



MINERAÇÃO E PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO: caminhos para o mutualismo sustentável

ADAM BARROS FERNANDES
LUIZ EDUARDO PANISSET TRAVASSOS
GABRIELI SANTOS BOULHOSA
MARIANA BARBOSA TIMO

MINERAÇÃO E PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO: caminhos para o mutualismo sustentável

Adam Barros Fernandes
Luiz Eduardo Panisset Travassos
Gabrieli Santos Boulhosa
Mariana Barbosa Timo



2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Mineração e patrimônio espeleológico [livro eletrônico] : caminhos para o mutualismo sustentável / Adam Barros Fernandes...[et al.].
-- Belo Horizonte, MG : IPCE, 2025.
PDF

Outros autores: Luiz Eduardo Panisset Travassos,
Gabrieli Santos Boulhosa, Mariana Barbosa Timo.
Bibliografia.
ISBN 978-65-987896-4-0

1. Cavernas - Brasil 2. Espeleologia 3. Mineração
4. Mineração - Aspectos ambientais 5. Políticas
públicas 6. Sustentabilidade I. Fernandes, Adam
Barros. II. Travassos, Luiz Eduardo Panisset.
III. Boulhosa, Gabrieli Santos. IV. Timo, Mariana
Barbosa. V. Título.

25-318059.0

CDD-551.4470981

Índices para catálogo sistemático:

1. Brasil : Espeleologia 551.4470981

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

SOBRE OS AUTORES



Adam Barros Fernandes

Geólogo, Especialista em Direito da Mineração, Mestre em Geotecnia e Doutor em Geologia e Recursos Naturais.

Pós-doutorando em Geografia - Tratamento da Informação Espacial na PUC Minas.

e-mail: adambarrosgeo@gmail.com



Luiz Eduardo Panisset Travassos

Geógrafo, Especialista em Gestão Ambiental de Resíduos Sólidos, Mestre e Doutor em Geografia, Doutor em Carstologia pela University of Nova Gorica, Eslovênia.

Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Geografia da PUC Minas.

Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq.

e-mail: luizepanisset@gmail.com



Gabrieli Santos Boulhosa

Geóloga, Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Consultora sênior de mineração na Ernst & Young, contribuindo para o desenvolvimento de novas tecnologias no setor mineral.

e-mail: gabrieli.boulhosa@gmail.com



Mariana Barbosa Timo

Engenheira Ambiental, Mestre e Doutora em Geografia, Doutora em Carstologia pela University of Nova Gorica, Eslovênia. Diretora da Spelayon Consultoria – EPP e Coordenadora da Comissão de Educação Espeleológica para Crianças e Adolescentes da União Internacional de Espeleologia (UIS).

e-mail: mariana.timo@spelayonconsultoria.com.br

APRESENTAÇÃO

Este livro dedica-se à interação entre o setor mineral e a conservação do patrimônio espeleológico, reunindo oito capítulos voltados à consulta de estudantes, profissionais da área, docentes, empresários e da sociedade civil.

Em um contexto de transição energética, pressões territoriais e exigências de governança, o livro integra fundamentos, marcos regulatórios, evidências públicas e boas práticas para qualificar as decisões.

O Capítulo 1 apresenta conceitos-chave e tipologias de cavernas, articula valores científico-culturais e ecológicos e introduz serviços ecossistêmicos, estabelecendo indicadores de importância e uma linguagem que serão mobilizados no licenciamento, no monitoramento e na gestão discutidos adiante.

O Capítulo 2 examina métodos de lavra (céu aberto e subterrânea) para explicar mecanismos típicos de impacto em ambientes cavernícolas: rebaixamento do nível d' água, vibrações e estabilidade, subsidência, alterações microclimáticas e de fluxos hídricos/aéreos. Compila casos emblemáticos no Brasil e no exterior como base para prevenção, mitigação e compensação.

O Capítulo 3 reconstitui a evolução normativa brasileira (com ênfase no Decreto nº 6.640/2008 e na Resolução CONAMA nº 347/2004) e estabelece pontes comparativas com referenciais internacionais, destacando as implicações práticas para licenciar, fiscalizar e decidir.

O Capítulo 4 analisa processos administrativos da ANM e autos de infração do IBAMA para identificar padrões recorrentes de impacto sobre cavernas e demonstra como esses dados podem fortalecer a gestão ambiental, a transparência e o controle social.

O Capítulo 5 reúne experiências nacionais e internacionais que atuam como “provas de conceito” da compatibilização: boas práticas empresariais e certificações, além de parcerias entre empresas, universidades e órgãos públicos, com participação estruturada da sociedade civil.

O Capítulo 6 propõe instrumentos e arranjos para reduzir conflitos e gerar benefícios compartilhados: governança socioambiental (ESG), planejamento e zoneamento territorial (como o ZEE), planos espeleológicos regionais, inovação tecnológica (mapeamento 3D, monitoramento contínuo, aplicações de IA) e engajamento comunitário com metas e indicadores.

O Capítulo 7 discute como a transição energética, os minerais críticos e a digitalização da mineração, articulados à Agenda 2030/ODS, reconfiguram o setor e a conservação espeleológica; aponta tendências em políticas públicas, P&D e tecnologias emergentes.

O Capítulo 8 consolida aprendizados e reposiciona a convivência mineração–cavernas como horizonte de mutualismo sustentável: do curto prazo econômico ao legado socioambiental, com transparência, metas e indicadores como pilares.

Em conjunto, o livro demonstra que o confronto não é destino: ao integrar conhecimento técnico, marcos legais,

evidências públicas e experiências concretas, é possível governar o subterrâneo de modo a compatibilizar a atividade mineral com a conservação do patrimônio espeleológico e transformar tensões históricas em benefícios compartilhados.

Aos leitores, desejamos que aproveitem a leitura, pois a Espeleologia é uma ciência fascinante e essencial. Que este livro ajude a transformar o conhecimento em prática e que seja trabalhado, processado, organizado e divulgado, para que o saber seja cada vez mais bem aproveitado.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	9
CAPÍTULO 1 PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO VALORES E CONFLITOS.....	13
CAPÍTULO 2 MINERAÇÃO E IMPACTOS SOBRE AMBIENTES SUBTERRÂNEOS.....	21
CAPÍTULO 3 MARCOS LEGAIS E REGULATÓRIOS.....	33
CAPÍTULO 4 ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS EM PROCESSOS ADMINISTRATIVOS.....	38
CAPÍTULO 5 EXPERIÊNCIAS DE CONCILIAÇÃO E BOAS PRÁTICAS	48
CAPÍTULO 6 CAMINHOS PARA O MUTUALISMO SUSTENTÁVEL	53
CAPÍTULO 7 PERSPECTIVAS FUTURAS: MINERAÇÃO E CONSERVAÇÃO ESPELEOLÓGICA EM CONVERGÊNCIA	64

CAPÍTULO 8	
PARA ALÉM DO SUBTERRÂNEO: UM NOVO PARADIGMA DE CONVIVÊNCIA ENTRE MINERAÇÃO E CONSERVAÇÃO	73
CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
REFERÊNCIAS.....	87

INTRODUÇÃO

As cavernas e os terrenos cársticos ocupam uma posição singular no debate contemporâneo sobre sustentabilidade. Eles reúnem, num mesmo espaço, aquíferos de grande relevância, biodiversidade especializada, arquivos paleoclimáticos de grande valor e uma herança cultural que atravessa milênios. Não por acaso, estima-se que áreas cársticas cubram uma parcela significativa das terras emersas e abasteçam, com água subterrânea, mais de um quinto da população mundial, um dado que, por si só, desloca o patrimônio espeleológico do campo do “excepcional” para o centro das políticas públicas e da gestão territorial.

Esse patrimônio, contudo, não é apenas um conjunto de formas e processos naturais: é também um lugar de sociabilidades, crenças, ciência e economia. As cavernas abrigaram populações, inspiraram rituais, preservaram registros arqueológicos e paleontológicos e, hoje, acolhem atividades de visitação e educação que, quando bem conduzidas, geram renda e reforçam a conservação. O valor é múltiplo (científico, ecológico, cultural e paisagístico) e, justamente por isso, a tomada de decisão precisa ser prudente, informada e intersetorial.

É nesse ponto que surgem tensões. Em contextos cársticos, a alta conectividade entre superfície e subterrâneo torna o sistema intrinsecamente vulnerável: rebaixamentos do lençol freático, alterações na recarga, subsidência do

terreno, dolinamentos, aumento da turbidez e contaminação se propagam rapidamente e podem ser irreversíveis. Onde a mineração se sobrepõe ao carste, seja ele carbonático ou não, os riscos se ampliam e exigem salvaguardas robustas desde as fases inicial e exploratória, não apenas durante a lavra. A questão não é negar a importância econômica do setor, mas reconhecer que, em ambientes sensíveis, a prevenção vale mais do que a compensação tardia.

Do ponto de vista institucional, avanços normativos brasileiros estabeleceram critérios de relevância, exigência de estudos espeleológicos e condicionantes específicas. Ainda assim, persistem lacunas de padronização, integração de dados e fiscalização. Por isso, três princípios precisam orientar escolhas: 1) a *precaução* (agir diante da incerteza com foco na integridade ecológica), 2) *evidência* (linhas de base confiáveis, indicadores replicáveis e monitoramento contínuo) e *proporcionalidade* (medidas compatíveis com o risco e com o valor em jogo, sobretudo em cavidades de máxima relevância). A legitimidade social, a chamada *licença social para operar* (LSO), depende de participação qualificada, transparência e repartição justa de benefícios, com diagnóstico socioeconômico, mapeamento das partes interessadas, consulta e comissões de acompanhamento.

A tecnologia, por sua vez, é aliada quando está a serviço desses princípios. Laser scanner 3D, LIDAR terrestre, fotogrametria, sensoriamento remoto com drones, microssísmica e modelos hidrogeológicos preditivos ele-

vam a resolução do diagnóstico e permitem decisões mais seguras, inclusive a paralisação preventiva e o protocolo de achados fortuitos. Esses recursos não substituem a governança, mas sim a potencializam. Acoplados a planos de monitoramento adaptativo e a métricas claras, reduzem incertezas e ajudam a evitar os impactos que a literatura descreve há décadas no carste.

Propomos, portanto, uma mudança de postura: sair da lógica binária “mineração versus conservação” e adotar o *mutualismo sustentável* como horizonte operativo. Isso significa planejar o território de modo integrado (delimitação de áreas sensíveis, zonas de amortecimento e corredores ecológicos), qualificar o licenciamento com informações de qualidade e incorporar, desde o projeto, metas de proteção do carste e de desenvolvimento local. No pós-mineração, a reabilitação precisa mirar processos, não apenas cenários: replicação de formas de relevo, restabelecimento da drenagem natural, estabilidade geotécnica, conectividade ecológica e uso social compatível.

Em última instância, este livro parte de uma convicção simples: as cavernas não são obstáculos à modernidade, mas referências para uma modernidade mais inteligente. Onde antes se via apenas rocha e vazio, vemos infraestrutura hídrica crítica, arquivos de memória ambiental e espaços de aprendizagem e de identidade. Entre a pressa da economia e o tempo lento da geologia, a boa gestão é a ponte possível. Se soubermos ouvi-la com ciência, técnica, participação e

ética, mineração e patrimônio espeleológico podem deixar de ser adversários e tornar-se parceiros na construção de territórios mais resilientes, justos e duráveis.

CAPÍTULO 1

PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO: VALORES E CONFLITOS

O patrimônio espeleológico é um componente singular da geodiversidade e da cultura, abrangendo não apenas formações geológicas subterrâneas de elevada complexidade, mas também espaços de interação entre natureza e sociedade.

Globalmente, terrenos cársticos ocupam cerca de 13% das terras emersas e abrigam água subterrânea para mais de 20% da população, o que reforça a centralidade desse patrimônio para políticas públicas e para a gestão territorial (Ford; Williams, 2007; Williams; Fong, 2010; Berbert-Born *et al.*, 2016; Travassos, 2019).

Ao longo da história, as cavernas desempenharam diversos papéis, como abrigo, locais de ritual e de contemplação (Travassos, 2010; Cassimiro *et al.*, 2012) e fontes de recursos (Gomes; Piló, 1992). Mais recentemente, o espeleoturismo, quando bem manejado, tem sido apontado como uma via de valorização e conservação do patrimônio espeleológico, com benefícios socio-econômicos para as populações locais (Berbert-Born *et al.*, 2016). Consolidaram-se, portanto, como bens de interesse científico, cultural e ecológico (Trajano, 2000; Auler; Rubbioli; Brandi, 2001). A literatura técnico-científica recomenda que decisões sobre uso e ocupação em carste sejam orientadas pelo princípio da precaução, dado o

ambiente naturalmente vulnerável (Berbert-Born, 2016). Essa leitura integradora também perpassa os geossistemas ferruginosos, nos quais a conciliação entre conservação e usos econômicos (mineração) exige uma gestão baseada em evidências (Ruchkys *et al.*, 2024). No setor mineral, ampliar a aceitação comunitária – a chamada “licença social para operar” – é hoje vital para a viabilidade dos empreendimentos, o que inclui incorporar objetivos de proteção do carste às políticas e controles gerenciais (Sánchez, 2016)

Para Couto e Travassos (2023), a interação entre ambientes cavernícolas e práticas humanas é dialética: as cavernas moldam e são moldadas pelos usos sociais. No Quadrilátero Ferrífero, o Parque Nacional da Serra do Gandarela (criado em 2014) foi utilizado como recorte para inventariar e avaliar sítios de geodiversidade com foco educacional, diante das atividades minerárias e da presença de cavernas em litologias ferruginosas, carbonáticas e siliciclásticas (Santos *et al.*, 2018). Compreender esses ambientes é importante para orientar políticas e práticas que conciliem atividades econômicas com a conservação do patrimônio natural e cultural. Para Berbert-Born *et al.* (2016), esse entendimento deve considerar a elevada vulnerabilidade intrínseca dos sistemas cársticos e a necessidade de um manejo hídrico criterioso para evitar rebaixamentos do nível freático que possam induzir subsidências e colapsos de cobertura.

O termo patrimônio espeleológico abrange o conjunto de cavidades naturais subterrâneas, bem como os

elementos geológicos, biológicos, paleontológicos, arqueológicos e históricos nelas inseridos, e os ecossistemas associados (Fernandes *et al.*, 2022). No Brasil, o marco regulatório tem origem no Decreto nº 6.640/2008, posteriormente alterado pelo Decreto nº 10.935/2022, e é complementado pela Instrução Normativa MMA nº 2/2017, que reconhecem as cavernas como bens da União e definem critérios para sua proteção e uso sustentável (Brasil, 2008; 2022). Para além do cumprimento legal, recomenda-se a integração de metas de proteção do carste na governança das empresas e a melhoria contínua dos estudos ambientais (Sánchez, 2016).

Do ponto de vista didático-metodológico, há uma lacuna de procedimentos específicos para avaliar o potencial educativo da geodiversidade (Gray, 2004; Santos *et al.*, 2018). Em estudos espaciais, o entorno de 250 m ao redor das entradas é frequentemente adotado como área inicial de análise (Santos *et al.*, 2018). Mapas de vulnerabilidade e risco para proteção de aquíferos cársticos constituem referência metodológica internacional (Zwahlen, 2003).

Sob a perspectiva científica, cavernas são laboratórios naturais que permitem investigações sobre processos de carstificação, dinâmica hidrogeológica, evolução biológica e registros paleoclimáticos (Langer, 2001; Llamas; Custodio, 2002; Custodio; Llamas, 2012; Custodio, 2021). Estudos de paisagem em áreas ferruginosas reforçam que a estrutura e a composição do entorno das cavidades influenciam

diretamente as funções ecológicas e as estratégias de manejo (Ruchkys; Travassos, 2015; Ruchkys *et al.*, 2024). Os efeitos espeleoclimáticos (e.g.: estabilidade térmica e alta umidade; acúmulo de CO₂ em setores profundos) e a distinção entre espeleometeorologia e espeleoclimatologia estruturam a leitura do ambiente subterrâneo (Romero, 1971; Lobo, 2010; Lecoq *et al.*, 2017; Couto; Travassos, 2023). Elas também funcionam como arquivos paleoambientais de alta resolução, preservando informações essenciais à reconstrução de eventos pretéritos e à compreensão da relação entre sociedade e ambiente. Para Callux e Lobo (2016), do ponto de vista hidrogeológico, a remoção da cobertura vegetal e o aumento do escoamento superficial podem levar sedimentos e contaminantes a sumidouros e condutos, afetando a qualidade da água e até secando nascentes a jusante.

A classificação das cavernas geralmente baseia-se na natureza litológica e nos processos formadores predominantes. Podem ser destacadas:

- **Cavernas carbonáticas:** formadas em rochas calcárias ou dolomíticas, associadas a processos de dissolução por águas levemente ácidas (Ford; Williams, 2007);
- **Cavernas em rochas não carbonáticas:** desenvolvidas em quartzito, arenito, formações ferríferas, gnaisses, granito etc., nas quais predominam controles estruturais (fraturas, falhas e planos de anisotropia), erosão diferencial, intemperismo físico-químico e, em alguns casos, dissolução localizada mais lenta que em

carbonatos (Auler; Rubbioli; Brandi, 2001);

- **Cavernas vulcânicas:** resultantes do resfriamento diferencial de fluxos de lava e do escape de gases, formando tubos de lava e câmaras associadas (Wood, 1981);
- **Cavernas marinhas:** formadas por erosão mecânica e química provocadas por ondas, marés e spray salino em zonas litorâneas (Halliday, 2007).

Essa diversidade tipológica (Figura 1) evidencia a multiplicidade de valores atribuídos às cavernas, tanto no contexto geológico quanto no socioambiental.

Em Carajás, por exemplo, análises multitemporais de uso e cobertura do solo (1985–2021) em buffers ao redor de cavernas evidenciam a relevância de monitorar a fragmentação, a conectividade e as atividades de mineração para sustentar decisões (Ruchkys *et al.*, 2024). Em paralelo, no Parque Nacional da Serra do Gandarela foram gerados 33 polígonos ao agrupar cavernas por buffers de 250 m, revelando uma forte heterogeneidade espacial na distribuição das 265 cavidades inventariadas (Santos *et al.*, 2018). A experiência nacional e internacional também documenta impactos irreversíveis associados à mineração em carste, como perda de cavernas, destruição de sítios arqueológicos e paleontológicos, degradação da qualidade da água e perda de nascentes quando não há estudos e salvaguardas adequados (Trajano; Neri, 2016).

O patrimônio espeleológico tem importância em múltiplas dimensões. Na dimensão científica, cavernas são depósitos de minerais raros, fósseis e espeleotemas que registram variações paleoclimáticas e paleoambientais (Cruz Jr. *et al.*, 2005).

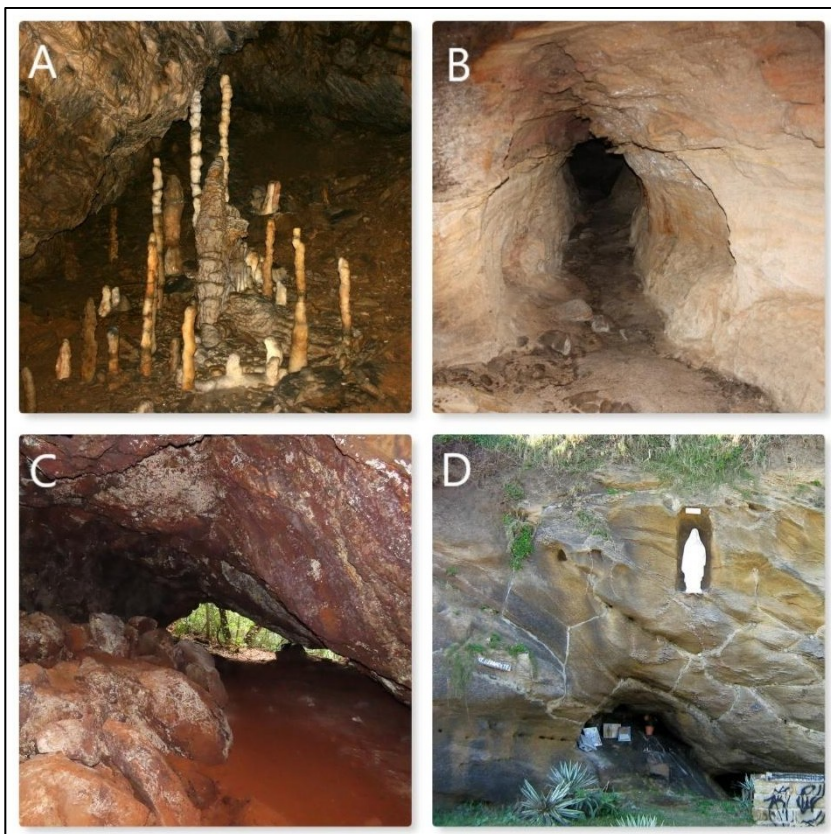


Figura 1: Exemplos de cavidades naturais subterrâneas em diferentes tipos de rocha. A) Espeleotemas em uma caverna carbonática. B) Aspecto morfológico de uma caverna em quartzito. C) Caverna em rocha ferífera. D) Pequena caverna de uso religioso no litoral do Rio de Janeiro. **Fonte:** Fotos de L.E.P. Travassos.

No aspecto cultural e histórico, são portadoras de vestígios arqueológicos, de arte rupestre e de registros da ocupação humana em distintas fases históricas (Schmitz, 1996). Casos de peregrinações e paisagens simbólicas ilustram a persistência de vínculos espirituais e culturais com cavernas (Gibson, 2008; Cigna; Forti, 2013; Harari, 2016; Travassos, 2023).

Também possuem relevância ecológica, constituindo habitats singulares para espécies endêmicas e troglóbias, além de desempenharem papel fundamental no equilíbrio hidrológico e na manutenção da biodiversidade (Trajano; Bichuette, 2010; Hirata *et al.*, 2019). No caso das *bat caves*, há benefícios ecossistêmicos adicionais (polinização, dispersão de sementes e controle de pragas), com implicações econômicas e de conservação (Furey; Racey, 2015; Medellín *et al.*, 2017; Freire, 2023; Ruchkys *et al.*, 2024; Piló *et al.*, 2023). A visitação religiosa e turística pode gerar impactos (e.g., quebra de espeleotemas, contaminação, compactação, alterações na circulação) e demandar manejo específico.

Sendo assim, a conservação dos ecossistemas associados a cavernas e áreas cársticas é reforçada por múltiplos fatores. Tais ambientes influenciam diretamente a disponibilidade hídrica, ao atuarem como reservatórios e condutores de águas subterrâneas, e contribuem para a ciclagem de nutrientes por meio da transformação e do transporte de matéria orgânica. (Custodio; Llamas, 2012; Hirata *et al.*, 2019; Llamas; Custodio, 2002; Custodio, 2021).

Em ambientes ferruginosos com alta demanda minerária, a proteção de áreas de forrageamento e de corredores ecológicos ao redor das cavidades é destacada como medida essencial de gestão integrada (Ruchkys *et al.*, 2024). No Parque Nacional do Gandarela, a prevalência de cambissolos e neossolos – solos pouco evoluídos, rasos e associados a relevo movimentado – aumenta a vulnerabilidade ambiental e demanda planejamento cuidadoso. Ferramentas de geoprocessamento e bases padronizadas têm sido aplicadas para caracterizar o entorno das cavidades e apoiar a tomada de decisões (Santos *et al.*, 2018). Além disso, oscilações artificiais do nível d'água subterrâneo decorrentes de exploração mal dimensionada podem desestabilizar superfícies e elevar o risco de subsidências, exigindo monitoramento hidrogeológico contínuo.

Dessa forma, é possível evidenciar que as cavernas extrapolam o escopo estritamente geológico e constituem bens integradores entre ciência, cultura e biodiversidade. O reconhecimento de sua importância é condição para um diálogo construtivo entre mineração e conservação, orientando modelos de gestão integrada e decisões baseadas em evidências, diretrizes que norteiam os capítulos subsequentes. Em síntese, recomenda-se uma abordagem equilibrada entre a extração de recursos e a conservação, com políticas públicas robustas e monitoramento contínuo (Couto; Travassos, 2023).

CAPÍTULO 2

MINERAÇÃO E IMPACTOS SOBRE AMBIENTES SUBTERRÂNEOS

A mineração é uma das bases da economia contemporânea, responsável pelo suprimento de matérias-primas para a indústria, a construção civil e a produção de bens de consumo. Ainda assim, quando incide sobre ambientes sensíveis, especialmente em regiões cársticas (ricas em patrimônios geológicos, ecológicos e culturais de alto valor), os riscos socioambientais se intensificam (Santos, 2004; Figueiredo; Rasteiro; Rodrigues, 2010; Teles; Morais, 2019; Sánchez, 2020; Fernandes *et al.*, 2022).

Em contextos cársticos carbonáticos ou não, os impactos tendem a ser exacerbados e, não raro, irreversíveis; por isso, deve-se buscar um equilíbrio entre a extração de recursos e a avaliação dos efeitos negativos prováveis (Santos, 2004; Brinkmann; Parise, 2012; Parise, 2016; Potapov *et al.*, 2017; Sonter *et al.*, 2017; Teles; Morais, 2019; Siqueira-Gay *et al.*, 2020; Fernandes *et al.*, 2022). No carste, o decapeamento altera a infiltração e o transporte de sólidos; já o rebaixamento do aquífero reduz as vazões de nascentes e/ou de cursos d'água. A perda de pressão hidrostática associada ao rebaixamento pode levar a colapsos da cobertura e movimentos de massa, com transformações praticamente irreversíveis, além de intensificar processos de dolinamento e subsidência.

O PIB do Brasil somou R\$ 3,2 trilhões no 2º trimestre de 2025, com alta de 2,2% em relação ao mesmo período de 2024. Pela ótica da oferta, a Indústria cresceu 1,1%, com destaque para as Indústrias Extrativas, que avançaram 8,7% impulsionadas pelo aumento na extração de petróleo e gás, além do minério de ferro (IBGE, 2025). Nas substâncias minerais não metálicas, a demanda por calcário seguiu elevada: o consumo aparente de calcário agrícola foi de ~59,6 milhões de toneladas em 2024 e a ABRACAL estima cerca de 58 milhões de toneladas em 2025. Em relação ao cimento, principal destino do calcário, as vendas somaram 44,2 milhões de toneladas no ano até agosto/2025, apesar de uma queda pontual de 2,5% no mês (ABRACAL, 2025; SNIC, 2025).

A mineração desempenha papel estratégico na economia global, contribuindo para o PIB e para a geração de empregos diretos e indiretos. No Brasil, historicamente, impulsiona o desenvolvimento regional, com destaque para Minas Gerais, Pará, Bahia e Goiás. Entretanto, em áreas cársticas, demanda salvaguardas adicionais, dado o potencial de perda de habitats, comprometimento hidrogeológico e agravamento de conflitos socio-ambientais. De acordo com Cavalcanti *et al.* (2013) e Parise (2016), além do dano biofísico, a perda de paisagens cársticas reduz os valores estéticos e as receitas turísticas, inclusive quando há cavernas turísticas e sítios reconhecidos por seu valor cênico. Para Sánchez (2016), a própria ideia de “licença social para operar” em regiões cársticas requer

reconhecer conflitos pela apropriação de recursos naturais e culturais e instituir processos de diálogo e de governança com as comunidades, o poder público e a sociedade civil.

Os métodos de lavra, em termos gerais, dividem-se em duas grandes categorias: lavra a céu aberto e lavra subterrânea. A lavra a céu aberto caracteriza-se pela remoção progressiva de camadas de solo e rocha (decapeamento) até a extração do minério, sendo indicada para depósitos rasos ou de ampla extensão lateral. Embora eficiente do ponto de vista produtivo, tende a causar impactos expressivos na paisagem, na cobertura vegetal e na dinâmica hídrica superficial (White, 1988; Hartman; Mutmanský, 2002). No carste, recomenda-se monitoramento hidrológico, hidrogeológico e hidroquímico desde a implantação, com séries temporais, pontos de controle e parâmetros isotópicos para detectar e mitigar perturbações (Trajano; Neri, 2016).

Os principais efeitos no carste associados à lavra a céu aberto ou subterrânea incluem: (i) perda de feições e paisagens cársticas; (ii) destruição do epicarste; (iii) alterações hidrológicas e hidrogeológicas; (iv) subsidência e dolinamento; e (v) poluição e contaminação dos ecossistemas (White, 1988; Ford e Williams, 2007; Parise, 2016). A lavra subterrânea, aplicada a depósitos mais profundos, utiliza métodos como câmaras-e-pilares, *sublevel stoping* e *longwall mining*, entre outros, o que tende a reduzir impactos diretos na superfície, porém eleva os riscos de subsidência, de instabilidades geotécnicas e de

alterações no fluxo de águas subterrâneas (Hustrulid; Bullock, 2001). Efeitos de rebaixamento podem iniciar um novo nível de erosão subsuperficial, promovendo a migração descendente de materiais e a formação de subsidências da cobertura; cargas externas, como bota-foras e pilhas de estéril, também agravam o processo (Hess; Slattery, 1999; Trajano; Neri, 2016).

A atividade minerária em ambientes cársticos pode produzir impactos severos e, por vezes, irreversíveis: dano físico a cavidades (incluindo supressão parcial ou total), intervenções no raio de influência legal, mudanças no regime hídrico, contaminação de aquíferos e perda de biodiversidade especializada (Figueredo; Rasteiro; Rodrigues, 2010; Trajano; Bichuette, 2010; Teles; Morais, 2019). Além disso, eventos de subsidência ou colapso em galerias subterrâneas podem comprometer a integridade ecológica e a segurança das comunidades do entorno. A destruição de cavernas durante o avanço de frentes de lavra e o aterro de grandes vazios com resíduos são práticas frequentemente documentadas; no mínimo, recomenda-se explorar e documentar a cavidade antes de qualquer decisão (Parise, 2016). Esse conjunto de riscos é extensamente documentado para o carste e para as cavernas, incluindo a perda de feições geomorfológicas, a perda de nascentes, a redução da recarga e a degradação de habitats superficiais, subsuperficiais e subterrâneos.

Alterações no aquífero podem incluir enchentes súbitas em minas, com perdas econômicas e de vida,

fenômeno associado a falhas e a paleoformas cársticas (Wanfang, 1997; Gongyu; Wanfang, 1999; Yin; Zhang, 2005; Parise, 2016). Secas de nascentes e intermitência de córregos decorrentes do desmatamento e da alteração da recarga subterrânea são relatadas em múltiplos estudos de campo em regiões cársticas, tradicionais ou não.

Além do ciclo operacional, a fase de pós-mineração torna-se crítica: pilhas e bota-foras podem desencadear drenagem ácida (AMD), risco de autoignição e incêndios, e movimentos de massa nas encostas, exigindo prevenção, monitoramento e planos de recuperação e/ou reabilitação. De acordo com Sánchez *et al.* (2016), recomenda-se avaliar e acompanhar as práticas de recuperação de áreas degradadas (RAD), a drenagem das águas pluviais nas pilhas e o monitoramento pós-fechamento, com participação das partes interessadas. Experiências internacionais apontam para a necessidade de regras específicas e até normativas locais para áreas de deposição, incluindo a avaliação da viabilidade de descaracterização de barragens rejeitos quando técnica e ambientalmente justificável (Warcholik; Gawor; Dolnicki, 2014). Em regiões cársticas, áreas mineradas e abandonadas tendem a virar depósitos ilegais de resíduos, agravando a vulnerabilidade dos aquíferos; por isso, planos de recuperação devem ser parte obrigatória do projeto de fechamento de mina (Zwahlen, 2004; Bakalowicz, 2005; Parise, 2016).

A expansão minerária no Brasil tem suscitado debates intensos sobre sua compatibilização com o patrimônio

espeleológico e cultural, bem como com o turismo, especialmente em áreas como o entorno da Serra da Moeda e de Cordisburgo (Fernandes *et al.*, 2022). Complementar a essa discussão as análises de custo-benefício devem internalizar as perdas de valor cênico e de renda turística decorrentes da instalação de pedreiras em paisagens cársticas (Parise, 2016). Recomenda-se, em paralelo, um programa mínimo de monitoramento sismográfico, hidrológico e hidrogeológico, geoestrutural, fotográfico, climático, microclimático e espeleoclimático.

Apesar desses desafios, existem no país experiências de convivência mais equilibradas, como no Quadrilátero Ferrífero (MG) e em Carajás (PA), associadas a programas de gestão espeleológica e a medidas compensatórias implementadas pelos empreendimentos minerários. Nesses arranjos, boas práticas incluem metas de desenvolvimento local, capacitação e ações de longo prazo articuladas ao fechamento de mina.

Embora o Brasil possua diretrizes e instrumentos normativos que visam compatibilizar o uso e a conservação, a literatura destaca a necessidade de políticas públicas mais integradas no âmbito do Patrimônio Espeleológico Brasileiro (Cavalcanti *et al.*, 2013; Teles; Moraes, 2019). Para aprimorar a tomada de decisão na gestão dessas áreas, recomenda-se incorporar a perspectiva de medir a perturbação e a sustentabilidade cárstica (Brinkmann; Parise, 2012; Teles; Moraes, 2019). Destaca-se, portanto, que as questões sociais e econômicas na mineração e no carste

apresentam peculiaridades e variam ao longo do ciclo de vida da mina, demandando governança e transparência por parte dos entes envolvidos.

Em âmbito internacional, destacam-se as cavernas de Altamira (Espanha), situadas em região com histórico de atividades extrativas e reconhecidas como Patrimônio Mundial pela UNESCO. Situações de efeitos em cadeia (*chain impacts*) incluem rebaixamento do lençol por lavra, erosão, *piping* e colapso superficial subsequente (Newton, 1987; Langer, 2001; Sánchez *et al.*, 2007; Parise, 2016). O epicarste, apesar de pouco espesso, é vital para a infiltração, o armazenamento e a biota subterrânea (Williams, 1983; 2008; Culver; Pipan, 2009; Parise, 2016).

A gestão sustentável da mineração em áreas cársticas requer um pacote robusto de prevenção e mitigação: estudos de impacto ambiental com abordagem espeleológica e hidrogeológica específicas, monitoramento contínuo (superficial e subterrâneo) e adoção de tecnologias e arranjos operacionais menos invasivos (Sánchez, 2020). Em casos em que a supressão de cavidades se mostre tecnicamente inevitável, a legislação brasileira estabelece compensação ambiental voltada à proteção de cavidades de relevância equivalente ou superior (Brasil, 2008). Assim, para diagnosticar e monitorar distúrbios antrópicos no carste, ferramentas como o *Karst Disturbance Index* (KDI) – com indicadores de Geomorfologia, Atmosfera, Hidrologia, Biota e Cultura – têm sido aplicadas em diversos cenários, conforme demonstrado por Van

Beynen e Townsend (2005), North *et al.* (2009) e Parise (2016).

O caso Carrara–Corchia nos Alpes Apuanos, na Itália (Figura 2), ilustra o conflito e a busca de uso sustentável: após décadas de tensão entre pedreiras de mármore e espeleologia, a criação do Parque dos Alpes Apuanos e a abertura turística de um trecho da caverna Antro del Corchia mostraram que benefícios locais podem surgir de forma concomitante com a extração de mármore (Piccini *et al.*, 2008; Parise, 2016).

Cabe reconhecer, ainda, a dimensão arqueológica e cultural das cavernas, que são lugares sagrados em muitas sociedades. Brady e Rissolo (2006) afirmam que, nas Américas, pesquisas em cavernas no México indicam que a civilização Maia frequentemente minerou o subterrâneo, ainda que em pequena escala, em zonas escuras, com finalidades ritualísticas. Entre essas práticas estavam a extração de *kancab* (“terras vermelhas”) e *sah kab* (“argilas esbranquiçadas”), empregadas tanto em práticas de geofagia quanto em usos rituais, além da retirada de espeleotemas para fins simbólicos e construtivos. Em diversos contextos, túneis de extração funcionaram como “cavernas artificiais”, o que reforça a necessidade de protocolos de salvaguarda do patrimônio cultural subterrâneo em planejamentos de mineração contemporâneos nessas áreas.

No Brasil, a mineração de salitre consolidou-se entre o fim do século XVIII e as primeiras décadas do século XIX,

impulsionada por medidas régias e pela organização de frentes produtivas e de fábricas de pólvora (Gomes; Piló, 1992; Gandolfi; Figueirôa, 2014).

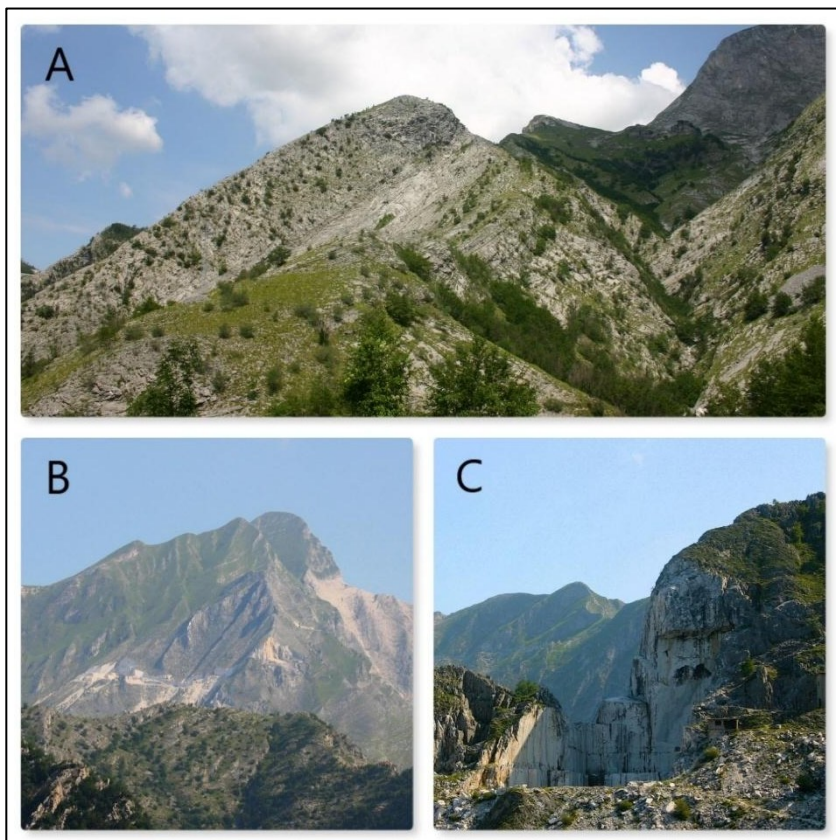


Figura 2: Mineração de mármore nos Alpes Apuanos (Carrara, Toscana, Itália). A) Panorama do carste dos Alpes Apuanos e de seus campos de lapiás. B) Encosta exibindo pedreiras ativas, com bancadas e estradas de acesso que recortam o relevo. C) Detalhe frontal de lavra a céu aberto, com paredes verticais e extração de blocos de mármore de Carrara. **Fonte:** Fotos de L.E.P. Travassos.

No início dos Oitocentos, a Coroa suspendeu trabalhos particulares e enviou José Vieira Couto (1803) para estudar as nitreiras de Monte Rodrigo, produzindo memória técnica e cartográfica (Gomes; Piló, 1992) e, em 1808, criou-se no Rio de Janeiro a Real Fábrica de Pólvora, marco institucional para a produção em larga escala (Piva; Filgueiras, 2008; Gandolfi; Figueirôa, 2014).

As principais frentes produtivas registradas incluem Arcos (Loca Grande/Boa Vista) – com emprego de mão de obra escravizada e menção a ossadas fósseis – e o conjunto Montes Claros–Coração de Jesus (Lapa Grande), visitados pelos naturalistas Saint-Hilaire, Eschwege, Spix e Martius entre 1818 e 1822 (Gomes; Piló, 1992). Em síntese, a lavra histórica de salitre em ambientes cavernícolas integrou um esforço estatal e produtivo que, hoje, reforça a necessidade de salvaguardas específicas ao patrimônio cultural subterrâneo nos processos de licenciamento ambiental.

À luz dos riscos típicos da pós-mineração (e.g.: Drenagem Ácida de Mina – DAM, contaminação de água e solo e instabilidade de taludes), é recomendável que os planos de fechamento de mina incorporem diretrizes específicas para estruturas de apoio, como barragens e pilhas de estéril, integrando exigências legais gerais com regulamentos complementares em nível local quando necessário (Lana, 2008; Warcholik; Gawor; Dolnicki, 2014). Exemplos de boas práticas incluem a drenagem de águas pluviais nas pilhas, a revegetação e a avaliação periódica das práticas de recuperação de áreas degradadas (RAD). De

acordo com Parise (2016), tecnologias e modelagens geológico-geotécnicas hoje permitem prever a propagação de colapsos e a subsidência até a superfície, apoiando a mitigação de riscos.

A efetividade desses instrumentos depende de governança participativa, transparência e fiscalização, visando a uma convivência de fato sustentável entre a mineração e o patrimônio espeleológico. Minerar em áreas cársticas exige planejamento, controle e recuperação desde o início, pois formas e depósitos que levaram milhões de anos a se formar podem ser destruídos rapidamente por ações humanas. É imprescindível reconhecer que as atividades minerárias e seus potenciais impactos sobre ambientes subterrâneos evidenciam a complexidade de compatibilizar a produção mineral com a conservação do patrimônio natural (Figura 3).

Casos emblemáticos nacionais e internacionais demonstram que, embora a mineração seja vital para a economia global, sua prática em regiões cársticas exige controles ambientais rigorosos, a fim de evitar danos irreparáveis à biodiversidade, à cultura e aos recursos hídricos. Portanto, o desafio contemporâneo consiste em articular ciência, tecnologia, marcos legais e diálogo social – inclusive com salvaguardas específicas para a fase de fechamento de mina e para o patrimônio espeleológico/cultural – a fim de alcançar soluções equilibradas e duradouras.

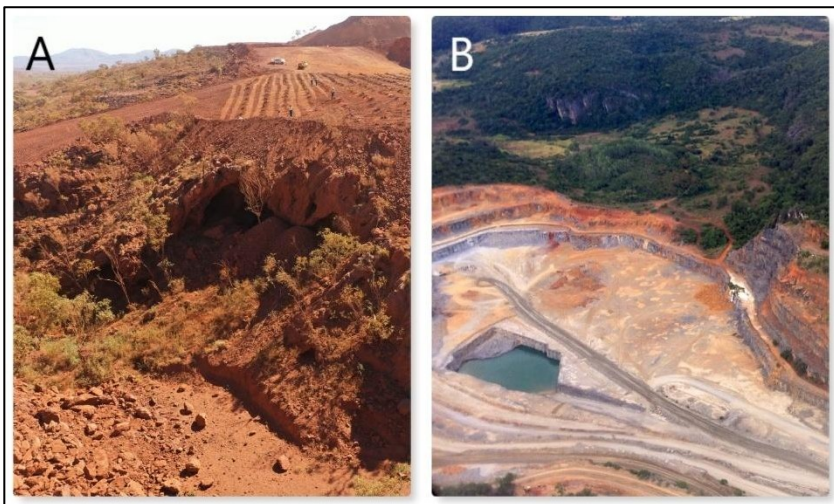


Figura 3: Mineração em áreas com cavidades naturais subterrâneas. A) *Caverna de Juukan Gorge, situada na Austrália, habitada por aborígenes há mais de 46.000 anos e impactada por detonações de explosivos.* Fonte: Wahlquist, (2020). B) *Mina a céu aberto em bancadas, evidenciando a proximidade entre a frente de lavra e as feições cársticas.* Fonte: Fotos de L.E.P. Travassos.

CAPÍTULO 3

MARCOS LEGAIS E REGULATÓRIOS

A proteção do patrimônio espeleológico no Brasil está amparada por um arcabouço legal robusto que reflete a evolução da consciência ambiental e a necessidade de compatibilizar o uso dos recursos naturais com a conservação dos ecossistemas subterrâneos. Ao longo das últimas décadas, o país consolidou um conjunto de normas e instrumentos de gestão ambiental que estabelecem critérios técnicos e jurídicos para a exploração, preservação e compensação de cavidades naturais subterrâneas (Fernandes *et al.*, 2022).

O Decreto nº 6.640/2008 representa um marco ao regulamentar a proteção das cavidades naturais subterrâneas, definindo graus de relevância (máxima, alta, média e baixa) e condicionantes específicas para a preservação, o uso e a compensação (Brasil, 2008). Antes do Decreto nº 6.640/2008, não havia norma de “seletividade” por relevância; todas as cavernas eram, na prática, protegidas de forma integral; após 2008, a classificação por atributos passou a orientar possibilidades de impacto e de compensação (Miranda; Chiodi, 2015).

Complementando esse instrumento, a Resolução CONAMA nº 347/2004 disciplina o licenciamento ambiental de empreendimentos potencialmente impactantes ao patrimônio espeleológico, especificando a necessidade de estudos espeleológicos e de medidas de

mitigação e/ou compensação. Existe, portanto, a obrigação de licenciar e incluir estudos espeleológicos no EIA/RIMA, conforme o disposto no art. 4º da CONAMA 347/2004 e convergência com o art. 5º do Decreto nº 99.556/1990 (Ribeiro; Reino; Cruz, 2019) (Figura 4).

De acordo com Miranda e Chiodi (2015), a consolidação do regime jurídico de proteção do patrimônio espeleológico no Brasil remonta à Portaria IBAMA nº 887/1990, que introduziu a noção de área de influência definida por estudos técnicos e, até a conclusão destes, fixou um raio mínimo de proteção de 250 m projetado a partir da cavidade; na sequência, o Decreto nº 99.556/1990 conferiu maior segurança jurídica às restrições de uso e elevou as cavidades à condição de “patrimônio cultural brasileiro”.

Nos procedimentos de licenciamento, a definição da área de influência cabe ao órgão ambiental, podendo exigir estudos específicos do empreendedor; além disso, a preservação automática do entorno de 250 m (prevista no §3º do art. 4º da CONAMA 347/2004) não garante, por si só, a ausência de impactos irreversíveis em cavernas de grau máximo, razão pela qual se recomenda que essas áreas de influência sejam definidas antes da Licença Prévia (LP) (Ribeiro; Reino; Cruz, 2019).

Como diretriz técnica complementar, o estudo da área de influência deve ser feito caso a caso, pois cada sistema cavernícola é único; a delimitação deve considerar, entre outros pontos, a zona de recarga hídrica, a conectividade

com outras cavidades (inclusive por traçadores) e fontes de aporte trófico como troglóxenos (e.g.: colônias de morcegos), cuja distribuição e ecologia precisam ser investigadas (Trajano, 2016).

No plano institucional, Ribeiro, Reino e Cruz (2019) registram que a Constituição Federal de 1988 inseriu as cavidades naturais subterrâneas como bens da União e atribuiu aos órgãos do SISNAMA a gestão ambiental correspondente, fundamento que estrutura o licenciamento e a fiscalização do patrimônio espeleológico. Assim, à luz desse marco, depende de estudos espeleológicos específicos e/ou de autorização/licença: (i) empreendimentos e atividades efetiva ou potencialmente poluidoras do patrimônio espeleológico ou de sua área de influência; (ii) atividades turísticas, culturais ou religiosas no ambiente cavernícola; e (iii) pesquisas científicas que envolvam coleta/captura de material ou potenciais interferências – nos termos da Resolução CONAMA nº 347/2004 (art. 7º).

No âmbito federal, o ICMBio consolidou procedimentos por meio da IN nº 7/2014, que define como o Instituto se manifesta nos processos de licenciamento quando a intervenção afeta cavernas em UCs federais e suas zonas de amortecimento, e da IN nº 3/2014, que regulamenta o SISBio e as regras de autorização para pesquisa científica/didática em cavernas. Essas normas se articulam à Portaria MMA nº 55/2014, que disciplina a interface IBAMA–ICMBio no licenciamento federal e traz

um capítulo específico para empreendimentos que possam impactar cavidades, e ao art. 36, §3º, da Lei nº 9.985/2000 (SNUC), que condiciona o licenciamento à autorização do órgão gestor quando houver afetação de UC ou de sua zona de amortecimento (Ribeiro; Reino; Cruz, 2019).

A comparação com experiências internacionais é elucidativa: países com tradição espeleológica associam a conservação de cavernas à gestão integrada de aquíferos e conectividade ecológica, e enfatizam o princípio da precaução (Gillieson *et al.* 2022). No Brasil, embora haja avanços normativos, ainda persistem desafios na aplicação efetiva das regras – sobretudo quanto à padronização metodológica de relevância, à fiscalização, ao monitoramento e ao desenho da compensação.

Em síntese, o arcabouço legal brasileiro voltado ao patrimônio espeleológico busca um equilíbrio dinâmico entre o desenvolvimento mineral e a conservação ambiental. Sua efetividade depende de governança participativa, integração técnica entre órgãos (ANM, órgãos ambientais estaduais e ICMBio) e incorporação de boas práticas internacionais, sem perder de vista a prioridade de evitar impactos irreversíveis e, quando inevitáveis, compensá-los de forma adequada e territorialmente pertinente.

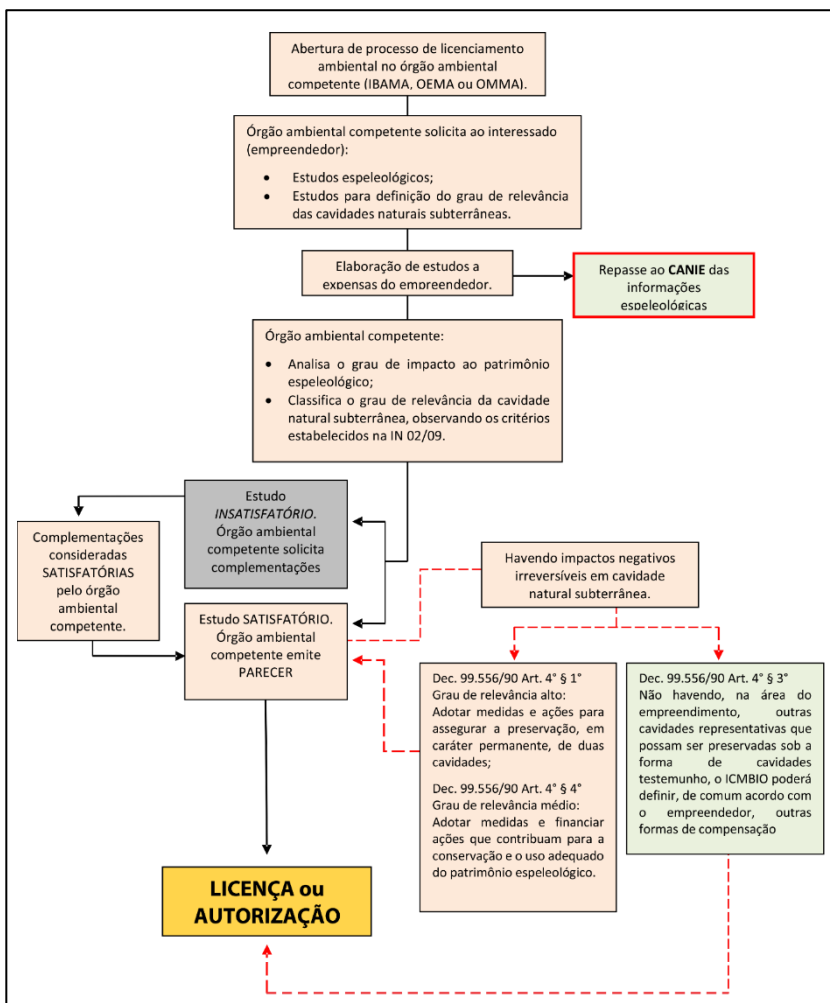


Figura 4: Atribuições dos órgãos ambientais (OEMAS, IBAMA e ICMBio) nos processos de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores de cavidades naturais subterrâneas, bem como de sua área de influência.

Fonte: ICMBio, 2022.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS EM PROCESSOS ADMINISTRATIVOS

A compreensão dos impactos ambientais da atividade minerária sobre ambientes subterrâneos é fundamental para a formulação de políticas públicas e para o delineamento de estratégias de mitigação eficazes. Este capítulo analisa impactos identificados a partir do exame de processos administrativos minerários da Agência Nacional de Mineração (ANM) e de autos de infração emitidos pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), destacando padrões recorrentes, limitações metodológicas e potencialidades do uso desses dados na gestão ambiental do patrimônio espeleológico.

Os processos administrativos minerários foram obtidos por meio de acesso aberto e gratuito à plataforma SEI/ANM, abrangendo o período de janeiro de 2019 a agosto de 2025. Já os autos de infração do IBAMA foram coletados na Plataforma de Análise e Monitoramento Geoespacial da Informação Ambiental (PAMGIA), com dados abertos referentes a 1998–2024, disponibilizados em formato digital.

Os registros administrativos e os autos de infração constituem fontes relevantes para a identificação de interferências em cavernas e em sistemas cársticos, permitindo observar tendências espaciais e tipológicas de

impacto. Entre os principais tipos de ocorrência, destacam-se: supressão total ou parcial de cavidades, intervenções em áreas de influência espeleológica, alterações do regime hídrico subterrâneo, contaminação de aquíferos e perda de biodiversidade subterrânea (Fernandes *et al.*, 2022; Trajano; Bichuette, 2010).

Na distribuição por Unidade da Federação (UF), Minas Gerais concentra o maior número de registros associados à mineração, com 72 ocorrências, o que evidencia sua predominância no cenário nacional. Essa prevalência relaciona-se à forte presença de províncias feríferas e cársticas no estado, notadamente no Quadrilátero Ferrífero e no carste de Lagoa Santa, onde coexistem alta densidade de cavernas e intensa atividade mineral. Em seguida, destacam-se Mato Grosso (35), Bahia (20) e Rio Grande do Norte (19), estados que também apresentam litologias carbonáticas ou siliciclásticas propícias à formação de cavidades naturais subterrâneas. Os demais estados apresentam valores inferiores ou iguais a dez ocorrências – com destaque para Ceará, Santa Catarina e Pará – sugerindo concentração geográfica dos impactos em regiões de maior potencial espeleológico e dinamismo econômico (Figura 5). Esse padrão reforça a necessidade de políticas públicas regionais específicas voltadas à compatibilização entre a mineração e a conservação espeleológica.

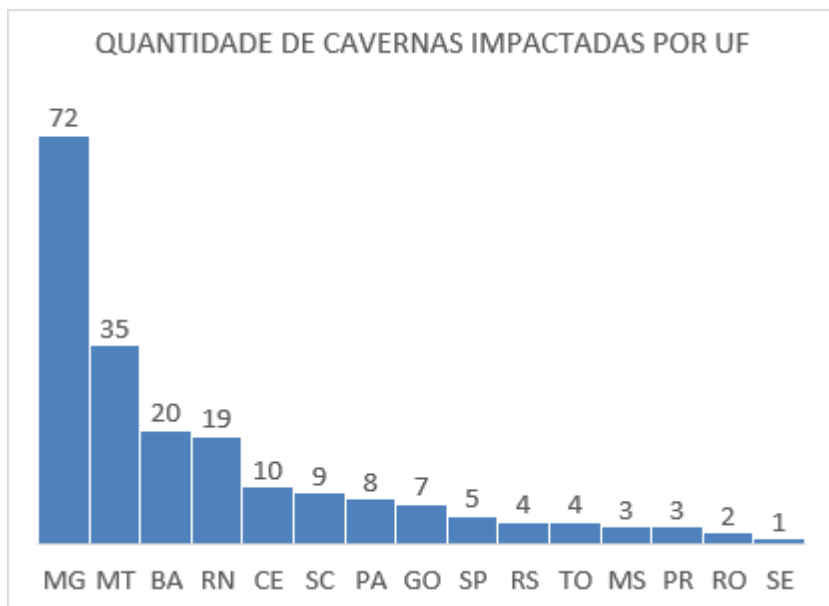


Figura 5: Gráfico de quantidade de cavernas impactadas por Unidade da Federação. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

No que se refere à quantidade de cavernas impactadas por substâncias minerais, constata-se a predominância marcante da extração de calcário, com 120 cavernas impactadas – número muito superior ao das demais substâncias. O resultado é coerente com a natureza geológica dos ambientes cársticos, formados majoritariamente em rochas carbonáticas, nas quais a mineração de calcário para produção de cimento e corretivo agrícola é intensa. Em seguida, aparecem fosfato (17), ferro (16), granito (12) e arenito (10), o que reflete a diversidade de contextos litológicos em que se inserem cavidades naturais subterrâneas. Observou-se menor

representatividade para ouro (8), água mineral (4) e para rochas ornamentais e minerais gemológicos e industriais (Figura 6). Essa distribuição revela que, embora os impactos sobre cavernas possam ocorrer em distintos ambientes geológicos, os carstes carbonáticos permanecem mais vulneráveis às atividades potencialmente impactantes ao patrimônio espeleológico.

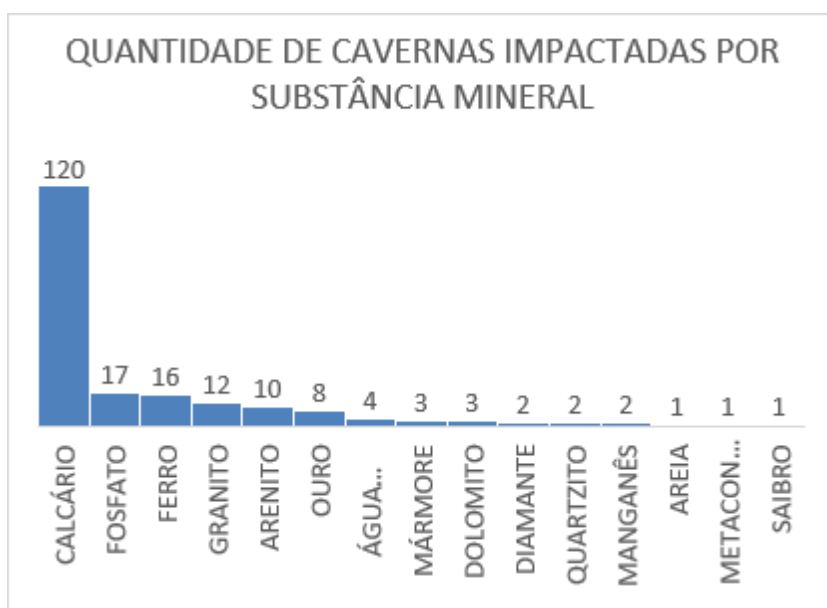


Figura 6: Gráfico de quantidade de cavernas impactadas por substância mineral (ANM). **Fonte:** Elaborado pelos autores.

A análise por fase do processo minerário demonstra que a maior parte dos impactos está associada à Concessão de Lavra (92 casos), etapa em que ocorre a extração efetiva do minério e a alteração direta do substrato geológico. Em

segundo lugar, surge a Autorização de Pesquisa (49), indicando que interferências significativas também podem ocorrer durante atividades exploratórias, sobretudo em áreas de alta densidade espeleológica. As fases de Requerimento de Lavra (22) e Licenciamento (16) apresentam valores intermediários, refletindo situações de sobreposição entre áreas de interesse mineral e cavidades conhecidas. Por fim, os registros de Área Livre (10), Requerimento de Pesquisa (9), Lavra Garimpeira (2) e Disponibilidade (2) são menos frequentes, mas evidenciam que, mesmo em áreas ainda não tituladas ou de menor porte, podem ocorrer impactos ao patrimônio espeleológico (Figura 7). Esses resultados reforçam a importância da prospecção espeleológica e da análise do raio de influência desde as etapas iniciais do processo mineralário.

Com base na análise do grau de impacto das cavernas, obtiveram-se os seguintes resultados: impacto médio (44%), impacto baixo (35%) e impacto alto (21%). A predominância de impactos médios indica que, embora muitos empreendimentos adotem medidas de controle e mitigação, persiste uma alteração significativa das condições naturais das cavernas — especialmente devido a intervenções diversas no raio de influência. Os impactos altos associam-se, em geral, à mineração de grande porte e à lavra a céu aberto, afetando diretamente a integridade física e ecológica das cavidades; destacam-se as supressões parciais ou totais.

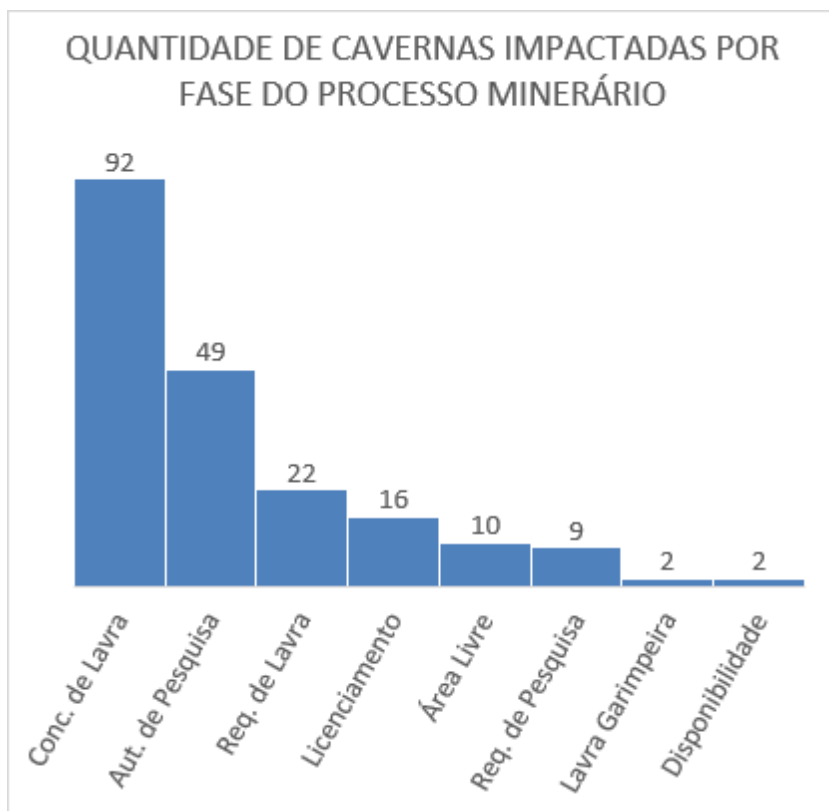


Figura 7: Gráfico de quantidade de cavernas impactadas por fase do processo minerário (ANM). **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Já os impactos baixos refletem atividades de menor escala ou intervenções pontuais, frequentemente mitigáveis por meio de planejamento ambiental adequado (por exemplo, supressão vegetal no raio de influência e disposição de resíduos inertes em cavernas) (Figura 8). A leitura integrada desses percentuais reforça a necessidade de fortalecer os instrumentos de avaliação espeleológica e

de monitoramento ambiental, garantindo que a compatibilização entre mineração e conservação ocorra de forma preventiva e sustentável.

Uma análise conjunta dos dados revela padrões espaciais, substanciais e procedimentais dos impactos minerários sobre o patrimônio espeleológico brasileiro. A concentração de ocorrências em Minas Gerais e a predominância do calcário confirmam a correlação direta entre o carste e a extração mineral, enquanto a elevada incidência na fase de lavra evidencia que os impactos efetivos se materializam majoritariamente após a autorização da atividade extrativa.

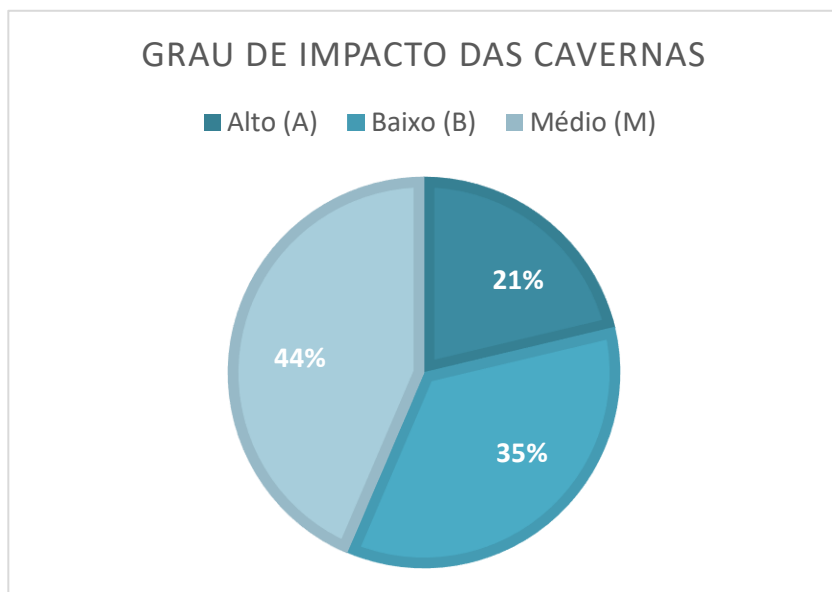


Figura 8: Gráfico de percentual de cavernas afetadas por grau de impacto. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Ainda que grande parte dos registros seja de intensidade média, a relevância ecológica e científica das cavernas afetadas exige estratégias de gestão territorial integradas, com base em dados públicos (ANM e IBAMA) e no aprimoramento dos critérios de classificação de relevância espeleológica.

As interferências mais frequentes concentram-se em ações de mineração propriamente dita, seguidas de pesquisas minerais e de ocorrências específicas – como a coleta de icnofósseis sem autorização e a abertura de trilhas dentro do raio de influência. Esses registros demonstram que, embora variem quanto à escala e à finalidade das atividades, a maioria das interferências está associada a empreendimentos minerários em regiões com presença de cavidades naturais subterrâneas, o que reforça a necessidade de integração entre a gestão minerária e a conservação ambiental.

Quanto aos impactos identificados, observa-se uma forte concentração de intervenções no raio de influência das cavernas, o que configura o tipo mais recorrente entre os processos analisados. Também se destacam a supressão parcial de cavidades, a supressão de vegetação e os vestígios de poluição antrópica – como pichação e deposição de resíduos sólidos. A maior parte foi classificada como de caráter permanente, irreversível e de abrangência local ou regional, podendo refletir condição de degradação ambiental de longo prazo. Esse quadro evidencia a urgência de políticas de mitigação mais eficazes e de estratégias que

reduzam a sobreposição entre áreas mineradas e zonas de influência espeleológica com cavidades de máxima relevância, favorecendo um modelo de mineração que respeite os limites ecológicos e legais do território.

Apesar de sua importância, o uso de dados administrativos e de fiscalização apresenta limitações significativas. Entre elas, destacam-se a falta de padronização na classificação dos impactos, a ausência de informações georreferenciadas completas e a fragmentação institucional entre ANM, IBAMA, ICMBio e órgãos estaduais de meio ambiente. Essa desarticulação dificulta a integração de bases, compromete o planejamento territorial e a avaliação cumulativa de impactos. Além disso, muitos autos de infração carecem de detalhamento técnico suficiente para subsidiar ações corretivas específicas, o que limita o potencial de análise quantitativa e espacial.

Por outro lado, há grande potencial de aprimoramento desses registros se integrados a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e vinculados a bancos de dados geológicos e ambientais. Essa integração permite desenvolver indicadores ambientais, identificar áreas críticas de conflito e priorizar ações de fiscalização preventiva. Experiências internacionais mostram que o uso de bases unificadas – como o *Karst Information System*, na Eslovênia, e o *Cave Management Database*, na Austrália – tem contribuído para aperfeiçoar a gestão de cavernas e o acompanhamento dos impactos das atividades econômicas (Gillieson *et al.*, 2020).

No Brasil, a incorporação de ferramentas de inteligência geoespacial, associada ao cruzamento sistemático de dados da ANM, do IBAMA e do ICMBio, pode consolidar um modelo de governança mais eficiente e transparente. Esse modelo deve priorizar a prevenção em detrimento da correção de danos, assegurando que as medidas de compensação ambiental sejam planejadas de forma proativa e tecnicamente fundamentada. Ademais, a criação de um cadastro nacional de impactos sobre cavidades naturais representaria um avanço estratégico para a gestão integrada do patrimônio espeleológico.

Conclui-se que a análise dos impactos ambientais identificados em processos administrativos e autos de infração constitui uma ferramenta poderosa para compreender a extensão e a natureza das intervenções antrópicas sobre ambientes subterrâneos. Apesar das limitações inerentes à dispersão e à ausência de padronização dos dados, esses registros oferecem subsídios relevantes para a formulação de políticas públicas, fiscalização ambiental e aprimoramento dos instrumentos de licenciamento. O fortalecimento da integração institucional e tecnológica entre os órgãos competentes é condição essencial para que o Brasil avance na compatibilização entre mineração e conservação do patrimônio espeleológico, consolidando o ideal de mutualismo sustentável entre desenvolvimento e conservação

CAPÍTULO 5

EXPERIÊNCIAS DE CONCILIAÇÃO E BOAS PRÁTICAS

A conciliação entre mineração e conservação do patrimônio espeleológico representa um dos maiores desafios contemporâneos da gestão ambiental e das geociências aplicadas, como sintetizam as diretrizes para proteção das cavernas e do carste da UIS/IUCN. Elas propõem princípios, avaliação ambiental e governança multissetorial para compatibilizar a conservação das cavernas e do carste com as atividades potencialmente impactantes, entre elas a mineração (Guillieson *et al.*, 2022).

Em diferentes contextos geográficos e institucionais, observa-se a emergência de experiências que buscam harmonizar o aproveitamento mineral com a proteção das cavernas e dos ecossistemas subterrâneos, propondo novos paradigmas de sustentabilidade baseados em ciência, tecnologia e governança compartilhada (Langer, 2001; Souza; Araújo, 2020) com as estratégias de monitoramento como eixo (e.g.: linhas de base, indicadores e gestão adaptativa), recomendado de forma explícita para recursos abióticos e bióticos do carste (Guillieson *et al.*, 2022).

No cenário brasileiro, a incorporação de critérios espeleológicos aos processos de licenciamento ambiental tem se destacado em zonas de alta atividade minerária. O Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, exemplifica essa tendência: nesta região, a avaliação de impactos passou a

exigir não apenas o levantamento topográfico exaustivo das cavidades subterrâneas, mas também a elaboração de planos de monitoramento contínuo, visando à compatibilização da atividade extrativa com a conservação do patrimônio. Aqui, a ênfase é dada à definição de perímetros de proteção, ao georreferenciamento de cavidades e a programas de monitoramento hidrogeológico, espeleoclimático e de vibrações, o que favorece decisões preventivas e a redução de riscos. Tais medidas permitem uma visão mais integrada do território, conciliando o avanço da lavra com a conservação de cavidades de alta relevância ecológica e científica.

Em outras áreas, como nas frentes de lavra de calcário e dolomito do Centro-Oeste e do Nordeste brasileiros, observa-se o emprego, ainda que muito restrito, de modelagens tridimensionais e de técnicas de varredura a laser (scanner 3D), capazes de registrar, com alta precisão, a morfologia e o volume interno das cavernas (ANM, 2022). Sánchez *et al.* (2016) afirmam que essas diretrizes setoriais recomendam o diagnóstico contínuo do comportamento hídrico, o monitoramento de subsidência e dolinamento, o controle de sedimentos e efluentes, além do georreferenciamento preciso como linha de base para decisões de engenharia.

Essa inovação tecnológica favorece o planejamento de rotas seguras de extração e a delimitação de zonas de amortecimento, reduzindo significativamente o risco de colapso de condutos subterrâneos e a perda de atributos espeleológicos (Langer, 2001). Em escala internacional,

países como Austrália, Canadá e Finlândia têm se destacado por adotarem políticas públicas e normativas específicas voltadas à compatibilização entre a mineração e a conservação de áreas cársticas (Gillieson *et al.*, 2022). Na Austrália, de forma semelhante ao que ocorre no Brasil, a legislação ambiental estabelece a obrigatoriedade de planos de manejo espeleológico, instrumentos que determinam as condições de exploração em ambientes subterrâneos e orientam a proteção de cavernas em unidades de conservação. Esses planos são construídos de forma participativa, envolvendo governos locais, universidades, empresas e comunidades, numa abordagem de governança ambiental integrada (Gillieson *et al.*, 2022).

A partir dessas experiências, emergem boas práticas empresariais que se tornam referência no setor mineral global. Diversas empresas passaram a adotar sistemas de gestão ambiental certificados, como a ISO 14001 (ISO, 2015), que estabelece requisitos para o controle e mitigação de impactos, e o padrão IRMA (*Initiative for Responsible Mining Assurance*), reconhecido internacionalmente por seu rigor técnico e social (IRMA, 2022) por selecionar indicadores exequíveis, replicação/frequência, protocolos e priorização de monitoramento automatizado, por exemplo (Gillieson *et al.*, 2016). Tais certificações impulsionam o desenvolvimento de uma cultura organizacional voltada à sustentabilidade, à transparência e ao diálogo com as partes interessadas, fortalecendo o conceito de mineração responsável.

Essas iniciativas também estão alinhadas aos Princípios do Equador e aos critérios ESG (*Environmental, Social and Governance*), que orientam práticas de financiamento e investimento sustentáveis (Taylor; Christou, 2022). A adoção desses instrumentos tem levado empresas a repensar seus modelos de operação, incorporando indicadores ambientais verificáveis e políticas de reparação socio-ambiental.

O papel das universidades e dos centros de pesquisa é igualmente determinante nesse processo. Instituições acadêmicas têm desenvolvido projetos em cooperação com o setor produtivo e com órgãos ambientais, aplicando tecnologias emergentes, como drones, sensores remotos, modelagem hidrogeológica, microssísmica e inteligência artificial, na investigação de cavidades e no monitoramento de impactos (Gillieson *et al.*, 2022). Esses estudos têm ampliado a compreensão da dinâmica subterrânea e fornecido subsídios técnicos para o aprimoramento das políticas públicas de conservação e de licenciamento.

No âmbito institucional, órgãos públicos como o IBAMA, ICMBio e a Agência Nacional de Mineração (ANM) vêm assumindo um papel mais ativo na regulação e fiscalização das atividades que afetam ambientes cársticos. A publicação de diretrizes específicas para o licenciamento de empreendimentos minerários em áreas de ocorrência de cavernas representa um avanço na integração entre o conhecimento técnico e a gestão ambiental (ANM, 2022). Essa atuação coordenada busca prevenir a perda de patrimônio natural e garantir que as medidas compen-

satórias e mitigadoras sejam efetivamente implementadas, pois é preciso fortes evidências para evitar danos a nascentes, sumidouros e cavernas.

As organizações da sociedade civil também têm contribuído de forma relevante para a consolidação de um modelo de mineração mais responsável. Grupos espeleológicos, ONGs e associações ambientalistas realizam ações de monitoramento independente, educação ambiental e mobilização comunitária, fortalecendo o controle social sobre os processos minerários e de licenciamento. Em algumas regiões, a cooperação entre empresas e organizações civis tem resultado em planos de manejo compartilhados e protocolos de visitação sustentável, que conciliam a conservação com o turismo científico e educativo.

Essas experiências revelam que a conciliação entre mineração e espeleologia é mais do que uma possibilidade técnica, é um imperativo ético e estratégico. A articulação entre inovação tecnológica, governança participativa e responsabilidade socioambiental constitui a base de um novo paradigma de atuação, pautado pelo mutualismo sustentável. Nesse modelo, o desenvolvimento mineral não se opõe à conservação, mas passa a integrá-la, contribuindo para o conhecimento, a valorização e a proteção do patrimônio subterrâneo.

CAPÍTULO 6

CAMINHOS PARA O MUTUALISMO SUSTENTÁVEL

O desenvolvimento de um modelo de mutualismo sustentável entre a mineração e a conservação do patrimônio espeleológico demanda uma profunda revisão das práticas produtivas, das políticas públicas e das formas de governança ambiental (DeWaele *et al.*, 2011; Gutiérrez *et al.*, 2014). A ideia central desse conceito reside na construção de uma relação cooperativa e equilibrada entre o aproveitamento mineral e a proteção dos ecossistemas subterrâneos, na qual ambos possam coexistir e gerar benefícios recíprocos. Essa abordagem integra princípios de governança socioambiental (ESG), planejamento territorial, inovação tecnológica e participação comunitária, configurando um novo paradigma de sustentabilidade aplicado ao setor mineral (Azapagic, 2004; Hilson; Murck, 2000; Pinheiro; Gentilini; Giardino, 2023; Sepe; Herrmann; Salvador, 2021; Gillieson *et al.*, 2022).

Nesse sentido, Azapagic (2004) ressalta que a mineração sustentável exige a definição explícita de indicadores ambientais, sociais e econômicos, capazes de monitorar, ao longo do ciclo de vida do empreendimento, tanto os impactos negativos quanto as contribuições positivas ao desenvolvimento local. Hilson e Murck (2000) complementam afirmando que não se trata apenas de mitigar danos, mas de reposicionar a atividade mineral

como agente de desenvolvimento estratégico, em diálogo com os limites ecológicos e com as expectativas da sociedade.

O primeiro pilar desse modelo é a governança socioambiental, alicerçada nos critérios ESG (*Environmental, Social and Governance*), que orientam as decisões estratégicas de empresas e instituições públicas para além do desempenho econômico. O eixo **ambiental** implica a redução de impactos, o monitoramento da biodiversidade subterrânea e a valorização dos serviços ecossistêmicos das cavernas. Já o eixo **social** destaca a importância da inclusão de comunidades locais nos processos decisórios e o eixo de **governança** reforça a transparência, a ética e a conformidade regulatória como fundamentos da atividade minerária responsável (Gillieson *et al.*, 2022; Taylor; Christou, 2022).

Jenkins e Yakovleva (2006) e Vintro e Comajuncosa, (2010) afirmam que estudos indicam que empresas que internalizam critérios ESG de forma robusta tendem a apresentar menor risco de conflitos socioambientais e maior estabilidade das operações em longo prazo. No contexto da mineração, isso se traduz em políticas claras de relacionamento com as comunidades, mecanismos de queixa e resposta e divulgação pública de dados de desempenho ambiental e social (Moffat; Zhang, 2014). Para áreas cársticas, Gutiérrez *et al.* (2014) enfatizam que a governança deve contemplar explicitamente a vulnerabilidade hidrogeológica e a singularidade da biodiversidade subterrânea, sob pena de transformar

impactos pontuais em degradação sistêmica de aquíferos e cavernas.

No Brasil, observa-se um avanço gradual na incorporação desses princípios no setor mineral. Grandes e médias empresas têm criado comitês de sustentabilidade, relatórios integrados de ESG e planos de metas ambientais, alinhando-se a diretrizes internacionais como o Pacto Global da ONU e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS (*United Nations*, 2015). Esse movimento (Figura 9), ainda que recente, demonstra o reconhecimento de que a responsabilidade ambiental e social não é mais um diferencial, mas uma exigência para a legitimidade e a perenidade das operações.



Figura 9: Os objetivos das Nações Unidas para atingir a Agenda 2030 no Brasil. **Fonte:** Nações Unidas (2025).

A Agenda 2030 explicita esse alinhamento ao estabelecer metas específicas para energia limpa, trabalho decente, redução de desigualdades e proteção da água e da biodiversidade (*United Nations*, 2015; GANKHUYAG, U.; GREGOIRE (2018), ao tratar da gestão da mineração para o desenvolvimento sustentável, mostra que empresas do setor mineral que vinculam seus planos de negócio aos ODS tendem a ampliar parcerias com governos e universidades, a diversificar sua atuação em projetos sociais e a consolidar a chamada “licença social para operar”. Malan (2021) argumenta que, nesse cenário, a competitividade da mineração deixa de ser medida apenas pelo custo de produção e passa a incorporar a reputação socioambiental, a capacidade de inovação e a contribuição para as políticas públicas.

Outro componente essencial é o planejamento territorial integrado, que permite identificar zonas de compatibilidade e de restrição entre a mineração e a conservação ambiental. Ferramentas como o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE), o planejamento espeleológico regional e os mapeamentos geotécnicos e hidrogeológicos são instrumentos fundamentais para subsidiar decisões estratégicas sobre a localização e o dimensionamento de empreendimentos minerários. A integração desses instrumentos evita sobreposições de uso, reduz conflitos socioambientais e promove uma visão sistêmica do território (CONAMA, 2004)

Em áreas cársticas, Parise e Gunn (2007) destacam que a ausência de planejamento regional favorece a

fragmentação de habitats subterrâneos, a contaminação de aquíferos e o aumento da incidência de colapsos e subsidências. Langer (2001), ao revisar a mineração em terrenos cársticos, mostra que muitos problemas poderiam ser evitados se, na fase de planejamento, fossem consideradas as zonas de recarga e descarga dos aquíferos, bem como a densidade e a conectividade das cavernas.

No contexto brasileiro, estudos de zoneamento e vulnerabilidade ambiental em áreas de mineração têm demonstrado que a articulação entre mapeamentos geológicos, hidrogeológicos e socioeconômicos é decisiva para orientar os limites operacionais e definir áreas onde a mineração deve ser restringida (Vasconcelos, 2011).

O zoneamento ambiental, quando aplicado de forma participativa, constitui um dos meios mais eficazes para promover o mutualismo sustentável. A delimitação de áreas de proteção espeleológica, zonas de amortecimento e corredores ecológicos subterrâneos permite conciliar as atividades econômicas com a manutenção dos processos ecológicos essenciais. Além disso, os mecanismos de compensação ambiental previstos na legislação brasileira, como os definidos pelo Decreto nº 6.640/2008, podem ser aprimorados por meio de critérios científicos mais robustos e de uma gestão adaptativa baseada em resultados (Brasil, 2008).

Parise e Gunn (2007) sugerem que a compensação em ambientes cársticos não deve se limitar a métricas de área ou de número de cavernas, mas também deve incorporar atributos como singularidade geomorfológica,

função hidrogeológica e sensibilidade ecológica. Gutiérrez *et al.* (2014) reforçam a importância de integrar a avaliação de perigos e riscos aos instrumentos de licenciamento e compensação, de modo que as medidas compensatórias contribuam para reduzir as vulnerabilidades estruturais do sistema, e não apenas para “compensar” perdas pontuais.

A inovação tecnológica emerge como um vetor determinante nesse processo de integração entre mineração e conservação. Tecnologias como laser scanner 3D, levantamentos geofísicos de alta resolução, monitoramento microsísmico, inteligência artificial (IA) e modelagem preditiva têm revolucionado o modo como se compreendem os ambientes subterrâneos e se planejam as operações minerárias. A aplicação de sistemas de sensoriamento remoto e de drones em ambientes cársticos possibilita a obtenção de dados detalhados e contínuos sobre estabilidade, drenagem e comportamento hidrogeológico, aumentando a segurança operacional e a eficiência das medidas mitigadoras (Fernandes *et al.*, 2023).

Complementarmente, a adoção de laser scanner 3D, de protocolos de achados fortuitos e de paralisação preventiva amplia a capacidade de diagnóstico e de resposta. Em conjunto, tais recursos orientam intervenções voltadas a mitigar impactos típicos em contextos cársticos, como, materiais particulados, vibrações, rebaixamento do lençol freático, subsidência, dolinamento e impacto sobre a qualidade da água (Drew, 1999; Langer, 2001, Ford; Williams, 2007).

González-Aguilera *et al.* (2009) demonstram que o uso de laser scanner 3D em cavernas permite a geração de modelos geométricos de alta precisão, fundamentais para analisar a estabilidade, os volumes escavados e as zonas de fragilidade estrutural. Esses modelos, integrados a dados geomecânicos e hidrológicos, podem orientar o traçado de frentes de lavra e a definição de áreas de exclusão. Estudos em minas a céu aberto também têm apontado o potencial de combinar varredura a laser, fotogrametria de drones e monitoramento microssísmico para prever rupturas de taludes e planejar ações preventivas com maior antecedência (Hartwig; Moreira, 2021). Ao mesmo tempo, trabalhos de síntese sobre impactos da mineração em ambientes cársticos destacam que a tecnologia só se converte em proteção efetiva quando os resultados são incorporados a protocolos claros de decisão – por exemplo, gatilhos operacionais que determinam redução de carga explosiva, alteração de traçado ou suspensão imediata das atividades (De Waele *et al.*, 2011; Parise; Gunn, 2007).

A integração entre inovação e governança depende da participação das comunidades locais e do fortalecimento de redes de colaboração entre empresas, universidades, órgãos ambientais e organizações civis. O envolvimento comunitário é um componente essencial do mutualismo sustentável, pois garante que os benefícios da mineração, como geração de empregos, investimentos em infraestrutura e apoio à educação e à cultura, sejam distribuídos de forma justa e transparente (Souza; Araújo, 2020). Modelos participativos, como os Conselhos

Municipais de Meio Ambiente e as Câmaras Técnicas Regionais, têm se mostrado eficazes na mediação de conflitos e na construção de soluções compartilhadas. No plano operacional, isso se traduz na realização de diagnóstico socioeconômico, no mapeamento de partes interessadas, em processos de consulta e na instalação de comissões de acompanhamento, ou seja, procedimentos consolidados na prática setorial (Sánchez *et al.*, 2016).

A literatura sobre “licença social para operar” demonstra que o simples cumprimento dos requisitos legais não é suficiente para garantir a aceitação de um empreendimento minerário (Prno; Scott Slocombe, 2012). Moffat e Zhang (2014) identificam que a confiança, a percepção de justiça procedimental e a distribuição de benefícios são dimensões-chave para que comunidades aceitem a presença da mineração em seu território. Baumbach, Prado Filho e Fonseca (2013), ao analisar experiências brasileiras, destacam que processos participativos bem conduzidos podem transformar o antagonismo em cooperação, especialmente quando comunidade, empresa e poder público coproduzem diagnósticos e planos de ação. Nesse contexto, a integração com universidades e centros de pesquisa contribui para qualificar o debate, fornecendo dados independentes sobre riscos, impactos e alternativas de manejo.

Deve-se buscar a cooperação entre a iniciativa privada (mineradora) e atores locais para viabilizar a ressignificação de cavernas, elevando-as de objetos de risco a ativos culturais e educacionais. Assim, teríamos a aplicação

prática da licença social, em que a transparência e o retorno coletivo asseguram a viabilidade política dos projetos. Neste contexto, infere-se que a educação patrimonial e o envolvimento dos *stakeholders* não são medidas acessórias, mas sim mecanismos estruturais essenciais para mitigar a dispersão dos impactos socioambientais.

Experiências internacionais em espeleoturismo e uso público de cavernas mostram que, quando bem manejadas, atividades educativas e turísticas podem gerar renda, fortalecer identidades locais e criar incentivos à conservação do patrimônio espeleológico (Buonincontri *et al.*, 2021; Chiarini; Duckeck; De Waele, 2022). Travassos (2010) e Cassimiro *et al.* (2012), no contexto brasileiro, salientam que projetos construídos em parceria com comunidades ampliam a percepção de valor das cavernas – não apenas como “obstáculo” à mineração ou como reserva de minério, mas como espaços de memória, espiritualidade, ciência e lazer. Quando tais iniciativas são financiadas, apoiadas ou facilitadas pelas próprias empresas mineradoras, reforça-se a ideia de mutualismo: a atividade econômica contribui para criar condições materiais e simbólicas favoráveis à geoconservação.

Assim, o mutualismo sustentável configura-se como um caminho de transição para uma mineração do futuro (Onifade, 2024; Pavloudakis; Roumpou; Spanidis, 2024), ou seja, uma mineração que reconhece seus limites ecológicos, valoriza o conhecimento científico, respeita os direitos das comunidades e atua como parceira na conservação do patrimônio natural. A consolidação desse modelo depende

do fortalecimento das políticas públicas, da evolução normativa e do compromisso ético de todos os agentes envolvidos na cadeia mineral. Em termos decisórios, devem prevalecer o planejamento, a evidência científica e o monitoramento adaptativo como base para avaliar expansões, rebaixamentos e medidas de mitigação em pedreiras e minas situadas em áreas cársticas.

Hilson e Murck (2000) indicam que a transição para uma mineração sustentável é incremental e exige mudanças simultâneas em tecnologia, regulação e cultura organizacional. De Waele *et al.* (2011) e Gutiérrez *et al.* (2014) argumentam que, em ambientes cársticos, essas mudanças são ainda mais urgentes, dado o caráter muitas vezes irreversível dos impactos sobre aquíferos e cavernas. Gankhuyag e Gregoire (2018) propõem que governos incorporem critérios claros de risco e vulnerabilidade aos processos de licenciamento e fiscalização, de forma a estimular modelos de negócio que internalizem os custos ambientais e sociais, em vez de transferi-los para a sociedade.

Mais do que um conceito técnico, o mutualismo sustentável é uma visão de coexistência, na qual o desenvolvimento mineral e a conservação ambiental não se antagonizam, mas se retroalimentam, promovendo um equilíbrio dinâmico entre progresso e permanência. Nesse horizonte, práticas de restauração e reabilitação de áreas mineradas podem adotar o conceito de “replicação de formas de relevo” (*landform replication*), conforme proposto por Gunn e Bailey (1993), reforçando a coerência

entre a recuperação paisagística, a funcionalidade ecológica e os valores socioculturais do território (Bailey; Gunn, 1991; 1992; Gunn; Bailey, 1993). Assim, tem-se a reconstrução, no pós-mineração, das geoformas originais (e.g.: encostas, vales, dolinas, terraços, talwegues etc.) para restabelecer processos hidrológicos e geomorfológicos, a estabilidade do terreno e a integração paisagística.

Estudos de reabilitação de minas de calcário no Reino Unido mostram que a replicação de formas de relevo, associada ao uso de substratos adequados, favorece o restabelecimento de mosaicos vegetacionais mais próximos das condições pré-mineração e melhora a conectividade ecológica em escala de paisagem (Bailey; Gunn, 1991; 1992; Gunn; Bailey, 1993; Cullen; Wheeler; Dunleavy, 1998; Gilardelli *et al.* (2016). Os autores destacam, ainda, que projetos de restauração que dialogam com a morfologia original tendem a ser mais bem aceitos pelas comunidades locais, pois minimizam a percepção de “paisagem artificial” e reforçam o vínculo identitário com o território. Em áreas cársticas, essa abordagem é especialmente promissora quando combinada com medidas de proteção de recarga, recuperação de solos e recomposição de drenagens superficiais e subterrâneas (Langer, 2001; Parise; Gunn, 2007).

CAPÍTULO 7

PERSPECTIVAS FUTURAS: MINERAÇÃO E CONSERVAÇÃO ESPELEOLÓGICA EM CONVERGÊNCIA

O século XXI impõe ao setor mineral e à conservação espeleológica um desafio sem precedentes: conciliar a demanda crescente por recursos minerais estratégicos com a preservação dos ecossistemas subterrâneos, reconhecidos como patrimônios naturais e culturais de valor inestimável. Como sintetizam Trajano, Berbert-Born e Lobo (2024, p.11), “cavernas são verdadeiras janelas para a compreensão do meio subterrâneo”.

Estudos sobre riscos geológicos e ambientais em áreas cársticas demonstram que esses ambientes combinam alta dependência hídrica da população com grande vulnerabilidade à contaminação e à instabilidade do terreno, o que reforça a necessidade de modelos de uso do território particularmente cautelosos (Gutiérrez *et al.*, 2014; De Waele *et al.*, 2011).

As perspectivas futuras apontam para uma transformação estrutural da mineração, orientada por princípios de sustentabilidade, inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental, em consonância com as metas globais da Agenda 2030 das Nações Unidas e seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS (*United Nations*, 2015). Trabalhos recentes têm explorado de forma sistemática como a mineração pode se alinhar aos ODS ao

incorporar metas de redução de impactos, uso eficiente de recursos, mitigação de riscos e transparência na gestão de rejeitos (Gankhuyag; Gregoire, 2018).

O avanço tecnológico, a digitalização dos processos produtivos e a transição energética global estão reformulando a lógica de exploração e de uso dos recursos minerais. Minerais estratégicos como lítio, níquel, cobalto, grafita e terras raras tornam-se peças-chave na construção de uma economia de baixo carbono, essencial à produção de baterias, painéis solares e sistemas de armazenamento de energia (IEA, 2021). Relatórios da Agência Internacional de Energia indicam que a demanda por alguns desses minerais pode aumentar até seis vezes em cenários compatíveis com as metas climáticas, ao mesmo tempo em que a oferta permanece altamente concentrada em poucos países, ampliando riscos de segurança de fornecimento e de pressões socioambientais sobre territórios produtores (IEA, 2021; Valero *et al.*, 2021; Renn *et al.*, 2022).

Esse cenário reforça a necessidade de novos modelos de governança que conciliem competitividade econômica e responsabilidade ambiental, especialmente em regiões sensíveis como os sistemas cársticos. Nessa perspectiva, o ambiente cárstico é reconhecido como um dos ecossistemas mais frágeis que conhecemos, combinando aquíferos altamente permeáveis, drenagem subterrânea complexa e propensão a subsidência e dolinamento, com consequências diretas para a infraestrutura e a segurança das populações (De Waele *et al.*, 2011; Gutiérrez *et al.*, 2014; Travassos, 2019; Travassos; Timo, 2022; Trajano; Berbert-

Born; Lobo, 2024). Em contexto urbano, estudos recentes no Brasil mostram como a interação entre carste e expansão desordenada agrava os riscos de colapso de terreno e de abertura de dolinas, exigindo instrumentos de planejamento e monitoramento específicos (Vital; Travassos, 2015; Santos; Silva; Vital, 2022).

No contexto brasileiro, a Agência Nacional de Mineração (ANM) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA) enfrentam o desafio de integrar a política mineral à política ambiental, promovendo instrumentos normativos que estimulem a mineração sustentável e fortaleçam mecanismos de avaliação ambiental estratégica. Tais instrumentos permitem antecipar riscos cumulativos e propor soluções compatíveis com os princípios de precaução e sustentabilidade (Brasil, 2002). A literatura internacional sobre governança de recursos naturais destaca que a eficácia dessas políticas depende da capacidade de integrar diferentes escalas de decisão, alinhar incentivos econômicos e internalizar custos ambientais ao longo de toda a cadeia mineral (Gankhuyag; Gregoire, 2018; Renn *et al.*, 2022).

O Decreto nº 6.640/2008 e a Resolução CONAMA nº 347/2004, ao estabelecerem parâmetros de proteção às cavidades naturais subterrâneas, constituem marcos importantes, mas demandam atualização diante das novas realidades tecnológicas e ambientais (Brasil, 2004; Brasil, 2008). Assim, os instrumentos de licenciamento que não consideram adequadamente os efeitos cumulativos, as mudanças climáticas e a ampliação da demanda por

minerais críticos tendem a subestimar os riscos em áreas cársticas, especialmente em zonas de urbanização acelerada ou de múltiplos empreendimentos (Gutiérrez *et al.*, 2014; Vital; Travassos, 2015; Santos; Silva; Vital, 2022).

As tendências nas políticas públicas indicam uma ampliação da abordagem integrativa entre o desenvolvimento econômico e a conservação. Planos de ação nacionais e regionais vêm incorporando metodologias de planejamento territorial participativo, zoneamento ecológico-econômico (ZEE) e gestão adaptativa, capazes de equilibrar múltiplos usos do território. Além disso, o fortalecimento da transparência ambiental, por meio de plataformas digitais e bancos de dados públicos, aproxima a sociedade civil do processo decisório e amplia o controle social sobre as atividades minerárias. Experiências internacionais indicam que abordagens baseadas em cenários territoriais de mineração, combinando avaliação de risco, planejamento do uso do solo e participação social, podem reduzir conflitos e orientar a escolha de alternativas locais menos impactantes (Gankhuyag; Gregoire, 2018; Scammacca; Mehdizadeh; Gunzburger, 2022).

No campo da tecnologia, as perspectivas são igualmente promissoras. A mineração do futuro será cada vez mais automatizada, digital e inteligente, com uso intensivo de sensoriamento remoto, big data, inteligência artificial (IA), robótica autônoma e geotecnologias de precisão (Zhironkina; Zhironkin, 2023). A literatura sobre “Mining 4.0” destaca que sistemas inteligentes de monitoramento e controle tendem a reduzir a exposição

humana a ambientes perigosos, otimizar o uso de energia e de água e aprimorar a detecção precoce de instabilidades geotécnicas (Löow; Abrahamsson; Johansson, 2019; Zhironkina; Zhironkin, 2023; Liu *et al.*, 2024). Essas inovações permitiram reduzir impactos diretos no meio físico, aprimorar o monitoramento ambiental e aumentar a segurança de trabalhadores e de comunidades próximas. No contexto espeleológico, tecnologias como modelagem tridimensional (3D), fotogrametria digital, microssísmica, LIDAR terrestre e robôs exploratórios vêm ampliando o conhecimento sobre o ambiente subterrâneo e suas dinâmicas ecológicas (Šupinský *et al.*, 2022; Rissolo *et al.*, 2024; Trimmis; Lazaridis, 2025).

Esses métodos têm sido aplicados para produzir modelos de alta resolução de redes de cavernas, avaliar a estabilidade de condutos, registrar arte rupestre e outros vestígios arqueológicos, e subsidiar decisões de engenharia e de conservação em grandes projetos de infraestrutura ou de mineração em áreas cársticas. A integração entre mapeamento digital, monitoramento contínuo e bancos de dados geoespaciais favorece abordagens de “early warning” para riscos de colapso, subsidência e alterações microclimáticas em cavernas turísticas e não turísticas.

A convergência entre mineração e conservação dependerá também da ciência e da educação ambiental. Universidades e centros de pesquisa desempenharão um papel central na formação de profissionais capazes de atuar de forma interdisciplinar, integrando geociências, biologia, engenharia e gestão pública. A valorização da educação

espeleológica e da divulgação científica será fundamental para a construção de uma cultura social que reconheça o valor intrínseco das cavernas, não apenas como espaços de interesse científico, mas também como símbolos de identidade geológica e cultural. Revisões recentes sobre *geoheritage* e geoturismo destacam que estratégias de interpretação de geossítios, associadas a práticas de geoeducação e geoética, podem fortalecer a participação pública, melhorar a percepção de risco e reforçar a legitimidade das ações de conservação (Gordon, 2018; Ólafsdóttir; Tverijonaite, 2018; Pijet-Migoń; Migoń, 2022).

Nesse contexto, as cavernas turísticas desempenham papel singular. Estudos comparativos em diferentes países demonstram que elas são, ao mesmo tempo, ativos econômicos relevantes e ecossistemas extremamente sensíveis. Por isso, exigem monitoramento microclimático e gestão do fluxo de visitantes para evitar impactos irreversíveis (Chiarini; Duckeck; De Waele, 2022; Piano *et al.*, 2024). Pesquisas em geoeducação também têm demonstrado que a vivência direta em geossítios (incluindo cavernas) tende a ampliar o conhecimento sobre processos geológicos e a apoiar atitudes pró-conservação, sobretudo quando acompanhada de materiais didáticos adequados e de mediação qualificada (Spyrou *et al.*, 2024; Zgłobicki *et al.*, 2024).

Dessa forma, a Agenda 2030 fornece o arcabouço ético e político para esses processos. Entre seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (United Nations, 2015), destacam-se o ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), o ODS 9

(Indústria, Inovação e Infraestrutura), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e o ODS 15 (Vida Terrestre), todos diretamente relacionados às práticas minerárias e à gestão dos ecossistemas subterrâneos. A incorporação desses objetivos às estratégias corporativas e às políticas públicas brasileiras representa não apenas uma exigência internacional, mas também uma oportunidade de posicionar o país como líder em mineração sustentável e na conservação da biodiversidade subterrânea.

Para Araya *et al.* (2021), estudos de caso em diferentes contextos evidenciam que, quando os ODS são internalizados como metas operacionais e não apenas como retórica institucional, há ganhos concretos em termos de desempenho ambiental, eficiência de recursos e aceitação social.

Outro vetor de transformação, de acordo com Prno e Scott Slocombe (2012), será o fortalecimento das parcerias multissetoriais entre governos, empresas, comunidades e organizações não governamentais. A criação de fundos de inovação verde, laboratórios vivos de mineração sustentável e iniciativas de economia circular podem impulsionar o reaproveitamento de rejeitos, a recuperação de áreas degradadas e a valorização de minerais secundários presentes em estéreis. Os modelos de “*social licence to operate*” aparecem como mecanismos centrais para legitimar empreendimentos em contextos sensíveis, baseados na confiança, no diálogo contínuo, na distribuição

justa de benefícios e na capacidade de resposta às demandas locais.

Por fim, o futuro da mineração e da conservação espeleológica dependerá de uma mudança de paradigma, na qual o valor econômico seja reinterpretado à luz dos valores ecológico e social. Como lembram Trajano, Berbert-Born e Lobo (2024, p.15), “destruir uma caverna é destruir um patrimônio”, o que ressalta o caráter irreversível das perdas quando não há um modelo de mutualismo sustentável entre mineração e conservação. Reflexões recentes sobre abastecimento global de metais para a transição energética convergem na ideia de que não existe “mineração verde” sem limites ecológicos claros, justiça intergeracional e mecanismos eficazes de participação pública (Renn *et al.*, 2022).

A busca por um mutualismo sustentável, como discutido no capítulo anterior, constitui o eixo conceitual dessa transição. O desafio consiste em construir políticas e práticas capazes de reconhecer que a conservação das cavernas e a exploração racional dos recursos minerais não são esferas opostas, mas partes complementares de um mesmo sistema geossocial, cuja harmonia garante a continuidade da vida e do desenvolvimento humano no planeta.

A mineração do futuro será, necessariamente, consciente, inclusiva e regenerativa, apoiada na ciência, guiada pela ética e comprometida com o legado que deixará às próximas gerações. É nesse ponto de convergência entre tecnologia, governança e respeito à

natureza que se delineia a nova fronteira do setor mineral brasileiro e global: uma fronteira em que o subterrâneo não é apenas explorado, mas também compreendido, protegido e valorizado (Figura 9).



Figura 9: Conjunto de paisagens cársticas brasileiras, evidenciando a conexão entre os ambientes de superfície e os sistemas subterrâneos, que deve orientar o planejamento e a gestão das atividades minerárias e de conservação.

Fotos: L.E.P. Travassos e M.B. Timo.

CAPÍTULO 8

PARA ALÉM DO SUBTERRÂNEO: UM NOVO PARADIGMA DE CONVIVÊNCIA ENTRE MINERAÇÃO E CONSERVAÇÃO

Até agora, o livro nos permitiu percorrer um caminho que vai do reconhecimento dos valores ecológicos, geológicos e culturais das cavernas até a busca por estratégias concretas de integração entre mineração e conservação, propondo uma leitura contemporânea da relação entre sociedade, território e recursos naturais.

Ao longo dos capítulos, demonstrou-se que a aparente dicotomia entre produção mineral e preservação ambiental pode ser superada por meio de uma abordagem sistêmica e cooperativa, orientada pelos princípios do mutualismo sustentável.

Experiências recentes em paisagens mineradas de Minas Gerais mostram que instrumentos de geoconservação, como inventários de geossítios, roteiros interpretativos e projetos de geoparques, podem funcionar como pontes entre conservação, turismo e requalificação de áreas de mineração, desde que incorporados ao planejamento territorial e às políticas setoriais (Pinheiro; Gentilini; Giardino, 2023).

A mineração, historicamente associada a impactos ambientais e conflitos territoriais, está diante de uma encruzilhada: continuar reproduzindo modelos extrativistas tradicionais ou reinventar-se como agente de transformação

socioambiental positiva. Essa reinvenção não é apenas técnica, mas também cultural e ética. Exige o reconhecimento de que a sustentabilidade não é um adorno discursivo, mas um imperativo de sobrevivência institucional e ecológica. A coexistência entre lavra e conservação depende, portanto, de uma nova consciência mineral, capaz de enxergar o subsolo como patrimônio coletivo e não como mero depósito de recursos.

Nesse sentido, Jovanović, Stanković e Krstić (2023) destacam estudos empíricos com empresas de mineração na Sérvia que indicam que as práticas de gestão do conhecimento e de inovação verde são decisivas para compatibilizar desempenho econômico, proteção ambiental e responsabilidade social. Isso reforça, portanto, que a adoção de tecnologias limpas deve ser acompanhada de mudanças na cultura organizacional.

Ao tratar dos marcos legais e regulatórios, observou-se que o Brasil possui um conjunto normativo sólido, como o Decreto nº 6.640/2008 e a Resolução CONAMA nº 347/2004, mas que necessita de atualização e integração interinstitucional para lidar com os desafios da mineração moderna. A criação de instrumentos como a Avaliação Ambiental Estratégica, o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) e os planos espeleológicos regionais representam uma oportunidade de aperfeiçoar a governança ambiental, assegurando previsibilidade jurídica e eficiência na proteção dos ambientes subterrâneos. Revisões recentes sobre mineração e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável mostram que instrumentos de governança

territorial – como AAE, ZEE e políticas de uso do solo – são decisivos para alinhar o setor mineral às metas de longo prazo da Agenda 2030, evitando que a mineração se torne um obstáculo estrutural à transição sustentável (Omotehinse; Tomi, 2019; 2023).

Os casos analisados ao longo do livro demonstram que é possível conciliar produção mineral e conservação quando há planejamento, diálogo e inovação. Experiências nacionais e internacionais mostram que a adoção de tecnologias avançadas, como mapeamentos 3D, monitoramento microssísmico e inteligência artificial, podem reduzir significativamente os riscos de interferência em sistemas cársticos e otimizar a recuperação de áreas afetadas.

Uma revisão sobre mineração sustentável destaca que a passagem da lógica “ciclo de vida da mina” para “ciclo de vida do mineral” depende justamente dessa combinação entre monitoramento de alta resolução, modelagem geoambiental e planos de fechamento desde a fase de projeto (Gorman; Dzombak, 2018). Em terrenos cársticos, estudos na Indonésia demonstraram que, mesmo com suporte tecnológico avançado, a fragilidade estrutural e hidrogeológica do carste impõe limites rígidos à expansão minerária, exigindo abordagens de manejo muito mais conservadoras (Arif *et al.*, 2024).

No entanto, é preciso ser dito que a tecnologia, por si só, não garante a sustentabilidade. O verdadeiro avanço reside na integração entre o conhecimento técnico e a sensibilidade social. As comunidades locais e os povos

tradicionais desempenham um papel central nesse processo, oferecendo saberes e práticas que enriquecem a gestão territorial e a conservação ambiental. A inclusão dessas vozes nos espaços decisórios, por meio de conselhos, audiências e acordos de gestão compartilhada, fortalece a legitimidade dos projetos e amplia os benefícios coletivos.

Pesquisas realizadas em comunidades mineradoras no norte da Finlândia, em distritos mineiros consolidados na Suécia e em áreas de cobre na Zâmbia apontam que a sustentabilidade social depende de processos participativos continuados, da diversificação de meios de vida e de uma relação menos assimétrica entre empresas e populações locais (Suopajärvi *et al.*, 2016; Segerstedt; Abrahamsson, 2019; Kourouma *et al.*, 2023).

O conceito de mutualismo sustentável introduzido neste livro sintetiza essa nova lógica. Ele propõe que mineração e conservação não sejam vistas como forças opostas, mas como parceiras interdependentes num mesmo sistema geossocial. Assim como os organismos que coexistem em simbiose no subsolo, o ser humano e a natureza também podem e devem estabelecer relações de benefício mútuo, em que o progresso econômico alimenta a preservação ambiental e vice-versa.

Essa visão se concretiza por meio da governança ESG, da inovação tecnológica, da educação ambiental e da cooperação multissetorial. No plano conceitual, essa agenda converge com a geoética, que propõe princípios normativos para o uso responsável dos georrecursos e tem

sido aplicada no Brasil na defesa do patrimônio espeleológico (Ruchkys, 2020; Castro *et al.*, 2021; Imbernon; Castro; Mansur, 2021). A própria “*White Paper on Responsible Mining*”, elaborada pela IAPG, enfatiza que a legitimidade do setor depende de práticas transparentes, da participação social e do compromisso com a proteção de ecossistemas sensíveis (Arvanitidis *et al.*, 2017).

As perspectivas futuras, alinhadas à Agenda 2030 e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), apontam para uma transição global rumo à mineração de baixo impacto, digital, inclusiva e transparente. Nesse contexto, o Brasil tem potencial para se tornar referência internacional, graças à sua diversidade geológica, à base científica consolidada e à crescente capacidade de articular políticas públicas de sustentabilidade.

Contudo, Woźniak *et al.* (2022) demonstram que ainda há um descompasso entre o discurso e a prática em algumas empresas mineradoras europeias no que se refere a declaração e a implementação dos ODS. Percebe-se que avanços são concentrados em indicadores mais fáceis de monitorar e ainda são incipientes a adoção de temas sensíveis como desigualdade, participação social e recuperação de áreas degradadas.

Avaliações recentes também indicam que, mesmo quando os ODS são incorporados a relatórios corporativos, persistem lacunas na mensuração de impactos e na priorização de metas, reforçando a importância de uma governança pública robusta e de mecanismos de monitoramento independentes (Baninla *et al.*, 2025;

Fuentes *et al.*, 2024).

O desafio das próximas décadas será redefinir o significado do desenvolvimento mineral. Isso implica substituir o paradigma da extração pelo da regeneração, transformando cada lavra, cada reabilitação de área degradada e cada projeto de pesquisa geológica em oportunidades de conhecimento, educação e reconstrução ambiental. Revisões internacionais sobre restauração em áreas pós-mineradas enfatizam que a recuperação de serviços ecossistêmicos – como a regulação hídrica, a fertilidade dos solos e os habitats para a biodiversidade – deve ser entendida como eixo central, e não acessório, do planejamento minerário (Bauerek *et al.*, 2022; Krzemień *et al.*, 2022; Islam *et al.*, 2024). Estudos de longo prazo em paisagens de mineração de carvão na Ásia demonstram que programas consistentes de reflorestamento, associados a políticas claras de uso do solo, podem converter antigas cavas em mosaicos florestais funcionalmente estáveis, ainda que com composição ecológica distinta da do estado original (Pratiwi *et al.*, 2021).

Pesquisas sobre a disposição a pagar de populações locais para a restauração de paisagens mineradas revelam, por sua vez, uma demanda social concreta por projetos de recuperação ambiental, o que reforça a legitimidade de políticas públicas e de investimentos privados em reabilitação ecológica (Ganhane, 2025).

As cavernas, testemunhas silenciosas da história geológica do planeta, convidam-nos a refletir sobre o tempo e a permanência. Enquanto a mineração lida com a urgência

dos ciclos econômicos, as cavernas representam a paciência dos processos naturais. Encontrar o ponto de equilíbrio entre esses ritmos é um dos grandes desafios da contemporaneidade. Abordagens etnográficas em paisagens pós-minerárias têm mostrado como comunidades passam a atribuir novos significados a ambientes antes associados apenas à extração, construindo narrativas de cuidado, memória e experimentação ecológica em meio às ruínas industriais (Pampus, 2024).

Ao mesmo tempo, pesquisas sobre restauração ecológica em áreas florestais afetadas pela mineração apontam que a recuperação de atributos ecológicos precisa caminhar em paralelo à reconstrução de vínculos sociais, percebendo essas paisagens como sistemas socio-ecológicos em transformação, e não apenas como “passivos” a serem compensados (Lee *et al.*, 2024). Sínteses recentes sobre resiliência ecológica em áreas mineradas reforçam que a capacidade de adaptação de um sistema depende tanto de processos biofísicos quanto da maneira como as comunidades se organizam diante de mudanças e riscos (Suopajärvi *et al.*, 2016; Segerstedt; Abrahamsson, 2019; Kourouma *et al.*, 2023).

Portanto, a mineração do futuro não será aquela que apenas extrai com eficiência, mas aquela que deixa legado e dialoga respeitosamente com o subterrâneo. Trabalhos recentes sobre integração entre ODS e fechamento de minas apontam que a fase pós-mineração pode funcionar como laboratório privilegiado para experimentar formas de economia circular, de recuperação de serviços

ecossistêmicos e de construção de novos arranjos produtivos locais (Araya *et al.*, 2021; Omotehinse; Tomi, 2023; Baninla *et al.*, 2025). Ao mesmo tempo, análises sobre inovação ecológica em empresas evidenciam que a adoção de metas ambientais ambiciosas, combinada com participação social e transparência, tende a gerar sinergia entre o desempenho econômico e a proteção ambiental (Jovanović; Stanković; Krstić, 2023; Sepe; Herrmann; Salvador, 2021; Fuentes *et al.*, 2024). É nesse cruzamento entre restauração ecológica, resiliência socioecológica e responsabilidade corporativa que o mutualismo sustentável se afirma como um novo paradigma de convivência entre mineração e conservação.

Encerramos, portanto, convencidos de que o mutualismo sustentável não é uma utopia, mas um horizonte possível e necessário. Ele requer vontade política, compromisso empresarial e engajamento social, mas, acima de tudo, uma mudança na forma como a humanidade se enxerga diante da Terra. Se o passado da mineração foi marcado pela extração, o futuro pode ser marcado pela reconciliação: entre o homem e a rocha, entre a economia e o ambiente, entre a superfície e o subterrâneo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste livro, procuramos demonstrar que a relação entre mineração e patrimônio espeleológico não é, por natureza, uma sentença de conflito, mas um campo de tensões que pode ser conduzido rumo à cooperação.

Partimos do reconhecimento de que as cavernas e os terrenos cársticos concentram aquíferos estratégicos, biodiversidade especializada, arquivos paleoclimáticos, paisagens simbólicas e memórias históricas que não admitem reposição em escalas de tempo humanas. Ao mesmo tempo, reconhecemos que a mineração permanece um dos pilares da economia contemporânea, especialmente em países com forte vocação geológica, como o Brasil.

Portanto, o eixo central do livro foi recusar tanto a romantização da conservação quanto a retórica desenvolvimentista acrítica, propondo o mutualismo sustentável como horizonte de convergência entre o uso e a proteção.

Os capítulos iniciais mostraram que o patrimônio espeleológico é, simultaneamente, geológico, biológico, cultural e espiritual. Essa multiplicidade de valores exige leituras interdisciplinares e decisões que não se limitem a métricas estritamente econômicas. A análise da atividade minerária nos ambientes subterrâneos evidenciou que, em contextos cársticos, erros de planejamento e de governança

podem resultar em perdas irreversíveis, como a supressão de cavidades naturais, o colapso de aquíferos, o desaparecimento de nascentes, a degradação de sítios arqueológicos e paleontológicos, bem como a ruptura de vínculos territoriais e identitários. A mensagem que se impõe é inequívoca: no carste, a margem de erro é mínima e a lógica de “testar limites” é incompatível com a fragilidade intrínseca do sistema.

Do ponto de vista normativo, o livro evidenciou avanços e contradições. O arcabouço legal brasileiro para o patrimônio espeleológico é relativamente robusto e reconhece, em diferentes instrumentos, a singularidade das cavidades naturais subterrâneas e de suas áreas de influência. No entanto, a distância entre a letra da norma e a prática cotidiana ainda é grande. Persistem a fragmentação institucional, as assimetrias de informação, as dificuldades de fiscalização e as lacunas na integração entre a política mineral, a política ambiental e o ordenamento territorial. Ao propor o fortalecimento de instrumentos como a Avaliação Ambiental Estratégica, o Zoneamento Ecológico-Econômico, os planos espeleológicos regionais e os cadastros integrados de impactos em cavidades, defendemos uma governança que antecipe conflitos e riscos, em vez de apenas reagir a desastres consumados.

A análise de processos administrativos da ANM e de autos de infração do IBAMA mostrou, com base em evidências, que a mineração já registrou um histórico significativo de interferências em cavernas, muitas delas classificadas como de impacto médio ou alto. Ao mesmo

tempo, esses dados revelam um enorme potencial de aperfeiçoamento: a integração de bases públicas em sistemas de geoespacialização, a definição de indicadores econômicos e de vulnerabilidade, a priorização de áreas críticas para fiscalização preventiva e o uso desses insumos para orientar decisões de licenciamento e de compensação. A mensagem aqui é pragmática: a transição para modelos mais responsáveis depende menos da criação de novas leis e mais do uso inteligente das informações que já possuímos.

O percurso por experiências de conciliação e boas práticas, no Brasil e no exterior, reforçou que a compatibilização entre mineração e conservação não é uma abstração teórica, mas uma construção possível quando ciência, tecnologia e participação caminham juntas. Planos de manejo espeleológico, programas de monitoramento contínuo, adoção de tecnologias de alta resolução (como scanner 3D, microssísmica e modelagens preditivas), certificações ambientais, compromissos ESG, iniciativas de espeleoturismo responsável e projetos de educação ambiental demonstram que é viável transformar “áreas de conflito” em territórios de cooperação. Essas experiências, contudo, não devem ser vistas como vitrines isoladas, mas como evidências de que o setor minerário pode desempenhar um papel ativo na proteção do patrimônio subterrâneo.

É nesse contexto que o mutualismo sustentável se consolida como proposta conceitual e prática. Ele exige, ao menos, quatro movimentos articulados:

1. **Mudança de escala:** passar da visão de cava isolada para a leitura de bacias hidrográficas, sistemas de cavernas, corredores ecológicos e territórios vividos.
2. **Mudança de tempo:** da lógica de “ciclo de vida da mina” para a perspectiva do “ciclo de vida do mineral” e do próprio território, incorporando a fase de fechamento da mina como etapa central do planejamento, e não como apêndice tardio.
3. **Mudança de linguagem:** da ênfase exclusiva nas reservas, teor e produtividade para a inclusão de serviços ecossistêmicos, risco e vulnerabilidade socioambiental na tomada de decisão.
4. **Mudança ética:** da visão de recurso disponível para a ideia de bem comum geológico, cuja gestão deve ser partilhada entre o Estado, as empresas e a sociedade.

A partir dessas premissas, o livro aponta para uma agenda concreta. Para o poder público, o desafio é fortalecer a capacidade de planejar, regular e fiscalizar, integrando bases de dados, estimulando a avaliação ambiental estratégica, qualificando equipes técnicas e garantindo transparência e participação nos processos decisórios.

Para o setor mineral, trata-se, de fato, de internalizar os custos ambientais e sociais das operações, adotando tecnologias menos invasivas, metas ambientais verificáveis, planos de fechamento de mina robustos e mecanismos efetivos de diálogo com as comunidades.

Para a comunidade científica e os grupos espeleológicos, permanece a tarefa de produzir conhecimento aplicado, desenvolver metodologias de avaliação e monitoramento, registrar e divulgar o valor das cavernas e tensionar, com evidências, a agenda pública.

Para as comunidades locais, abre-se o espaço para reivindicar direitos, disputar narrativas e coproduzir projetos de futuro que não reduzam o território a uma fronteira extrativa.

Em termos de pesquisa, este livro também deixa lacunas assumidas: a necessidade de estudos de longo prazo sobre reabilitação de áreas cársticas pós-mineração; o aprofundamento das metodologias de valoração de serviços ecossistêmicos subterrâneos; a avaliação jurídica comparada de marcos regulatórios em diferentes países; e a análise crítica de experiências de geoconservação em paisagens mineradas, incluindo o papel de geoparques, unidades de conservação e arranjos de uso público. Longe de encerrar o debate, o volume busca alimentar perguntas, oferecer referenciais e convidar novos trabalhos a avançar sobre os pontos aqui delineados.

Por fim, as cavernas permanecem como metáfora e advertência. **Metáfora**, porque condensam, em poucos metros, a interdependência entre água, rocha, vida e cultura, lembrando que não há futuro viável que prescindia dessa interconexão. **Advertência**, pois lembram que destruições rápidas podem apagar processos que levaram centenas de milhares de anos para se constituir.

O mutualismo sustentável proposto ao longo destas páginas não é um slogan, mas uma escolha civilizatória: seguir extraindo como se o subterrâneo fosse apenas um obstáculo, ou aprender a dialogar com ele como arquivo, abrigo, laboratório e memória. Se optarmos pela segunda via, mineração e patrimônio espeleológico poderão, enfim, deixar de ocupar lados opostos da mesa e passar a compartilhar a tarefa de desenhar territórios mais resilientes, justos e duradouros.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Relatório de Sustentabilidade e Fiscalização Ambiental da Mineração Brasileira – 2022. Brasília: ANM, 2022.

ARAYA, N. *et al.* Sustainable development goals in mine tailings management: targets and indicators. **Materials Proceedings**, v.5, n.1, 2021. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005082>

ARIF, R. *et al.* Threats of mining activities and karst landscape management strategies in Indonesia. In: BARLIAN, E. *et al.* (org.). **AIP Conference Proceedings**. Melville: American Institute of Physics, 2024. v. 3001, n. 1, art. 080019. <https://doi.org/10.1063/5.0184145>.

ARVANITIDIS, N. *et al.* **White Paper on Responsible Mining**. IAPG – International Association for Promoting Geoethics, 2017. Disponível em: <http://www.geoethics.org/wp-responsible-mining>. Acesso em: 17 nov. 2025.

AULER, A.; RUBBIOLI, E.; BRANDI, R. **As grandes cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 2001. 228p.

AZAPAGIC, A. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. **Journal of cleaner production**, v. 12, n. 6, p. 639-662, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(03\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(03)00075-1)

BAILEY, D. E.; GUNN, J. Landform replication as an approach to reclamation of limestone quarries. In: DAVIES, M. C. R. (ed.). **Land reclamation: An end to dereliction?** London: Elsevier, 1991. p.91-106. <https://doi.org/10.21000/JASMR92010487>.

BAILEY, D.E.; GUNN, J. Landform replication in two English limestone quarries. **Proceedings of the American Society of Mining Reclamation**, p.487-496, 1992. Disponível em: <https://www.asrs.us/wp-content/uploads/2021/09/0487-Bailey.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.

BAKALOWICZ, M. Karst groundwater: a challenge for new resources. **Hydrogeology Journal**, v. 13, p. 148–160, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9>.

BANINLA, Y. *et al.* Evaluating the progress and identifying future improvement areas of mining's contribution to the sustainable development goals (SDGs). **The Extractive Industries and Society**, v. 23, p. 101637, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101637>.

BAUERER, A. *et al.* Development of soil substitutes for the sustainable land reclamation of coal mine-affected areas. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 8, art. 4604, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14084604>

BAUMBACH, M. de O.; PRADO FILHO, J.F. do; FONSECA, A. Environmental management in small mining enterprises: comparative analysis of three Brazilian cases through the lenses of ISO 14001. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 66, p. 111-116, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672013000100015>.

BERBERT-BORN, M.L.C. *et al.* O Carste, um tipo particular de ambiente. In: SÁNCHEZ, L. E.; LOBO, H. A. S. (Orgs.). **Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016. p.14-27.

BERBERT-BORN, M.L.C. Geossistemas Cársticos. In: SÁNCHEZ, L. E.; LOBO, H. A. S. (Orgs.). **Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016. p.30-92.

BRADY, J. E.; RISSOLO, D. A reappraisal of ancient Maya cave mining. **Journal of Anthropological Research**, v. 62, n. 4, p. 471-490, 2006. <http://www.jstor.org/stable/20371076>.

BRASIL. Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 10 de novembro de 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Avaliação Ambiental Estratégica**. Brasília: MMA/SQA, 2002.

BRINKMANN, R.; PARISE, M. Karst Environments: Problems, Management, Human Impacts and Sustainability: An Introduction to the Special Issue. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.74, n.2, p.135–136, 2012. <https://www.doi.org/10.4311/2011JCKS0253>

BUONINCONTRI, P. *et al.* Where does sustainability stand in underground tourism? A literature review. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p.12745, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132212745>.

CALLUX, A.; LOBO, H.A.S. Cavernas. In: SÁNCHEZ, L. E.; LOBO, H. A. S. (Orgs.). **Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016. p.93-125.

CASSIMIRO, R. *et al.* Referências históricas sobre os “milagres” e as cavernas da Serra da Piedade, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31., 2011, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: SBE; GUPE; UEPG, 2011. p. 357–364. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais31cbe/31cbe_357-364.pdf. Acesso em: 02 nov. 2025.

CASTRO, P.de T.; MANSUR, K. L.; RUCHKYS, Ú. A.; IMBERNON, R.A.L. Geoethics and geoconservation: integrated approaches. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, v.4, n.S11, 2021. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2021.v4.S11.3>.

CAVALCANTI, L.F.; *et al.* A situação atual do patrimônio espeleológico brasileiro: dados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32, 2013. Barreiras. **Anais...** Campinas: SBE, 2013. p.231-238. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais32cbe /32cbe 231-238.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2025.

CHIARINI, V.; DUCKECK, J.; DE WAELE, J. A Global Perspective on Sustainable Show Cave Tourism. **Geoheritage**, v.14, 82, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00717-5>.

CIGNA, A.; FORTI, P. Caves: the most important geotouristic feature in the world. **Tourism and Karst Areas**, v.6, n.1, p.09-26, 2013. Disponível em: https://www.cavernas.org.br/wp-content/uploads/2021/07/TKA_v6_n1_009-026.pdf. Acesso em: 02 nov. 2025.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 347, de 13 de setembro de 2004. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452>. Acesso em: 02 nov. 2025.

COUTO, L.C.O.; TRAVASSOS, L.E.P. O ser humano nas cavernas. **GeoTextos**, v.19, n.2, p.135-160, 2023. <https://doi.org/10.9771/geo.v0i2.55910>.

CRUZ JR., F. W. *et al.* Stable isotope study of cave percolation waters in subtropical Brazil: implications for paleoclimate inferences from speleothems. **Chemical Geology**, v. 220, p. 245-262, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.04.001>.

CULLEN, W. R.; WHEATER, C. Philip; DUNLEAVY, P. J.
Establishment of species-rich vegetation on reclaimed limestone
quarry faces in Derbyshire, UK. **Biological Conservation**, v. 84,
n. 1, p. 25-33, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(97\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(97)00089-X).

CULVER, D. C.; PIPAN, T. **The biology of caves and other
subterranean habitats**. Oxford: Oxford University Press, 2009.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780198820765.001.0001>.

CUSTODIO, E. Concepts on groundwater resources. **Boletín
Geológico y Minero**, v.132, n.1-2, p. 141-146, 2021.
<https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.014>.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Groundwater Hydrology**.
Madrid: Springer, 2012.

DE WAELE, J.; GUTIÉRREZ, F.; PARISE, M.; PLAN, L.
Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review.
Geomorphology, v. 134, p. 1-8, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.001>.

DREW, D.; HÖTZL, H. (Eds.) **Karst hydrology and human
activities: Impacts, consequences and implications**. Rotterdam;
Brookfield, VT: A.A. Balkema, 1999. 322p.

EQUATOR PRINCIPLES. **The Equator Principles IV: A financial
industry benchmark for determining, assessing and managing
environmental and social risk in projects**. Londres: EP
Association, 2020.

FERNANDES, A. B. *et al.* Mapeamento topográfico de cavernas
no setor mineral: avanços e novas tecnologias. **Revista Brasileira
de Geomorfologia**, v. 24, n. 3, 2023.
<https://doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2315>.

FERNANDES, F. H. S. *et al.* Exposição aos impactos da fragmentação e perda de habitat provenientes do setor minerário nas áreas de ocorrências de cavernas do Brasil In: MOMOLI, R. S.; STUMP, C. F.; VIEIRA, J. D. G.; ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 36, 2022. Brasília. **Anais...** Campinas: SBE, 2022. p.593-600. Disponível em: https://www.cavernas.org.br/wp-content/uploads/2021/02/36cbe_593-600.pdf. Acesso em: 02 nov. 2025.

FIGUEIREDO, L.A.V. de; RASTEIRO, M.A.; RODRIGUES, P.C. Legislação para a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro: mudanças, conflitos e o papel da Sociedade Civil. **Espeleo-Tema**, v. 21, n. 1, p. 49-65, 2010. Disponível em: https://www.cavernas.org.br/wp-content/uploads/2021/02/espeleo-tema_v21_n1_049-065.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. London: Wiley, 2007. 576p.

FREIRE, J.K.S. **Valoração de serviços de supressão de insetos por morcegos: uma revisão**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Biológicas - Bacharelado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/52310>. Acesso em: 02 nov. 2025.

FUENTES, M. *et al.* Links between the actors and mining activities related to the implementation of sustainable development principles. **Sustainable Development**, v.32, n.6, p.6763-6787, 2024. <https://doi.org/10.1002/sd.3054>.

FUREY, N. M.; RACEY, P. A. Conservation ecology of cave bats. In: VOIGT, C. C.; KINGSTON, T. (Eds.). **Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World**. Cham: Springer, 2015. p.463-500. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25220-9>.

GANDOLFI, H. E.; FIGUEIRÔA, S.F. de M. As nitreiras no Brasil dos séculos XVIII e XIX: uma abordagem histórica no ensino de ciências. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 2, p. 279-297, 2014. <https://doi.org/10.53727/rbhc.v7i2.210>.

GANHANE, J.J. Willingness to pay for post-mining landscape restoration. **Environmental Challenges**, v. 19, p. 101157, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101157>.

GANKHUYAG, U.; GREGOIRE, F. **Managing Mining for Sustainable Development: A Sourcebook**. Bangkok: United Nations Development Programme, 2018. 116p. Disponível em: <https://www.undp.org/publications/managing-mining-sustainable-development>. Acesso em 05 nov. 2025.

GIBSON, S. **A gruta de São João Batista: a primeira prova arqueológica da veracidade dos evangelhos**. Rio de Janeiro: Record, 2008.

GILARDELLI, F.; SGORBATI, S.; CITTERIO, S.; GENTILI, R. Restoring limestone quarries: Hayseed, commercial seed mixture or spontaneous succession? **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 2, p. 316-324, 2016. <https://doi.org/10.1002/ldr.2244>.

GILLIESON, D.; GUNN, J.; AULER, A.; BOLGER, T. (Orgs.). **Guidelines for Cave and Karst Protection**. 2.ed. Postojna: International Union of Speleology; Gland: IUCN, 2022. 106 p. Disponível em: <https://portals.iucn.org/library/node/49955>. Acesso em: 05 nov. 2025.

GOMES, M. do C. A.; PILÓ, L. B. As minas de salitre: a exploração econômica das cavernas em Minas Gerais nos fins do período colonial. **Espeleo-Tema**, São Paulo, v. 16, p. 83–93, 1992.

Disponível em: https://www.cavernas.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Espeleo-Tema_v16_083-093.pdf.

Acesso em: 02 nov.2025.

GONGYU, L.; WANFANG, Z. Sinkholes in karst mining areas in China and some methods of prevention. **Engineering Geology**, v. 52, n. 1-2, p. 45-50, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00053-2).

GONZÁLEZ-AGUILERA, Diego *et al.* 3D digital surveying and modelling of cave geometry: Application to paleolithic rock art. **Sensors**, v.9, n.02, p. 1108-1127, 2009. <https://doi.org/10.3390/s90201108>.

GORDON, J. E. Geoheritage, geotourism and the cultural landscape: enhancing the visitor experience and promoting geoethics. **Geosciences**, v. 8, n. 4, 2018. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040136>.

GORMAN, M. R.; DZOMBAK, D. A. A review of sustainable mining and resource management: transitioning from the life cycle of the mine to the life cycle of the mineral. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 137, p. 281-291, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.001>.

GUNN, J., BAILEY, D.E. Limestone quarrying and quarry reclamation in Britain. **Environmental Geology**, v.21, p.167–172, 1993. <https://doi.org/10.1007/BF00775301>.

GUTIÉRREZ, F.; PARISE, M.; DE WAELE, J.; JOURDE, H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. **Earth-Science Reviews**, v. 138, p. 61-88, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>.

HALLIDAY, W. R. Sea caves of the world. **International Journal of Speleology**, v. 36, p. 123-132, 2007.

HARARI, Y. N. **Sapiens: uma breve história da humanidade**. Porto Alegre: L&PM, 2016.

HARTMAN, H.; MUTMANSKY, J. **Introductory Mining Engineering**. New York: Wiley, 2002.

HARTWIG, M. E.; MOREIRA, C. A. Integration of multisources data for quarry slope stability assessment in the Itaoca district (Southeastern Brazil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.93, n.1, p.e20190322, 2021.
<https://doi.org/10.1590/00013765202120190322>.

HESS, J.W.; SLATTERY, L.D. Extractive industries impact. In: DREW, D. (Ed.) **Karst Hydrogeology and Human Activities: Impacts, Consequences and Implications**, Rotterdam, Netherlands, 1999. 187p.
<https://doi.org/10.1201/9780203749692>.

HILSON, G.; MURCK, B. Sustainable development in the mining industry: clarifying the corporate perspective. **Resources Policy**, v. 26, n. 4, p.227-238, 2000.
[https://doi.org/10.1016/S03014207\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S03014207(00)00041-6)

HIRATA, R. *et al.* **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo/ Instituto de Geociências, 2019. 66p. Disponível em:
https://igc.usp.br/igc_downloads/Hirata%20et%20al%202019%20Agua%20subterranea%20e%20sua%20importancia.pdf.
Acesso em: 10 nov. 2025.

HUSTRULID, W.; BULLOCK, R. **Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies**. Littleton: SME, 2001.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contas Nacionais Trimestrais: indicadores de volume e valores correntes. IBGE: Rio de Janeiro, Abr.-Jun. 2025. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2121/cnt_2025_2tri.pdf. Acesso em: 2 nov. 2025.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Anuário IBRAM – Mineração do Brasil – Ano Base 2024**. IBRAM: Brasília, 2025. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/10/IBRAM-Anuario-IBRAM-Mineracao-do-Brasil-WEB.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2025.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Setor mineral: 3º trimestre 2025**. IBRAM: Brasília, 2025. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/10/Setor-Mineral-3o-trimestre-2025-%E2%80%93-3T25-1.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2025.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Licenciamento Ambiental**. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/orientacoes-e-procedimentos/licenciamento-ambiental>. Acesso em: 19 out. 2025.

IEA. International Energy Agency. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. Paris: IEA Publications, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 05 out. 2025.

IMBERNON, R. A. L.; CASTRO, P. T. A.; MANSUR, K. L. Geoethics in the scenario of the geological society in Brazil. **Geosciences**, v.11, n. 11, art. 462, 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences11110462>.

IRMA. Initiative for Responsible Mining Assurance. **Standard for Responsible Mining**. Washington, D.C.: IRMA, 2022. Disponível em: <https://responsiblemining.net/what-we-do/standard/>. Acesso em: 25 out. 2025

ISLAM, M. M. *et al.* Revitalizing the Land: Ecosystem Restoration in Post-Mining Areas, **North American Academic Research**, v.7, n.11, p.26-57, 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14261457>.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 14001: Environmental Management Systems – Requirements with Guidance for Use**. Genebra: ISO, 2015.

JENKINS, H.; YAKOVLEVA, N. Corporate social responsibility in the mining industry: Exploring trends in social and environmental disclosure. **Journal of cleaner production**, v.14, n. 3-4, p. 271-284, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.10.004>.

JOVANOVIĆ, V.; STANKOVIĆ, S.; KRSTIĆ, V. Environmental, social and economic sustainability in mining companies as a result of the interaction between knowledge management and green innovation—The SEM approach. **Sustainability**, v. 15, n. 16, p. 12122, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151612122>.

KOUROUMA, J. M. *et al.* Community-centred approach for assessing social sustainability in mining regions: a case study of Chingola district, Zambia. **Sustainable Development**, v. 31, n. 4, p. 3102-3127, 2023. <https://doi.org/10.1002/sd.2572>.

KRZEMIEN, A. *et al.* Restoring coal Mining-Affected areas: the missing ecosystem services. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.19, n.21, p.14200, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114200>.

LANGER, W. H. **Potential environmental impacts of quarrying stone in karst – A literature review**. USGS Open-File Report OF-01-0484. Reston: United States Geological Survey, 2001.

Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0484/ofr-01-0484so.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2025.

LECOQ, N.; *et al.* Evidence of daily and seasonal inversions of airflow in Petites Dales cave, Normandy, France. **Acta Carsologica**, Postojna, v. 46, p. 2-3, p. 179-197, 2017. <https://doi.org/10.3986/ac.v46i2-3.4801>.

LEE, B. *et al.* The Social and Ecological Dimension of Ecosystem Service Enhancement in Post-Mining Forest Rehabilitation: Integrating Stakeholder Perspectives. **Forests**, v. 16, n. 1, p. 7, 2024. <https://doi.org/10.3390/f16010007>.

LIU, X. *et al.* Research progress and prospects of intelligent technology in underground mining of hard rock mines. **Green and Smart Mining Engineering** v. 1, n. 1, p. 12-26, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.03.007>.

LLAMAS, M. R.; CUSTODIO, E. Intensive use of groundwater: a new situation which demands proactive action. Intensive use of groundwater: challenges and opportunities. In: LLAMAS, M. R.; CUSTODIO, E. (Ed.). **Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities**. 2002.p.13-31.

LOBO, H. A. S. Histórico das Pesquisas Espeleoclimáticas em Cavernas Brasileiras. **Espeleo-Tema**, v. 21, n. 2, p. 131-144, 2010. Disponível em: https://www.cavernas.org.br/wp-content/uploads/2021/07/espeleo-tema_v21_n2_131-144-1.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

LÖÖW, J.; ABRAHAMSSON, L.; JOHANSSON, J. Mining 4.0—the Impact of New Technology from a Workplace Perspective. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v.36, p.701–707, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00104-9>.

MALAN, S. **How to advance sustainable mining**. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development (IISD), 2021. Disponível em: <https://www.iisd.org/system/files/2021-10/still-one-earth-sustainable-mining.pdf>. Acesso em 10 nov. 2025.

MEDELLIN, R. A.; WIEDERHOLT, R.; LOPEZ-HOFFMAN, L. Conservation relevance of bat caves for biodiversity and ecosystem services. **Biological Conservation**, v. 211, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.01.012>

MIRANDA, M.P.S.; CHIODI, C.K. Proteção jurídica do patrimônio espeleológico. In: RUCHKYS, U.; TRAVASSOS, L.E.P.; RASTEIRO, M.A.; FARIA, L.E. (Eds.). **Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2015. p. 56-77, 2015.

MOFFAT, K.; ZHANG, A. The paths to social licence to operate: An integrative model explaining community acceptance of mining. **Resources policy**, v. 39, p. 61-70, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.11.003>.

MONJEZI, M. *et al.* Environmental impact assessment of open pit mining in Iran. **Environmental Geology**, v.58, p.205–216, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1509-4>.

NAÇÕES UNIDAS. **Os objetivos de desenvolvimento sustentável no brasil**. Brasília: Nações Unidas, 2025.

NORTH, L. A.; VAN BEYNEN, P. E.; PARISE, M. Interregional comparison of karst disturbance: west-central Florida and southeast Italy. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 5, p. 1770–1781, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.018>.

ÓLAFSDÓTTIR, R.; TVERIJONAITE, E. Geotourism: a systematic literature review. **Geosciences**, v. 8, n. 7, 234, 2018.
<https://doi.org/10.3390/geosciences8070234>.

OMOTEHINSE, A.O., TOMI, G. de. Mining and the sustainable development goals: Prioritizing SDG targets for proper environmental governance. **Ambio**, v.52, p.229–241, 2023.
<https://doi.org/10.1007/s13280-022-01775-3>.

OMOTEHINSE, A.O.; TOMI, G. de. A social license to operate: Pre-mining effects and activities perspective. **REM-International Engineering Journal**, v.72, n.3, p. 523-527, 2019.
<https://doi.org/10.1590/0370-44672018720020>.

ONIFADE, M. *et al.* Advancing toward sustainability: The emergence of green mining technologies and practices. **Green and Smart Mining Engineering** v. 1, n. 2, p. 157-174, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.05.005>.

PAMPUS, M. Life in the ruins of a post-mining landscape: The co-constitutive character of human and non-human action in land restoration. **kritisk etnografi: Swedish Journal of Anthropology**, v.7, n.1, p. 87-107, 2024. <https://doi.org/10.33063/diva-544572>.

PARISE, M.; GUNN, J. (eds.). **Natural and anthropogenic hazards in karst areas: recognition, analysis and mitigation**. London: Geological Society of London, 2007. (Special Publication, 279). <https://doi.org/10.1144/SP279>.

PARISE, Mario *et al.* Modern resource use and its impact in karst areas–mining and quarrying. **Zeitschrift für Geomorphologie. SUPPLEMENTBAND**, v. 60, n. X, p. 199-216, 2016.
https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2016/00312.

PAVLOUDAKIS, F.; ROUMPOS, C.; SPANIDIS, P.M. Sustainable mining and processing of mineral resources. **Sustainability**, v. 16, n. 19, p. 8393, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16198393>.

PIANO, E.; MAMMOLA, S.; NICOLOSI, G.; ISAIA, M. Advancing tourism sustainability in show caves. **Cell Reports Sustainability**, v.1, n.3, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100057>.

PICCINI, L. *et al.* The environmental features of the Monte Corchia cave system (Apuan Alps, central Italy) and their effects on speleothem growth. **International Journal of Speleology**, v.37, p.153-172, 2008. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.37.3.2>

PIJET-MIGONÍ, E.; MIGONÍ, P. Geoheritage and cultural heritage: a review of recurrent and interlinked themes. **Geosciences**, v. 12, n. 2, 98, 2022. <https://doi.org/10.3390/geosciences12020098>.

PILÓ, L. B.; CALUX, A.; SCHERER, R.; BERNARD, E. Bats as ecosystem engineers in iron ore caves in the Carajás National Forest, Brazilian Amazonia. **PLoS ONE**, v. 18, n.5, e0267870, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267870>.

PINHEIRO, O.R.; GENTILINI, S.; GIARDINO, M. A framework for geoconservation in mining landscapes: opportunities for geopark and GEOfood approaches in Minas Gerais, Brazil. **Resources**, v. 12, n. 2, 20, 2023. <https://doi.org/10.3390/resources12020020>.

PIVA, T.C.C.; FILGUEIRAS, C.A.L. O fabrico e uso da pólvora no Brasil colonial: o papel de alpoim na primeira metade do século XVIII. **Química Nova**, v. 31, p. 930-936, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000400036>.

POTAPOV, P. *et al.* The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. **Science advances**, v. 3, n. 1, p. e1600821, 2017. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600821>

PRATIWI *et al.* Managing and reforesting degraded post-mining landscape in Indonesia: a review. **Land**, v. 10, n. 6, p. 658, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10060658>.

PRNO, J.; SCOOT SLOCOMBE, D. Exploring the origins of 'social license to operate' in the mining sector: Perspectives from governance and sustainability theories. **Resources policy**, v. 37, n. 3, p. 346-357, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.04.002>.

RENN, O. *et al.* Metal sourcing for a sustainable future. **Earth Science, Systems and Society**, v. 2, n. 1, p. 10049, 2022.

<https://doi.org/10.3389/esss.2022.10049>.

RIBIEIRO, A.R.; REINO, J.C.R.; CRUZ, J.B. Histórico e fundamentação legal. In: CRUZ, J.B.; PILÓ, L.B. **Espeleologia e licenciamento ambiental**. Brasília: ICMBio, 2019. p.217-254.

RISSOLO, D. *et al.* A multimodal approach to rapidly documenting and visualizing archaeological caves in Quintana Roo, Mexico. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLVIII-2-2024, p. 349-354, 2024. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-349-2024>.

ROMERO, E.A. La corrosión climática em las cavernas. **Cuadernos de Espeleologia**, n.5-6, p.169-188, 1971.

RUCHKYS, U. A. *et al.* Conservação da geodiversidade em geossistemas ferruginosos. **Mercator**, v. 23, e23023, 2024.

<https://doi.org/10.4215/rm2024.e23023>

RUCHKYS, U. A.; TRAVASSOS, L.E.P. Gestão do Patrimônio Espeleológico Regional: diretrizes, metas e recomendações para conservação. In: RUCHKYS, U. A.; TRAVASSOS, L.E.P.; RASTEIRO, M.A.; FARIA, L.E. (Orgs.). **Patrimônio Espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conformação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2015. p.332-341.

RUCHKYS, U. de A. *et al.* Applying geoethics to the context of mining ferruginous geosystems: case studies from the tailing dam breaks in Fundão and Córrego do Feijão, Minas Gerais-Brazil. **Episodes Journal of International Geoscience**, v.43, n.4, p.981-990, 2020. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2020/020060>.

SÁNCHEZ, L. E. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020. 496p.

SÁNCHEZ, L.E. *et al.* Recomendações de boas práticas. In: SÁNCHEZ, L. E.; LOBO, H. A. S. (Orgs.). **Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016. p.217-255.

SÁNCHEZ, M. A. *et al.* Geological risk assessment of the area surrounding Altamira Cave: A proposed Natural Risk Index and Safety Factor for protection of prehistoric caves. **Engineering Geology**, v. 94, n. 3-4, p.180-200, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.08.004>.

SÁNCHEZ, S.S. Desenvolvimento comunitário sustentável e mineração em áreas cársticas. In: SÁNCHEZ, L. E.; LOBO, H. A. S. (Orgs.). **Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016. p.197-207.

SANTOS, C.L. dos; SILVA, O.G. da; VITAL, S.R. de O. Mapeamento de Áreas de Risco Associadas ao Carste em Área Urbana no Município de João Pessoa-PB. **Sociedade & Natureza**, v. 34, p.e63641, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-63641>.

SANTOS, D. J. dos; RUCHKYS, U. de A., TRAVASSOS, L.E.P.; PIZANI, F.M.C. Uso de técnicas de geoprocessamento para caracterização geoambiental das áreas de ocorrência do patrimônio espeleológico no Geossistema Ferruginoso do Parque Nacional da Serra do Gandarela, Minas Gerais **Caderno de Geografia**, v.28, n.53, p.362–384, 2018.

<https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2018v28n53p362-384>.

SANTOS, R. F. dos. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de textos, 2004. 150p.

SCAMMACCA, O.; MEHDIZADEH, R.; GUNZBURGER, Y. Territorial mining scenarios for sustainable land-planning: a risk-based comparison on the example of gold mining in French Guiana. **Sustainability**, v. 14, n. 17, p. 10476, 2022.

<https://doi.org/10.3390/su141710476>.

SCHMITZ, P. I. **Arqueologia do Brasil**. Petrópolis: Vozes, 1996.

SEGERSTEDT, E.; ABRAHAMSSON, L. Diversity of livelihoods and social sustainability in established mining communities. **The Extractive Industries and Society**, v. 6, n. 2, p. 610-619, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.03.008>.

SEPE, J.; HERRMANN, H.; SALVADOR, N.N.B. Mineração, responsabilidade socioambiental e sustentabilidade. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 401-422, 2021. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v10e42021401-422>.

SIQUEIRA-GAY, J.; SONTER, L. J.; SÁNCHEZ, L. E. Exploring potential impacts of mining on forest loss and fragmentation within a biodiverse region of Brazil's northeastern Amazon. **Resources Policy**, v. 67, p.101662, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101662>.

SONTER, L. J. *et al.* Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 8, p. 1-7, out, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00557-w>.

SPYROU, E. *et al.* Promoting geo-education and geotourism through geosite assessment: A case study from Acheron-Parga, Epirus, Greece. **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 12, n. 2, p. 256-277, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2024.04.003>.

SUOPAJÄRVI, L. *et al.* Social sustainability in northern mining communities: A study of the European North and Northwest Russia. **Resources policy**, v.47, p.61-68, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.11.004>.

ŠUPINSKÝ, J. *et al.* LiDAR point clouds processing for large-scale cave mapping: a case study of the Majko dome in the Dmica cave. **Journal of Maps**, v. 18, n. 2, p. 268-275, 2022. <https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2035270>.

TAYLOR, J.L.; CHRISTOU, T.A. The Equator Principles and standards applicable to the financing of energy sector projects. In: DAHLAN, M.R.; LASTRA, R.M.; ROCHETTE, G. (Ed.). **Research Handbook on Energy, Law and Ethics**. Edward Elgar Publishing, 2022. p. 194-206.

TELES, E. F. B.; MORAIS, F. Gestão de áreas cársticas: uma proposta para a conservação ambiental. In: ZAMPAULO, R. A. (org.). Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35., 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p. 336–341. Disponível em: https://www.cavernas.org.br/wp-content/uploads/2021/07/35cbe_336-341.pdf. Acesso em: 02 nov. 2025.

TRAJANO, E. Biologia subterrânea. In: SÁNCHEZ, L. E.; LOBO, H. A. S. (Orgs.). **Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016. p.138-163.

TRAJANO, E. Cave faunas in the Atlantic tropical rain forest: composition, ecology, and conservation. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 882-893, 2000. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00626.x>.

TRAJANO, E.; BERBERT-BORN, M.; LOBO, H.A.S. **Memorial importância do patrimônio espeleológico brasileiro**. Campinas: SBE, 2024.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E. Diversity of Brazilian subterranean invertebrates, with a list of troglomorphic taxa. **Subterranean Biology**, v.7, p.1-16, 2010.

TRAJANO, E.; NERI, A.C. Biodiversidade em áreas cársticas. In: SÁNCHEZ, L. E.; LOBO, H. A. S. (Orgs.). **Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016. p.126-137.

TRAVASSOS, L.E.P. **A importância cultural do carste e das cavernas**. 2010. 372f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Disponível em: https://bib.pucminas.br/teses/tratinfespacial_travassoslep_1.pdf. Acesso em: 30 out. 2025.

TRIMMIS, K. P.; LAZARIDIS, G. Paperless mapping and cave archaeology. Reviewing BRIC5, SAP6, and mobile device-based lidar applications for archaeological cave survey. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, v. 39, e00463, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00463>.

UNITED NATIONS - UN. **Transforming our world: The 2023 agenda for sustainable development**. New York: United Nations, 2015. 40p.

VALERO, A. *et al.* Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways. **Energy**, v. 159, p.1175-1184, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.149>.

VAN BEYNEN, P. E.; TOWNSEND, K. A disturbance index for karst environments. *Environmental Management*, v. 36, p. 101–116, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0265-9>.

VASCONCELOS, V. V. From zoning to territorial environmental management: environmental vulnerability mapping to the mining impacts in Minas Gerais northern region – Brazil. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 59-74, 2011.
<https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v29i2.12370>.

VINTRÓ, C.; COMAJUNCOSA, J. Corporate social responsibility in the mining industry: Criteria and indicators. **Dyna rev.fac.nac.minas**, Medellín , v. 77, n. 161, p. 31-41, Mar. 2010.
Disponível em:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532010000100003&lng=en&nrm=iso. Acesso em 18 Nov. 2025.

VITAL, S. R. O. TRAVASSOS, L. E. P. Impactos decorrentes do uso do solo em dolinas da Bacia Sedimentar da Paraíba, zona oeste do município de João Pessoa (PB), Brasil. **Caderno de Geografia**, v.25, n.44, p.118- 133, 2015. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2015v25n44p118>.

WAHLQUIST, Calla. Rio Tinto blasts 46,000-year-old Aboriginal site to expand iron ore mine. **The Guardian**, v. 26, n. 05, 2020. Disponível em: <https://www.theguardian.com/australia-news/2020/may/26/rio-tinto-blasts-46000-year-old-aboriginal-site-to-expand-iron-ore-mine>. Acesso em: 01 nov. 2025.

WANFANG, Z. The formation of sinkholes in karst mining areas in China and some methods of prevention. **Environmental Geology**, v. 31, n. 1/2, p.50–58, 1997. <https://doi.org/10.1007/s002540050163>.

WARCHOLIK, W.; GAWOR, Ł.; DOLNICKI, P. Post Mining Grounds in Poland with Regard to Their Environmental Impacts and Coal Recovery Possibilities. In: IGU REGIONAL CONFERENCE, 18-22 ago. 2014, Kraków. IGU 2014. **Book of Abstracts**. Kraków: [s.n.], 2014. Abstract IGU2014 – 0660.

WHITE, W. B. Geomorphology and hydrology of karst terrains. Oxford: Oxford University Press, 1988.

WILLIAMS, P. W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. **International Journal of Speleology**, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2008. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.1>.

WILLIAMS, P.; FONG, Y. T. **World Map of Carbonate Rock Outcrops**, v. 3.0. Auckland: University of Auckland, 2010. Disponível em: http://web.env.auckland.ac.nz/our_research/karst/. Acesso em: 3 nov. 2025.

WILLIAMS, Paul W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. **Journal of hydrology**, v.61, n.1-3, p.45-67, 1983. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90234-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90234-2).

WOOD, C. A. Exploration and geology of some lava tube caves on the Hawaiian volcanoes. **Transactions of the British Cave Research Association**, v.8, n.1, p.111-129, 1981.

WOŹNIAK, J. *et al.* Declaration of the sustainable development goals of mining companies and the effect of their activities in selected areas. **Sustainability**, v.14, n.24, p.16422, 2022.
<https://doi.org/10.3390/su142416422>.

YIN, S. X.; ZHANG, J. Impacts of karst paleo-sinkholes on mining and environment in northern China. **Environmental Geology**, v. 48, p. 1077–1083, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0046-7>.

ZGŁOBICKI, W. *et al.* The Use of Geosites in Education—A Case Study in Central Poland. **Resources**, v.13, n.1, 2024.
<https://doi.org/10.3390/resources13010015>.

ZHIRONKINA, O.; ZHIRONKIN, S. Technological and intellectual transition to mining 4.0: A review. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1427, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16031427>.

