



Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
SUPERINTENDÊNCIA DO IBAMA NO ESTADO DE MINAS GERAIS

Informação Técnica nº 2/2026-Supes-MG

Número do Processo: 02001.019789/2026-35

Interessado: PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA Secretaria-Geral da Presidência da República Secretaria-Executiva
PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA Secretaria-Geral da Presidência da República Secretaria-Executiva

Belo Horizonte/MG, na data da assinatura digital.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Planalto Vulcânico de Poços de Caldas, situado na divisa entre o sul de Minas Gerais e o leste de São Paulo, representa uma das maiores estruturas alcalinas intrusivas do mundo. Caracterizado por uma complexa caldeira colapsada, este relevo montanhoso apresenta uma mineralização primária e supergênica altamente enriquecida em Elementos Terras Raras (ETR), além de expressivas concentrações naturais de urânio e tório. Essa assinatura geológica singular deu origem ao primeiro complexo minero-industrial de urânio do Brasil, a antiga Unidade de Tratamento de Minérios (UTM) da empresa pública Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB), localizada no município de Caldas/MG.

1.2. As atividades de extração e beneficiamento de urânio para a produção do concentrado de diuranato de amônio (*yellow cake*) estenderam-se de 1982 a 1995, ano em que a operação foi descontinuada devido à exaustão econômica do minério e aos elevados custos logísticos. O encerramento da lavra legou um expressivo passivo ambiental no sítio de aproximadamente 1.360 a 1.400 hectares, hoje denominado Unidade de Descomissionamento de Caldas (UDC). Esse passivo inclui a cava da mina inundada com águas acidificadas, bacias de rejeitos radioativos, depósitos de borra de enxofre e bota-foras de estéril geradores de drenagem ácida de mina (DAM).

1.3. Em 9 de janeiro de 2025, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) emitiu a Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI21723913), estabelecendo o marco regulatório federal definitivo para o descomissionamento da UDC. A emissão da licença, válida por 6 anos, formaliza condicionantes estritas para o controle do passivo nuclear, exigindo a execução de planos de recuperação de áreas degradadas (PRAD) e o tratamento ininterrupto de efluentes ácidos e radiológicos.

1.4. Paralelamente, o planalto vulcânico tornou-se alvo de uma corrida minerária focada em depósitos de argilas iônicas ricos em terras raras, minerais considerados críticos para a transição energética global. Dois grandes projetos privados circundam a área patrimonial da UDC:

- 1.5. **Projeto Caldeira (Meteoric Caldeira Mineração Ltda.):** Licenciado preliminarmente sob o processo administrativo [SLA 911/2024](#) e detalhado para a fase de Licença de Instalação (LI) por meio do Plano de Controle Ambiental (PCA) sob o processo [SLA 14422/2026](#). O projeto projeta a extração a céu aberto de 5.475.000 t/ano de run-of-mine (ROM), beneficiamento físico-químico a úmido, pilhas de estéril/rejeito de 146,07 ha e a disposição de 28.193.660,00 m³ de estéril lixiviado em cavas exauridas (*backfill*).

- 1.6. **Projeto Colossus (Viridis Mineração Ltda.):** Este empreendimento está cadastrado sob o processo administrativo [SLA 634/2025](#). O projeto visa a lavra a céu aberto de 5.000.000 de toneladas por ano de argilas iônicas para a extração de ETR, abrangendo uma Área Diretamente Afetada (ADA) de 376,07 hectares sobreposta a fragmentos de Floresta Ombrófila Densa Montana da Mata Atlântica.

1.7. A configuração territorial do Planalto de Poços de Caldas evidencia elevada complexidade socioambiental, decorrente da coexistência de uma somatória de empreendimentos minerários, da presença da Unidade de Descomissionamento de Caldas (UDC) da Indústrias Nucleares do Brasil, de áreas ambientalmente sensíveis e de importantes sistemas hídricos compartilhados entre diferentes municípios e estados. Nesse contexto, a proximidade entre as áreas de influência dos empreendimentos e a existência de bens e interesses federais demandam uma abordagem integrada para a compreensão das interações entre os componentes físicos, bióticos e socioeconômicos do território, incluindo a avaliação de possíveis impactos cumulativos e sinérgicos sobre os recursos hídricos, a biodiversidade, a integridade da área em descomissionamento da UDC, as atividades econômicas associadas às estâncias hidrominerais e ao turismo, bem como sobre as comunidades potencialmente afetadas. Essa perspectiva territorial amplia a capacidade de compreensão dos processos ecológicos e sociais em curso e contribui para uma avaliação ambiental mais consistente em regiões de elevada sensibilidade ambiental e institucional.

1.8. A proximidade geográfica e os limites comuns de suas bacias hidrográficas exigem uma avaliação aprofundada das sinergias regulatórias, físicas e bióticas para mitigar riscos ecológicos de longo prazo na região. Todas as informações consolidadas na presente análise foram obtidas dos seguintes Processos Administrativos: 02001.001948/98-67 (INB Caldas), 02015.003031/2024-64 (Projeto Caldeira, Meteoric), e 02015.000368/2025-09 (Projeto Colossus, Viridis), bem como a base de licenciamento ambiental do estado de Minas através do acesso aos Processos [SLA 911/2024](#) e [SLA 14422/2026](#) (Projeto Caldeira, Meteoric) e [SLA 634/2025](#) (Projeto Colossus, Viridis).

Evolução Regulatória dos Projetos Licenciatórios: Projeto Caldeira ([SLA 911/2024](#) para [SLA 14422/2026](#)), e Projeto Colossus ([SLA 634/2025](#))

1.9. A transição regulatória do Projeto Caldeira entre a fase preliminar e a de instalação física evidencia o caminho técnico do projeto de engenharia, considerando a avaliação inicial sob o cadastro do processo [SLA 911/2024](#), a Meteoric obteve a concessão de sua Licença Prévia (LP) em 20 de dezembro de 2025, atestando a viabilidade ambiental de seu arranjo conceitual de lavra e processamento a úmido. Esse processo classificou o empreendimento como Classe 6 com critério locacional 2, fundamentando-se no Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) elaborados pela consultoria CERN com supervisão geral da Alger Consultoria Socioambiental. O avanço para a fase de instalação, instruído pelo Plano de Controle Ambiental (PCA) sob o protocolo [SLA 14422/2026](#), visa subsidiar a emissão da Licença de Instalação (LI) na modalidade de Licenciamento Ambiental Trifásico (LAT).

1.10. A sobreposição de novas frentes de lavra ativas de terras raras ao redor de um sítio de descomissionamento nuclear em andamento gera severas preocupações socioambientais, motivando contestações por parte do Ministério Público Federal (MPF), Ministério Público do Estado de Minas Gerais (MPMG) e de coalizões da sociedade civil, como a Aliança pela APA da Pedra Branca. As representações judiciais alegam fracionamento ilegal do licenciamento ambiental e exigem a realização de uma Avaliação Ambiental Integrada (AAI) para avaliar o impacto cumulativo real sobre o território.

1.11. O Projeto Colossus fundamenta sua viabilidade econômica na exploração de depósitos superficiais de terras raras adsorbidas em argilas. A rota de beneficiamento mineral consiste na lavra a céu aberto de cavas com profundidades de 30 a 60 metros, lavagem e lixiviação química em uma Unidade de Tratamento de Minerais (UTM), seguida do descarte progressivo desse rejeito de argila lavada e filtrada de volta nas cavas exauridas (*backfill* progressivo). O processo de licenciamento ambiental do Projeto Colossus em âmbito estadual, [SLA 634/2025](#), obteve recomendação de deferimento para a Licença Prévia (LP) por meio do Parecer Técnico nº 73/FEAM/GST/2025 (SEI 27914799).

Tabela 1. Comparativo entre os Processos licenciatórios.

Empreendedor / Projeto	Processo Administrativo / Código Regulatório	Fase do Licenciamento	Enquadramento e Atividades Licenciadas	Métricas e Estruturas Físicas Associadas
INB S.A. / Unidade de Descomissionamento de Caldas (UDC)	Processo SEI/Ibama nº 02001.001948/08-67, Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI 21723913).	Operação Descomissionamento (Validade de 6 anos).	Gestão de passivos ambientais radioativos e químicos, tratamento de DAM e custódia de estruturas de contenção.	Cava da mina inundada, Bota-foras (BF-1, BF-3, BF-4, BF-7, BF-8, BF-Cava), Barragem de Rejeitos (BAR), Barragem de Águas Claras (BAC) e Barragem D4.
Meteoric Caldeira Ltda. / Projeto Caldeira	PA COPAM nº SLA 911/2024 (LP) e Solicitação nº 2026.02.04.003.0003265 de (SLA 14422/2026 LI).	Licenciamento Trifásico - Fase de Instalação (LI).	Lavra a céu aberto de minerais metálicos, exceto ferro; UTM a úmido; pilha de rejeito; disposição de estéril em cava.	Produção: 5.475.000 t/ano ROM. Pilha de estéril: 146,07 ha. Volume de backfill: 28.193.660,00 m ³ . Área diretamente afetada (ADA): 425,99 ha.
Viridis Mineração Ltda. / Projeto Colossus	PA COPAM nº SLA 634/2025 Parecer Técnico nº 73/FEAM/GST/2025 (SEI 27914799).	Licenciamento Trifásico - Fase de Licença (LP).	Lavra a céu aberto de minerais metálicos; UTM com tratamento a úmido; pilha de rejeito/estéril; disposição em cava.	Lavra de argila iônica, beneficiamento a úmido com lavagem e filtração, reabilitação progressiva das frentes de lavra por backfill.

Hidrodinâmica e Conectividade Hidrogeológica

1.12. O principal meio de propagação de impactos sinérgicos no Planalto de Poços de Caldas ocorre por meio dos recursos hídricos. O divisor de águas local condiciona o escoamento superficial e subterrâneo para duas sub-bacias principais: a do Ribeirão das Antas (bacia do Rio Pardo) e a do Ribeirão Soberbo (bacia do Rio Verde).

1.13. A UDC/INB apresenta um balanço hídrico subterrâneo delicado. Estudos conduzidos pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) estimam que a taxa média de recarga do aquífero na região do Bota-Fora 4 (BF-4) é de 202,8 m³/h (variando entre 168,7 e 237,2 m³/h, o que representa de 27,4% a 38,5% da precipitação média anual, s.m.j.. A descarga subterrânea natural direcionada para a cava inundada da mina Osamu Utsumi é estimada em 40,2 m³/h. Esta dinâmica hidrogeológica mantém plumas de contaminação subterrânea por drenagem ácida de mina (DAM) ativas a jusante do BF-4 e da Barragem de Rejeitos.

1.14. A abertura simultânea de dezenas de frentes de lavra rasas para extração de argila iônica pelos projetos Caldeira e Colossus interfere diretamente no lençol freático local. O rebaixamento do nível d'água necessário para viabilizar as cavas de mineração privada (tratado na seção 3.6.3 do PCA do Projeto Caldeira) altera localmente os gradientes hidráulicos. Esse rebaixamento freático cumulativo

pode provocar o desvio ou a aceleração da migração das plumas subterrâneas contaminadas por DAM da INB para fora dos limites da bacia de contenção atual (Bacia Nestor Figueiredo - BNF), ameaçando mananciais hídricos e nascentes rurais do entorno.

1.15. Adicionalmente, os processos de lixiviação química para a recuperação de terras raras envolvem a recirculação contínua de soluções salinas e ácidas. O arraste decorrente desse processo nas cavas e a reinserção das denominadas "argilas lixiviadas" no meio ambiente por meio do método de *backfill* podem promover a lixiviação secundária e a mobilização de metais pesados estáveis, urânio e tório que ocorrem naturalmente na matriz intemperizada do solo, superando os valores de referência de qualidade de solo (VRQ) definidos pela [Deliberação Normativa COPAM/CERH nº 02/2010](#).

1.16. No âmbito superficial, o balanço de múltiplos usos é pressionado pelas demandas de captação de água das mineradoras. A Viridis planeja captar água industrial em quatro barramentos já consolidados no entorno, enquanto a Meteoric também prevê captações superficiais significativas. A vazão desses cursos d'água é historicamente influenciada e regularizada pela Barragem de Águas Claras (BAC) da INB, que recebe os efluentes industriais neutralizados da UDC. A redução da vazão de referência devido às captações industriais cumulativas pode comprometer a capacidade de autodepuração e diluição dos efluentes da UDC no Ribeirão das Antas, elevando os níveis de metais dissolvidos a jusante.

1.17. O balanço hídrico superficial da bacia do Ribeirão das Antas e do Ribeirão Soberbo (UPGRH GD6) é severamente afetado de forma cumulativa pelos dois empreendimentos. A bacia de decantação D3 e a Barragem D4 (BD4) da INB encontram-se assoreadas há anos devido ao carreamento de sedimentos dos córregos do Cercado, Pitangueiras e Cachoeirinha, o que reduziu drasticamente o tempo de detenção hidráulica do sistema de tratamento de águas ácidas (AA-440/AA-470). Em junho de 2023, o arraste de sólidos em suspensão e a ineficiência do polimento químico com cal hidratada na BD4 resultaram em uma concentração de alumínio dissolvido de 29,53 mg/L no ponto de lançamento de efluentes (ponto 041), o maior registro histórico da unidade.

1.18. A implantação das frentes de lavra do Projeto Colossus, mesmo situado em uma área mais distante dos limites da UDC, tem a capacidade de gerar poeira e carreamento de sedimentos finos por erosão pluvial de solos expostos (Latosolo Vermelho-Amarelo) durante a terraplenagem e abertura de acessos. Esses sedimentos assoreiam de forma cumulativa as bacias receptoras da UDC e os córregos periféricos, inviabilizando os sistemas de retenção de rádio e neutralização de acidez da INB.

Emissões Atmosféricas, Tráfego de Argila e Qualidade do Ar

1.19. A escala de operação do Projeto Caldeira exige a movimentação contínua de ROM entre as frentes de lavra (Cavas da Figueira) e a Unidade de Tratamento de Minerais (UTM), configurando uma atividade de transporte de lavra pesada em estradas de terra que cortam as divisas municipais de Caldas e Poços de Caldas. Estima-se o tráfego de milhares de toneladas diárias de argila, gerando emissões de material particulado e gases de combustão (SO_x, CO, NO_x e hidrocarbonetos).

1.20. Esse incremento de poeira e gases de combustão atinge diretamente as fitofisionomias nativas de Mata Atlântica e Floresta Estacional Semidecidual Montana que circundam a área diretamente afetada (ADA) dos empreendimentos. A deposição contínua de material particulado sobre o limbo foliar da vegetação nativa causa desregulação fisiológica por obstrução estomática, reduzindo as trocas gasosas e a eficiência fotossintética da flora de sub-bosque e dossel, acelerando o efeito de borda nos fragmentos remanescentes.

1.21. Em nível sinérgico, as emissões fugitivas de poeira das vias operacionais de terra podem atingir áreas da UDC onde estão dispostos resíduos radioativos secos e intemperizados (como bota-foras e solos superficiais contaminados). A movimentação atmosférica induzida pela circulação de caminhões pesados pode atuar como um vetor físico secundário para a ressuspensão e dispersão eólica de radionuclídeos de vida longa aderidos à poeira fina, aumentando a exposição por inalação nas comunidades do entorno e na fauna silvestre.

Estabilidade Geotécnica de Barragens e Estruturas de Contenção

1.22. A UDC/INB possui três grandes barramentos sujeitos à [Política Nacional de Segurança de Barragens](#) (PNSB): a Barragem de Águas Claras (BAC), a Barragem de Rejeitos (BAR) e a Barragem D4.

Historicamente, auditorias independentes apontaram problemas na garantia de estabilidade física dessas estruturas, com a BAR mantida em nível de alerta e apresentando sinais de deterioração por ciclagem mineral no enrocamento do talude de montante.

1.23. A lavra mecanizada de terras raras pelos projetos Caldeira e Colossus envolve escavações, movimentação intensa de tratores e caminhões e, potencialmente, vibrações contínuas de alta energia. Embora os memoriais das mineradoras apontem distanciamento espacial mínimo em relação à bacia de inundação da BAC, a propagação de ondas de choque no substrato rochoso fraturado pode alterar as pressões neutras das fundações das barragens da INB ou desestabilizar os diques de contenção de DAM. O comprometimento estrutural desses barramentos, decorrente do impacto cumulativo das vibrações da mineração ativa, acarretaria o vazamento de rejeitos ácidos e de sedimentos contaminados com urânio e tório para o ecossistema do Ribeirão Soberbo e do Rio Verde.

1.24. Em atendimento às condicionantes técnicas impostas pela Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI 21723913), a INB estruturou o Programa de Monitoramento da Biodiversidade da UDC, Revisão 03 PG-UDC-GA-08 R03 - Programa Monitoramento da Biodiversidade (PMBIO) - UDC (SEI 26906574). O programa foca em avaliar o biotransporte de contaminantes radiológicos e químicos e mensurar as taxas de bioacumulação ao longo das teias tróficas terrestres e aquáticas.

1.25. O aprimoramento do monitoramento ambiental na UDC é evidenciado na transição da Revisão 02, PG-UDC-GA-08 R02 - Programa Monitoramento da Biodiversidade (PMBIO) - UDC (SEI 26691339) para a Revisão 03 PG-UDC-GA-08 R03 - Programa Monitoramento da Biodiversidade (PMBIO) - UDC (SEI 26906574), que readequou o esforço amostral para atender integralmente às exigências do Ibama.

1.26. O monitoramento estende-se de forma sistemática em um **raio de 10 km** a partir da cerca patrimonial da UDC para avifauna, herpetofauna, pequenos mamíferos, e o uso de radiotelemetria via satélite de mamíferos de médio e grande porte predadores topo de cadeia, visando avaliar a ocupação e distribuição das espécies escolhidas no território.

Monitoramento da Biodiversidade

1.27. O monitoramento de fauna terrestre detalhado na Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI 21723913, estabelece metodologias estritas para os seguintes grupos taxonômicos:

- **Avifauna:** Amostragem trimestral contendo dois períodos de campo por semestre (estação seca e chuvosa), cobrindo todas as fitofisionomias florestais nativas e exóticas (*Pinus* e *Eucalyptus*) no raio de 10 km. São realizadas coletas de penas e sangue para análise de metais pesados, tório e urânio.
- **Herpetofauna:** Foco especial no monitoramento de espécies sensíveis e bioindicadoras de ambientes lóticos e de encosta de Mata Atlântica, tais como os anfíbios anuros *Boana beckeri* e *Scinax caldarum*. Adicionalmente, exige-se o monitoramento por radiotelemetria ativa do cágado-da-serra (*Hydromedusa maximiliani*), réptil aquático de vida longa altamente suscetível à bioacumulação de contaminantes de sedimentos em riachos de cabeceira.
- **Mastofauna:** Dividido em micro-mamíferos (capturados por armadilhas de queda *pitfalls*, redes de neblina *mistnets* e armadilhas tipo *Sherman/Tomahawk*) e mamíferos de médio a grande porte. Para estes últimos, a condicionante III do programa de fauna exige o monitoramento radiotelemétrico via satélite com foco em três espécies carnívoras chave: o lobo-guará (*Chrysocyon brachyurus*), a raposinha (*Lycalopex vetulus*) e o gato-do-mato-pequeno (*Leopardus cf. guttulus*). A captura desses indivíduos visa a obtenção de tecidos, pelos e sangue para determinação de parâmetros bioquímicos e análise de bioacumulação de metais pesados e diuranato de cálcio (DUCA).

Biota Aquática e Ecotoxicologia Estuarina/Lótica

1.28. O programa de monitoramento especial de biota aquática apresenta frequência mínima trimestral, com pontos amostrais distribuídos nos corpos d'água internos da UDC (Córrego do Cercado, Córrego da Consulta e Ribeirão Soberbo) e pontos externos a jusante. O monitoramento integra os seguintes grupos bioindicadores :

- **Fitoplâncton:** Avaliação taxonômica sistemática para identificar a dominância de cianobactérias, utilizadas como bioindicadores negativos de qualidade de água e indicadoras de perturbação química extrema.
- **Zooplâncton:** Rastreamento do zooplâncton como principal elo bioacumulador de metais dissolvidos, demonstrando alta sensibilidade a traços de urânio e tório e atuando na transferência trófica de contaminantes para os músculos da ictiofauna.
- **Macroinvertebrados Bentônicos:** Foco em famílias da ordem Diptera (especialmente *Chironomidae*) e na classe *Oligochaeta*, conhecidas por tolerar condições severas de acidez e baixa oxigenação. Esses organismos bentônicos acumulam metais pesados presentes na interface água-sedimento, servindo de bioindicadores de longo prazo do assoreamento e contaminação de leitos.
- **Ictiofauna:** Rastreamento de espécies nativas associadas a protocolos de investigação de episódios de mortandade induzidos por variações bruscas de pH na descarga da ETE/AA-440 ou arraste físico de precipitados de DUCA em suspensão na Represa de Águas Claras.

1.29. Os testes de ecotoxicidade padronizados utilizam o microcrustáceo *Ceriodaphnia silvestrii* exposto a águas de escoamento e de sedimentos do complexo da UDC. O histórico de monitoramento indica respostas de toxicidade crônica e aguda relacionadas a altas concentrações de sulfatos dissolvidos e metais móveis gerados por DAM.

2. ANÁLISE

Sinergias Físicas, Hidrogeológicas e Efeitos Cumulativos com a INB Caldas.

2.1. A proximidade espacial entre as frentes de lavra planejadas para o Projeto Caldeira e as estruturas de contenção de rejeitos radioativos da UDC exige uma análise rigorosa de não interferência geotécnica e de propagação de contaminantes. Vistorias integradas conduzidas por técnicos do Ibama, da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN) e apresentação realizada pela equipe da empresa Meteoric, demonstraram que as cavas do Projeto Caldeira mantêm um distanciamento físico em relação aos barramentos críticos da UDC. Não há sobreposição ou interferência geométrica direta com a Barragem de Águas Claras (BAC), a Barragem D4 (BD4), a Barragem de Rejeitos (BAR), a Bacia Nestor Figueiredo (BNF) ou os galpões de estocagem de resíduos radioativos de Torta II e mesotório. Essa compatibilidade espacial foi documentada formalmente por meio do Ofício do Ibama nº 778/2025/COMIP/CGTEF/DILIC (SE7880427), do Ofício da ANSN nº 114/2025-CGCC.ANSN e do comunicado externo da INB CE-GEFIS.P/SUNOV.P-005/26 em janeiro de 2026.

2.2. Apesar da ausência de sobreposição geométrica, os efeitos sinérgicos e cumulativos de longo prazo podem se manifestar de forma pronunciada nos eixos hidrogeológico e geoquímico, afetando as sub-bacias hidrográficas do Ribeirão das Antas e do Rio Verde. Os principais vetores de impacto cumulativo e as fontes geradoras da UDC estão consolidados na tabela abaixo:

Tabela 2. Comparativo entre as estruturas da UDC e possíveis impactos cumulativos associados ao Projeto Caldeira.

Estrutura da UDC (INB)	Carga Poluidora / Passivo Associado	Mecanismo de Impacto Cumulativo com o Projeto Caldeira
Bota-fora 4 (BF4)	>100 milhões de toneladas de estéril gerador de Drenagem Ácida de Mina (DAM).	O rebaixamento do lençol freático pelas cavas da Meteoric pode alterar a direção do fluxo e acelerar a pluma de DAM.
Barragem de Rejeitos (BAR)	Rejeitos radioativos líquidos e sólidos, incluindo diuranato de cálcio (DUCA).	Concentração histórica de contaminantes no solo e risco de percolação para aquíferos fraturados comuns.
Barragem Águas Claras (BAC)	Sedimentos químicos radioativos de DUCA depositados em seu leito (>500.000 m3).	Demanda por captação superficial e rebaixamento do nível d'água podem desestabilizar as condições de contorno de fluxo.
Galpões de Armazenamento	15.000 toneladas de Torta II e mesotório em 25.000 bombonas.	Risco cumulativo de dispersão atmosférica de particulados finos e gases nitrosos na mesma bacia aérea.

Bacia Retenção Tório	de de	Efluentes líquidos de processo com alta concentração de tório solúvel.	Risco de carreamento em eventos de precipitação extrema sobre canais de escoamento superficiais adjacentes.
----------------------	-------	--	---

2.3. No eixo hidrogeológico, o Projeto Caldeira demandará um volume substancial de recursos hídricos, tendo protocolado um requerimento de outorga preventiva sob o processo SEI nº 2090.01.0008731/2024-38 para a captação superficial de até 7.680,00 m³/dia destinado ao consumo industrial, humano e aspersão de vias. Alternativamente, o projeto de engenharia prevê a captação de até 540 m³/dia por meio de furos e poços específicos para o rebaixamento do lençol freático nas frentes de lavra.

2.4. Esse rebaixamento de nível d'água, ao induzir cones de depressão regionalizados na superfície potenciométrica local, interfere diretamente na hidrodinâmica subterrânea do entorno da UDC. A UDC possui uma pluma histórica de contaminação subterrânea por drenagem ácida que migra de forma ativa a jusante do Bota-fora 4 em direção à microbacia do Rio Verde. O gradiente hidráulico artificial induzido pelo bombeamento nas cavas da Meteoric pode distorcer as linhas de fluxo natural, promovendo a aceleração ou o desvio dessa pluma de acidez e metais pesados (Al, Mn, U, Zn) na direção das frentes de lavra ou de poços de captação de terceiros.

2.5. No eixo geoquímico, o processo de lixiviação química a ser implantado na UTM para a extração iônica das terras raras apresenta um risco de mobilização de radionuclídeos e metais pesados de ocorrência natural no solo alcalino. Os relatórios analíticos de ensaios de águas subterrâneas da área da Meteoric (boletins nº 0624/2024 e 0629/2024) indicam que as concentrações de Urânio Total de background (0,0117 mg/L e 0,0121 mg/L) já se encontram muito próximas ao Valor Máximo Permitido de 0,015 mg/L fixado pela Resolução CONAMA nº 396/2008 para consumo humano, denotando a alta sensibilidade química local.

2.6. Por essa razão, a Recomendação nº 87/2025 do Ministério Público Federal e a Condicionante 9 do Parecer Único estadual exigem que a Meteoric realize estudos geoquímicos preditivos e de dispersão de contaminantes de longo prazo (com cenários projetados para até 10 anos pós-fechamento). Esses estudos devem avaliar se o processo de lixiviação química em circuito fechado provocará, por arraste e reutilização da água, o enriquecimento e a precipitação de Urânio (U) e Tório (Th) solúveis. Também deve ser demonstrado que a disposição final das argilas lixiviadas (devolvidas às cavas mineradas no âmbito do PRAD do Projeto Caldeira) não provocará a contaminação secundária de aquíferos fraturados ou a ressurgência de metais pesados na sub-bacia do Ribeirão das Antas.

O Novo Regime de Operação de Descomissionamento da UDC: Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI 21723913).

2.7. Em 9 de janeiro de 2025, o Ibama emitiu a Licença de Operação (LO) nº 1.709, com validade de 6 anos, estabelecendo de forma definitiva as obrigações da INB para o descomissionamento e a remediação ambiental de Caldas. Essa licença unificou os esforços técnicos de equipe robusta, envolvendo um corpo técnico robusto de diversas Diretorias do Ibama, bem como da Superintendência do Ibama em Minas Gerais, impondo um cronograma rígido para neutralizar as fontes de poluição ativa da UDC bem como programas de monitoramento de longo prazo da biota aquática e terrestre.

2.8. A Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI 21723913), vinculou juridicamente a INB à execução de quatro grandes frentes de obras de engenharia e geotécnica na UDC:

- 1) **Canal de Desvio Pluvial do Sistema D3/BD4:** Composto por canaletas de concreto de 80 cm de diâmetro e extensão aproximada de 1 km, concluído ao final de agosto de 2024. O projeto desviou com sucesso o escoamento pluvial de uma bacia de 56,67 ha que antes desaguava diretamente no Dique D3 e na Barragem D4. Essa obra de engenharia eliminou o aporte de sedimentos finos e reduziu os riscos de transbordamento hidráulico das estruturas de tratamento.
- 2) **Esvaziamento e Dragagem Mecanizada da BD4:** Em julho de 2025, a equipe da UDC executou o desvio do efluente tratado da ETE-1, direcionando-o diretamente para o Córrego do Cercado através do ponto 441. Esse desvio permitiu o rebaixamento do nível d'água e a secagem da bacia da BD4

durante o período de estiagem de 2025. O objetivo consiste na dragagem mecanizada de aproximadamente 40.000 m³ de lodo e sólidos assentados, os quais serão confinados em geoformas geotêxteis instaladas na pilha de estéril BF8. A água decantada dessas geoformas é direcionada sucessivamente ao Dique D3, D4 e à Barragem de Águas Claras para garantir o polimento químico.

- 3) **Unificação do Tratamento de Efluentes na ETE-1:** Projeto prioritário da UDC para desativar a ETE-2 e cessar o lançamento de efluentes tratados na Barragem de Rejeitos (BAR), permitindo o avanço de seu descomissionamento geotécnico e o dismantelamento das bacias D1 e D2 a jusante. O projeto prevê a canalização de todas as águas das bacias B1, B2, BIA, BNF e da cava da mina diretamente para o tratamento centralizado na ETE-1. O projeto executivo e o início das obras físicas estavam planejados para julho de 2025, e o comissionamento pleno de todo o sistema unificado de condução está estimado para conclusão em abril de 2028.
- 4) **Remediação da Pluma do Bota-fora 4:** Apresentação, até abril de 2027, de um projeto executivo completo com soluções tecnicamente viáveis para capturar, bombear e tratar a pluma subterrânea de DAM que extravasa a BNF, com estabelecimento de metas progressivas de melhoria de qualidade de água no Rio Verde.

Caracterização de Resíduos e Toxicidade Química

2.9. A Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI21723913) exige que a INB atualize o seu Programa de Gerenciamento de Materiais Radioativos (PGMR), com foco especial nos riscos associados à toxicidade química estável de substâncias como o Urânio e o Tório, indo além dos critérios clássicos de radioproteção e radiotoxicidade.

2.10. Nesse contexto, a INB deve formalizar a caracterização química e física completa de passivos históricos como a "goianita" e o "inareno". A goianita é resultante do processamento químico primário de minérios de terras raras conduzido no passado na UDC e se assemelha quimicamente à Torta II, apresentando em sua composição teores majoritários de óxido de tório (ThO₂).

Biomonitoramento Terrestre e Aquático de Longo Prazo da UDC e Entorno

2.11. A delimitação de uma área de estudo que se estende por um raio de 10 km a partir dos limites físicos da UDC permite capturar a dispersão de radionuclídeos e contaminantes químicos por via atmosférica (poeira suspensa contendo tório e urânio, além de emissão de Rn₂₂₂) e por via hídrica subterrânea e superficial.

2.12. Essa abordagem regional é a única metodologia capaz de diferenciar o *background* biogeoquímico natural do planalto — que possui anomalias minerais nativas de alumínio, ferro e manganês — das anomalias induzidas pelas atividades minerárias integradas. Adicionalmente, o raio de 10 km intercepta unidades de conservação municipais, remanescentes florestais da APA da Pedra Branca e áreas habitadas por comunidades tradicionais (como o Povo Indígena Kariri e o Povo Quilombola Barreirinho), permitindo modelar de forma integrada a exposição das populações humanas.

2.13. O monitoramento integrado da biota na UDC e em sua área de influência de 10 km constitui uma exigência essencial para avaliar os caminhos de exposição de contaminantes e o restabelecimento de processos ecológicos em áreas sob remediação. Sob o amparo da Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI 21723913), do Parecer Técnico nº 18/2025-UBIO-MG/Ditec-MG/Supes-MG (SEI24826340), do Parecer Técnico nº 8/2026-U-BIO-MG/Ditec-MG/Supes-MG (SEI26691644), que aprovaram o Programa de Monitoramento da Biodiversidade (PMBIO), detalhado na Revisão 03 PG-UDC-GA-08 R03 - Programa Monitoramento da Biodiversidade (PMBIO) - UDC (SEI26906574), com a estruturação de campanhas sistemáticas divididas em subprogramas específicos de monitoramento terrestre e aquático.

Subprograma de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre

2.14. O monitoramento terrestre foca na identificação de bioindicadores e no rastreamento de metais pesados e radionuclídeos ao longo dos níveis tróficos da fauna silvestre que coloniza o sítio. Para atingir a abrangência espacial necessária, as ações foram delineadas com os seguintes métodos de campo e amostragem:

- 1) **Monitoramento e Radiotelemetria de Mastofauna (Raio de 10 km):** Campanhas trimestrais para monitorar mamíferos de grande e médio porte. Prevê a captura e instalação de coleiras de monitoramento por satélite (radiotelemetria) para indivíduos de lobo-guará (*Chrysocyon brachyurus*), raposinha (*Lycalopex vetulus*) e gato-do-mato-pequeno (*Leopardus cf. guttulus*). A coleta sistemática de amostras de sangue, pelos e tecidos desses animais visa realizar exames bioquímicos e dosar a presença de metais pesados, urânio e radionuclídeos de sua cadeia de decaimento (Ra_{226} , Pb_{210} , Th_{232} , Ra_{228}). O objetivo consiste em avaliar o risco de "sumidouro ecológico", cenário no qual a ausência de perturbação humana na UDC atrai a fauna regional, mas a exposição crônica à radioatividade e aos metais pesados causa danos genéticos e de longevidade subcrônicos à população.
- 2) **Malha de Armadilhas Fotográficas:** Instalação de câmeras com esforço amostral mínimo de 20 dias por mês, obedecendo ao adensamento locacional de 1 armadilha por km^2 dentro dos limites internos da UDC, e de 1 armadilha para cada 10 km^2 ; na área externa, cobrindo o raio de 10 km a partir da cerca patrimonial.
- 3) **Plano de Manejo de Capivaras (*Hydrochoerus hydrochaeris*):** Monitoramento das populações associadas aos corpos d'água da UDC no raio de 10 km, com foco na captura para coleta de sangue e DNA de modo a monitorar patógenos como a bactéria *Rickettsia rickettsii* (febre maculosa) e avaliar a bioacumulação sistêmica de urânio em tecidos moles.
- 4) **Amostragem na Área Controlada AA-171:** Justifica-se a inclusão de pontos amostrais no interior de zonas sob controle radiológico estrito, como a AA-171 (onde se situam os silos de estocagem de mesotório). Como a fauna silvestre transita livremente entre a AA-171 e o restante da bacia de Caldas, a amostragem *in situ* é essencial para quantificar a dose real de exposição sofrida pelos indivíduos silvestres.

Subprograma de Monitoramento da Biodiversidade Aquática

2.15. Devido à alta solubilidade de compostos químicos associados à DAM e ao DUCA, os ecossistemas aquáticos das microbacias do Ribeirão das Antas e do Rio Verde representam as vias mais prováveis de transporte e acúmulo de poluentes na região. O biomonitoramento aquático baseia-se em campanhas sazonais trimestrais (divididas entre períodos seco e chuvoso) e avalia a dinâmica das comunidades biológicas sob as seguintes premissas integradas:

- **Fitoplâncton:** Avaliação sistemática de riqueza e abundância, com foco no acompanhamento de diatomáceas da classe *Bacillariophyceae* (como *Cyclotella stelligera*) e na identificação de florações de cianobactérias, utilizadas como bioindicadores de eutrofização e degradação física da água.
- **Zooplâncton:** Monitoramento de alta sensibilidade focado no comportamento de bioacumulação e transferência trófica de metais solúveis. O programa incorpora ensaios ecotoxicológicos periódicos de laboratório utilizando o microcrustáceo *Ceriodaphnia silvestrii* exposto a amostras d'água da UDC para avaliar respostas de toxicidade reprodutiva e de mortalidade crônica.
- **Macrozoobentos:** Amostragem qualitativa e quantitativa da fauna de fundo, avaliando a proporção de organismos altamente tolerantes a metais e acidez (como larvas de *Chironomidae* e indivíduos de *Oligochaeta*) frente a táxons sensíveis, servindo como termômetro de contaminação acumulada em sedimentos de leito.
- **Ictiofauna e Investigação de Mortandades na BAC:** O monitoramento sistemático das bacias da UDC registrou a presença de 557 indivíduos distribuídos em 15 táxons, com predomínio de peixes das ordens Characiformes e Cyprinodontiformes, tendo a espécie exótica *Oreochromis niloticus* (tilápia) como única ocorrência alóctone registrada. O programa inclui um protocolo emergencial de investigação (descrito no relatório RT-UDC-08-25) acionado em até 24 horas após qualquer relato de mortandade de peixes na Represa de Águas Claras. O protocolo exige a amostragem de peixes moribundos para análises patológicas de brânquias e dosagem de bioacumulação de metais pesados e radionuclídeos em músculos, avaliando se a ressuspensão de sedimentos ricos em DUCA e metais solúveis em períodos de chuva intensa é o agente causador desses eventos.

3. DISCUSSÃO

Comparativo Internacional de Programas de Descomissionamento

3.1. A estruturação regulatória adotada no Brasil para o monitoramento da UDC Caldas, quando confrontada com as práticas executadas nas principais províncias de mineração de urânio do mundo, revela diferentes estágios de integração ecológica e responsabilidade institucional.

Canadá (Elliot Lake, Ontario e Cluff Lake, Saskatchewan)

3.2. No Canadá, sob a supervisão da [Canadian Nuclear Safety Commission \(CNSC\)](#) os projetos históricos de Elliot Lake e Cluff Lake passaram por descomissionamento ativo na década de 1990 e início dos anos 2000. O principal diferencial canadense reside no **Programa de Controle Institucional (ICP)**, que protege o poder público e as comunidades dos custos futuros de longo prazo das áreas remediadas. Sob esse programa, o operador privado (Orano Canada) financia uma garantia perpétua para monitoramento e manutenção de longo prazo, permitindo que a área seja reaberta para usos tradicionais pelas Primeiras Nações (comunidades indígenas locais) após a comprovação de estabilidade ecológica.

3.3. O monitoramento de biodiversidade terrestre apoia-se em estudos detalhados de risco ecológico que atestam a segurança do consumo de alimentos silvestres (*bush foods*), como peixes, caça, frutos e ervas coletados pelas comunidades indígenas no entorno da bacia hidrográfica monitorada do Rio Serpent (*Serpent River Watershed*). O monitoramento de sedimentos adota uma abordagem baseada em efeitos (*effect-based guidelines*), fixando o limite de qualidade de sedimento em 100mg/kg de Urânio para a proteção de comunidades bentônicas, com base em testes laboratoriais integrados com macroinvertebrados locais.

Estados Unidos (Hanford Site, Washington e Smith Ranch-Highland, Wyoming)

3.4. Nos Estados Unidos, o gerenciamento de passivos de urânio e resíduos nucleares de Hanford e Rocky Flats é conduzido de forma compartilhada entre a [Environmental Protection Agency](#) (EPA - sob o regime *Superfund*), a [Nuclear Regulatory Commission](#) (NRC) e o [Department of Energy](#) (DOE - Office of Legacy Management).

3.5. O monitoramento terrestre americano introduziu a modelagem científica de **bioturbação** como vetor de transporte de radionuclídeos de longo prazo. Estudos em Hanford demonstraram que mamíferos escavadores (roedores, tatus) e insetos colonizadores (formigas) perfuram as barreiras argilosas de cobertura de valas de rejeitos radioativos superficiais, trazendo sedimentos contaminados com plutônio, tório e urânio para a superfície. Esse material exposto sofre ressuspensão eólica drástica. O monitoramento eólico nos EUA revelou que as emissões eólicas de solos perturbados por animais superaram os modelos teóricos de dispersão física em mais de 20 vezes, alterando permanentemente os protocolos de barreira vegetal do país.

3.6. Em Wyoming, o monitoramento de minas por lixiviação *in-situ* (ISL) foca na modelagem de plumas e em barreiras geoquímicas de atenuação natural. Enquanto o urânio nos aquíferos de lavra ativos sobe de 10-70 ppm para concentrações pós-lavra de 13-40 ppm, poços de monitoramento a jusante provam que a adsorção e a imobilização redutora em barreiras de argila limitam a migração horizontal das plumas contaminadas.

Europa Ocidental e Oriental (Wismut, Alemanha e República Checa)

3.7. O Projeto de Remediação Ambiental Wismut, executado nas regiões densamente povoadas da Saxônia e Turíngia (Alemanha), representou um investimento público federal alemão de € 6,2 bilhões para mitigar os passivos deixados por 40 anos de mineração de urânio soviética. Gerenciado pela estatal Wismut GmbH, o projeto resultou na renaturalização completa de mais de 100 km² de áreas industriais degradadas, incluindo o preenchimento controlado da cava de Lichtenberg com material de bota-foras e o descomissionamento a seco de grandes lagoas de rejeitos (*tailings management facilities*) como Helmsdorf e Culmitzsch.

3.8. O monitoramento ecológico alemão adota a Diretiva de Emissões e Imissões de Mineração, que estabelece uma rede unificada de aproximadamente 1.300 pontos de amostragem contínua de Rn₂₂₂ no ar, poeira com emissores alfa de vida longa, biomassa florestal e descargas líquidas

de urânio e rádio-226 desaguadas nos rios Weiße Elster e Zwickauer Mulde. Para assegurar a governança de longo prazo, foi criada em 2021 a Fundação Wismut (*Wismut Stiftung gGmbH*), financiada pelos estados da Turíngia e Saxônia para monitorar perpetuamente os locais remediados e preservar a memória histórica e cultural da mineração.

3.9. Na República Checa, o descomissionamento de minas de urânio fechadas entre 1958 e 1992 foca no monitoramento geoquímico e na dinâmica de inundação de poços profundos. O acompanhamento a longo prazo identificou o fenômeno do "primeiro fluxo" (*first flush*) após o enchimento natural das galerias subterrâneas, no qual ocorre a liberação maciça inicial de compostos de Ra₂₂₆ (com atividade de 0,03 a 1,85Bq/L) e metais pesados (Al, Co, Ni), exigindo tratamento ativo de água até que o sistema atinja o equilíbrio estratificado estável.

Austrália (Mina Ranger, Northern Territory)

3.10. Na Austrália, a mina de urânio Ranger, operada pela [Energy Resources of Australia Ltd](#) (ERA) e cercada pelo Parque Nacional Kakadu (patrimônio mundial da UNESCO e sítio Ramsar), encerrou o processamento de minério em 2021 com descomissionamento projetado até 2026. O processo é supervisionado de forma independente pelo [Supervising Scientist Branch](#) do governo federal australiano.

3.11. O diferencial da Austrália reside na padronização metodológica do monitoramento biótico terrestre por meio do protocolo [TERN AusPlots Survey Protocol](#) Este sistema utiliza parcelas permanentes de amostragem vegetal de 1 ha associadas a aplicativos móveis para coleta em tempo real de dados de solos e sub-bosque. Os dados coletados na mina Ranger são confrontados diretamente com séries temporais de longo prazo obtidas no [Northern Australian Tropical Transect \(NATT\)](#) dentro do Parque Nacional Kakadu, permitindo verificar estatisticamente se a reabilitação da mina está seguindo a trajetória ecológica correta de retorno aos ecossistemas de referência nativos. O monitoramento aquático de Magela Creek adota padrões ecotoxicológicos locais desenvolvidos pelo instituto de pesquisa [ERISS](#), calibrados especificamente para a sobrevivência de espécies aquáticas tropicais de zonas úmidas sob flutuações sazonais extremas.

Tabela 3. Matriz Comparativa de Padrões de Monitoramento e Governança

País / Sítio Referência	Padrões de Monitoramento Terrestre e Métricas de Solo	Padrões de Monitoramento Aquático e Sedimento	Estrutura de Custódia e Governança de Longo Prazo
Brasil / UDC Caldas (INB)	Monitoramento trimestral de fauna terrestre (raio de 10 km); radiotelemetria de lobo-guará (<i>Chrysocyon brachyurus</i>), raposinha (<i>Lycalopex vetulus</i>) e gato-do-mato-pequeno (<i>Leopardus cf. guttulus</i>) e cágado-de-barbicha (<i>Hydromedusa maximiliani</i>); dosagem de DUCA e metais pesados.	Frequência trimestral de biota aquática (fitoplâncton, zooplâncton, macroinvertebrados), ensaios ecotoxicológicos com Ceriodaphnia silvestrii.	Supervisão compartilhada pelo Ibama, através da Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (E 121723913), e CNEN/ANSN. Histórico de transição lenta mediada por termos de compromisso judiciais.

Canadá / Cluff Lake e Elliot Lake	Revegetação intensiva (>650.000 árvores); monitoramento radiológico de cadeia alimentar indígena (bush foods).	Monitoramento integrado de bacia hidrográfica (Serpent River); limite de 100mg/kg de U em sedimentos para proteção bentônica.	Licenciamento pela CNSC; Programa de Controle Institucional (ICP) com transferência de custódia para a província e fundo de garantia perpétuo.
Estados Unidos / Hanford e Rocky Flats	Monitoramento de bioturbação por animais escavadores (formigas, roedores) como vetor de dispersão de radionuclídeos secundários.	Modelagem de migração horizontal de plumas de lixiviação in-situ (ISL) em aquíferos profundos; barreiras de adsorção geoquímica.	Supervisão da EPA (Superfund), NRC e DOE; custódia permanente conduzida pelo Office of Legacy Management do governo federal.
Alemanha / Complexo Wismut	Renaturalização e monitoramento contínuo de Rn ²²² no ar e emissões de poeira alfa de vida longa em 100 km ² afetados.	Tratamento passivo por fitorremediação; monitoramento de cargas de urânio e rádio-226 nos rios Weiße Elster e Zwickauer Mulde.	Gerenciamento pela estatal Wismut GmbH com aporte de € 6,2 bilhões; criação da Wismut Stiftung (Fundação) para preservação de memória e monitoramento perpétuo.
Austrália / Mina Ranger	Protocolo padronizado TERN AusPlots; uso de drones (UAV) multiespectrais para avaliar a trajetória ecológica em relação ao P. N. Kakadu.	Critérios ecotoxicológicos rigorosos pelo ERISS para proteção de zonas úmidas protegidas pela Convenção Ramsar.	Supervisão científica independente pelo Supervising Scientist; comitê de revisão técnica (ARRTC) e anuência dos Proprietários Tradicionais Mirarr.

Modelos Internacionais Aplicáveis ao Licenciamento no Planalto de Poços de Caldas

3.12. A análise integrada das melhores práticas internacionais em descomissionamento de minas de urânio oferece eixos de aprimoramento técnico e regulatório diretamente aplicáveis ao conflito socioambiental no Planalto de Poços de Caldas:

1. Superação do Licenciamento Fragmentado (Modelos do Canadá e Alemanha)

3.13. Tanto o Canadá quanto a Alemanha superaram a abordagem de licenciamentos isolados de propriedades ao adotar monitoramentos em nível de **bacia hidrográfica integrada** (como o *Serpent River Watershed Program*). O atual modelo em Minas Gerais, caracterizado pelo fracionamento de processos no Sistema de Licenciamento Ambiental (SLA) da FEAM para frentes de lavra limítrofes dos projetos Caldeira (Meteoritic) e Colossus (Viridis), impede a visualização da carga cumulativa de poluentes sobre a sub-bacia do Ribeirão das Antas.

3.14. É recomendável que a Subsecretaria de Gestão Ambiental (SUGA/SEMAD) e o Ibama exijam uma **Avaliação Ambiental Integrada (AAI)** ou **Avaliação Ambiental Estratégica (AAE)**. Este estudo cumulativo deve simular os cenários de longo prazo de escoamento superficial, alteração do nível freático regional e dispersão de contaminantes de todos os direitos minerários de ETR e urânio da região, definindo a capacidade de suporte ecológica do Planalto.

2. Implantação de Protocolos de Trajetória Ecológica (Modelo da Austrália)

3.15. A ausência de métricas de sucesso biótico de longo prazo para as áreas sob reabilitação da UDC Caldas e para as futuras cavas mineradas por *backfill* progressivo nos projetos de terras raras eleva o risco de falha na revegetação nativa. Recomenda-se a adoção de um protocolo unificado de parcelas de monitoramento, inspirado no *TERN AusPlots* da Austrália.

3.16. A implantação de parcelas amostrais padronizadas de longo prazo tanto dentro do perímetro da UDC quanto na zona de amortecimento da APA Santuário Ecológico da Pedra Branca permitiria monitorar a regeneração natural da Floresta Estacional Semidecidual Montana, balizando o retorno das comunidades de fauna nativa por meio de dados quantitativos de sub-bosque, serrapilheira e cobertura de dossel.

3. Integração de Vetores de Biotransporte nos Modelos de Risco (Modelo dos EUA)

3.17. O programa de monitoramento de fauna terrestre da UDC, a Revisão 03 PG-UDC-GA-08 R03 - Programa Monitoramento da Biodiversidade (PMBIO) - UDC (SEI 6906574), foca primordialmente na coleta passiva e na radiotelemetria para avaliar taxas de bioacumulação e efeitos ecotoxicológicos. Contudo, os dados de Hanford provam que a fauna escavadora atua como um **vetor físico de biotransporte**, rompendo coberturas de bota-foras e gerando caminhos preferenciais para infiltração de água da chuva e geração acelerada de DAM.

3.18. Os modelos de risco conceitual de fechamento de cavas e bota-foras da INB (atualmente revisados pelo CDTN) e os estudos de dispersão de resíduos das mineradoras de terras raras devem incorporar as atividades de escavação de mamíferos fossoriais locais (como tatus e roedores) como variáveis ativas nos modelos de estabilidade de coberturas multicamadas e na geração eólica de poeira radiológica.

4. Criação de Fundos de Custódia Institucional (Modelos do Canadá e Alemanha)

3.19. Apesar da emissão recente da Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI 21723913), o processo de descomissionamento da UDC Caldas é um *continuum* de execução de ações ao longo de quase três décadas, com ações predominantemente emergenciais e paliativas de tratamento de água e demais ações de contenção de passivos ambientais devido à instabilidade e limitações de repasses financeiros à empresa pública operadora. A introdução de novos projetos de mineração privada de terras raras na periferia do sítio nuclear exige salvaguardas financeiras de encerramento de atividade rígidas nestes empreendimentos em fase inicial de implantação, visando não repetir o passado.

3.20. O Estado de Minas Gerais e a União devem estruturar um **Fundo de Custódia Institucional**, inspirado no [Institutional Control Program](#) (ICP) canadense e na estrutura da Wismut Stiftung alemã. Este fundo, alimentado por royalties e garantias financeiras vinculadas à produção das mineradoras de terras raras e das operações nucleares, asseguraria a manutenção ininterrupta das estações de tratamento de águas ácidas (AA-440 e AA-570) e o monitoramento biótico regional mesmo em cenários de falência corporativa ou desmobilização de ativos, que são cenários perfeitamente factíveis face a volatilidade do mercado e aos interesses empresariais.

3.21. A análise integrada das melhores práticas internacionais em descomissionamento de minas de urânio oferece eixos de aprimoramento técnico e regulatório diretamente aplicáveis ao conflito socioambiental no Planalto de Poços de Caldas.

3.22. A estruturação das ações de descomissionamento e biomonitoramento da UDC de Caldas encontra paralelos técnicos diretos em programas de fechamento de minas de urânio conduzidos sob modernos padrões regulatórios mundiais. A análise detalhada desses projetos internacionais, de suas tecnologias e de seus modelos de governança ambiental de longo prazo, mais uma vez deve ser lembrada no contexto atual.

Tabela 4. Modelos de descomissionamento de minas de Urânio no exterior.

Região / Projeto	Estratégia de Engenharia e Contenção de Rejeitos	Metodologias de Biomonitoramento Terrestre e Aquático	Governança, Transição de Uso e Financiamento
Canadá (Cluff Lake, Elliot Lake, Gunnar e Lorado)	• Quirke Tailings (Elliot Lake): Uso de barreiras hídricas inundadas (water covers) para evitar oxidação. • Gunnar: Coberturas de areia e argila compactada com semeadura de vegetação nativa.	• Serpent River Watershed Program: Amostragem regional de bacia. • IEMP (CNSC): Avaliação de Po_{210} em peixes, em vegetação arbustiva do gênero <i>Rhododendron</i>, e tecidos de uma espécie de cervídeo habitante da região, o alce (<i>Alces alces</i>).	• Saskatchewan Institutional Control Program (ICP): Transferência da área sob fundos de custeio perpétuo pagos pela Orano. • Reaproveitamento da área de Elliot Lake em condomínio para aposentados.
Austrália	Ranger Mine (ERA / Supervising Scientist)	Retorno de 100% dos rejeitos químicos e estéreis para o fundo de cavas exauridas (Pit 3), seguido de selamento geotécnico.	• Abordagem de múltiplas linhas de evidência (química, biológica e radiológica). • Dosagem de Ra_{226} em mexilhões (bush food). • eDNA para recolonização faunística.
Estados Unidos (Smith Ranch-Highland Canyon Mine)	• Smith Ranch: Operações de ISL com atenuamento natural e barreiras geoquímicas de adsorção e redução. • Canyon Mine: Bombeamento hidráulico ativo de efluentes.	• Smith Ranch: Monitoramento intensivo de águas em poços periféricos. • Canyon Mine: Monitoramento de condores e mamíferos em lagoas de evaporação abertas.	• Canyon Mine: Sujeita a intensos litígios cíveis federais e disputas por fianças de remediação com o US Forest Service. • Áreas protegidas ao redor do Grand Canyon.

Alemanha (Complexo Wismut)	Wismut GmbH: Inundação de poços profundos, desmantelamento de UTM's e purificação contínua de DAM em plantas centralizadas.	- Monitoramento em escala regional ao longo das bacias receptoras dos rios da Saxônia e Turíngia. - Amostragem botânica periódica de pastagens.	- Remediação classificada como "tarefa eterna" (Ewigkeitslasten), custeada pelo Estado. - Fundação Wismut (2021) criada para preservar o patrimônio histórico-cultural.
Leste Europeu (Bukhovo e Orlov Dol - Bulgária)	- Orlov Dol: Tamponamento de cimento em poços ISL. - Bukhovo: Lagoas de rejeito com cortinas de argila e canais de desvio pluvial perimetrais.	- Monitoramento irregular e ineficaz conduzido após o encerramento das minas. - Ausência de campanhas de bioacumulação sistemáticas na biota local.	- Bukhovo: Desmoronamento de diques e infiltração de água ativa na bacia. - Áreas liberadas indevidamente para pasto e agricultura de alimentos (Yana).

Análise e Integração Técnica

1) Estratégias de Convecção e Proteção de Rejeitos contra DAM

3.23. A tecnologia de reabilitação adotada em Elliot Lake (Canadá) estabelece uma importante diretriz de custo-benefício ambiental. Na barragem de rejeitos Quirke, a aplicação de coberturas de água (*water covers*) para manter os rejeitos de urânio sob condições anóxicas provou ser vastamente superior em comparação com coberturas de vegetação seca. A barreira hídrica limita a difusão do oxigênio molecular livre para os grãos de pirita e sulfetos, reduzindo a taxa de geração de DAM a níveis insignificantes. O consumo de cal para neutralização ácida na cobertura de água do Quirke é de apenas 4 a 5 toneladas por ano, enquanto as áreas de cobertura vegetal do mesmo complexo demandam cerca de 750 toneladas de cal por ano para o tratamento químico do escoamento superficial.

3.24. Na Austrália, a Ranger Mine adotou a premissa de retornar 100% de seus rejeitos metalúrgicos e de lixiviação para o fundo da Cava exaurida do Pit 3, cobrindo-os com camadas espessas de estéril e solo vegetal (*topsoil*), isolando os elementos radioativos de qualquer contato com a biosfera ativa e de processos erosivos superficiais. Para a UDC em Caldas, essas técnicas evidenciam que a devolução do solo contaminado, da borra de enxofre e do DUCA para as cavas profundas exauridas, seguida de inundação e selagem controladas, constitui a alternativa mais robusta em relação à manutenção de pilhas de estéril secas e expostas às forças meteorológicas locais.

2) Metodologias de Biomonitoramento e Detecção Precoce de Impactos

3.25. O programa desenvolvido pelo [Supervising Scientist](#) para a Ranger Mine (Austrália) baseia-se na abordagem de múltiplas linhas de evidência. Para o monitoramento aquático, o órgão governamental implementa o rastreamento biológico de longo prazo através da dosagem sistemática de Rn_{226} em mexilhões de água doce coletados na represa Mudginberri Billabong. Como esses bivalvos constituem parte da dieta tradicional (*bush food*) das comunidades aborígenes locais, a amostragem in situ e a análise estatística de bioacumulação garantem a segurança alimentar e a proteção da saúde humana de forma integrada à proteção ecológica.

3.26. Além disso, a empresa Ranger lidera o uso de inovações tecnológicas de

biomonitoramento, aplicando algoritmos de inteligência artificial em nuvem (Microsoft Azure) com 80% de acurácia para automatizar a identificação de espécies de peixes por análise de vídeo subaquático para estimar biomassa. O projeto também aplica técnicas avançadas em colaboração com a Universidade Macquarie para sequenciar DNA ambiental (eDNA) extraído de mosquitos e algumas espécies de invertebrados hematófagos como as lesmas para rastrear o retorno e mapear a biodiversidade de vertebrados terrestres em zonas sob renaturalização.

3.27. No Canadá, o [Independent Environmental Monitoring Program](#) (IEMP) conduz amostragens anuais de tecidos biológicos de espécies de aves como as perdizes (*Canachites canadensis*), e mamíferos cervídeos como o alce (*Alces alces*) e plantas nativas do gênero *Rhododendron* ao redor dos sítios de Beaverlodge, Gunnar e Lorado. Os ensaios analisam radionuclídeos sensíveis, comprovando que os níveis de Po_{210} em peixes capturados em áreas sob influência da antiga mineração equivalem aos níveis encontrados em estações de controle de background natural (como Milliken Lake e Prospectors Bay), atestando a eficácia das coberturas de terra aplicadas pela SRC.

3) Governança, Financiamento e Responsabilidade de Perpetuidade

3.28. A governança pós-fechamento do Canadá e da Alemanha destaca-se pela instituição de garantias financeiras de longo prazo para evitar a herança de passivos órfãos. O Gunnar Mine Site exemplifica o risco de encerramento inadequado: fechado em 1964 pela empresa privada operadora sem qualquer plano de descomissionamento, o local tornou-se uma responsabilidade pública de 280 milhões de dólares canadenses para os governos federal e provincial. Para evitar cenários semelhantes, o governo de Saskatchewan instituiu o [Institutional Control Program](#) (ICP). Sob esse programa, a Orano Canada é obrigada a aportar recursos financeiros em um fundo de custeio estatal antes de transferir a posse das terras reabilitadas de Cluff Lake para a Província. Esse fundo garante os recursos necessários para que o Estado conduza monitoramentos perpétuos, manutenções rotineiras e responda de forma ágil a quaisquer acidentes ambientais futuros imprevisíveis.

3.29. Na Alemanha, o complexo Wismut é gerido por uma corporação estatal de propósito específico (Wismut GmbH) financiada por recursos federais, que trata a remediação como uma tarefa de perpetuidade eterna (*eternal task*), dividindo os recursos e a governança com a Fundação Wismut para apoiar projetos de educação, turismo histórico e preservação cultural.

3.30. Em contraste, no Leste Europeu, as operações herdadas da era soviética na Bulgária, como Bukhovo, expõem as graves consequências de uma governança ineficaz. O desvio de canais pluviais em Bukhovo apresentou graves falhas operacionais, permitindo que a enxurrada continuasse a infiltrar na antiga lagoa de rejeitos, gerando instabilidades geotécnicas recorrentes com risco de colapso de diques e contaminação de bacias agrícolas alimentares a jusante. O vazamento de poços ISL em Orlov Dol por quebra de tampões de cimento resultou na formação de lagoas contaminadas sem cercamento, permitindo o livre acesso de gado local, o que demonstra que a ausência de controles institucionais de perpetuidade transforma antigos complexos de urânio em ameaças ativas de contaminação regional.

Ferramentas de Avaliação de Risco Ecológico e Modelagem de Dose

3.31. A maior lacuna técnica existente nos processos de licenciamento nacionais reside na ausência de metodologias integradas de dosimetria para a proteção da biota não-humana. Enquanto a legislação brasileira baseia-se em limites de concentração química absoluta estabelecidos em normativas genéricas (como a [Resolução CONAMA 357/2005](#) para águas superficiais e [Resolução CONAMA 420/2009](#) para solos e sedimentos), a Austrália, o Canadá e a Alemanha utilizam ferramentas computacionais de transferência ambiental e cálculo de dose de radiação absorvida para ecossistemas.

3.32. A ferramenta [ERICA](#) (**Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management**), consagrada internacionalmente, permite calcular a dose de radiação interna e externa recebida por uma série de organismos de referência (plantas terrestres, líquens, mamíferos, peixes e invertebrados bentônicos) a partir de dados medidos de concentração de atividade (Bq/kg ou Bq/L) no solo, água e sedimentos. A estimativa é comparada a um limite de triagem internacional (*screening level*) comumente aceito de $10 \mu\text{Gy/h}$, abaixo do qual nenhum efeito deletério à reprodução, mortalidade ou morbidade de populações animais e vegetais é esperado.

3.33. A modelagem de transporte e destino usando modelos conceituais (CSM) e códigos de computador como o [RESRAD-Biota](#) permite prever de forma robusta a dispersão futura das plumas radioativas e seus impactos ecológicos de longo prazo. A inclusão dessas ferramentas no monitoramento do Planalto de Poços de Caldas permitiria avaliar de forma cientificamente amparada os reais efeitos sinérgicos causados pelo empurrão da fauna silvestre das áreas degradadas da Viridis para as zonas radioativas remanescentes da UDC.

3.34. Contudo, o Parecer Técnico nº 8/2026-U-BIO-MG/Ditec-MG/Supes-MG (SE26691644), na avaliação do Programa Monitoramento da Biodiversidade (PMBIO), a Revisão 03 PG-UDC-GA-08 R03 - Programa Monitoramento da Biodiversidade (PMBIO) - UDC (SE26906574), solicitou a incorporação de tais ferramentas nas avaliações a serem realizadas no âmbito do atendimento as condicionantes contidas na Licença de Operação (LO) nº 1.709/2025 (SEI 21723913).

O Fenômeno de "Efeito de Borda" e a Concentração Biótica em Áreas Contaminadas

3.35. O impacto cumulativo sobre a fauna silvestre assume contornos ecotoxicológicos críticos devido à interface espacial dos projetos. O avanço das frentes de lavra e a implantação da infraestrutura do Projeto Colossus e Projeto Caldeira exigem a supressão de vegetação nativa em estágio médio e avançado de regeneração de Mata Atlântica. Esse desmatamento gera fragmentação florestal, perda de conectividade e o aumento imediato do efeito de borda.

3.36. Simultaneamente, o avanço do processo de descomissionamento físico da UDC-INB e a consequente redução da circulação humana e industrial podem gerar um cenário propício para o retorno espontâneo da vida silvestre às áreas menos perturbadas da unidade (*rewilding*). No entanto, a intensa atividade mecânica, a movimentação de veículos pesados, a geração de vibrações e ruídos nas áreas de lavra de ambos os projetos de terras ras geram um forte afugentamento da fauna das áreas periféricas em direção ao interior do sítio da UDC.

3.37. Esse deslocamento forçado afunila populações de mamíferos, aves, herpetofauna e entomofauna para o centro geográfico da UDC. Ocorre que essa zona central de refúgio coincide espacialmente com as áreas de maior contaminação radiológica e química residual do empreendimento federal, tais como os galpões de estocagem de Torta II (que armazenam rejeitos radioativos de mesotório e tório em bombonas plásticas e tambores metálicos sujeitos a desgaste físico), os depósitos de borra de enxofre e as praias marginais da Barragem de Rejeitos (BAR) enriquecidas em pirita.

3.38. A fauna silvestre concentrada nessas áreas úmidas e florestais remanescentes da UDC pode ser submetida a taxas elevadas de irradiação externa gama e contaminação interna por inalação de aerossóis contendo radionuclídeos e ingestão de água acidificada rica em metais pesados biodisponíveis. Cria-se, assim, uma "armadilha ecológica" sinérgica, onde a supressão vegetal periférica da lavra privada empurra a fauna para um sumidouro ecotoxicológico estatal.

Vulnerabilidade a Eventos Climáticos Extremos e Zonas de Autossalvamento

3.39. A análise de riscos integrados exige correlacionar os cenários de mudanças climáticas com a estabilidade geotécnica e hidrológica de ambas as áreas. O Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais e o diagnóstico do meio físico do Projeto Colossus sinalizam o aumento na frequência de precipitações extremas concentradas e períodos prolongados de seca severa para o Planalto de Poços de Caldas.

3.40. Durante eventos de chuvas torrenciais, o risco de transbordamento de águas ácidas armazenadas na cava inundada da INB e de rompimento de canais de desvio de drenagem pluvial aumenta significativamente. Se as cavas ativas do Projeto Colossus e Projeto Caldeira estiverem operando nas cotas topográficas adjacentes, a inundação repentina dessas cavas por águas contaminadas da UDC pode carrear toneladas de sedimentos e metais pesados para o sistema de drenagem pluvial externo.

3.41. Esse cenário impacta diretamente comunidades vulneráveis localizadas a jusante, como os moradores do bairro Jardim Kennedy II, em Poços de Caldas. Essa população já se encontra inserida em duas Zonas de Autossalvamento (ZAS) devido à sua localização física abaixo das barragens da UDC-INB (BAR e BD4) e da Represa do Cipó. O aumento da pressão hidrológica cumulativa e os riscos de

escorregamento de taludes em cavas ativas ou pilhas de estéril e rejeitos de argila lixiviada sob condições de saturação pluvial intensa representam uma severa ameaça à segurança física e sanitária dessas comunidades.

3.42. Com efeito, a contiguidade a UDC tornou-se foco de intensas discussões socioambientais em função do surgimento de projetos de mineração de terras raras na mesma bacia hidrográfica. Mesmo que as empresas Viridis e Meteoric apontem vantagens operacionais e menor interferência física em relação às lavras subterrâneas convencionais, as atividades de lavra de argila iônica demandam a movimentação de milhões de toneladas de solo por ano e o uso intensivo de agentes lixivantes químicos.

3.43. Sob a perspectiva da análise de riscos regionais, a proximidade física entre a mina de urânio da INB em processo de descomissionamento e as futuras cavas de terras raras introduz a possibilidade de interações geoquímicas e radiológicas cumulativas que não podem ser identificadas de forma isolada nos estudos de impacto ambiental convencionais. Por essa razão, a instauração de uma Avaliação de Impacto Cumulativo (AIC) torna-se obrigatória para avaliar as perturbações sinérgicas que ameaçam os aquíferos locais e a saúde das populações do entorno. A adoção de um processo estruturado de AIC, evoluindo de uma abordagem rápida baseada em dados secundários para uma modelagem de alta fidelidade tridimensional, está em perfeito alinhamento com os requisitos da [Performance Standard 1](#) (PS1) da [Corporação Financeira Internacional](#) (IFC) , além de cumprir os requisitos de segurança e remediação da [Agência Internacional de Energia Atômica](#) (AIEA) e as recomendações de planejamento a longo prazo da [Agência de Energia Nuclear da OCDE](#) (OCDE/NEA)

Integração Estruturada dos Pontos de Atenção e Governança Territorial

Considerando a necessidade de reorganização de quais são as prioridades de Governança territorial, aqui identificadas pelo termo "Pontos de Atenção", foi elaborada uma estruturação destas prioridades propostas para o território do Planalto de Poços de Caldas, e que devem ser contextualizadas frente à complexidade técnica do passivo da UDC e à implantação dos projetos privados de terras raras. O ordenamento das prioridades analíticas e de gestão está detalhado a seguir:

1. Estado do conhecimento

O atual nível de conhecimento ainda não permite avaliar de forma integrada os impactos cumulativos, sinérgicos e de longo prazo decorrentes da implantação dos diferentes empreendimentos minerários previstos para o Planalto de Poços de Caldas.

A avaliação isolada de cada empreendimento omite as profundas interações subterrâneas e superficiais geradas pela proximidade das cavas de mineração. Enquanto o Projeto Caldeira e o Projeto Colossus projetam lavras rasas em depósitos superficiais de argilas iônicas, o comportamento conjunto dos cones de rebaixamento potenciométrico sobre a hidrodinâmica das plumas de contaminação ácida e radioativa da UDC da INB permanece uma lacuna científica. Não há estudos integrados que simulem a circulação geoquímica profunda nem o fluxo transfronteiriço de efluentes entre as sub-bacias do Ribeirão das Antas e do Ribeirão Soberbo, limitando o planejamento de remediação de longo prazo.

2. Incertezas técnicas

Persistem incertezas relevantes quanto aos efeitos sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, a biodiversidade, a estabilidade ambiental, os passivos existentes e as atividades econômicas dependentes da qualidade ambiental, como o turismo e a agropecuária.

No campo hidrogeológico, resta esclarecer se o rebaixamento cumulativo do lençol freático pelas cavas da Meteoric e da Viridis acelerará o escoamento subterrâneo poluído a partir do bota-fora BF-4. Sob o ponto de vista geoquímico, o potencial de mobilização secundária de metais pesados, urânio e tório gerado pelo retorno das "argilas lixiviadas" ácidas às cavas mineradas (*backfill progressivo*) constitui um risco real de degradação da qualidade do solo. Na biodiversidade, a fragmentação florestal severa decorrente da supressão vegetal de Mata Atlântica e o afugentamento de fauna pelas atividades de lavra mecanizada criam uma "armadilha ecológica" sinérgica. O ruído e as vibrações das minas privadas forçam o deslocamento da fauna regional para o interior da UDC — zona que, embora desprovida de perturbação humana, apresenta áreas com contaminação radiológica e química residual crítica, como os depósitos de Torta II na área controlada AA-171 e as margens da

Barragem de Rejeitos (BAR). Esse sumidouro ecotoxicológico estatal pode gerar danos genéticos e de longevidade subcrônicos à fauna regional. Finalmente, o desvio das plumas contaminadas coloca em risco a estabilidade das estâncias hidrominerais e nascentes de água mineral profunda que sustentam o turismo e o abastecimento público do município de Poços de Caldas.

3. Integração dos estudos

Existem lacunas na integração dos estudos ambientais, que permanecem focados em empreendimentos individualizados, sem avaliar adequadamente as interações ecológicas, hidrológicas, territoriais e socioeconômicas do conjunto dos projetos.

A análise isolada e compartimentalizada dos estudos de licenciamento ambiental conduzidos em situações distintas em âmbito estadual ([SLA 911/2024](#) e [SLA 14422/2026](#) para o Projeto Caldeira da Meteoric e [SLA 634/2025](#) para o Projeto Colossus da Viridis), impede a estimativa da carga cumulativa de poluentes. Fatores como a capacidade regional de diluição de efluentes no Ribeirão das Antas, o arraste cumulativo de sedimentos geradores de assoreamento nas bacias de contenção da INB e a degradação conjunta da bacia aérea devido às emissões fugitivas de poeira nas vias operacionais de transporte não são contemplados nos estudos convencionais. Torna-se imperativo que os órgãos reguladores exijam uma Avaliação Ambiental Integrada (AAI) ou uma Avaliação Ambiental Estratégica (AAE) para simular os cenários cumulativos em um horizonte temporal estendido.

4. Abordagem territorial

O conjunto dos empreendimentos demanda uma abordagem territorial integrada, considerando a singularidade ambiental do Planalto de Poços de Caldas, caracterizado por aquíferos estratégicos, estâncias hidrominerais, áreas protegidas, passivos radiológicos e elevada sensibilidade ecológica.

O avanço da nova fronteira mineral de terras raras não pode se estabelecer à margem de uma visão ecossistêmica regional. Conforme preceituam as diretrizes do guia de boas práticas da Corporação Financeira Internacional ([IFC - Performance Standard 1](#)), a unidade de análise técnica deve ser definida pela abrangência dos componentes ambientais e bacias hidrográficas afetados e não por divisas administrativas ou polígonos de direitos minerários. O território é caracterizado pela interconectividade dos aquíferos fraturados, pela presença do corredor ecológico da APA da Pedra Branca e por passivos nucleares federais de alta sensibilidade. Essa configuração exige um modelo integrado de planejamento do território que regule o uso do solo de forma harmônica.

5. Governança ambiental

A governança ambiental regional ainda necessita de instrumentos capazes de integrar a avaliação dos impactos cumulativos, sinérgicos e transfronteiriços, subsidiando decisões públicas fundamentadas em uma visão sistêmica do território.

Atualmente, não existem canais permanentes de coordenação regulatória entre os entes federais responsáveis pelo descomissionamento nuclear da UDC (Ibama e ANSN/CNEN) e as agências ambientais estaduais de Minas Gerais (SEMAD e FEAM) responsáveis pelo licenciamento das mineradoras privadas. Essa fragmentação administrativa eleva a insegurança técnica e regulatória. Uma governança sistêmica deve unificar as redes de monitoramento ambiental e instituir salvaguardas financeiras de longo prazo. A instituição de um Fundo de Custódia Institucional Regional, inspirado no *Institutional Control Program* (ICP) canadense e na estrutura da *Wismut Stiftung* alemã, financiado por *royalties* e garantias de fechamento das mineradoras, deve ser estruturado para assegurar a manutenção perpétua das bacias e estações de tratamento de águas ácidas mesmo face a cenários de volatilidade econômica do mercado de terras raras.

6. Participação e acompanhamento

A complexidade do cenário recomenda o fortalecimento dos mecanismos de cooperação institucional, transparência, monitoramento e participação social, de forma a assegurar maior segurança técnica e jurídica ao processo de tomada de decisão.

A coexistência de lavra ativa e passivo nuclear gera preocupações sociais e judiciais

legítimas. O fortalecimento de instâncias de controle social e a ampla publicidade dos dados de monitoramento da qualidade da água, do ar e de bioacumulação da fauna são cruciais. A transparência de dados deve abranger as populações vulneráveis localizadas imediatamente a jusante das estruturas da UDC e inseridas em Zonas de Autossalvamento (ZAS), como os moradores do bairro Jardim Kennedy II em Poços de Caldas, situados abaixo das barragens BAR e BD4 e da Represa do Cipó. A inclusão dessas populações rurais e tradicionais em fóruns de debate qualificados confere robustez jurídica e mitiga riscos de contestações judiciais de fracionamento licenciatório.

4. CONCLUSÃO

4.1. O IBAMA reconhece e respeita as competências legalmente atribuídas ao Estado de Minas Gerais, exercidas por meio da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), no que se refere ao licenciamento ambiental dos empreendimentos, em conformidade com a [Lei Complementar nº 140/2011](#) e demais normas aplicáveis. A atuação do Instituto não se confunde com a competência do órgão licenciador estadual, tampouco pretende revisitar o mérito administrativo do processo de licenciamento, restringindo-se às atribuições federais relacionadas à proteção ambiental, ao acompanhamento de temas de interesse da União e à cooperação técnica entre os entes federativos, sempre pautada pelos princípios da coordenação, da complementaridade e da atuação harmônica previstos no Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA).

4.2. Com base nas análises de engenharia, no diagnóstico hidrogeológico e no levantamento de restrições bióticas e regulatórias do Planalto Vulcânico de Poços de Caldas, considerando análise integrada das sinergias, dos efeitos cumulativos e das melhores práticas mundiais de biomonitoramento e descomissionamento permite consolidar as seguintes recomendações para os órgãos reguladores e empreendedores atuantes no Planalto de Poços de Caldas:

- **Instituição de uma Rede Integrada de Monitoramento Hidrogeológico:** O Ibama, a ANSN, a ANA, a FEAM, e o IGAM devem exigir a unificação das bases de dados potenciométricos e de monitoramento de nível de água subterrânea do Projeto Caldeira da Meteoric, do Projeto Colossus da Viridis, e da INB UDC. O modelo numérico tridimensional da hidrodinâmica local deve simular de forma conjunta o cone de rebaixamento induzido pelas cavas do Projeto Caldeira e do Projeto Colossus, e a trajetória da pluma ácida subterrânea originada no BF4 da INB, garantindo que as cavas do Projeto Caldeira e do Projeto Colossus não acelerem o transporte de radionuclídeos e metais pesados livres no aquífero fraturado.
- **Unificação e Expansão da Malha de Monitoramento de Água:** Estabelecer um comitê técnico conjunto formado pela INB, Meteoric, Viridis, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (GD6), Ibama, ANSN, ANA, FEAM, e IGAM para unificar os pontos de monitoramento de qualidade de água e sedimentos superficiais e subterrâneos no entorno de um raio de 10 km da UDC. A rede de poços de monitoramento deve cobrir todas as zonas de recarga e descarga profunda para rastrear em tempo real a pluma de DAM do Bota-Fora 4 e eventuais vazamentos químicos das cavas de terras raras.
- **Execução do Monitoramento de Fauna Terrestre com Foco em Cadeias Tróficas:** Recomendar que os programas de monitoramento de fauna das mineradoras privadas adotem a mesma metodologia analítica do programa Revisão 03 PG-UDC-GA-08 R03 - Programa Monitoramento da Biodiversidade (PMBIO) - UDC (SE26906574) da INB, coletando sistematicamente tecidos de espécimes bioindicadores para testar a acumulação cumulativa de tório, urânio, metais pesados e diuranato de cálcio (DUCA), assegurando a integridade ecológica do corredor conectivo com a APA Santuário Ecológico da Pedra Branca.
- **Atualização da Ecotoxicologia e dos Ensaios de Bioacumulação no PMBIO:** O biomonitoramento aquático da UDC deve incorporar de forma obrigatória as metodologias de avaliação trófica multivariada com análises integradas de sedimento, água e tecidos biológicos. Devem ser expandidos os estudos com o organismo-teste *Ceriodaphnia silvestrii* e com a espécie nativa de peixe *Phalloceros harpagos* (altamente representativa nas bacias de Caldas) para mapear de forma precoce o transporte de metais da base da cadeia até os predadores superiores, permitindo estabelecer nexos causais claros durante eventos de mortandade na Barragem de Águas Claras.

- **Criação de um Fundo de Custeio de Controle Institucional Regional:** Inspirando-se no modelo de Saskatchewan (ICP), o licenciamento de instalação e operação do Projeto Caldeira da Meteoric, e do Projeto Colossus da Viridis, devem prever a constituição de garantias financeiras vinculadas à manutenção e ao monitoramento em perpetuidade. Esse fundo deve prover suporte financeiro para o biomonitoramento e vigilância de longo prazo em um raio mínimo de 10 km a partir do perímetro de desativação da UDC e das áreas de disposição de argilas lixiviadas da Meteoric e da Viridis, resguardando o erário público de futuros custos de remediação de passivos órfãos.

4.3. A IFC, uma instituição membro do Banco Mundial, cujo o objetivo é promover o desenvolvimento econômico através do setor privado em países em desenvolvimento, em seu guia prático estabelece a importância do empreendedor identificar os impactos cumulativos, **e recomenda que a unidade de análise seja definida pelos componentes ambientais afetados e não pelos limites administrativos dos empreendimentos.** Neste contexto, a modelagem de impactos sinérgicos no Planalto Vulcânico de Poços de Caldas evidencia que o avanço da nova fronteira mineral de terras raras, se conduzido à margem de uma avaliação integrada, possui o potencial de comprometer e desestabilizar os sistemas de remediação ambiental do passivo nuclear da INB Caldas.

4.4. Apenas, com o estabelecimento de um regime regulatório integrado, que associe a governança participativa à unificação das redes de monitoramento de ecossistemas (conforme as melhores referências técnicas do Canadá, EUA e Austrália), será capaz de salvaguardar a sustentabilidade hidrogeológica, a biodiversidade e a segurança das comunidades rurais e urbanas expostas ao duplo estresse químico e radiológico no planalto.

4.5. Neste contexto, a questão deixa de ser apenas um licenciamento ambiental de dois empreendimento minerários distintos, e passa a envolver uma discussão sobre governança territorial em uma região ambientalmente sensível e funcionalmente integrada.

4.6. Considerando a relevância estratégica da região, recomenda-se o fortalecimento da atuação coordenada entre os órgãos federais e estaduais, promovendo a integração das informações técnicas, o acompanhamento dos impactos cumulativos e a construção de mecanismos permanentes de governança territorial.

5. BIBLIOGRAFIA

- Adeola, A. O., Iwuozor, K. O., Akpomie, K. G., Adegoke, K. A., Oyedotun, K. O., Ighalo, J. O., ... & Conradie, J. 2023. Advances in the management of radioactive wastes and radionuclide contamination in environmental compartments: a review. *Environmental geochemistry and health*, 45(6), 2663-2689.
- Andersen, A. N., Einoder, L. D., Fisher, A., Hill, B., & Oberprieler, S. K. 2023. Faunal standards for the restoration of terrestrial ecosystems: a framework and its application to a high-profile case study. *Restoration Ecology*, 31(1), e13735.
- Aumalikova, M. 2025. Impact of uranium mining on radiation levels in Kazakhstan: A case study of two major provinces. *Bull. L. N. Gumilyov Eurasian Natl. Univ. Physics. Astron. Ser.*, 151, 45–59
- Bayliss, C., & Langley, K. 2003. *Nuclear decommissioning, waste management, and environmental site remediation.* Elsevier.
- Chernysh, Y., Chubur, V., Ablieieva, I., Skvortsova, P., Yakhnenko, O., Skydanenko, M., ... & Roubík, H. 2024. Soil contamination by heavy metals and radionuclides and related bioremediation techniques: A review. *Soil Systems*, 8(2), 36.
- Cui, Q.; Zhang, Z.; Beiyuan, J.; Cui, Y.; Chen, L.; Chen, H.; Fang, L. 2023. Uranium in soil-plant systems. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 53, 340–365
- Delistraty, D. 2008. Radioprotection of nonhuman biota. *Journal of environmental radioactivity*, 99(12), 1863-1869.
- Diaz, A., Green, I., Smith, B., & Carrington, I. 2006. Ecological drivers in mine site rehabilitation. In *Mine Closure 2006: Proceedings of the First International Seminar on Mine Closure* (pp. 51-60). Australian Centre for Geomechanics.

- Einoder, L. D., Hill, B., & Fisher, A. 2019. Rehabilitation of vertebrate assemblages at Ranger Uranium Mine: Assessment standards and monitoring methodology.
- Gould, S. F. 2011. Does post-mining rehabilitation restore habitat equivalent to that removed by mining? A case study from the monsoonal tropics of northern Australia. *Wildlife Research*, 38(6), 482-490.
- Goulet, R.R., Newsome, L., Vandenhove, H., Keum, D.-K., Horyna, J., Kamboj, S., Brown, J., Johansen, M.P., Twining, J., Wood, M.D., Cerne, M., Beaugelin-Seiller, K., Beresford, N.A., 2022. Best practices for predictions of radionuclide activity concentrations and total absorbed dose rates to freshwater organisms exposed to uranium mining/milling. *J. Environ. Radioact.* 244–245, 106826
- Hancock, G. R., Grabham, M. K., Martin, P., Evans, K. G., & Bollhöfer, A. 2006. A methodology for the assessment of rehabilitation success of post mining landscapes—sediment and radionuclide transport at the former Nabarlek uranium mine, Northern Territory, Australia. *Science of the Total Environment*, 354(2-3), 103-119.
- Hamza, A., Khan, F., Nawab, J., Ghani, J., Ali, S., Laghari, Y., ... & Wei, Z. 2026. Radiological contamination in soils near the world's largest rare earth minerals producing region and their impacts on human health: A summary analysis. *Journal of Environmental Radioactivity*, 296, 107974.
- IFC. 2013. Good practice handbook on cumulative impact assessment and management: guidance for the private sector in emerging markets. Washington (DC): International Finance Corporation
- International Atomic Energy Agency. 2021. Management of Residues Containing Naturally Occurring Radioactive Material from Uranium Production and Other Activities: Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency.
- Manero, A., Kragt, M., Standish, R., Miller, B., Jasper, D., Boggs, G., & Young, R. 2020. A framework for developing completion criteria for mine closure and rehabilitation. *Journal of Environmental Management*, 273, 111078.
- McKee, P. M., Snodgrass, W. J., Hart, D. R., Duthie, H. C., McAndrews, J. H., & Keller, W. 1987. Sedimentation rates and sediment core profiles of ^{238}U and ^{232}Th decay chain radionuclides in a lake affected by uranium mining and milling. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44(2), 390-398.
- Mussayeva, E., Bakhtin, M., & Kurbanova, A. 2026. Environmental Impacts of In Situ Leaching Uranium Mining: A Review. *Environments*, 13(7), 366.
- National Research Council, Division on Earth, Life Studies, Board on Earth Sciences, Committee on Earth Resources, & Committee on Uranium Mining in Virginia. 2012. Uranium mining in Virginia: scientific, technical, environmental, human health and safety, and regulatory aspects of uranium mining and processing in Virginia.
- Pillai, P. M. B. 2007. Naturally occurring radioactive material (NORM) in the extraction and processing of rare earths. In *Proceedings of the International Symposium on NORM* (pp. 197-221).
- Prlić, I., Mostečak, A., Surić Mihić, M., Veinović, Ž., & Pavelić, L. 2017. Radiological risk assessment: an overview of the ERICA Integrated Approach and the ERICA Tool use. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 68(4), 298-307.
- Proulx, C. L., Kilgour, B. W., & Goulet, R. R. 2025. Quantifying historical releases of radium-226 from Canadian mining operations to freshwaters. *Journal of Environmental Radioactivity*, 283, 107629.
- Rapantova, N., Licbinska, M., Babka, O., Grmela, A., & Pospisil, P. 2013. Impact of uranium mines closure and abandonment on groundwater quality. *Environmental science and pollution research*, 20(11), 7590-7602.
- Sauvé, D., Clulow, V., & Goulet, R. R. 2021. Quantifying historical releases and pre-operation levels of metals and radionuclides. *Journal of environmental radioactivity*, 237, 106683.
- Tiemann C, Young R, MacDonald V, Dixon, K. 2022. Rehabilitation and mine closure policies creating a pathway to 1 relinquishment – an Australian mining perspective. *Restoration Ecology* **30**: e13785.

Turner SR, Cross AT, Just M, Newton V, Pedrini S, Tomlinson S, Dixon, K. 2022. Restoration seedbanks for mined land restoration. *Restoration Ecology* **30**: e13667

Wiramanaden, C.I.E., Orr, P.L., Russel, C.K., 2015. Assessment of radium-226 bioavailability and bioaccumulation downstream of decommissioned uranium operations, using the caged oligochaete (*Lumbriculus variegatus*). *Environ. Toxicol. Chem.* **34** (3), 507–517.

Wufuer, R., Waheed, A., Liang, P., Shuzhi, W., Wenfeng, L., Fan, Y., Chimezie, E.C. 2025. Microbial interactions with uranium: Mechanisms, ecosystem impacts, and bioremediation strategies. *Environ. Technol. Innov.* **40**, 104510.

Atenciosamente,

(assinado eletronicamente)

KATIA ADRIANA DE SOUZA

Coordenadora - Comip/CGTef/Dilic/Ibama

[Portaria n.º 1.753, de 21 de julho de 2023](#)

(assinado eletronicamente)

SÉRGIO AUGUSTO DOMINGUES

Superintendente Estadual do Ibama em Minas Gerais

Portaria n.º 661, de 26 de junho de 2023

(assinado eletronicamente)

JUNIO AUGUSTO DOS SANTOS SILVA

Analista Ambiental/Equipe de Biodiversidade e Florestas - MG

Divisão Técnico-Ambiental

Superintendência do Ibama em Minas Gerais



Documento assinado eletronicamente por **KATIA ADRIANA DE SOUZA**, **Coordenadora**, em 09/07/2026, às 17:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **SERGIO AUGUSTO DOMINGUES**, **Superintendente**, em 09/07/2026, às 17:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JUNIO AUGUSTO DOS SANTOS SILVA**, **Analista Ambiental**, em 09/07/2026, às 18:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ibama.gov.br/autenticidade>, informando o código verificador **27880427** e o código CRC **1710AF06**.