repercussões sociais e jurídicas de longo prazo. Por isso, é fundamental que os planos de fechamento estejam articulados.

A experiência nacional e internacional mostra que a mitigação ambiental na mineração não deve ser tratada de forma isolada, mas sim como parte de um processo contínuo de

reabilitação ecológica. As boas práticas sugerem que a transição entre a mitigação e a recuperação deve ocorrer de maneira gradual, com ações que se complementam no tempo e no espaço. Tal abordagem integrada favorece a restauração da funcionalidade do ecossistema, promovendo benefícios duradouros à natureza e à sociedade (Silva et al., 2018).

Assim, a continuidade das ações de responsabilidade ambiental passa a exigir intervenções mais específicas e profundas, voltadas não apenas ao controle, mas à recuperação efetiva das áreas afetadas. A partir dessas premissas, compreende-se que a recuperação de áreas degradadas representa uma etapa fundamental na busca por um modelo de mineração mais sustentável, exigindo conhecimentos técnicos multidisciplinares e compromisso de longo prazo com os territórios explorados.

5.5 Estratégias de recuperação de áreas degradadas

A recuperação de áreas degradadas pela mineração demanda ações complexas que englobam aspectos ambientais, sociais e técnicos, sendo orientada por diretrizes estabelecidas pela legislação ambiental brasileira, como a Instrução Normativa nº 04/2011 do IBAMA, que disciplina a elaboração de Projetos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) (IBAMA, 2011). Tais ações visam restabelecer a funcionalidade ecológica dos ambientes impactados, com foco na recomposição da vegetação nativa, estabilização do solo e reintegração social da área.

A escolha das técnicas de recuperação deve ser adequada ao tipo de degradação e às características locais, o que envolve desde ações de engenharia, como a contenção de taludes e drenagem, até práticas biológicas, como a revegetação com espécies adaptadas à região (Silva, Campagna e Lipp-Nissinen, 2018). A revegetação é uma das estratégias mais utilizadas e eficientes, pois restabelece gradativamente a cobertura vegetal e contribui para o controle da erosão e reestruturação do solo, conforme ilustrado na Figura 7, que evidencia taludes estabilizados por meio de cobertura vegetal.

A utilização de espécies nativas tem sido considerada essencial, pois favorece a restauração dos processos ecológicos e facilita a reconstituição da biodiversidade local, respeitando a dinâmica natural dos ecossistemas (CPRM, 2022; ANM, 2023). Contudo, em alguns casos, o uso de espécies exóticas pode ser necessário em fases iniciais, com a função de proteção do solo e rápida estabilização da área.

Figura 7 - Revegetação de taludes.



Fonte: Feito com IA.

Segundo Resende e Chaer (2010), “a escolha das espécies vegetais deve considerar características como rusticidade, capacidade de fixação de nitrogênio, tolerância a solos pobres e resistência a pragas, além da disponibilidade de sementes e mudas no mercado local”. Essa abordagem integrada facilita a recuperação ambiental e acelera a sucessão ecológica, promovendo maior resiliência do ecossistema restaurado.

A importância da recuperação vai além do meio ambiente, estendendo-se aos aspectos sociais e econômicos, sobretudo em áreas onde a mineração é fonte principal de renda. As estratégias devem contemplar, também, a capacitação da população local para atividades sustentáveis, integrando o uso do solo à realidade socioeconômica da comunidade (Bacci et al., 2006).

Os estudos de Simoni (2017) apontam que a recuperação de áreas mineradas deve ser tratada como parte essencial do ciclo de vida do empreendimento, sendo planejada desde sua fase de licenciamento. A antecipação e o planejamento das ações de reabilitação possibilitam maior efetividade e reduzem os custos ambientais e financeiros ao final da exploração.

De acordo com Marina (2021), a responsabilidade pela reabilitação recai sobre o empreendedor, cabendo a ele a apresentação e execução do PRAD, que deve estar embasado em diagnósticos ambientais prévios e prever indicadores de monitoramento da área restaurada. A ausência de medidas eficazes pode acarretar sanções administrativas, civis e até penais.

O monitoramento pós-recuperação é uma etapa crucial para garantir o sucesso da intervenção. É necessário verificar periodicamente a evolução da cobertura vegetal, a estabilidade dos taludes, a qualidade da água e a presença de fauna e flora (Silva, Campagna e Lipp-Nissinen, 2018). Esses indicadores asseguram que a área esteja em processo de regeneração e dentro dos padrões legais. Nesse sentido, destaca-se que:

> "A recuperação de áreas degradadas não se resume à recomposição da cobertura vegetal. É um processo multidisciplinar que exige planejamento, execução técnica e acompanhamento, visando não apenas a recuperação paisagística, mas principalmente a funcionalidade ecológica da área impactada" (Brodkom, 2000, p. 42).

A gestão ambiental eficiente nas áreas mineradas deve considerar ainda a reinserção da área ao uso produtivo, quando possível, com a transformação de espaços degradados em áreas verdes, espaços de lazer ou projetos agroflorestais. Essa reconversão pode contribuir para a revalorização do espaço e benefícios sociais diretos à comunidade (Bastos; Silva, 2005).

Ademais, é necessário articular políticas públicas e incentivos econômicos para que as empresas priorizem a recuperação ambiental como parte integrante da atividade minerária. A atuação dos órgãos de fiscalização deve ser contínua e rigorosa para garantir que os PRADs não sejam tratados como mera formalidade (Sánchez, 2013; IBRAM, 2022).

Nesse contexto o papel da pesquisa científica é essencial. Estudos como os de Almeida (2016) e Rödel (2021) evidenciam a importância da produção de conhecimento técnico para subsidiar ações de recuperação com embasamento e efetividade. Conforme destacado por Sánchez e Silva-Sánchez (2013):

> "O planejamento do fechamento de mina e das ações mitigatórias deve ser antecipado e articulado com os objetivos de desenvolvimento sustentável, considerando os riscos e oportunidades de reconversão do espaço impactado. A ausência desse planejamento compromete a eficácia das ações de recuperação e perpetua os passivos ambientais" (Sánchez; Silva-Sánchez, 2013, p. 45).

A recuperação ambiental, portanto, precisa estar ancorada em responsabilidade técnica, jurídica e ética, a fim de garantir não só o cumprimento da legislação, mas principalmente a conservação dos ecossistemas e a melhoria da qualidade de vida das populações impactadas. Nesse sentido, as estratégias de recuperação não se encerram na execução de obras ou plantios, mas se prolongam na adoção de práticas que visem à perenidade dos resultados obtidos, criando as bases para novos modos de uso sustentável da terra e do território.

5.6 Perspectivas futuras para uma mineração mais consciente

As transformações sociais e ambientais do século XXI têm impulsionado a reavaliação

dos modelos de exploração mineral, exigindo do setor minerário uma postura mais comprometida com o desenvolvimento sustentável. A mineração, historicamente associada a graves passivos ambientais, precisa agora se alinhar às novas diretrizes globais que prezam pela preservação dos ecossistemas, redução de emissões e justiça social (Oliveira; Santos; Silva, 2020). Assim, delineiam-se novas perspectivas que propõem uma mineração mais ética, transparente e responsável.

Nesse novo cenário, os princípios da sustentabilidade devem ser incorporados desde a fase inicial de prospecção mineral até o fechamento da mina. Isso inclui o uso de tecnologias limpas, eficiência energética, minimização de resíduos e a priorização pela reabilitação imediata das áreas impactadas. Para isso, o planejamento ambiental estratégico e integrado torna-se ferramenta essencial, guiando os empreendimentos em decisões compatíveis com os limites do planeta (Costa; Silva; Oliveira, 2024).

A adoção de práticas inovadoras e sustentáveis vem sendo promovida por meio de certificações ambientais e sistemas de gestão reconhecidos internacionalmente. A norma ISO 14001, por exemplo, tem sido utilizada por empresas do setor para estabelecer diretrizes de gestão ambiental voltadas à prevenção da poluição, à conformidade legal e à melhoria contínua dos processos produtivos (Freitas; Oliveira; Santos, 2023).

A bioengenharia aplicada à recuperação de áreas degradadas desponta como importante tendência, pois permite restaurar a funcionalidade ecológica de forma mais próxima à regeneração natural. Técnicas como o uso de geotêxteis vegetativos, a introdução de bactérias fixadoras de nitrogênio e o cultivo de plantas pioneiras são apenas alguns exemplos de como a ciência pode auxiliar na recuperação dos ecossistemas afetados (Bezerra et al., 2020).

A utilização de tecnologias digitais também se insere como ferramenta de aprimoramento da mineração sustentável. Drones, sistemas de sensoriamento remoto e inteligência artificial têm sido aplicados no monitoramento de áreas mineradas, no controle de emissão de poluentes e no planejamento de rotas operacionais com menor impacto ambiental (Martins; Souza; Almeida, 2023). Esses recursos permitem decisões mais precisas e eficientes, contribuindo para a mitigação de danos e o fortalecimento da governança socioambiental.

Outro aspecto importante para a construção de uma mineração mais consciente é a educação ambiental voltada para os trabalhadores do setor e para as comunidades do entorno. Promover o conhecimento sobre os impactos da mineração e sobre as formas de preservação ambiental é essencial para o fortalecimento de uma cultura de responsabilidade e

corresponsabilidade (Menezes, 2024). Assim, a transformação não ocorre apenas em processos técnicos, mas também em atitudes cotidianas.

É nesse contexto que se insere a necessidade de uma nova mentalidade empresarial, mais comprometida com os princípios de ESG (Environmental, Social and Governance). Esses princípios estão sendo exigidos por investidores, consumidores e órgãos reguladores, o que pressiona as empresas a adotarem condutas mais éticas, transparentes e sustentáveis em todas as etapas da cadeia produtiva (Fagundes; Souza, 2024).

De acordo com diretrizes recentes de boas práticas divulgadas pelo setor mineral, é fundamental que as empresas adotem uma postura ativa na mitigação de impactos, implementem ações de responsabilidade social e se envolvam com o desenvolvimento das comunidades locais. Isso inclui o fomento à economia circular, o investimento em inovação e o fortalecimento da participação social nas decisões que envolvem o uso e ocupação do território (Pires; Amaral, 2021). Nesse sentido, afirma-se que:

> "A mineração do futuro deve ser capaz de operar com baixos índices de impacto ambiental, máxima eficiência na utilização de recursos e profundo comprometimento com as populações envolvidas. Trata-se de uma mudança de paradigma que exige mais do que adequações técnicas: requer um reposicionamento ético diante da natureza e da sociedade" (Sánchez; Silva-Sánchez, 2013, p. 55).

O planejamento do fechamento de mina, quando feito de forma integrada e antecipada, também representa um avanço significativo rumo à mineração consciente. Ele permite que as áreas impactadas sejam incorporadas de forma positiva ao território após a desativação do empreendimento, evitando a formação de passivos ambientais e contribuindo para a valorização do espaço (Costa; Silva; Oliveira, 2024). Além disso, políticas públicas e marcos regulatórios devem ser constantemente atualizados, de forma a acompanhar as inovações tecnológicas e responder aos desafios ambientais contemporâneos. A legislação ambiental brasileira, embora avance em instrumentos como o licenciamento e a compensação ambiental, ainda necessita de mecanismos eficazes de fiscalização e incentivos mais robustos à adoção de boas práticas pelas empresas mineradoras (Menezes, 2024).

A construção de um modelo de mineração mais consciente também demanda o fortalecimento das instituições e a participação ativa da sociedade civil. É fundamental garantir o acesso à informação e a transparência dos dados ambientais, possibilitando o controle social sobre as atividades extrativas (Almeida et al., 2023). Isso aumenta a legitimidade das ações minerárias e promove o diálogo entre os diversos atores sociais, promovendo uma governança ambiental mais democrática e eficiente.

O fortalecimento de políticas de compensação ambiental, de recuperação de passivos antigos e de zoneamento ecológico-econômico são medidas que também devem ser ampliadas nos próximos anos. Essas iniciativas permitem o ordenamento do uso do território, evitando a sobreposição de usos conflitantes e prevenindo novos danos ambientais (CPRM, 2002).

Essa perspectiva reforça a necessidade de fortalecer as estratégias de recuperação de áreas degradadas como uma das principais frentes dessa nova abordagem da mineração, estabelecendo conexões práticas entre os impactos passados e as oportunidades de regeneração ecológica e social do futuro.

5.7 Técnicas de recuperação ambiental

A recuperação de áreas degradadas pela mineração tem como objetivo restabelecer condições ambientais adequadas após a exploração mineral. Esse processo envolve um conjunto de ações técnicas voltadas à recomposição do relevo, estabilização do solo, controle de processos erosivos e revegetação das áreas impactadas, buscando restabelecer o equilíbrio ecológico e permitir novos usos sustentáveis do solo (PINHEIRO, 2016).

A recuperação ambiental de áreas degradadas pela mineração é uma exigência legal e técnica que visa restaurar, ao menos parcialmente, as condições ecológicas e produtivas do local afetado. No caso da mineração, como a extração de areia, argila e calcário, as técnicas de recuperação devem ser adaptadas às características do solo, clima, relevo e vegetação nativa da região (Almeida et al., 2023).

Dentre as práticas mais comuns, destaca-se a recomposição topográfica, que consiste na reorganização das camadas do solo para restabelecer o relevo original ou adaptá-lo para novos usos, como reflorestamento, pastagem ou agricultura. Essa técnica é fundamental para evitar processos erosivos e favorecer o escoamento adequado das águas pluviais (Costa; Silva; Oliveira, 2024).

Outra técnica amplamente utilizada é o uso do “topsoil”, que corresponde à camada superficial do solo, rica em matéria orgânica e microrganismos. Quando corretamente armazenada durante o processo de lavra, essa camada pode ser reaplicada na área degradada para favorecer a regeneração da vegetação e o reestabelecimento da biota do solo (Silva; Santos; Oliveira, 2020).

A revegetação também é uma etapa central na recuperação de áreas mineradas. Pode ser feita por meio da semeadura direta de espécies nativas ou da introdução de mudas cultivadas em viveiros (Figura 8). A escolha das espécies deve levar em conta a resiliência às

condições edáficas locais e a capacidade de recompor as funções ecológicas do ecossistema (Bezerra et al., 2020).

Figura 8 - Reconstrução das encostas de barragem de mineração realizado pela Embrapa.



Fonte: Forbes (2023).

Em áreas afetadas pela extração de areia em leitos fluviais, como demonstrado por Nunes (2022), a recuperação deve incluir medidas de contenção de margens, replantio de matas ciliares e controle do assoreamento. Essas ações visam restabelecer o equilíbrio hídrico e evitar danos a jusante, como inundações e perda da fauna aquática.

As práticas de bioengenharia têm ganhado destaque por aliarem técnicas de engenharia civil com elementos vegetais. O uso de gramíneas, estacas vivas e biomantas para estabilização de taludes é uma alternativa eficaz, de baixo custo e com menor impacto ambiental em comparação às estruturas convencionais de concreto (Almeida et al., 2023).

Entre as técnicas mais recentes aplicadas à recuperação ambiental destaca-se a bioengenharia de solos, que combina princípios da engenharia civil com elementos biológicos para estabilização de áreas degradadas. Essa abordagem utiliza materiais naturais, como biomantas, estacas vivas, gramíneas e espécies vegetais pioneiras, com o objetivo de controlar processos erosivos, estabilizar taludes e favorecer a regeneração da vegetação nativa. A bioengenharia apresenta vantagens ambientais importantes, pois reduz o uso de estruturas rígidas de concreto e promove soluções mais compatíveis com a dinâmica natural dos ecossistemas, contribuindo para a recuperação progressiva da funcionalidade ecológica das áreas impactadas pela mineração (Sánchez, 2013; IBRAM, 2022).

Um exemplo da aplicação dessas técnicas pode ser observado no uso de biomantas vegetais para estabilização de taludes, que auxiliam na fixação do solo e na germinação de espécies vegetais, contribuindo para a proteção da superfície contra processos erosivos.

Figura 9 - Biomanta para a estabilização de taludes.



Fonte: Diprotec Geo, s.d.

Em relação à mineração de argila, comum em áreas de planície, os métodos de recuperação devem considerar a compactação do solo e o comprometimento da infiltração de água. Técnicas como subsolagem, adubação orgânica e introdução de espécies leguminosas têm se mostrado eficientes na reestruturação física e química desses solos (Freitas; Oliveira; Santos, 2023).

Figura 10 - Cobertura vegetal nas áreas IV Beluno e II Ex-Patrimônio.



Fonte: Acervo Núcleo de Apoio Técnico de Criciúma (NUMA) / SUREG-PA.

O monitoramento ambiental pós-recuperação é essencial para verificar a eficiência das técnicas aplicadas. Indicadores como cobertura vegetal, diversidade de espécies, qualidade do solo e estabilidade do relevo são avaliados periodicamente para ajustar o plano de recuperação conforme necessário (Santos; Vanderlei, 2024).

Um desafio recorrente é a ausência de planejamento prévio. Muitos empreendimentos iniciam a recuperação sem diagnóstico adequado da área, o que compromete a escolha das técnicas e resulta em intervenções ineficientes. Por isso, o PRAD deve ser elaborado com base em estudos de solo, vegetação, hidrologia e uso do entorno (Menezes, 2024).

Além dos aspectos técnicos, a recuperação deve considerar os impactos sociais e o destino da área após a mineração. Em algumas regiões, o uso de áreas recuperadas para lazer,

agroecologia ou turismo tem promovido a reintegração territorial e o fortalecimento das economias locais (Pires; Amaral, 2021).

A implementação de sistemas agroflorestais em áreas mineradas tem se mostrado uma solução promissora, conciliando recuperação ambiental e geração de renda para comunidades próximas. Essa estratégia reduz o risco de novas degradações e reforça a sustentabilidade do processo (Costa; Silva; Oliveira, 2024).

Figura 11 - Sistemas agroflorestais para recuperar solos degradados.



Fonte: Jornal da Unicamp (2018).

Tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento também têm sido incorporadas ao planejamento e acompanhamento da recuperação. Imagens de satélite permitem avaliar a evolução da cobertura vegetal e identificar falhas na restauração, como áreas com erosão persistente ou baixa densidade de plantas (Martins; Souza; Almeida, 2023).

Em termos legais, a Instrução Normativa IBAMA nº 04/2011 estabelece critérios para a elaboração e execução do PRAD, incluindo cronogramas, metas e métodos de avaliação. No entanto, o cumprimento efetivo da legislação ainda depende da fiscalização pelos órgãos ambientais e do compromisso dos empreendedores (Rigotto, 2020).

É fundamental que os órgãos de licenciamento incentivem a adoção de práticas de recuperação ambiental desde o início da atividade mineradora. O conceito de “planejamento reverso”, que prevê a recuperação ainda na fase de projeto, pode evitar custos elevados e reduzir os danos ambientais (Fagundes; Souza, 2024).

A adoção sistemática dessas técnicas, com base científica e alinhamento legal, é o caminho para transformar a mineração em uma atividade compatível com os princípios do desenvolvimento sustentável. A articulação entre empresas, poder público e comunidades

locais é indispensável para garantir a efetividade da recuperação e a valorização do território (Oliveira; Santos; Silva, 2020).

5.8 Projeto de recuperação

No contexto da mineração, a elaboração do PRAD constitui uma exigência legal no Brasil, tendo como finalidade estabelecer medidas técnicas para a recuperação ambiental das áreas impactadas pela atividade minerária. O PRAD define ações de recomposição do solo, revegetação e monitoramento ambiental, visando restabelecer a estabilidade ecológica e minimizar os impactos gerados pela exploração mineral (PINHEIRO, 2016).

O PRAD é o instrumento técnico que organiza as ações destinadas à restauração ambiental de locais impactados por atividades antrópicas, como a mineração. Para o setor mineral, esse documento é fundamental, pois orienta desde a recomposição do relevo até a revegetação, com base em diagnósticos ambientais detalhados (Menezes, 2024).

A elaboração do PRAD deve ocorrer antes mesmo do início das atividades de lavra, conforme preconiza a Instrução Normativa IBAMA nº 04/2011, integrando o processo de licenciamento ambiental. Nesse contexto, o planejamento prévio evita improvisações e garante que as ações de recuperação estejam inseridas no cronograma da exploração mineral (Rigotto, 2020).

O primeiro passo na elaboração de um PRAD é o diagnóstico ambiental da área. Essa etapa envolve o levantamento da vegetação existente, análise do solo, relevo, hidrologia e uso atual da terra. Para áreas de mineração de areia ou argila, por exemplo, é essencial avaliar a compactação do solo e a presença de corpos d’água que possam ter sido desviados ou assoreados (Almeida et al., 2023).

Com base no diagnóstico, são definidos os objetivos do projeto, que podem incluir a reconstituição da vegetação nativa, a estabilização do solo, o restabelecimento da drenagem natural ou a destinação do espaço para outros usos compatíveis, como agricultura, pastagem controlada ou áreas de lazer comunitário (Costa; Silva; Oliveira, 2024).

A escolha das técnicas de recuperação deve considerar as características locais e o grau de degradação. A recomposição topográfica, a reaplicação de topsoil, a semeadura de espécies nativas e o uso de sistemas agroflorestais são algumas das práticas recomendadas em projetos bem-sucedidos de recuperação de áreas mineradas (Bezerra et al., 2020).

Em regiões onde há presença de cursos d’água, como no caso da mineração de areia

em leitos fluviais, o PRAD deve prever a recomposição das matas ciliares com espécies adaptadas e de rápido crescimento. Nunes (2022) ressalta que o restabelecimento dessas áreas é crucial para a proteção da biodiversidade aquática e para o controle da erosão.

O cronograma de execução é uma parte obrigatória do PRAD. Deve indicar o período de implantação de cada etapa, os responsáveis técnicos e os recursos necessários. Esse planejamento permite o acompanhamento eficiente por parte dos órgãos ambientais e aumenta a transparência das ações (Fagundes; Souza, 2024).

Após a implementação das técnicas de recuperação, é necessário avaliar periodicamente os indicadores ambientais da área. A cobertura vegetal, a estabilidade dos taludes, a qualidade da água e a presença de fauna são exemplos de variáveis que devem ser monitoradas ao longo do tempo (Santos; Vanderlei, 2024).

O uso de tecnologias de geoprocessamento tem se mostrado uma aliada nesse processo. Imagens de satélite e drones permitem acompanhar a evolução da vegetação, identificar falhas na recuperação e ajustar o plano conforme necessário, tornando o PRAD um documento dinâmico e em constante atualização (Martins; Souza; Almeida, 2023).

Os projetos de recuperação também devem prever a participação da comunidade local, sobretudo em áreas onde a mineração convive com zonas urbanas ou territórios tradicionais. A inclusão de moradores nas etapas de plantio, manutenção e uso posterior do solo contribui para o fortalecimento do vínculo social com o território (Pires; Amaral, 2021).

A articulação interinstitucional é outro fator que amplia a efetividade do PRAD. Parcerias entre prefeituras, universidades, consórcios públicos e ONGs ambientais favorecem a implementação de tecnologias de baixo custo e a capacitação técnica das equipes envolvidas na recuperação (Freitas; Oliveira; Santos, 2023).

Os custos envolvidos na recuperação ambiental devem ser integralmente arcados pela empresa responsável pela degradação, conforme estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981). A previsão orçamentária no PRAD é obrigatória e deve detalhar todos os insumos, mão de obra e serviços contratados (Oliveira; Santos; Silva, 2020). Infelizmente, muitos PRADs são elaborados de forma superficial, sem diagnóstico técnico ou metas claras. Essa deficiência compromete o sucesso da recuperação e perpetua o passivo ambiental, exigindo maior rigor por parte dos órgãos licenciadores na análise e aprovação dos projetos (Silva; Santos; Oliveira, 2020). Casos bem-sucedidos de recuperação, como o descrito por Costa, Silva e Oliveira (2024), demonstram que quando há planejamento, comprometimento e monitoramento adequado, é possível transformar áreas degradadas em espaços produtivos, sustentáveis e integrados ao contexto social e ecológico local.

Portanto, o PRAD é mais do que um requisito legal; é uma ferramenta essencial para garantir que a mineração seja compatível com a conservação ambiental e com o uso racional dos recursos naturais. Sua aplicação eficaz depende da integração de conhecimentos técnicos, políticas públicas e da responsabilidade socioambiental dos empreendedores (Menezes, 2024).

Tabela 2 - Checklist técnico para execução do PRAD.

Etapa	Procedimento técnico	Objetivo
Diagnóstico ambiental	Levantamento de solo, vegetação, hidrologia e uso da área	Identificar nível de degradação
Planejamento do PRAD	Definição das técnicas de recuperação	Organizar a recuperação ambiental
Recomposição topográfica	Regularização do relevo e estabilidade de taludes	Evitar erosão
Reaplicação do topsoil	Retorno da camada superficial do solo	Recuperar fertilidade
Revegetação	Plantio de espécies nativas	Restaurar cobertura vegetal
Monitoramento ambiental	Avaliação periódica da área recuperada	Garantir eficácia do PRAD
Planejamento de fechamento de mina	Definição do uso futuro da área	Evitar passivos ambientais

Fonte: Adaptado de IBAMA (2011) e Sánchez (2013).

A aplicação sistemática dessas etapas contribui para a eficiência do processo de recuperação ambiental em áreas mineradas. O uso de instrumentos como checklists técnicos permite organizar as ações previstas no PRAD, facilitando o acompanhamento das atividades e garantindo que as medidas de recuperação sejam implementadas de forma adequada. Além disso, o monitoramento contínuo das áreas recuperadas possibilita avaliar a eficácia das técnicas adotadas e realizar ajustes quando necessário, assegurando a restauração progressiva das funções ecológicas do ambiente (IBAMA, 2011; IBRAM, 2022).

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS ESPERADOS

A aplicação de técnicas de recuperação ambiental em áreas degradadas por mineração tem como principal objetivo restabelecer, parcial ou integralmente, as condições ecológicas e funcionais do ambiente afetado. Os resultados esperados a partir da implementação de um PRAD devem refletir ganhos em indicadores ambientais, sociais e econômicos, a médio e longo prazo.

Entre os principais resultados previstos está a reconstituição da cobertura vegetal, fundamental para a estabilização do solo, a melhoria da infiltração hídrica e o retorno da biodiversidade local. A revegetação com espécies nativas, aliada à reposição da camada de topsoil, permite o restabelecimento dos ciclos ecológicos e contribui para a resiliência do ecossistema (Bezerra et al., 2020; Almeida et al., 2023).

Do ponto de vista edáfico, espera-se a melhora progressiva das propriedades físico-químicas do solo, especialmente quando há uso de técnicas como adubação orgânica, subsolagem e introdução de leguminosas fixadoras de nitrogênio. Essas medidas favorecem a reestruturação do perfil do solo e possibilitam usos futuros compatíveis com a conservação ambiental ou a agricultura de baixo impacto (Costa; Silva; Oliveira, 2024).

Além dos ganhos ecológicos, o PRAD pode proporcionar benefícios sociais relevantes, como o reaproveitamento da área para projetos comunitários, a capacitação de moradores locais em práticas de manejo sustentável e a criação de empregos temporários durante a execução do plano (Pires; Amaral, 2021). A inclusão social é potencializada quando a comunidade participa ativamente da elaboração e manutenção da recuperação.

Tabela 3 – Síntese dos resultados esperados com a recuperação ambiental.

Dimensão	**Resultados Esperados**
Ambiental	Reconstituição da cobertura vegetal, controle da erosão, melhoria da qualidade do solo e da água
Econômico	Possibilidade de uso futuro para agroecologia, pastagem ou turismo ambiental
Social	Inclusão da comunidade no manejo, geração de empregos, valorização territorial
Legal e Institucional	Atendimento à legislação ambiental, redução de passivos, melhoria da imagem institucional do empreendedor

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Bezerra et al. (2020), Almeida et al. (2023), Costa; Silva; Oliveira (2024), Pires; Amaral (2021).

O monitoramento contínuo da área recuperada permite identificar falhas no processo e realizar ajustes técnicos. Espera-se que, em um horizonte de 3 a 5 anos, as áreas revegetadas apresentem cobertura mínima superior a 80%, estabilidade geomorfológica e ausência de

processos erosivos ativos (Martins; Souza; Almeida, 2023).

A avaliação dos resultados também envolve indicadores de biodiversidade. O retorno de espécies da fauna, a presença de polinizadores e a regeneração natural são sinais positivos da restauração ecológica. Esses dados podem ser obtidos por meio de levantamentos periódicos com apoio técnico de instituições ambientais ou universidades (Silva; Santos; Oliveira, 2020).Em muitos casos, as zonas de mineração podem ser transformadas em espaços de uso múltiplo, como áreas verdes urbanas, parques ambientais, projetos de agricultura familiar ou áreas de conservação. Essa multifuncionalidade contribui para a revalorização social e econômica do território (Santos; Vanderlei, 2024).A partir da adoção de ferramentas geotecnológicas, é possível estimar a evolução da recuperação em séries temporais. Imagens de satélite, sensores multiespectrais e drones auxiliam na análise de cobertura do solo, densidade da vegetação e alterações topográficas. Esses dados geram relatórios técnicos robustos, que subsidiam decisões de manejo (Almeida et al., 2023).

A expectativa é que a correta implementação do PRAD reduza significativamente o passivo ambiental acumulado por décadas de exploração mineral sem controle. Além disso, o cumprimento das metas ambientais poderá ser valorizado em programas de certificação ambiental, como o Selo Verde ou créditos de recuperação ecológica (Rigotto, 2020).

A replicabilidade de projetos bem-sucedidos de recuperação ambiental em áreas mineradas fortalece políticas públicas e estimula a regulamentação de pequenos empreendimentos, frequentemente marginalizados nos processos de licenciamento (Menezes, 2024). Portanto, a análise dos resultados esperados evidência que a recuperação de áreas degradadas pela mineração, quando bem conduzida, gera benefícios concretos e multidimensionais. A integração entre ciência, legislação e participação social é fundamental para transformar o passivo ambiental em uma nova oportunidade de desenvolvimento territorial sustentável.

A efetiva aplicação de um PRAD em empreendimentos minerários representa um avanço significativo na mitigação dos danos ambientais decorrentes da exploração de substâncias como areia, argila e calcário. Os resultados esperados vão além da recomposição estética da paisagem, envolvendo também a reabilitação ecológica, funcional e socioeconômica da área impactada (Costa; Silva; Oliveira, 2024).

Ao restabelecer a cobertura vegetal nativa ou adaptada, cria-se um microclima mais estável, promove-se o sombreamento do solo e são estimulados processos naturais como a fixação biológica do nitrogênio, o sequestro de carbono e a regeneração espontânea de espécies vegetais (Bezerra et al., 2020). Tais processos são fundamentais para restaurar a

funcionalidade ecológica da área e favorecer o retorno da fauna local. A recuperação dos solos é um resultado crítico esperado, especialmente em áreas onde a compactação, a perda de nutrientes e a erosão são intensas. A introdução de práticas como subsolagem, adubação verde e cobertura morta permite restabelecer a capacidade de retenção de água e aumentar a porosidade do solo, facilitando o desenvolvimento radicular e o ciclo hidrológico local (Freitas; Oliveira; Santos, 2023).

No campo hidrológico, espera-se a estabilização dos cursos d'água, a redução do assoreamento e o controle da turbidez. A revegetação das margens, associada ao manejo adequado das águas pluviais, contribui diretamente para a proteção dos recursos hídricos e pode beneficiar inclusive o abastecimento humano e a produção agrícola em áreas adjacentes (Nunes, 2022). No aspecto social, destaca-se a melhoria da qualidade de vida das populações vizinhas às áreas mineradas. Com a redução da poeira, do ruído e da degradação visual, bem como a recuperação de áreas de lazer ou de produção agrícola, cria-se um ambiente mais saudável e valorizado para os habitantes locais (Pires; Amaral, 2021). A seguir, apresenta-se na Tabela 2 que detalha de forma mais abrangente os resultados esperados por dimensão e apresenta indicadores de avaliação sugeridos, visando auxiliar gestores e técnicos na mensuração do sucesso do PRAD.

Tabela 4 - Detalhamento dos resultados esperados e indicadores de sucesso.

Dimensão	**Resultados Esperados**	**Indicadores de Avaliação**
Vegetação	Reestabelecimento da cobertura vegetal com espécies nativas	% de cobertura vegetal; diversidade de espécies
Solo	Melhora das propriedades físicas e químicas do solo	pH, teor de matéria orgânica, densidade do solo
Hídrica	Redução do assoreamento e estabilização da drenagem superficial	Transparência da água, vazão, taxa de erosão
Fauna	Retorno de espécies da fauna silvestre	Presença de polinizadores, rastros, avistamentos
Social	Participação comunitária e valorização territorial	Nº de moradores envolvidos; percepção pública
Econômica	Possibilidade de uso futuro da área para fins produtivos	Projetos implantados; geração de renda
Legal	Cumprimento das exigências legais e redução do passivo ambiental	Relatórios técnicos; aprovação por órgãos ambientais
Tecnológica	Aplicação de tecnologias de monitoramento e sensoriamento remoto	Imagens satélite, drones, softwares de análise

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Martins; Souza; Almeida (2023), Santos; Vanderlei (2024), Menezes (2024), Rigotto (2020), Fagundes; Souza (2024).

A integração de métodos participativos também figura entre os objetivos do projeto. A escuta ativa da comunidade e o envolvimento em atividades como plantio e manutenção

promovem o senso de pertencimento e ampliam as chances de preservação da área após o encerramento das atividades minerárias (Menezes, 2024).

Adicionalmente, espera-se que o projeto contribua para a redução de conflitos socioambientais, especialmente em áreas urbanas ou periurbanas onde a mineração causa tensões relacionadas ao uso do solo e à qualidade de vida. A presença de um PRAD bem elaborado transmite à sociedade uma imagem de responsabilidade socioambiental por parte do empreendedor (Rigotto, 2020).

Resultados indiretos também podem ser observados, como a melhoria nos índices de saúde pública, devido à redução da poeira em suspensão, da proliferação de vetores em áreas alagadas e da contaminação de mananciais (Oliveira; Santos; Silva, 2020). Estes efeitos, embora não mensurados diretamente pelo PRAD, estão intrinsecamente relacionados à sua efetividade.

A médio prazo, áreas recuperadas podem se tornar objeto de políticas públicas de valorização ambiental, como a criação de unidades de conservação municipais, parques lineares ou áreas de lazer comunitário, o que representa uma estratégia de uso múltiplo e sustentável dos territórios anteriormente degradados (Fagundes; Souza, 2024).

Portanto, os resultados esperados da recuperação ambiental não se restringem aos indicadores ecológicos imediatos, mas abrangem dimensões mais amplas e duradouras. A previsão e análise desses resultados devem ser parte central da elaboração do PRAD, não apenas como exigência normativa, mas como compromisso técnico e ético com o território e sua população (Santos; Vanderlei, 2024).

A expectativa de resultados do PRAD também envolve a promoção da resiliência ecológica da área impactada. Isso significa restaurar a capacidade do ecossistema de resistir a distúrbios futuros, como mudanças climáticas, novas intervenções antrópicas ou alterações no uso do solo. A adoção de espécies nativas resilientes, de rápido crescimento e com funções ecológicas bem definidas (fixadoras, sombreadoras, atrativas à fauna) é crucial nesse processo (Bezerra et al., 2020).

Outro desdobramento esperado do processo de recuperação é a educação ambiental integrada às ações do PRAD. Atividades educativas voltadas à comunidade local como oficinas, mutirões de plantio, visitas técnicas e trilhas interpretativas geram conhecimento coletivo, incentivam a conservação e fortalecem o compromisso social com o espaço recuperado (Pires; Amaral, 2021).

Além dos indicadores ecológicos e sociais, também devem ser previstos indicadores econômicos, sobretudo nos casos em que o projeto de recuperação preveja o uso futuro da

área para produção agroecológica, silvicultura de espécies nativas comerciais ou ecoturismo. A estimativa de retorno financeiro, quando baseada em planejamento participativo e viabilidade técnica, pode viabilizar economicamente a manutenção da área recuperada (Costa; Silva; Oliveira, 2024).

A conexão territorial da área recuperada com outras unidades de conservação, remanescentes florestais ou corredores ecológicos é outro aspecto importante dos resultados esperados. Quando o PRAD é planejado considerando a paisagem regional, os efeitos positivos se estendem além da área diretamente degradada, contribuindo para a conectividade da biodiversidade (Freitas; Oliveira; Santos, 2023).

Do ponto de vista institucional, espera-se que a execução eficaz de projetos de recuperação contribua para o fortalecimento das políticas públicas de fiscalização e gestão ambiental. PRADs bem-sucedidos podem servir de modelo e base para normativas regionais, manuais técnicos e diretrizes de planejamento urbano e rural sustentáveis (Rigotto, 2020).

É relevante destacar que os resultados esperados não devem ser pensados como metas fixas, mas sim como processos evolutivos e adaptativos, ajustados ao longo do tempo conforme as respostas da área ao manejo aplicado. O PRAD, portanto, deve incluir dispositivos de revisão periódica, permitindo que a estratégia de recuperação acompanhe os aprendizados do monitoramento (Martins; Souza; Almeida, 2023).

A efetividade do PRAD pode ser melhor compreendida por meio da análise de casos concretos aplicados à mineração. Um exemplo relevante é o projeto de recuperação de áreas mineradas em zonas urbanas de Belém (PA), coordenado por pesquisadores da UFPA, em que áreas de extração de argila foram revegetadas com espécies nativas como andiroba e ipê-roxo, promovendo regeneração do solo e reativação de processos ecológicos básicos após três anos de acompanhamento técnico (Sousa et al., 2021).

Estudo conduzido no município de Rio Claro (SP) demonstrou que a recomposição de matas ciliares degradadas por mineração de areia, por meio do plantio de espécies pioneiras como guanandi (Calophyllum brasiliense), contribuiu para a recuperação da qualidade da água e estabilidade das margens fluviais, com redução de até 45% na turbidez da água em dois anos de monitoramento (Freitas et al., 2022).

Na região do Vale do Jequitinhonha (MG), projetos-piloto de recuperação de cavas exauridas por extração de saibro adotaram o modelo de sistemas agroflorestais, integrando frutíferas e nativas da caatinga, gerando benefícios ambientais e renda local, além de promover a recomposição da paisagem (Instituto Estadual de Florestas, 2023).

No estado do Ceará, projetos de recuperação de áreas degradadas por mineração de

calcário têm demonstrado resultados positivos com o uso combinado de biofertilizantes, adubação verde e introdução de leguminosas, possibilitando aumento significativo da matéria orgânica do solo e retorno gradual da fauna edáfica e de pequenos mamíferos (Cavalcante et al., 2020).

Em Campo Largo (PR), um caso de sucesso é o da conversão de áreas de mineração de argila em parques urbanos e trilhas ecológicas, resultado da parceria entre a prefeitura, ONGs e empresas licenciadas, com alto índice de regeneração vegetal e engajamento comunitário nas ações de manutenção (Sema/PR, 2021).

Esses exemplos mostram que os resultados esperados de um PRAD, quando bem planejado, são alcançáveis e geram benefícios concretos para o meio ambiente, a sociedade e a economia local, reforçando a importância de técnicas como o uso de topsoil, a revegetação nativa e o monitoramento geotécnico contínuo (Bezerra et al., 2020).

Observa-se também como destaque nacional é o Projeto Terra Forte, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), que ofereceu apoio técnico a pequenas mineradoras de areia em municípios do agreste, promovendo a reestruturação de áreas por meio de curvas de nível, cobertura morta e reflorestamento com espécies adaptadas ao semiárido (Martins et al., 2022).

O componente de educação ambiental também se mostra relevante em experiências como o Projeto “Areia Sustentável”, desenvolvido no interior do Pará, que associou ações de restauração à formação ambiental de estudantes e moradores, ampliando o alcance social das intervenções e garantindo sua continuidade no longo prazo (Pinheiro et al., 2023).

Do ponto de vista técnico, os dados dos estudos de caso apontam que, em média, áreas revegetadas com espécies nativas atingem 80% de cobertura em até cinco anos, dependendo das condições climáticas e do histórico de degradação, o que evidencia a importância do planejamento técnico prévio no PRAD (Almeida et al., 2023).

A replicação dessas boas práticas deve ser incentivada por meio de políticas públicas, incentivos financeiros e maior fiscalização dos órgãos ambientais, uma vez que a recuperação de áreas degradadas é viável, eficaz e essencial para consolidar modelos territoriais mais sustentáveis (Menezes, 2024).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu uma análise abrangente sobre os impactos ambientais gerados pela mineração e sobre as estratégias aplicáveis à recuperação de áreas degradadas. Observou-se que, apesar de sua expressiva importância socioeconômica, essas atividades ainda são marcadas por elevado passivo ambiental, especialmente em regiões onde predominam a informalidade, a ausência de planejamento ambiental e a baixa fiscalização. A degradação do solo, a contaminação hídrica, a supressão da vegetação nativa e os efeitos sobre a fauna são consequências recorrentes da exploração mineral desassistida de critérios técnicos e ambientais.

A partir da revisão bibliográfica e normativa, foi possível compreender que os instrumentos legais, como o PRAD, constituem ferramentas essenciais para a mitigação dos danos e a recomposição funcional dos ecossistemas afetados. A elaboração e aplicação efetiva desses planos, quando respaldadas por diagnósticos ambientais consistentes e pela participação das comunidades envolvidas, demonstram resultados promissores em termos de sustentabilidade e valorização territorial.

Verificou-se também que a recuperação ambiental não deve ser tratada como uma etapa final ou corretiva do ciclo minerário, mas como um processo contínuo, iniciado já na fase de planejamento da lavra. A adoção de práticas como o reaproveitamento do topsoil, a revegetação com espécies nativas, a aplicação de técnicas de bioengenharia e o uso de tecnologias de geoprocessamento têm se mostrado eficazes na regeneração ecológica e no monitoramento das áreas reabilitadas. A análise dos resultados esperados reforça que a recuperação de áreas degradadas pode gerar benefícios ambientais, sociais, econômicos e legais, contribuindo não apenas para a mitigação dos danos ambientais, mas também para o fortalecimento da governança ambiental, da justiça social e da valorização do espaço explorado. Nesse contexto, a mineração pode se alinhar aos princípios do desenvolvimento sustentável, desde que haja compromisso técnico, institucional e ético por parte dos empreendedores, do poder público e da sociedade civil.

Portanto, conclui-se que a mineração de pequeno porte, quando conduzida com responsabilidade e orientada por práticas sustentáveis, possui o potencial de minimizar os impactos negativos e promover a recuperação efetiva das áreas degradadas. Para tanto, é imprescindível a articulação entre conhecimento técnico, legislação ambiental, políticas

públicas e participação social, de modo a transformar a mineração em uma atividade compatível com os desafios socioambientais do século XXI.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. S. Plano de recuperação de áreas degradadas (PRAD). **Recuperação ambiental da Mata Atlântica**. 3. ed. rev. e ampl. Ilhéus, BA: Editus, 2016. p. 140–158.

ALMEIDA, M. R. **Avaliação dos mecanismos de garantia financeira para fins de fechamento de mina e seu impacto na viabilidade de projeto de mineração de grande porte no estado de Minas Gerais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

BACCI, D. et al. **Impactos ambientais da mineração**: estudos de caso no Brasil. Brasília: IBAMA, 2006. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/biblioteca/documentos/series/serie_estudos_24.pdf . Acesso em: 10 ago. 2025.

BARRETO, A. C. **Manejo e conservação do solo**: teoria e prática. São Paulo: EMBRAPA, 2001. Disponível em: https://www.biosistemico.org.br/wp content/uploads/2013/05/cartilhamanejo-e-conservacao-do-solo.pdf. Acesso em: 10 ago. 2025.

BASTOS, F. A.; SILVA, J. M. **Reconversão de áreas mineradas**: aspectos econômicos e ambientais. São Paulo, 2005. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/884697/1/RECUPERACAOAREAS-MINERADAS-ed02-2010.pdf. Acesso em: 05 nov. 2025.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário mineral brasileiro 2023**. Brasília: ANM, 2023.

BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**: sistemas de gestão ambiental: requisitos com orientações para uso. São Paulo: ABNT, 2015.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 05 nov. 2025.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm. Acesso em: 08 dez. 2025.

BRODKOM, E. **Reabilitação de áreas degradadas pela mineração**: princípios e práticas. São Paulo: CPRM, 2000. Disponível em: https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/175225/2/recuperacao.pdf. Acesso em: 05 nov. 2025.

COSTA, T. A. M.; SILVA, R. F.; OLIVEIRA, F. T. Indicadores econômicos em projetos de recuperação de áreas degradadas: estudo de caso em áreas mineradas no Cerrado. **Revista Agrogeoambiental**, v. 16, n. 1, p. 91–107, 2024. Disponível em: https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/2024.

Acesso em: 27 jan. 2026.
CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Recursos minerais do Brasil**. Brasília: CPRM, 2022.

FREITAS, L. M.; OLIVEIRA, R. S.; SANTOS, J. C. Planejamento paisagístico na recuperação de áreas mineradas. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 189–202, 2023. Disponível em: https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/ambiente/article/view/7953. Acesso em: 27 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório anual da mineração brasileira 2022**. Brasília: IBRAM, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Instrução normativa nº 4, de 13 de abril de 2011. **Estabelece procedimentos para elaboração de Projeto de Recuperação de Área Degradada – PRAD**. Brasília: IBAMA, 2011.

MARTINS, R. T. de; SOUZA, M. L.; ALMEIDA, G. C. Avaliação da eficácia de técnicas silviculturais em áreas mineradas no semiárido. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 53–65, 2023. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/71541. Acesso em: 08 dez. 2025.

PINHEIRO, C. S. S. **Extração de areia e seixo**: desenvolvimento ou degradação? O caso de Porto Grande/AP. 2016. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local na Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

PIRES, A. F. A.; AMARAL, B. G. Educação ambiental e recuperação de áreas degradadas: experiências de comunidades impactadas pela mineração. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 155–172, 2021. Disponível em: https://revistas.unaerp.br/ambiente/article/view/2250. Acesso em: 27 jan. 2026.

RIGOTTO, R. Governança ambiental e mineração: desafios para o controle social. **Revista Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 23, p. e0206, 2020. Disponível em: https://www.scielo.br/j/asoc/a/yKkYfX5VzVYbnF6FnTcGLNd/?lang=pt. Acesso em: 27 jan. 2026.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental**: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.