

Efetividade da recuperação pós-mineração em Mariana/MG: protocolo jurídico-ambiental baseado em análise documental e SIG

Fernando Bartolomeu Mendonça Costa*

Mestrando no Mestrado profissional em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 35400-000, Ouro Preto/MG, Brasil

*E-mail do autor correspondente: fernandobartolomeu@yahoo.com.br

Submetido em: 07 mar. 2026. Aceito em: 02 jul. 2026

Resumo

Este artigo propõe um protocolo jurídico-ambiental para avaliar a efetividade da recuperação de áreas degradadas pela mineração em Mariana (MG), e realiza uma microaplicação piloto na sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, com base em análise documental e dados públicos de monitoramento hídrico e de revegetação. A pesquisa combina revisão técnico-jurídica, análise documental e estudos de caso regionais, integrando instrumentos normativos, como LP, LI, LO, PRAD, TAC, ACP e PAFEM, a métricas ambientais obtidas por dados secundários e por Sensoriamento Remoto/SIG. O protocolo estrutura-se em quatro eixos: painel de indicadores e metas por sub-bacia e APP; matriz Promessa x Evidência para comparar condicionantes, obrigações e resultados; regras de julgamento classificadas em OK, Parcial e Não, acompanhadas de plano corretivo; e gatilhos para execução de garantias financeiras, articulados a um sistema público de monitoramento, reporte e verificação. A proposta busca deslocar o enfoque de obrigações de meio para obrigações de resultado, reforçando segurança jurídica, proteção ambiental e transparência. Como limitações, destacam-se a dependência da disponibilidade e qualidade dos dados e a necessidade de *benchmarks* locais para validação e aplicação do protocolo.

Palavras-chave: PRAD, Fechamento de Mina, Efetividade, Garantias Financeiras, SIG.

Abstract

Effectiveness of post-mining rehabilitation in Mariana (Brazil): a legal-environmental protocol based on documentary analysis and SIG

This article proposes a legal-environmental protocol to assess the effectiveness of the recovery of mining-degraded areas in Mariana, Minas Gerais, and presents a pilot micro-application in the Gualaxo do Norte River sub-basin, based on document analysis and public data on water monitoring and revegetation. The study combines a technical-legal review, document analysis, and regional case studies, integrating regulatory instruments such as Preliminary License (LP), Installation License (LI), Operation License (LO), PRAD, TAC, ACP, and PAFEM with environmental metrics derived from secondary data and Remote Sensing/GIS. The protocol is structured around four axes: an indicator and target panel by sub-basin and Permanent Preservation Area (APP); a Promise vs. Evidence matrix to compare conditions, obligations, and outcomes;

assessment rules classified as OK, Partial, and No, accompanied by a corrective action plan; and triggers for the enforcement of financial guarantees linked to a public monitoring, reporting, and verification system. The proposal seeks to shift the focus from obligations of conduct to obligations of result, strengthening legal certainty, environmental protection, and transparency. Its main limitations are the dependence on data availability and quality and the need for local benchmarks to validate and apply the protocol.

Keywords: PRAD, Mine Closure, Effectiveness, Financial Guarantees, GIS.

Introdução

A mineração no Quadrilátero Ferrífero impulsionou a economia regional e, ao mesmo tempo, gerou passivos ambientais relevantes (Figueiredo, 2021). Os rompimentos de barragens de rejeitos em Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, expuseram falhas de governança e lacunas na transposição de exigências legais em resultados ambientais duradouros (Castro, 2021; Braga; Fonseca, 2021). Na prática, Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) e condicionantes de licenças são frequentemente redigidos como listas de ações (plantio, obras de drenagem), com pouca ênfase em metas verificáveis de desempenho e critérios de encerramento. Este trabalho objetiva propor um protocolo jurídico-ambiental, reproduzível e baseado em dados secundários, que permita avaliar a efetividade da recuperação pós-mineração em Mariana (MG) e orientar o redesenho de condicionantes de resultado, de modo a fortalecer o *enforcement* e a transparência (Acsegrad, 2004; Zhouri, 2008; Zhouri, 2018). Do ponto de vista da extensão universitária e da justiça ambiental, o protocolo buscado aqui não se restringe à racionalidade interna do licenciamento. A intenção é produzir uma ferramenta que possa ser apropriada por órgãos públicos locais, comitês de bacia, movimentos sociais e projetos de extensão universitária, facilitando a leitura territorial da recuperação pós-mineração e fortalecendo o controle social sobre decisões de

encerramento de empreendimentos e sobre o uso de garantias financeiras.

Referencial Teórico

No estudo são apresentados os principais conceitos e debates que sustentam a proposta do protocolo: a forma como a mineração se organiza no Quadrilátero Ferrífero, o papel dos PRAD e do fechamento de mina, o uso de indicadores ambientais e de serviços ecossistêmicos, o enquadramento pelos Limites Planetários e pela justiça ambiental, e, por fim, lições extraídas de casos regionais já amplamente estudados.

PRAD vs fechamento e efetividade

A região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, é um dos centros históricos da mineração de ferro no Brasil. A atividade minerária trouxe emprego, receitas públicas e infraestrutura para diversos municípios, mas também deixou um rastro de áreas degradadas, conflitos pelo uso da água e riscos permanentes para populações e ecossistemas (Figueiredo, 2021). Os rompimentos de barragens de rejeitos em Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019 tornaram essa contradição ainda mais evidente: ao mesmo tempo em que a mineração é tratada como motor do desenvolvimento, os desastres revelaram falhas graves de planejamento, fiscalização e governança, bem como a dificuldade de transformar normas e condicionantes em melhorias concretas e duradouras na qualidade da

água, do solo e da vida das pessoas (Castro, 2021; Braga; Fonseca, 2021).

Dentro desse contexto, dois instrumentos merecem destaque, (i) os Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) e os (ii) planos de fechamento de mina, em tese responsáveis por garantir que a transição do “durante” para o “pós-mineração” não deixe passivos permanentes (Lima; Flores; Costa, 2006; Castro, Lima; Flores, 2011).

Na prática, contudo, diagnósticos institucionais indicam que muitos PRAD e condicionantes de licença são redigidos como listas de ações físicas, como plantar mudas, instalar drenos e construir bacias de contenção, sem deixar claro que resultado ambiental essas ações precisam produzir, em quanto tempo e com quais critérios de encerramento (IBAMA, 2019; Silva; Campagna; Lipp-Nissinen, 2018). O foco recai sobre o “fazer algo” (meio), e não sobre “atingir um certo estado do ambiente” (resultado).

Este trabalho parte justamente dessa crítica para propor um protocolo jurídico-ambiental, desenhado para ser reproduzível e baseado em dados secundários, e para demonstrar sua operacionalidade por meio de uma microaplicação piloto na sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, em Mariana (MG) e que permita avaliar a efetividade da recuperação pós-mineração nesse território. A ênfase está em condicionantes de resultado, formuladas em termos de metas verificáveis de qualidade da água, estabilidade do solo, recomposição da vegetação e transparência, de forma a fortalecer o *enforcement* (capacidade real de exigir o cumprimento) e reduzir a distância entre norma e território (Braga; Fonseca, 2021).

Ao mesmo tempo, a proposta dialoga com a literatura de justiça ambiental e com a experiência de extensão universitária em territórios minerados. Em vez de ser apenas um instrumento técnico de

gabinete, o protocolo é pensado como uma ferramenta compartilhável com órgãos públicos locais, comitês de bacia, movimentos sociais e projetos de extensão, ajudando a “traduzir” a recuperação em mapas, indicadores e decisões mais transparentes. Isso contribui para fortalecer o controle social sobre o encerramento de empreendimentos e sobre o uso de garantias financeiras vinculadas à recuperação (Zhour, 2008; Zhour, 2018).

Indicadores ambientais e serviços ecossistêmicos

Para saber se uma área realmente está se recuperando, não basta afirmar que houve plantio de mudas ou obras de drenagem. É preciso observar indicadores ambientais, isto é, sinais mensuráveis de que os ecossistemas estão voltando a cumprir suas funções básicas de regulação, suporte e provisão de bens e serviços.

No caso da água, alguns indicadores são particularmente relevantes; (i) o Índice de Qualidade da Água (IQA), que sintetiza diferentes parâmetros (oxigênio, coliformes, nutrientes, entre outros) em uma escala compreensível, (ii) a turbidez (NTU) e os sólidos em suspensão total (SST), que indicam o quanto o rio está carregando de sedimento e material particulado, (iii) a vazão de base, que representa a parcela mais “estável” da vazão, mantendo cursos d’água ativos mesmo em períodos secos.

Para o solo e a geomorfologia, interessam indicadores ligados à estabilidade de taludes, ao risco de erosão e à ocorrência de ravinas por quilômetro quadrado, que refletem o quanto a paisagem ainda está se desmanchando ou se estabilizando.

Na dimensão de vegetação e conectividade, a atenção recai sobre a porcentagem de cobertura nativa, o NDVI (índice derivado de imagens de

satélite que indica vigor da vegetação) e métricas de paisagem que mostram se os fragmentos de mata estão isolados ou conectados em corredores ecológicos. Já na dimensão de qualidade química, monitora-se a presença de metais e arsênio, substâncias que podem permanecer por muito tempo no ambiente e na cadeia alimentar se não forem devidamente controladas.

Além desses parâmetros mais difundidos, há um grande potencial para ampliar o uso de bioindicadores, como a macrofauna do solo (minhocas, insetos, pequenos invertebrados). A composição e abundância desses organismos costumam responder bem às mudanças no ambiente e podem oferecer uma leitura mais fina da qualidade e funcionalidade do solo, embora ainda sejam pouco utilizados em programas de monitoramento de áreas mineradas (Bianchi *et al.*, 2017).

A perspectiva dos serviços ecossistêmicos ajuda a conectar cada indicador a algo que importa diretamente para a sociedade: qualidade e quantidade de água para consumo, proteção contra enxurradas, manutenção da fertilidade do solo, suporte à biodiversidade, lazer, paisagem, entre outros. Em vez de olhar os parâmetros como números isolados, essa abordagem permite perguntar: “Que serviço esse trecho de rio ou essa encosta deveria proporcionar? Os indicadores mostram que isso está, de fato, acontecendo?”

Limites Planetários e justiça ambiental

O debate sobre Limites Planetários propõe que o planeta possui certos “limiares de segurança” para processos fundamentais, como o clima, a integridade da biosfera, os ciclos de nutrientes e a qualidade química dos ambientes, entre outros (Rockström *et al.*, 2009; Richardson *et al.*, 2023). Quando esses limites são ultrapassados, aumentam significativamente os

riscos de mudanças abruptas e potencialmente irreversíveis.

Embora esse arcabouço tenha sido formulado em escala global, ele oferece um pano de fundo importante para metas locais. Em áreas mineradas, isso significa, por exemplo, (i) adotar padrões de qualidade da água que não apenas evitem intoxicações imediatas, mas também reduzam o aporte acumulado de poluentes ao sistema como um todo, (ii) garantir a integridade da biosfera, o que inclui proteger e recuperar fragmentos de vegetação nativa, corredores ecológicos e habitats de espécies sensíveis, (iii) lidar com “novas entidades químicas”, categoria que inclui numerosos compostos industriais e contaminantes persistentes associados à atividade minerária.

Nesse contexto, a literatura de justiça ambiental alerta que os impactos negativos da degradação e da poluição não se distribuem de forma igual entre grupos sociais: populações mais pobres, comunidades rurais, povos tradicionais e bairros periféricos tendem a sofrer mais riscos e ter menos acesso à informação, à justiça e à reparação (Acsehrad, 2004; Zhou, 2018). Portanto, mecanismos de monitoramento, relato e verificação (MRV) públicos, combinados com processos participativos efetivos, não são apenas detalhes técnicos: são elementos essenciais para democratizar o acesso a dados, dar voz aos atingidos e influenciar a forma como metas ambientais são definidas e cobradas.

Integrar os Limites Planetários ao debate local sobre recuperação pós-mineração, sob a lente da justiça ambiental, significa reconhecer que, (i) decisões tomadas em Mariana e no Quadrilátero Ferrífero têm relação com processos maiores de crise ambiental, (ii) os custos e riscos dessa crise não devem recair sempre sobre as mesmas comunidades, (iii) ferramentas de avaliação, como

o protocolo proposto, devem ser desenhadas de forma a aumentar, e não reduzir, a capacidade de incidência dos grupos mais vulneráveis (Acsegrad, 2004; Zhouri, 2018).

Casos regionais e governança pós-desastre

Os desastres de Mariana e Brumadinho geraram uma grande quantidade de estudos sobre qualidade da água, sedimentos, biota aquática, governança e responsabilização ao longo da bacia do Rio Doce e de outras áreas afetadas. Esses trabalhos oferecem séries históricas de dados e análises detalhadas que ajudam a definir parâmetros realistas de meta e a identificar pontos críticos de falha institucional.

Pesquisas sobre o comportamento da pluma de rejeitos, sobre a recuperação (ou não) de comunidades aquáticas, sobre o aporte de metais ao longo do tempo e sobre a interação entre diferentes órgãos públicos mostram que a reconstrução de um rio após um desastre é um processo longo, complexo e politicamente disputado (Carmo *et al.*, 2017; Foesch *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2020; Silva, 2021; Faria; Souza, 2019; Rezende; Floriano, 2019).

Esses estudos também evidenciam gargalos de coordenação e de responsabilização: sobreposição ou fragmentação de competências entre instituições, dificuldades de acesso a dados, conflitos em torno de metas e indicadores, controvérsias sobre a suficiência de medidas adotadas, entre outros. Para além dos números, a literatura regional revela que a efetividade da recuperação pós-desastre depende de arranjos de governança capazes de, (i) articular diferentes escalas (local, estadual, federal), (ii) envolver de forma contínua as comunidades atingidas, (iii) garantir transparência sobre critérios e decisões e (iv) acionar, quando necessário, instrumentos

econômicos e jurídicos disponíveis para correção de rumos.

Ao se apoiar nessa base regional, o protocolo proposto neste trabalho não parte do “zero”: ele busca sistematizar lições aprendidas, traduzindo-as em painéis de indicadores, matrizes de promessa versus evidência e regras claras de julgamento, aplicáveis à realidade específica de Mariana, mas com potencial de replicação em outros contextos minerados.

Material e Métodos

Trata-se de estudo de natureza metodológica, com microaplicação piloto ilustrativa. O foco principal é construir um modo de avaliar a recuperação pós-mineração e, em seguida, demonstrar sua operacionalidade em recorte real, sem pretensão de exaurir a avaliação integral da recuperação territorial.

O ponto de partida é uma revisão narrativa integrativa: reúnem-se e organizam-se, de forma crítica, estudos, leis e documentos técnicos já existentes sobre mineração e recuperação de áreas degradadas, para então propor um protocolo adaptado à realidade de Mariana (MG).

Em vez de produzir novos dados em campo, o trabalho utiliza apenas fontes secundárias. No plano jurídico e administrativo, são analisados documentos típicos do licenciamento ambiental, como as licenças prévia, de instalação e de operação (LP, LI e LO), os Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), planos de fechamento de mina, termos de ajustamento de conduta e ações civis públicas (TAC/ACP), além de relatórios de monitoramento ambiental apresentados ao poder público. No plano ambiental e geoespacial, recorrem-se a bases públicas de dados, como as de órgãos de recursos hídricos (IGAM, ANA), estatística e território (IBGE), geologia (CPRM) e a conjuntos de

imagens de satélite amplamente utilizados, como Sentinel-2 e Landsat (imagens ópticas), Sentinel-1 SAR (radar) e modelos de relevo como SRTM/NASADEM. O recorte territorial considera sub-bacias hidrográficas e as Áreas de Preservação Permanente (APPs) ao longo dos cursos d'água, permitindo olhar para o território em pedaços coerentes do ponto de vista ambiental.

Como prova de conceito, o protocolo foi aplicado à sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, em recorte centrado na estação RD011, localizada próxima à foz no rio do Carmo, e nas áreas de revegetação emergencial vinculadas à cláusula 158 do TTAC. Selecionaram-se três indicadores para o piloto: turbidez, oxigênio dissolvido e revegetação emergencial implantada. A escolha do recorte decorre da severidade dos impactos observados no vale e na planície do Gualaxo do Norte, da existência de obrigação formalmente definida no TTAC e da disponibilidade de dados oficiais de monitoramento e avaliação institucional.

Com base nessas informações, é proposto um protocolo jurídico-ambiental que articula quatro peças principais: (i) um painel de indicadores e metas, que traduz em números e prazos o que se espera de água, solo, vegetação e governança em cada sub-bacia/APP; (ii) uma matriz “Promessa x Evidência”, que compara o que foi exigido em documentos oficiais com aquilo que os dados mostram na prática; (iii) regras de julgamento (cumprido, parcialmente cumprido ou não cumprido) sempre acompanhadas de um plano corretivo; e (iv) o desenho de um sistema de MRV público (monitoramento, relato e verificação) ligado a gatilhos para uso de garantias financeiras, de modo que o dinheiro reservado à recuperação seja acionado quando as metas não forem atingidas.

Do ponto de vista técnico, utilizam-se métodos de SIG (Sistemas de Informação

Geográfica) e Sensoriamento Remoto para tratar e analisar as imagens e mapas. Isso envolve etapas de pré-processamento (ajustes básicos nas imagens), cálculo de índices como NDVI (relacionado ao vigor da vegetação), NDWI (associado à presença de água) e NDTI (ligado a solo exposto e sedimentos), além de derivados de relevo (por exemplo, inclinação de encostas). Quando necessário, são aplicadas técnicas de classificação supervisionada, em que partes da imagem são previamente identificadas para “ensinar” o computador a reconhecer padrões, com posterior verificação da qualidade dessa classificação. Em todo o estudo, não são coletados dados primários (como entrevistas ou novas campanhas de amostragem em campo); trabalha-se exclusivamente com informações já existentes, o que reforça a importância da transparência e da qualidade dos dados públicos disponíveis (Fujaco; Leite; Messias, 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Protocolo proposto de avaliação

Esta seção apresenta o protocolo jurídico-ambiental proposto e demonstra sua operacionalidade por meio de microaplicação piloto na sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, em Mariana (MG). A exposição foi organizada em duas camadas: primeiro, descrevem-se os componentes estruturantes do protocolo; depois, apresenta-se uma aplicação ilustrativa com base em dados reais, suficiente para testar a coerência interna da matriz Promessa x Evidência e das regras de julgamento.

Painel de indicadores e metas por sub-bacia/APP

O primeiro componente do protocolo é um painel de indicadores, organizado por sub-bacia hidrográfica e por Área de Preservação

Permanente (APP) ao longo dos cursos d'água. Em termos simples, é um quadro que mostra, para cada pedaço do território, o que precisa melhorar e como vamos medir essa melhora.

No eixo Água, o painel reúne quatro elementos principais, como turbidez, medida em NTU, que indica se a água está mais “limpa” ou “barrenta”. A meta é manter a turbidez abaixo de um valor-alvo durante pelo menos 12 meses seguidos nos pontos de monitoramento. Índice de Qualidade da Água (IQA), que precisa estar em uma classe compatível com os usos previstos (por exemplo, abastecimento, recreação, proteção da vida aquática). Sólidos em Suspensão Total (SST), que devem apresentar tendência de redução, sinalizando menor carreamento de sedimentos. Vazão de base, que é a “água de fundo” que mantém o rio correndo mesmo no período seco, e que deve ser preservada ou aumentada, evitando o rebaixamento permanente dos cursos d'água.

No eixo Solo e geomorfologia, o foco é a estabilidade física das encostas e margens. O painel considera um fator de segurança mínimo para taludes e áreas críticas, indicando baixo risco de deslizamento; A diminuição do número de ravinas por quilômetro quadrado, que revela menor erosão concentrada; A redução da taxa de assoreamento, isto é, menos sedimento sendo depositado no leito de rios e reservatórios.

No eixo Vegetação e conectividade, a atenção recai sobre a recomposição de mata nativa e a ligação entre fragmentos. São estabelecidos marcos temporais, por exemplo, atingir 60% de cobertura nativa em determinados trechos após 24 meses, alcançar 80% após 36 meses, e além da quantidade, medir o ganho de conectividade ripária, ou seja, se as faixas de vegetação ao longo dos rios estão se unindo e formando corredores ecológicos.

No eixo de Qualidade química, o painel verifica se metais e arsênio permanecem dentro dos padrões legais e, mais do que isso, se seguem uma trajetória de queda ao longo do tempo, reforçando que não basta “estar dentro do limite”, é preciso caminhar para uma condição cada vez mais segura.

Por fim, o eixo de Governança observa se existe um sistema público de MRV (Monitoramento, Relato e Verificação), com dados atualizados em prazos definidos, Relatórios acessíveis, regras claras que indiquem quando um problema aciona uma correção e quando uma garantia financeira deve ser usada, esse painel transforma a recuperação ambiental em metas concretas, com números, prazos e responsabilidades bem definidos.

Para reduzir o risco de uma avaliação “ambientalmente correta, porém socialmente insuficiente”, recomenda-se acrescentar ao painel um eixo Socioeconômico e de bem-estar territorial, tratando a recuperação como transição de longo prazo do “durante” para o “pós-mineração”, e não apenas como recomposição biofísica. Esse eixo pode operar em duas camadas: (a) indicadores territoriais (município/distritos e recortes por sub-bacia/APP quando houver relação direta com água, poeira, sedimentos e uso do solo) e (b) indicadores distributivos, explicitando quais grupos suportam custos e quais recebem benefícios (por exemplo, comunidades ribeirinhas, rurais, bairros mais expostos e trabalhadores). Na prática, ele pode reunir: (i) segurança hídrica e acesso (regularidade de abastecimento, interrupções e qualidade percebida, acoplado aos parâmetros do eixo Água); (ii) saúde e segurança comunitária (eventos sentinela e tendência de agravos associados a poeira, água e acidentes, usando séries administrativas como “alertas” e não como prova isolada); (iii) dinâmica de trabalho e renda

(emprego formal, rotatividade, requalificação e qualidade do posto, evitando que “emprego gerado” vire justificativa para relaxar metas ambientais); (iv) diversificação econômica local e arrecadação (dependência setorial e capacidade de sustentar serviços públicos no pós-ciclo); e (v) conflitualidade e resposta institucional (volume de reclamações, tempo de resposta, taxa de resolução, qualidade das devolutivas do MRV). O objetivo é que o protocolo mostre, com o mesmo grau de verificabilidade dos eixos ambientais, se a recuperação está reduzindo vulnerabilidades reais no território e produzindo uma condição pós-mineração minimamente sustentável e legítima perante os atingidos (Banco Mundial, 2021; International Finance Corporation, 2012).

Matriz Promessa x Evidência e regras de julgamento

O segundo componente é uma matriz que coloca lado a lado o que foi prometido e o que, de fato, foi entregue. Por isso, ela é chamada de “Promessa x Evidência”. O Quadro 2 apresenta a estrutura dessa matriz, indicando seus campos de análise, o conteúdo esperado em cada item e um exemplo simplificado de preenchimento.

Para cada documento oficial (licença, condicionante, PRAD, TAC, sentença, acordo), a matriz registra o indicador que será usado para conferir se aquela obrigação foi cumprida (por exemplo, turbidez, cobertura vegetal, estabilidade de talude); qual é a meta, sempre com valor e prazo (ex.: “reduzir turbidez abaixo de X em 12 meses”); em que ponto e em que escala isso será medido (sub-bacia, APP específica, trecho do rio); qual é a prova usada na verificação (série histórica de dados, mapa, fotografia georreferenciada, relatório de vistoria, laudo técnico); qual é o julgamento final, classificado em três níveis: OK (obrigação cumprida), Parcial (houve avanço, mas

a meta ainda não foi integralmente atingida) e Não (a obrigação está descumprida); e qual ação corretiva será aplicada em cada caso, seja por meio de ajustes técnicos, prorrogação com condicionantes, sanções ou execução de garantias.

Essa matriz funciona como um painel de controle para gestores públicos, órgãos ambientais, Ministério Público e sociedade porque ela mostra de forma visual onde há aderência entre promessa e realidade e onde é necessário agir, seja para corrigir, sancionar ou reconhecer o cumprimento.

MRV público e transparência

O terceiro componente trata de como as informações vão ser tornadas públicas, e não apenas arquivadas em processos administrativos. Aqui entra o conceito de MRV, monitorar para definir o que será acompanhado, com que frequência e por quem; reportar para organizar os dados em relatórios, mapas e painéis de fácil leitura; verificar para permitir que esses dados sejam conferidos por outros órgãos, pesquisadores e pela própria população (Trovão; Alves, 2025).

O protocolo estabelece regras claras para periodicidade da atualização (por exemplo, trimestral, semestral, anual), formato dos dados (tabelas abertas, arquivos geoespaciais, gráficos, textos explicativos), local de armazenamento e acesso, preferencialmente em repositório digital aberto, com histórico de versões.

Ao garantir auditabilidade (ser possível refazer as contas), rastreabilidade (saber de onde veio cada dado) e respostas formais à sociedade, a transparência fortalece o controle social, reduz desigualdades de informação entre empresas, governo e comunidades, dá mais legitimidade às

decisões sobre encerramento de minas e sobre o uso de recursos de recuperação.

Garantias financeiras com gatilhos

O quarto componente lida com as chamadas garantias financeiras ambientais, valores ou instrumentos econômicos que a empresa deposita para assegurar que haverá recursos disponíveis caso a recuperação não seja feita como prometido (Almeida; Lima, 2008).

O protocolo propõe que essas garantias sejam diretamente ligadas a metas ambientais objetivas, por sub-bacia e APP, com gatilhos bem definidos. Em termos práticos a liberação de partes da garantia (ou a sua manutenção) depende do cumprimento de marcos ambientais como a turbidez estabilizada abaixo do valor alvo, recuperação de um percentual mínimo de vegetação, estabilidade comprovada de taludes. A garantia pode ser fracionada em etapas, por exemplo, associando parcelas a marcos em 12, 24 e 36 meses.

Essa lógica desestimula a postura oportunista do tipo ‘faz o mínimo e depois negocia’ e incentiva o desempenho contínuo. Se as metas forem cumpridas, parte da garantia poderá ser liberada de forma gradual; se não forem cumpridas, a garantia permanecerá vinculada ou será executada para financiar ações corretivas.

Assim, diminui-se o risco de comportamento oportunista (o chamado “risco moral”) e aumenta-se a segurança de que o território não ficará desamparado.

Benchmarks territoriais e risco AEV

O quinto componente trata da forma como as metas são definidas para cada pedaço do território, evitando um padrão único para realidades muito diferentes. Para isso, o protocolo usa *benchmarks* territoriais, isto é, valores de referência locais.

As metas são ajustadas por sub-bacia e APP, levando em conta o risco AEV, entendido aqui como a combinação de três dimensões: a ameaça, referente às características físicas capazes de gerar problemas, como encostas íngremes, taludes instáveis e drenagens que concentram grande volume de água e sedimentos; a exposição, que diz respeito a quem ou ao que está na linha de impacto, como captações de água para consumo humano, áreas de preservação permanente, bairros, comunidades rurais ou assentamentos próximos; e a vulnerabilidade, ligada à capacidade do ambiente e da população de lidar com o impacto, considerando o tipo de solo, o uso e a cobertura atual da terra, bem como a presença ou ausência de infraestrutura de proteção e de políticas públicas.

Com base nessa leitura, sub-bacias e APPs mais vulneráveis e mais expostas a ameaças recebem metas mais rigorosas e prazos mais apertados, enquanto áreas de menor risco podem ter metas gradativas. O objetivo é que o painel respeite as diferenças internas do território e priorize onde o dano potencial é maior.

Fluxo operacional

Por fim, o sexto componente organiza tudo isso em um passo a passo operacional, para que o protocolo possa ser aplicado de forma sistemática e replicável em vários municípios. O fluxo proposto passa pela seleção de documentos e áreas de interesse (Identificar quais licenças, PRADs, TACs, sentenças e outros documentos serão analisados; delimitar as sub-bacias e APPs que farão parte da avaliação). Levantamento das condicionantes e obrigações (Extrair, desses documentos, todas as exigências ambientais relevantes (por exemplo, metas de qualidade da água, de revegetação, de estabilidade, de transparência). Definição dos indicadores, metas e

benchmarks locais (Associar a cada obrigação um indicador adequado; estabelecer a meta (valor e prazo); ajustar esses valores aos *benchmarks* territoriais de cada sub-bacia/APP). Coleta e organização de dados séries e mapas (Reunir séries históricas de monitoramento, mapas, imagens de satélite e relatórios técnicos; organizar tudo em bases abertas e prontas para análise). Preenchimento da Matriz Promessa x Evidência (Registrar, para cada obrigação, qual foi o resultado encontrado nos indicadores; classificar o cumprimento (OK/Parcial/Não) com base nas regras de julgamento). Julgamento integrado e definição de plano corretivo (Analisar o conjunto dos resultados por sub-bacia/APP; estabelecer quais ações corretivas serão exigidas, em que prazo e com que responsabilidades). Reporte público em sistema de MRV e gestão das garantias (Divulgar os resultados e o plano corretivo em painel público; aplicar as regras de liberação ou execução das garantias financeiras, conforme os gatilhos definidos).

Esse fluxo transforma o protocolo em uma rotina de trabalho, permitindo que diferentes atores (órgãos ambientais, Ministério Público, gestores municipais, pesquisadores e comunidades) acompanhem, de forma coordenada, se a recuperação pós-mineração está de fato acontecendo no território.

O Quadro 1 sintetiza os componentes centrais do protocolo jurídico-ambiental proposto, destacando sua definição, seus principais elementos e sua função na avaliação da recuperação pós-mineração.

Microaplicação Piloto

Para tornar o protocolo mais fácil de visualizar, pode-se imaginar uma aplicação em caráter ilustrativo em um pequeno trecho de rio e sua faixa de proteção (APP) dentro de uma sub-

bacia. Nesse exercício, o primeiro passo seria ler com atenção o PRAD e demais documentos do processo de licenciamento para identificar tudo o que foi prometido especificamente para aquela área de preservação: por exemplo, recuperação de mata ciliar, controle de erosão nas margens e melhoria da qualidade da água.

Em seguida, seriam definidos pontos de monitoramento “a jusante”, isto é, em locais do curso d’água que recebem a influência direta da área degradada. Para esses pontos, buscar-se-iam dados públicos já existentes sobre qualidade da água, especialmente séries históricas de turbidez (NTU) e de Índice de Qualidade da Água (IQA), disponíveis em bases oficiais. Paralelamente, utilizar-se-iam imagens de satélite para estimar a porcentagem de vegetação nativa na faixa de APP, recorrendo a índices como o NDVI e a métricas simples de paisagem que indiquem se a mata ciliar está se recompondo e se conectando ao longo do rio.

Com esses elementos, todas as informações seriam reunidas na Matriz Promessa x Evidência: de um lado, o que foi assumido como obrigação; de outro, o que os indicadores mostram na prática. A partir dessa comparação, é possível registrar um julgamento (cumprido, parcialmente cumprido, não cumprido) e, quando necessário, definir um plano corretivo ou acionar gatilhos para uso de garantias e revisão de medidas.

Como se trata de uma aplicação conceitual baseada em dados secundários, a viabilidade do exercício depende diretamente da existência, acessibilidade e qualidade dos dados administrativos (licenças, relatórios, monitoramentos) e geoespaciais (imagens, mapas). Onde essas informações são falhas ou inexistentes, o protocolo revela não só limitações técnicas, mas também lacunas de transparência e de governança que precisam ser enfrentadas.

Quadro 1. Componentes do protocolo jurídico-ambiental proposto.

Componente	O que é	Principais elementos	Uso no protocolo
Painel de indicadores e metas	Conjunto de metas por sub-bacia/APP	Água, solo/geomorfologia, vegetação/conectividade, qualidade química, governança	Medir se a recuperação está acontecendo no território
Matriz Promessa x Evidência	Comparação entre exigências e resultados	Documento, indicador, meta (valor e prazo), evidência, julgamento (OK/Parcial/Não)	Guiar correções, sanções e decisões de encerramento
MRV público	Monitoramento, relato e verificação com transparência	Periodicidade, formato, repositório público, devolutivas à sociedade	Reduzir assimetrias de informação, fortalecer controle social
Gatilhos de garantias financeiras	Critérios para liberar ou executar garantias	Marcos temporais, metas associadas, regras de fracionamento e execução	Assegurar recursos para correção quando metas não forem cumpridas
Fluxo operacional	Passo a passo de aplicação do protocolo	Seleção de documentos, definição de metas, coleta de dados, preenchimento da matriz, julgamento e reporte	Tornar o método replicável em diferentes territórios

Fonte: Elaboração do autor.

Quadro 2. Estrutura da Matriz Promessa x Evidência.

Campo da matriz	Conteúdo	Exemplo simplificado
Documento/condicionante	Qual é a obrigação formal	PRAD – Recuperação de APP da margem esquerda do rio X
Indicador	Como será medida a obrigação	Turbidez (NTU) e % de cobertura nativa na APP
Meta (valor e prazo)	Resultado esperado em número e tempo	NTU $\leq$ 50 por 12 meses; $\geq$ 60% cobertura em 24 meses
Ponto/escala	Onde e em que recorte espacial	Ponto a jusante P1; sub-bacia Y; APP 30 m
Evidência	Séries, mapas, laudos, fotos georreferenciadas	Série IGAM 2016–2024, imagens Sentinel-2
Julgamento	Classificação (OK/Parcial/Não)	Parcial
Ação corretiva	O que deve ser feito diante do resultado	Revisão de obras de drenagem; plantio complementar

Fonte: Elaboração do autor.

Microaplicação piloto do protocolo na sub-bacia do rio Gualaxo do Norte (Mariana/MG)

Para demonstrar a operacionalidade do protocolo, realizou-se microaplicação piloto na

sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, com foco na estação RD011 e nas áreas associadas à revegetação emergencial prevista na cláusula 158 do Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC). A escolha desse recorte se justifica pela intensidade dos impactos observados no vale e na planície aluvial do Gualaxo do Norte, bem como pela existência de dados públicos de monitoramento hídrico e de avaliação institucional da revegetação (Brasil, 2016; IGAM, 2017; IBAMA, 2020).

No piloto, foram selecionados três indicadores: (i) turbidez, como *proxy* da persistência do passivo hidrossedimentológico; (ii) oxigênio dissolvido, como parâmetro básico de qualidade da água; e (iii) revegetação emergencial implantada, como indicador de cumprimento material de obrigação reparatória. Quanto à obrigação documental, tomou-se como referência a cláusula 158 do TTAC, segundo a qual caberia à

Fundação efetuar a revegetação inicial, emergencial e temporária, com extensão total de 800 ha e conclusão até o último dia útil de junho de 2016 (Brasil, 2016).

Quanto às evidências empíricas, a Nota Técnica n. 4/2020/CT-FLOR/GABIN registrou 808,49 ha medidos em campo e 794,33 ha em projeção plana para a revegetação emergencial, além de apontar discussão institucional sobre o cumprimento da cláusula 158 e a necessidade de monitoramento continuado. No monitoramento hídrico da estação RD011, a média de turbidez foi de 7.985 NTU no primeiro período pós-rompimento e de 751 NTU no segundo período, permanecendo acima do limite de 100 NTU. Já o oxigênio dissolvido na mesma estação apresentou médias de 7,9115 mg/L e 7,7188 mg/L, acima do limite mínimo de 5 mg/L adotado como referência para águas doces Classe 2 (IGAM, 2017; IBAMA, 2020).

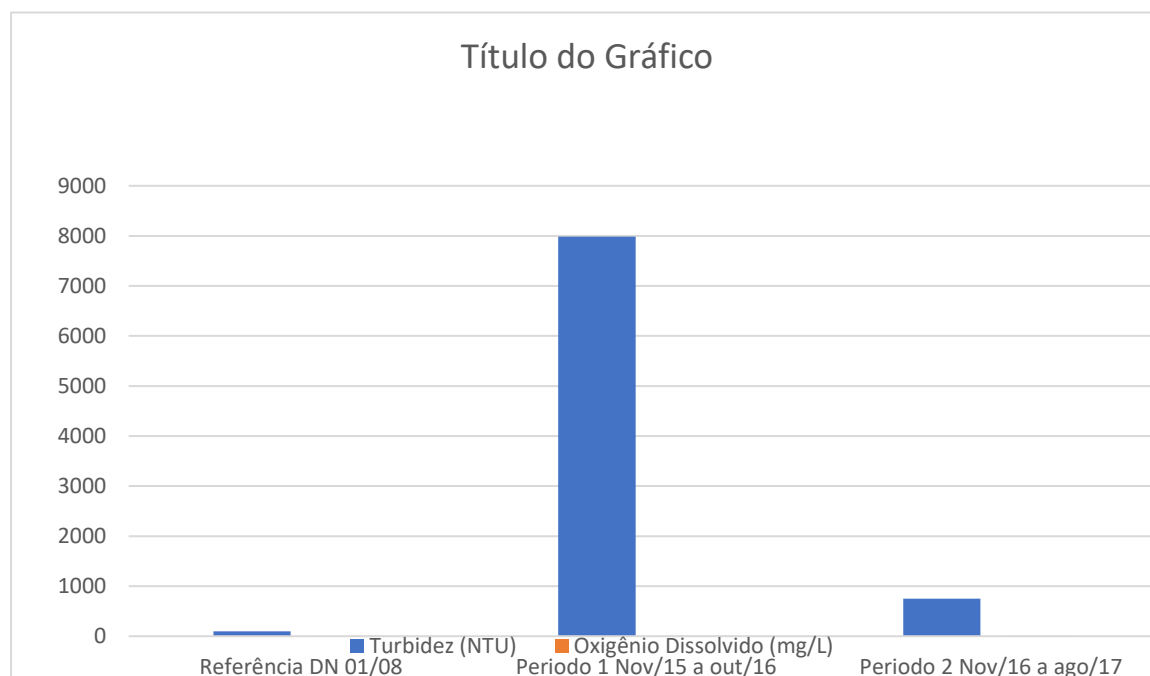


Figura 1. Turbidez e Oxigênio Dissolvido.

Fonte: Elaboração do autor.

A microaplicação revela resultado assimétrico. A revegetação emergencial indica cumprimento material relevante, mas não integralmente satisfatório em termos de prazo e de efetividade ecológica final, razão pela qual o julgamento é parcial. A turbidez revela não cumprimento do resultado ambiental esperado, embora haja tendência de redução. O oxigênio dissolvido, por sua vez, atende ao parâmetro de referência, o que evidencia que indicadores isolados favoráveis não bastam para declarar a recuperação efetiva do sistema. O exercício

confirma, assim, a utilidade do protocolo para distinguir cumprimento formal, cumprimento material parcial e não cumprimento, com base em evidências convergentes (Brasil, 2016; IGAM, 2017; IBAMA, 2020).

O Quadro 3 sistematiza os resultados da microaplicação piloto na sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, relacionando a obrigação documental, a meta de referência, a evidência empírica observada e o respectivo julgamento.

Quadro 3. Microaplicação da Matriz “Promessa x Evidência” na sub-bacia do Rio Gualaxo do Norte (Mariana/MG).

Documento / indicador	Meta / referência	Evidência real	Julgamento
TTAC, cláusula 158 – revegetação emergencial	800 ha até o último dia útil de junho de 2016	808,49 ha medidos em campo; 794,33 ha em projeção plana; entrega final reportada após o prazo inicial	Parcial
Qualidade da água – turbidez em RD011	100 NTU	média de 7.985 NTU no 1º período e 751 NTU no 2º período	Não
Qualidade da água – oxigênio dissolvido em RD011	mínimo de 5 mg/L	média de 7,9115 mg/L no 1º período e 7,7188 mg/L no 2º período	OK

Fonte: Elaboração do autor.

Resultados e discussão da microaplicação piloto

A microaplicação piloto apresentada neste artigo tem por finalidade demonstrar, de forma inicial, a capacidade do protocolo proposto de diferenciar situações de cumprimento formal, cumprimento material parcial e não cumprimento das obrigações de reparação ambiental. Para isso, toma-se como recorte analítico o caso do rio Gualaxo do Norte, examinando-se indicadores selecionados que permitem avaliar não apenas a execução física de medidas reparatórias, mas

também sua correspondência com sinais efetivos de recuperação ecológica. Parte-se, assim, da premissa de que a avaliação da reparação não deve se limitar à verificação isolada de entregas ou obras implementadas, mas exigir a convergência de evidências capazes de indicar a recomposição progressiva das funções ambientais afetadas. A adoção de condicionantes de resultado e de critérios de encerramento, com MRV e gatilhos de garantia, migra o licenciamento de um modelo procedimental para um modelo orientado a desempenho, com ganhos de segurança jurídica e ambiental. Quando as exigências de um

licenciamento ambiental deixam de ser apenas listas de tarefas (“plantar n mudas”, “construir tal obra”) e passam a ser formuladas como metas de resultado – por exemplo, “reduzir a turbidez do rio abaixo de determinado valor em tantos meses”, muda também a lógica de funcionamento do sistema. A combinação entre condicionantes de resultado, critérios claros de encerramento, um sistema de monitoramento, relato e verificação (MRV) e gatilhos para uso de garantias financeiras faz o licenciamento caminhar de um modelo meramente procedimental (centrado em cumprir etapas burocráticas) para um modelo orientado a desempenho, em que o foco está no que realmente acontece no território (Braga; Fonseca, 2021). Isso tende a trazer ganhos concretos de segurança jurídica, porque todos passam a saber, de antemão, quais metas precisam ser cumpridas, e de segurança ambiental, porque o encerramento de um empreendimento depende de evidências consistentes de recuperação, e não apenas de papelada em ordem.

A introdução explícita do eixo socioeconômico também ajuda a tratar, de frente, o problema dos *trade-offs* (ganhos e perdas) que atravessam recuperação, urbanismo e mineração: medidas que “funcionam” para cumprir prazos administrativos podem aumentar risco geomorfológico; obras emergenciais podem melhorar um trecho e transferir sedimentos para outro; e a pressão por retomada econômica pode incentivar metas mais fáceis, gerando uma aparência de sucesso enquanto persistem passivos e desigualdades. Para evitar que o julgamento do protocolo seja capturado por uma lógica binária (“ou desenvolvimento ou proteção”), propõe-se que o julgamento integrado incorpore uma regra simples de governança: (i) limiares não negociáveis (mínimos de segurança hídrica, estabilidade e qualidade química; e salvaguardas

sociais, como transparência, resposta a queixas e proteção de grupos vulneráveis), (ii) matriz de compatibilidade entre metas ambientais e efeitos sociais (onde cada ação corretiva deve declarar impactos esperados e quem arca com custos), e (iii) deliberação rastreável no MRV (devolutivas públicas com justificativa, evidências, alternativas consideradas e critérios de decisão).

Esse desenho combina rigor técnico com legitimidade democrática: não “substitui” o juízo especializado, mas impede que ele se converta em tecnocracia opaca; e também reduz espaço para decisões puramente populistas, porque exige demonstração pública, comparável e auditável do porquê uma meta foi definida, alterada ou considerada suficiente. A lógica está alinhada a guias internacionais que tratam fechamento de mina como processo com requisitos técnicos e socioeconômicos, incluindo engajamento de partes interessadas e visão compartilhada de futuro pós-mineração (WORLD BANK, 2021), e a padrões que exigem avaliação integrada de riscos/impactos e engajamento contínuo ao longo do ciclo do projeto (IFC, 2012).

Como sintetizado no Quadro 3, a o protocolo da microaplicação distingue o cumprimento formal, cumprimento material parcial e não cumprimento. No recorte do Gualaxo do Norte, a revegetação emergencial demonstra avanço relevante de implantação, mas ainda não autoriza, por si só, conclusão favorável quanto à recuperação ecológica; a turbidez permanece muito acima do parâmetro de referência; e o oxigênio dissolvido mostra que a melhora de um indicador isolado não equivale à recuperação integral do sistema. O resultado reforça a utilidade do protocolo como instrumento de avaliação por convergência de evidências, e não por entregas físicas isoladas

O protocolo aqui proposto ajuda a aproximar o direito ambiental e minerário de práticas

internacionais de fechamento de mina, que já trabalham com metas claras, planos de longo prazo e execução de garantias quando os resultados não aparecem. Ao mesmo tempo, ele dialoga com o direito urbanístico, ao olhar para as Áreas de Preservação Permanente (APPs), para o plano diretor e para instrumentos como o Estudo de Impacto de Vizinhança (EIV) como espaços de articulação entre recuperação ambiental, uso do solo e planejamento das cidades. Em outras palavras, não se trata apenas de “consertar” o dano dentro da área da mina, mas de integrar a reparação ao território, considerando rios, bairros, estradas e formas de ocupação do solo.

Apesar desse potencial, alguns desafios importantes permanecem. Há lacunas na legislação sobre fechamento de mina e sobre recuperação de longo prazo; as séries de dados ambientais disponíveis são muitas vezes heterogêneas (mudam de método, escala ou periodicidade ao longo do tempo); faltam *benchmarks* ou valores de referência oficiais para vários indicadores; e ainda existem riscos de captura informacional, quando empresas controlam boa parte dos dados relevantes ou quando a forma de divulgá-los dificulta a compreensão por parte do público leigo (IBAMA, 2019; Acselrad, 2004). Nessas condições, o reforço institucional de órgãos ambientais, da ANM e do Ministério Público, a padronização mínima de indicadores e a abertura de dados em formatos acessíveis tornam-se condições básicas para que qualquer protocolo saia do papel e se converta em efetividade (Braga; Fonseca, 2021).

Nesse cenário, o protocolo não se limita a ser uma ferramenta técnica; ele também pode servir como plataforma para ações de extensão universitária em territórios minerados. Isso inclui apoiar diagnósticos participativos, realizar oficinas de leitura de mapas e indicadores e desenvolver

processos formativos com conselhos municipais, comitês de bacia, coletivos e comunidades atingidas (Zhour, 2018). Ao tornar mais transparente a ligação entre condicionantes do licenciamento, resultados ambientais observados e decisões administrativas (como liberar o fechamento de uma mina ou acionar uma garantia financeira), o modelo contribui para reduzir assimetrias de informação e ampliar a capacidade de incidência social sobre a política de recuperação e de fechamento de minas, em linha com o que a literatura de justiça ambiental vem defendendo há décadas (Acselrad, 2004; Zhour, 2008; Zhour, 2018).

A utilidade do piloto também está em mostrar que a recuperação pós-mineração precisa ser lida em horizonte temporal prolongado. A própria avaliação institucional da revegetação emergencial assinala a necessidade de monitoramento até março de 2026, ou até que sejam minimizados os processos erosivos e formados corredores arbóreos autossustentáveis em APP, o que reforça a centralidade de critérios de resultado e de acompanhamento continuado.

Considerações Finais

Este trabalho propôs um protocolo jurídico-ambiental para avaliação da efetividade da recuperação pós-mineração e demonstrou sua operacionalidade mediante microaplicação piloto na sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, em Mariana (MG).

A principal contribuição é oferecer uma espécie de “régua de desempenho” para a recuperação pós-mineração: em vez de se limitar a checar se obras foram feitas ou relatórios entregues, o protocolo ajuda a responder se, de fato, a água está melhor, o solo está mais estável, a vegetação está voltando e as informações estão acessíveis à sociedade. Essa régua é construída a

partir de dados secundários (documentos de licenciamento, relatórios, bases públicas) e de análises em Sistema de Informação Geográfica (SIG), o que torna sua aplicação viável mesmo sem grandes estruturas de pesquisa de campo, desde que haja transparência e qualidade mínima das informações disponibilizadas pelos órgãos e pelas empresas.

Do ponto de vista jurídico, a proposta dialoga com a necessidade de fortalecer condicionantes de resultado e critérios de encerramento de minas, aproximando a prática brasileira de experiências internacionais de fechamento e de debates sobre justiça ambiental e controle social (Acseirad, 2004; Zhouri, 2008; Zhouri, 2018; Braga; Fonseca, 2021). O protocolo não substitui a atuação de órgãos ambientais, da ANM ou do Ministério Público, mas oferece uma ferramenta concreta que pode ser incorporada por esses atores, por comitês de bacia, por conselhos locais e por projetos de extensão universitária.

Como desdobramento, propõe-se uma agenda de implementação estruturada em pelo menos quatro frentes, quais sejam, a Pactuação de *Benchmarks* Territoriais (Em parceria com órgãos públicos, universidades e comunidades, preciso para definir valores de referência locais para indicadores de água, solo, vegetação e governança em cada sub-bacia/APP, levando em conta suas vulnerabilidades específicas); a Padronização de Formatos e Periodicidades de Dados (para que o protocolo funcione de forma contínua, as informações de monitoramento precisam ser divulgadas em formatos comparáveis, com periodicidade definida e em repositórios públicos acessíveis, reduzindo lacunas e descompassos entre séries temporais); Testes Comparativos entre sub-bacias e contextos (para aplicar o protocolo em diferentes sub-bacias dentro de Mariana e, posteriormente, em outros

municípios minerados, permite testar sua robustez, ajustar indicadores e verificar se a “régua” proposta realmente diferencia situações mais ou menos efetivas de recuperação); e a Avaliação Jurídica das Condicionantes e das Garantias (necessário analisar, à luz do direito ambiental e minerário, como redigir condicionantes de resultado alinhadas ao protocolo e como estruturar modelos de garantia financeira (valores, gatilhos, formas de execução) que respondam de maneira clara quando as metas não forem cumpridas.

Em síntese, o protocolo aqui delineado já pôde ser testado em escala piloto, revelando sua aptidão para distinguir cumprimento formal, cumprimento parcial e não cumprimento em contextos de recuperação pós-mineração. Seu aperfeiçoamento futuro dependerá da ampliação de séries históricas, da pactuação de *benchmarks* territoriais e da incorporação de novos indicadores ecológicos e socioeconômicos.

Referências

ACSEIRAD, Henri; HERCULANO, Selene; PÁDUA, José Augusto (org.). **Justiça ambiental e cidadania**. Rio de Janeiro: Relume-Dumará, 2004. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/porta/resource/pt/teh-201>. Acesso em: 1 ago. 2025.

ALMEIDA, Maurício Rios de; LIMA, Hernani Mota de. Garantia financeira para fins de fechamento de mina e o seu impacto na viabilidade de uma mina: estudo de caso de uma mina de grande porte. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 2, p. 203–209, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/BJRxPt7tHfGfHgHGzHtBNrx/>. Acesso em: 25 out. 2025.

BANCO MUNDIAL. **Mine Closure: A Toolbox for Governments**. Washington, DC: World Bank, 2021. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/278831617774355047/pdf/Mine-Closure-A-Toolbox-for-Governments.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2025.

BIANCHI, Miriam de Oliveira; SCORIZA, Rafael Nogueira; RESENDE, Alexander Silva de; CAMPELLO, Eduardo Francia Carneiro; CORREIA, Maria Elizabeth Fernandes; SILVA, Eliane Maria Ribeiro da. Macrofauna Edáfica como indicadora em revegetação com leguminosas arbóreas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e00085714, 2017. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/loram/a/Cv6GYMMgpmjJyTLPbGY8PJ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 3 dez. 2025.

BRAGA, Michelle Cristina dos Reis; FONSECA, Alberto de Freitas Castro. Reactive improvement of environmental policies: lessons from the Mariana and Brumadinho disasters. *Sustentabilidade em Debate*, v. 12, n. 3, p. 182–213, 2021. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/view/39412>. Acesso em: 3 dez. 2025.

BRASIL. **Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC), celebrado entre União, Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, autarquias e empresas responsáveis pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana/MG**. Brasília, DF: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/cif/arquivos/ttac/cif-ttac-completo.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2026.

CARMO, Flávio Fonseca do; KAMINO, Luciana Hiromi Yoshino; TOBIAS JUNIOR, Rogério; CAMPOS, Iara Christina de; CARMO, Felipe Fonseca do; SILVINO, Guilherme; CASTRO, Kenedy Junio da Silva Xavier de; MAURO, Mateus Leite; RODRIGUES, Nelson Uchoa Alonso; MIRANDA, Marcos Paulo de Souza; PINTO, Carlos Eduardo Ferreira. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 15, n. 3, p. 145–151, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1679007316301566>. Acesso em: 23 nov. 2025.

CASTRO, Maíra Fonseca Moreira; LIMA, Hernani Mota; FLORES, José Cruz do Carmo. Panorama do fechamento de mina em Minas Gerais, Brasil. **REM - Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, p. 205-211, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/Y9MM7jSDPPMwmhmJks5ygJN/?lang=en>. Acesso em 10 dez. 2025.

CASTRO, Paulo Tadeu de Almeida. Desastres de Mariana e Brumadinho: o que aprendemos ou deixamos de aprender? **Caderno de Geografia**, v. 31, n. esp., p. 1–22, 2021. Disponível em: https://cit.reparacaobaciaridoce.com/wp-content/uploads/2025/09/Desastres-de-Mariana-e-Brumadinho_o-que-aprendemos-ou-deixamos-de-aprender.pdf. Acesso em: 1 dez. 2025.

FARIA, Edimur Ferreira de; SOUZA, Renata Martins. Da responsabilidade civil do Estado por omissão fiscalizatória: accidentalidade provocada pelo rompimento da barragem de Brumadinho. **A&C – Revista de Direito Administrativo & Constitucional**, v. 19, n. 78, p. 221–248, 2019. Disponível em: <https://revistaec.com/index.php/revistaec/article/view/1160>. Acesso em: 14 set. 2025.

FERREIRA, Frederico Fernandes; FREITAS, Mariella Bontempo Duca; SZINWELSKI, Neucir; VICENTE, Natália; MEDEIROS, Laila Carine Campos; SCHAEFER, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud;

DERGAM, Jorge Abdala; SPERBER, Carlos Frankl. Impacts of the Samarco tailing dam collapse on metals and arsenic concentration in freshwater fish muscle from doce river, southeastern Brazil. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 622–630, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32470204/>. Acesso em: 12 fev. 2026.

FIGUEIREDO, Múcio do Amaral. Mineração e crise hídrica em Minas Gerais: Quadrilátero Ferrífero/Quadrilátero Aquífero. **Caderno de Geografia**, v. 31, n. esp. 1, p. 116–132, 2021. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/25533>. Acesso em: 7 out. 2025.

FOESCH, Meri Diana Strauss; FRANCELINO, Marcio Rocha; ROCHA, Pablo Azevedo; GOMES, Adalberto Rodrigues Lira. River water contamination resulting from the Mariana disaster, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 4, e20180132, 2020. Disponível em: <https://www.floram.org/article/doi/10.1590/2179-8087.013218>. Acesso em: 19 set. 2025.

FUJACO, Maria Augusta Gonçalves; LEITE, Mariangela Garcia Praça; MESSIAS, Maria Cristina Teixeira Braga. Análise multitemporal das mudanças no uso e ocupação do Parque Estadual do Itacolomi (MG) através de técnicas de geoprocessamento. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 4, p. 695–701, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/Ff5TqdTqdTKLNRfjvTnds m/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 4 set. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Nota Técnica nº 4/2020/CT-FLOR/GABIN**. Brasília, DF: IBAMA, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/cif/arquivos/notas-tecnicas/CT-FLOR/2020/cif-nt-ct-flor-04-2020.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Programas de recuperação de áreas degradadas (PRADs) em licenciamentos ambientais de mineração**. Organização: Aline Fonseca de Carvalho. Brasília: Ibama, 2019. 41 p. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciament o/2019/2019-08-07-PRADS_em_licenciamentos_de_mineracao.pdf. Acesso em: 5 out. 2025.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Encarte especial sobre a qualidade das águas do rio Doce após dois anos do rompimento da barragem de Fundão – 2015/2017**. Belo Horizonte: IGAM, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/rio-doce/documentos-relacionados/encarte-qualidade-da-gua-do-rio-doce-dois-anos-apos-rompimento-de-barragem-de-fundao-1.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2026.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (IFC). **Padrões de Desempenho sobre Sustentabilidade Socioambiental**. Washington, DC: IFC, 2012. Disponível em:

<https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2010/2012-ifc-performance-standards-pt.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2025.

LIMA, Hernani Mota de; FLORES, José Cruz do Carmo; COSTA, Flávio Luiz. Plano de recuperação de áreas degradadas versus plano de fechamento de mina: um estudo comparativo. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 4, p. 397–402, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/rem/a/gBK7r9hzzDDpnP8R5SBPBrH/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 1 ago. 2025.

REZENDE, Elcio Nacur; FLORIANO NETO, Alex. Responsabilidade civil ambiental da empresa diante das tragédias ambientais decorrentes do rompimento de barragens: uma análise à luz dos princípios da função social e da preservação da empresa. **Revista Húmus**, v. 9, n. 25, p. 179–198, 2019. Disponível em: <http://www.periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/revistahumus/article/view/11375>. Acesso em: 31 dez. 2026.

RICHARDSON, Katherine; STEFFEN, Will; LUCHT, Wolfgang; BENDTSEN, Jørgen; CORNELL, Sarah E.; DONGES, Jonathan F.; DRÜKE, Markus; FETZER, Ingo; BALA, Govindasamy; BLOH, Werner von; FEULNER, Georg; FIEDLER, Stephanie; GERTEN, Dieter; GLEESON, Tom; HOFMANN, Matthias; HUISKAMP, Willem; KUMMU, Matti; MOHAN, Chinchu; NOGUÉS-BRAVO, David; PETRI, Stefan; PORKKA, Miina; RAHMSTORF, Stefan; SCHAPHOFF, Sibyll; THONICKE, Kirsten; TOBIAN, Arne; VIRKKI, Vili; WANG-ERLANDSSON, Lan; Weber, Lisa; ROCKSTRÖM, Johan. Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, v. 9, n. 37, eadh2458, 2023. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>. Acesso em: 3 dez. 2025.

ROCKSTRÖM, Johan et al. A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, p. 472–475, 2009. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/461472a>. Acesso em: 3 dez. 2025.

SILVA, Hélio Augusto Teixeira; ALVES, Kerley dos Santos; GOUVEIA, Antônio Maria Claret de; GAMEIRO, Danton Heleno; OLIVEIRA, Leonardo Barreto de. **A representação jurídica dos municípios históricos, mineradores e turísticos de Ouro Preto e Mariana (MG) e sua relação com a sustentabilidade**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/15179>. Acesso em: 4 out. 2025.

SILVA, Isis Arend da; CAMPAGNA, Adriana Rosa; LIPP-NISSINEN, Kátia Helena. Recuperação de áreas degradadas por mineração: uma revisão de métodos recomendados para garimpos. **Pesquisas em Geociências**, v. 45, n. 3, e0691, 2018. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencia/s/article/view/91386>. Acesso em: 3 dez. 2025.

SILVA, Mariza Ferreira. Análise espacial dos impactos socioambientais provocados pelo rompimento de duas barragens de rejeitos de mineração: Fundão, na cidade de Mariana e Córrego do Feijão, no município de Brumadinho (Minas Gerais – Brasil). **Territorium**,

Coimbra, n. 28 (I), p. 67–92, 2021. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10102375.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2025.

TROVÃO, Yuri Rafael de Oliveira; ALVES, Kerley dos Santos. Participação popular e licenciamento ambiental: uma análise da legislação pátria e mineira. **Além dos Muros da Universidade**, v. 10, n. 2, p. 257–275, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufop.br/alemur/article/view/7824>. Acesso em: 14 out. 2025.

ZHOURL, Andréa. Justiça ambiental, diversidade cultural e accountability: desafios para a governança ambiental. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 23, n. 68, p. 97–107, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/rbcsoc/a/gL9s5ytDQ9jvzVH5GvtsbXw/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 9 out. 2025.

ZHOURL, Andréa (Org.). **Mineração, violências e resistências: um campo aberto à produção de conhecimento no Brasil**. Marabá, PA: Editorial iGuana; Associação Brasileira de Antropologia (ABA), 2018. Disponível em: <https://portal.abant.org.br/publicacoes/indice/titulo/M>. Acesso em: 1 nov. 2025.