ANAIS do 36º Congresso Brasileiro de Espeleologia

Brasília-DF, 20-23 de Abril de 2022

O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 36º Congresso Brasileiro de Espeleologia (CBE) disponível gratuitamente em www.cavernas.org.br.

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

SOUZA, T. A. R.; SILVA, A. P. B.; PEDERSOLI, G. H. P.; AULER, A. S.. Aplicação de técnicas de limpeza para remoção de material particulado em ambientes cavernícolas 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.536-544. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais36cbe/36cbe_536-544.pdf>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.
Consulte outras obras disponíveis em www.cavernas.org.br

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE LIMPEZA PARA REMOÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO EM AMBIENTES CAVERNÍCOLAS

APPLICATION OF CLEANING TECHNIQUES FOR PARTICULATE REMOVAL IN CAVE ENVIRONMENTS

Tatiana Aparecida Rodrigues de Souza (1); Ana Paula Bueno da Silva (1); Gustavo Henrique Prado Pedersoli (2); Augusto Sarreiro Auler (1)

(1) Carste Ciência Ambiental.
(2) Samarco Mineração S.A.

Contatos: tatiana.souza@carste.com.br; anabueno@biologa.bio.br; gustavo.pedersoli@samarco.com; aauler@gmail.com

Resumo

O material particulado exerce importante influência em vários aspectos do ambiente cavernícola, como microclima, espeleogênese, mudanças na composição de espeleotemas, entre outros. Portanto, projetos de remoção da poeira depositada em cavernas podem trazer diversos benefícios, contribuindo para a recuperação das condições naturais desses ambientes. Por outro lado, a limpeza desses depósitos não é uma tarefa simples e trivial. A elevada fragilidade do meio cavernícola e de seu ecossistema demanda rigorosa avaliação prévia e a aplicação de técnicas consolidadas cientificamente, de modo que os impactos observados não sejam intensificados. Buscando contribuir para a ampliação do conhecimento envolvendo essa temática, a Carste Ciência Ambiental e a Samarco Mineração S.A. propuseram a limpeza de quatro cavidades do Projeto LOC - Complexo Germano, no município de Mariana, Minas Gerais, afetadas por poeira. A atividade foi autorizada pelo órgão ambiental licenciador, SUPRAM Central Metropolitana, dentro de um Programa de Monitoramento de Material Particulado de cavidades, que permitirá o acompanhamento a longo prazo quanto à resposta desses ambientes. Em suma, 13,1 kg de poeira foram coletados, 12,4 kg dentro das cavernas. Sessenta e seis por cento desse total foi coletado na cavidade LOC-0149 (8,6 kg). Devido aos aspectos de fragilidade dessas cavidades, a limpeza ocorreu apenas parcialmente. A comparação entre os dados pré-existentes sobre a fauna subterrânea com os resultados encontrados nas campanhas de monitoramento posteriores demonstrou que, até o momento, ainda não foram encontrados fundamentos que possibilitem atestar se a atividade de limpeza trouxe benefícios ou interferências negativas às comunidades subterrâneas.

Palavras-Chave: material particulado; recuperação de caverna; limpeza de caverna.

Abstract

Aerosol particulates, including dust, lint, etc, have a considerable influence on many aspects of the cave environment, as microclimate, speleogenesis, changes in speleothem composition, and others. Therefore, projects to remove dust deposited in caves could be beneficial, contributing to the recovering of these environments. However, cleaning these deposits is not a trivial task. The fragility of this environment and its ecosystem demands an insightful preliminary evaluation and the use of technics scientifically sound, in a way that the impacts observed do not get amplified. Aiming to contribute to the growing body of knowledge about this topic, frequently present in studies on the speleological patrimony to environmental licensing in Brazil, the environmental consultancy Carste Ciência Ambiental and the mining company Samarco Mineração S.A. proposed to clean four caves of the project LOC - Complexo Germano, in the municipality of Mariana, Minas Gerais affected by dust. The work was done under a permit from the governmental agency, SUPRAM Central Metropolitana, as part of a monitoring program of dust in caves, which will allow a long-term surveillance regarding the environmental response of these environments. In summary, 13,1 kg of dust were collected, 12,4 inside caves. Sixty-six per cent of this total (8,6 kg) only in the cave LOC-0149. Due to the fragility of these caves, the cleaning was done only partially. The comparison between the pre-existent data about subterranean fauna and the results from the monitoring field campaigns after the cleaning have shown that, to the moment, was not possible to find any evidences supporting that the cleaning activities brought benefits or negative impacts to the subterranean communities.

***Keywords**: dust, cave recovery, cave cleaning.*

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos processos naturais atua muito lentamente em cavidades subterrâneas de baixa energia. Por essa razão, alterações antrópicas podem permanecer indefinidamente nesses ambientes, a depender da intensidade dessas intervenções. Habitats cavernícolas, em especial, são facilmente perturbados, em parte porque seu balanço de energia é extremamente vulnerável (Palmer 2007). A fragilidade das cavernas, somada à sua importância, impulsionou o surgimento de diversas ações visando a proteção e também a recuperação desses ambientes.

Embora seja um tema pouco difundido no Brasil, a prática da recuperação de cavernas é comum em diversos países, com o intuito de remediar ou reparar danos causados por ações humanas, envolvendo uma variedade de tarefas, ferramentas e habilidades (Hildreth-Werker e Werker 2006).

Há décadas, ações de recuperação de cavernas nos Estados Unidos, incluindo limpeza de poeira e *lint* (compostos principalmente de fibras de origem natural e tecidos sintéticos), são amplamente divulgadas. Segundo Marech (2014), todos os anos, dezenas de espeleólogos voluntários se reúnem em locais como o Parque Nacional Mammoth Cave, em Kentucky, o Parque Nacional Carlsbad Caverns, no Novo México e as Cavernas Lehman no Parque Nacional Great Basin, de Nevada, para esse fim. Registros apontam que 364 voluntários removeram um total de 201,2 Kg de *lint* e poeira nas excursões organizadas por Pat Jablonsky nas Cavernas de Carlsbad quase todos os anos desde 1988 (MARECH 2014). Em 2014, 37 voluntários removeram *lint*, poeira e duas toneladas de lixo que os turistas deixaram na Lehman Cave, no Parque Nacional de Great Basin (GRIGGS 2014).

A limpeza de poeira em cavidades consiste em procedimento estabelecido na literatura por Horrocks e Ohms (2006). Entretanto, a depender de fatores relacionados à fragilidade, dinâmica natural e à forma de deposição dos aerossóis, a aplicação do procedimento pode não ser recomendada, carecendo, portanto, de avaliação técnica prévia *in loco*. Assim, o inventário e a documentação da cavidade, bem como o planejamento do projeto são essenciais. Os líderes da restauração avaliam o grau de impacto da caverna, estabelecem objetivos práticos, escolhem a técnica de recuperação que evitará a geração de novos danos e planejam métodos para proteger a área de perturbações futuras (HILDRETH-WERKER e WERKER 2006).

Estudos espeleológicos relativos ao processo de licenciamento ambiental do Projeto LOC-Complexo Germano (CARSTE 2019), empreendimento localizado no município de Mariana, Minas Gerais, e de responsabilidade da empresa Samarco Mineração S.A., indicaram a presença de material particulado em cavidades inseridas no entorno do projeto. Esse registro foi categorizado como uma interferência ambiental, sendo sugerido ao órgão licenciador a realização de diagnóstico detalhado sobre esse aspecto ambiental na área, a aplicação de medidas de mitigação e monitoramento. No contexto desse último, foi proposta ainda a limpeza de uma amostra de cavernas, com o objetivo de possibilitar comparações entre as condições ambientais prévias e posteriores à retirada do material particulado depositado no passado, oferecendo indicativos sobre possíveis consequências do mesmo no interior das feições, bem como sobre eventuais melhorias ou prejuízos ao meio em decorrência dessa atividade, especialmente no que se refere ao ecossistema cavernícola (fauna e substratos orgânicos).

É válido ressaltar que o conhecimento sobre a resposta e a adaptação do patrimônio espeleológico frente às alterações do ambiente e eventuais desequilíbrios é ainda restrito. Nesse sentido, atividades relacionadas ao tema são extremamente válidas, não apenas por buscar possibilitar a melhoria das condições ambientais nas cavernas, como também por agregar conhecimento científico sobre o assunto. O estudo possui um caráter precursor relevante no âmbito do licenciamento ambiental no Estado.

Sendo assim, este trabalho tem como finalidade apresentar os procedimentos e os resultados da atividade de limpeza de material particulado em quatro cavidades do Complexo Germano: LOC-0147, LOC-0149, LOC-0191, LOC-0226. A execução das técnicas de limpeza das cavernas foi proposta no Programa de Monitoramento de Material Particulado (Carste 2020a) e aprovada pela SUPRAM Central Metropolitana, através do Ofício n.º 138/2020 DREG/SUPRAMCM/SEMAD/SISEMA.

2. METODOLOGIA

Procedimentos da limpeza de cavidades

As técnicas de limpeza adotadas durante o trabalho foram pautadas nas referências presentes na literatura, sobretudo na obra organizada por Hildreth-Werker e Werker (2006). O embasamento

científico também deriva do conhecimento difundido durante o Curso Internacional de Conservação e Restauração de Cavernas, ministrado por Val Hildreth-Werker e Jim C. Werker, e promovido pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF), Instituto do Carste e Anglo American, em 2014, no Monumento Natural Gruta Rei do Mato, em Sete Lagoas, e no Monumento Natural Estadual Peter Lund, em Cordisburgo. No total, o trabalho envolveu um total de seis etapas, descritas na sequência.

Inventário e planejamento: Em uma primeira etapa, um diagnóstico prévio foi conduzido por meio de visita em seis cavernas com presença de material particulado para avaliação e seleção daquelas a serem limpas. A visita ocorreu entre os dias 15 e 16 de julho de 2020, com equipe formada por uma geógrafa, uma bióloga e um auxiliar de campo. Cada cavidade foi avaliada conforme critérios de seleção, que compreenderam:

• Configuração de ocorrência do material particulado: extensão de cobertura em função da área total da cavidade, tipos de superfícies recobertas, espessura dos depósitos, indicativos temporais de deposição;

• Fatores dificultadores para aplicação das técnicas de limpeza: teto baixo, cobertura do material em superfícies de difícil acesso;

• Aspectos de fragilidade ambiental: friabilidade da rocha, avaliação da fauna cavernícola já inventariada (presença de troglóbios ou elementos biológicos de destaque), potencialidade de geração de impactos que se sobreponham ao objetivo principal de limpeza da cavidade;

• Diversidade de contexto de inserção, considerando diferentes características geomorfológicas dos locais de ocorrência das cavernas.

Essa etapa permitiu a seleção das quatro cavidades alvo da atividade, bem como o levantamento dos cuidados necessários e das técnicas em cada caso, além do dimensionamento dos materiais.

Registro fotográfico: Para fins comparativos, as cavidades objeto de estudo foram fotografadas antes e após a atividade de limpeza. Para a repetição precisa das fotografias, utilizou-se marcos fixos duráveis, em materiais que não causem alterações ou contaminações no ambiente cavernícola. Os marcos foram fixados nos sedimentos do piso, e identificados com o código de cada estação. A compilação desses dados gera os mapas de localização das estações fixas e de registro angular (azimute, inclinação e altura do tripé em cada estação).

Aquisição de materiais: A definição dos materiais, e mesmo da quantidade necessária para a atividade de limpeza, foi realizada após a etapa de inventário e planejamento. Tais aspectos variam em função do tipo de superfície a ser limpa, bem como das características da própria cavidade. Os materiais adquiridos para essa atividade são listados na Tabela 1. Eles foram divididos em três kits individuais, para cada membro da equipe. Importante ressaltar que as quantidades variam de acordo com o número de cavernas a serem limpas, o número de integrantes da equipe e o tipo de técnica a ser aplicada.

Tabela 1. Lista de materiais para o trabalho de limpeza. Adaptado de Horrocks e Ohms (2006), Hildreth-Werker e Werker (2014).

Descrição	Quantidade
Água destilada	5 L
Balde plástico (12 L)	3
Caixa de plástico organizadora (20 L)	1
Copo plástico biodegradável (180 ml)	10
Escova com cerdas de plástico (duras)	3
Escova com cerdas de plástico (macias)	3
Esponja absorvente (sem fiapo)	6
Fita para marcar trilhas na caverna	1
Borrifador	3
Lona plástica (2x4 m)	1
Luvas	3
Macacão reserva	3
Máscara face shield	3
Mapas topográficos impressos	4
Máquina fotográfica	2
Máscara N95	90
Óculos de proteção	3
Pano multiuso absorvente	4
Pá	3
Pinça	1
Pincel com cerdas de poliéster (1/2")	3
Pincel com cerdas de poliéster (1")	3
Pincel com cerdas de poliéster (3")	3
Refletor LED portátil recarregável	2
Saco plástico (50 L)	10
Saco plástico zip lock (23x18)	45

Limpeza das cavernas: O trabalho de campo nas quatro cavidades ocorreu de 10 a 20 de agosto de 2020, e foi conduzido por uma geógrafa, por uma bióloga e por um auxiliar de campo.

Antes da aplicação das técnicas, foi realizada a setorização da cavidade no mapa topográfico, individualizando aqueles locais com características distintas, que exigiriam cuidados específicos. A divisão dos membros da equipe nos diferentes setores foi realizada neste momento. Os sedimentos coletados foram individualizados em

sacos plásticos *zip lock*, nomeados conforme a cavidade, setor e técnico responsável.

O reconhecimento do material particulado por parte da equipe é pressuposto para aplicação das técnicas. Nem sempre se trata de uma atividade fácil, já que os depósitos mais antigos aparecem como uma massa acinzentada composta de fiapos e poeira finamente moídos (Horrocks e Ohms 2006).

Os cuidados preliminares adotados foram:

• Os integrantes da equipe deveriam estar limpos, assim como os materiais levados para o interior da cavidade. Foi realizada a troca diária dos macacões. Os materiais foram limpos sempre que ocorreu a troca de caverna.

• Para as cavernas maiores, foram estabelecidas trilhas de deslocamento da equipe, de modo a evitar pisoteio generalizado.

• A limpeza foi precedida pela busca de fauna junto à superfície alvo, de modo a afugentá-la. Esta atividade foi realizada pela bioespeleóloga da equipe.

• A equipe foi composta por uma supervisora especialista, que gerenciou a atividade.

• Foi realizada a avaliação prévia da direção dos ventos antes de decidir como se daria a setorização da limpeza. Quando não há dispersão pelos ventos na direção oposta, é recomendável que a atividade ocorra sempre das partes mais altas em direção às mais baixas nos setores definidos.

• Para maior eficiência do procedimento, as técnicas foram aplicadas durante a estação seca, em dias não chuvosos.

A técnica de limpeza da poeira nas cavernas acompanhou o proposto por Horrocks e Ohms (2006), e consistiu na varredura suave das partículas, por meio de pincéis ou escovas, para sacos, copos de plástico ou pequenas pás (Figura 1). O uso dos sacos foi mais apropriado, já que esses se moldam à superfície da caverna e permitem a escovação direta para os mesmos, sem espalhar o material. A varredura foi confinada a pequenas áreas, e cuidados foram tomados para evitar que o pó ficasse em suspensão na caverna. Para superfícies delicadas, como depósitos químicos, por exemplo, panos sem fiapo ou espumas foram aplicados.

As cerdas de poliéster não quebram frequentemente como os demais tipos de cerdas, por isso são mais indicadas na literatura para pincéis ou escovas. Antes do uso, foram verificadas se as cerdas desses materiais estavam bem fixas. Quando um pincel começava a perder cerdas, o mesmo era descartado.

Teoricamente, o uso da água é indicado apenas no estágio final da limpeza, depois que a poeira for coletada. Horrocks e Ohms (2006) ressaltam que o uso da água deve ser evitado se existir sedimento natural inconsolidado abaixo do material a ser limpo. Quando a água foi utilizada no processo, aplicou-se cuidadosamente com borrifadores, e a captura de todo o escoamento foi realizada por meio de panos limpos. Foi aplicada água destilada, conforme recomendações da literatura. O trabalho foi também fotografado para registro da atividade.

Figura 1: Registro da atividade de limpeza nas cavidades.

Atividades de laboratório: Após o campo, o material particulado (MP) coletado foi peneirado em laboratório da Carste Ciência Ambiental, com o objetivo de triar eventuais materiais orgânicos ou sedimentos de maior granulometria reunidos na amostra. Uma pinça também foi utilizada nessa etapa. A manipulação das amostras foi realizada com uso de luvas de vinil.

Após a triagem, duas amostras de aproximadamente 100 g de cada caverna foram individualizadas, após serem pesadas em balança semi-analítica, modelo BK400, marca GEHAKA calibrada, para análises químicas e granulométricas. Essas amostras foram enviadas, respectivamente, aos laboratórios SGS Geosol Laboratórios LTDA e LCT - Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Foi aplicado o método de fluorescência de raio-x para as análises químicas e de difração de raio-x para separação granulométrica.

Os demais sedimentos foram pesados em balança digital marca AD&AD após a triagem. Os dados de peso foram registrados por cavidade e por setor em planilha Excel.

Também em laboratório, o material coletado foi classificado no sistema de cores Munsell, conforme catálogo *Munsell Soil Color Book*.

Acompanhamento do ecossistema cavernícola

Para fins de comparação, dados pretéritos relativos a duas campanhas de inventário bioespeleológico foram utilizados para avaliar o cenário ambiental das cavidades antes da aplicação do método, caracterizando a etapa de "pré-limpeza". A avaliação do cenário "pós-limpeza" foi realizada a partir dos resultados obtidos em duas campanhas realizadas no âmbito da execução do Programa de Monitoramento Bioespeleológico do Complexo Germano (Carste 2020b). Cabe ressaltar que a metodologia de coleta de fauna foi mantida entre os cenários "pré-limpeza" e "pós-limpeza" envolvendo a busca ativa com a procura por espécimes na maior diversidade possível de ambientes em cada caverna, tais como sedimentos, substratos rochosos, substratos orgânicos, paredes e teto. Deste modo, as etapas de acompanhamento biológicos acompanharam a seguinte cronologia:

Pré-limpeza: jun/jul 2019 (estação seca)
nov 2019 (estação úmida)

- Limpeza: agosto 2020
- Pós-limpeza: ago/set 2020 (estação seca)
  fev 2021 (estação úmida)

Dados entre cavidades que não passaram pelo procedimento de limpeza foram utilizados para fins de comparação, sendo as informações obtidas também a partir da consulta de resultados de campanhas anteriores de inventário e de campanhas de monitoramento bioespeleológico.

Para verificar a existência de diferenças significativas na riqueza e na diversidade de *Shannon* entre as cavidades alvo de limpeza e as demais da amostra e entre as campanhas de pré-limpeza e monitoramento bioespeleológico (pós-limpeza), foram ajustados modelos de equações de estimativas generalizadas, que são adequados a dados com realização de medidas repetidas ao longo do tempo, sendo bastante flexíveis quanto à distribuição de probabilidade da variável resposta (Guimarães e Hirakata 2012). Foi utilizada uma estrutura de autocorrelação temporal de simetria composta. Todas as análises estatísticas do estudo foram realizadas no software R, versão 4.0 (R Core Team 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cavidades alvo da limpeza se desenvolvem em quartzito, apresentam pequenas dimensões (entre 10,4 m a 20 m de projeção horizontal) e configuração em tálus. Tais características favorecem a ocorrência de espaços não acessíveis, o que impossibilitou a limpeza integral do meio cavernícola acometido pela poeira. A presença de sedimentos inconsolidados de origem autóctone associados ao material particulado também inviabilizou o trabalho em algumas porções, cumprindo-se a premissa de não promover impactos negativos ao meio.

Conforme indica o Quadro 1, três das quatro cavidades apresentavam presença generalizada de material particulado, com maior concentração na cavidade LOC-0149. Devido ao acúmulo sedimentar natural no piso, e à dificuldade de triagem desse material, essa parcela das feições não foi objeto da limpeza.

Quadro 1. Síntese das informações prévias à limpeza.

Caverna	Ocorrência de MP	Fatores dificultadores
LOC-0147	Localizada; Camada de deposição < 1 mm	Poeira recobrindo material proveniente dos solos locais (mais consolidado); localizada em partes altimetricamente elevadas
LOC-0149	Generalizada; Camada de deposição > 1 cm	Poeira em reentrâncias inacessíveis; presença de particulado em partes elevadas da cavidade, de difícil acesso
LOC-0191	Generalizada; Camada de deposição > 1 mm	Partes mediais e distais com acesso por quebra-corpo, apresentando teto baixo; poeira sobre musgos
LOC-0226	Generalizada; Camada de deposição < 1 mm	Áreas de difícil acesso e permanência (quebra-corpo e estreitamentos); poeira associada a musgos e raízes em algumas partes

Em suma, 13,1 kg de poeira foram coletados, 12,4 kg dentro das cavernas (Tabela 2). Sessenta e seis por cento desse total foi coletado na cavidade LOC-0149 (8,6 kg), onde estima-se que a

limpeza abarcou 80% das áreas afetadas. Na cavidade LOC-0147, por outro lado, foi coletada a menor quantidade de MP (0,1 g), que corresponde a 1% do total. Devido aos aspectos de fragilidade dessa cavidade, estima-se que apenas 10% da área acometida por poeira foi limpa. A Figura 2 exemplifica o resultado da limpeza em parte da cavidade LOC-0191.

Tabela 2. Dados do material particulado (MP) coletado.

Caverna	Estimativa de área limpa (%)	MP coletado (Kg)	Percentual de MP coletado (%)
LOC-0147	10	0,1	1
LOC-0149	80	8,6	66
LOC-0191	70	3,4 (2,6 dentro)	26
LOC-0226	40	0,9	7

Figura 2: Antes (A) e depois (B) da limpeza da parede sul do setor S1, cavidade LOC-0191, com patamares e depósitos químicos. A limpeza ocorreu com extrema cautela, devido à friabilidade da rocha.

A análise química do material coletado indicou composição predominante de sílica, com teores variando entre 44,8% a 51%, seguidos de óxido de ferro (25,7% a 44,6%) e, em menores quantidades, de óxidos de alumínio (1,83% a 7,47%). O predomínio de óxido de silício nas amostras justifica-se pelo arcabouço geológico local. As quatro feições estão alojadas em quartzitos vinculados ao Grupo Itacolomi. Embora a proporção entre os óxidos se mantenha similar em todas as amostras, algumas diferenças são interessantes. A amostra analisada da cavidade LOC-0149, por exemplo, apresentou quase duas vezes mais óxido de ferro do que a cavidade LOC-0226. As amostras das cavidades LOC-0191 e LOC-0147 também apresentaram percentual de Fe_20_3 superior (Tabela 3).

Como resultado do ensaio granulométrico, para as análises das cavernas LOC-0147, LOC-0149 e LOC-0191 observou-se a predominância da distribuição do tamanho dos grãos em uma faixa espectral compreendida entre 10 a 100 micrômetros, com concentração de 52% a 60% do volume da amostra. Para a caverna LOC-0226, nota-se que a curva de distribuição granulométrica compreende maiores tamanhos de partículas, no intervalo de 10 a 1000 micrômetros, com prevalecimento de partículas de tamanho 100 µm.

A classificação das cores das amostras varia de matiz vermelho ao amarelo (2.5 YR a 5YR), associados aos óxidos de ferro, que exercem uma influência pigmentante na cor do material coletado. A pigmentação avermelhada é um dos fatores que favorece o reconhecimento da poeira nas superfícies das cavernas quartzíticas de estudo. A cor bruno-avermelhado ocorre nas cavernas com maior influência de sedimentos coluvionares e autóctones: LOC-0147 e LOC-0226.

Tabela 3. Valor percentual dos elementos maiores nas amostras coletadas nas cavernas (LOI = perda ao fogo).

Amostra	SiO_2	Al_2O_3	BaO	Fe_2O_3	CaO	Cr_2O_3	MgO	TiO_2	P_2O_5	Na_2O	K_2O	MnO	V_2O_5	LOI
LOC-0149	44,8	4,13	0,02	44,6	0,33	<0,01	0,11	0,22	0,09	0,22	0,55	0,07	0,01	4,33
LOC-0226	52,9	7,47	0,01	25,7	0,2	0,01	0,2	0,38	0,29	<0,1	0,47	0,08	0,02	11,24
LOC-0191	54,9	1,83	<0,01	38	0,14	<0,01	<0,1	0,12	0,09	<0,1	0,26	0,04	0,01	4,59
LOC-0147	51	8,7	0,04	32,8	0,23	0,01	0,14	0,46	0,11	0,37	1,44	0,05	0,02	5,36

Quanto à avaliação dos parâmetros biológicos, as comparações entre as etapas pré-limpeza e pós-limpeza buscaram investigar se as cavidades que passaram pelo procedimento apresentam características distintas entre esses dois cenários e em comparação com as demais cavidades onde a limpeza não foi aplicada.

Em relação aos substratos orgânicos, as análises comparativas remeteram-se exclusivamente à perspectiva de cavidades limpas e não limpas através das duas campanhas de monitoramento, não contemplando a avaliação entre os dois contextos de pré-limpeza e pós-limpeza (Figura 3).

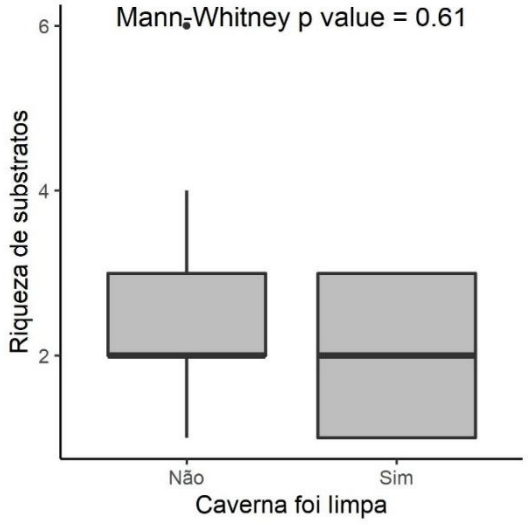

Figura 3: *Boxplot* de modelos lineares generalizados para riqueza de substratos orgânicos (preditor) e cavidades limpas e não limpas (resposta).

Esperava-se que a redução do acúmulo depositado de aerossóis de origem não natural nas cavernas poderia indicar uma maior qualidade ambiental e favorecer a atratividade de fauna trogloxena e acidental acarretando em maior aporte de recursos energéticos de origem animal aos ambientes subterrâneos. Contudo, decorridos seis meses após a realização do procedimento de limpeza, não foram observadas diferenças significativas na riqueza de substratos orgânicos, ao se comparar cavidades limpas e não-limpas, indicando não haver, até o momento, elementos que evidenciem tal suposição.

A detecção pontual de novos aportes de substratos orgânicos, principalmente nas cavidades que passaram pelo procedimento de limpeza, compõe indicativos de que a dinâmica natural desses ambientes pode estar sendo mantida, contribuindo para o entendimento, ao longo da continuidade do monitoramento, dos reais efeitos da presença de material particulado sobre o ecossistema cavernícola.

Já a respeito da fauna subterrânea, a comparação das informações pré-existentes com os resultados encontrados nas campanhas de monitoramento demonstrou que não foram observadas diferenças nas médias de riqueza de espécies e na diversidade de *Shannon* das cavernas entre os dois contextos de análise (pré e pós-limpeza) e nem entre as cavidades que passaram ou não pelo procedimento. Sendo assim, até o momento, ainda não foram encontrados fundamentos que possibilitem atestar se a atividade de limpeza trouxe benefícios ou interferências negativas às comunidades subterrâneas (Figura 4).

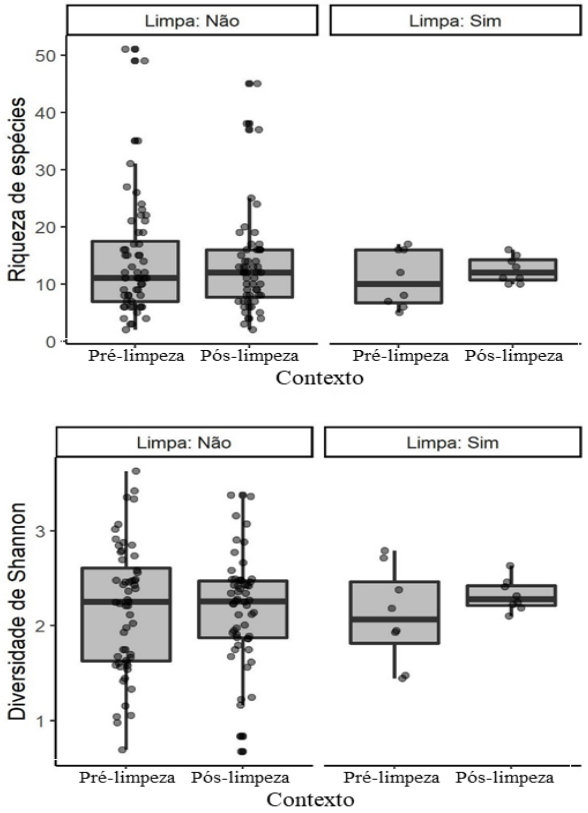

Figura 4: Variação espacial (entre cavidades limpas e não limpas) e temporal (entre contextos) da riqueza de espécies e diversidade de *Shannon*.

4. CONCLUSÕES

Durante 10 dias de trabalhos, diversos foram os desafios da atividade, que tem um caráter precursor, considerando o contexto de regularização ambiental no Estado de Minas Gerais.

Destaca-se que as ações de limpeza aplicadas através da retirada de material particulado fundamentaram-se essencialmente na possibilidade de promover a melhoria ambiental, inferindo se a presença de sedimentos acarreta em distúrbios das condições prístinas desses ambientes.

De uma forma geral, avaliou-se que a aplicação do método foi oportuna por: i) sinalizar a viabilidade das técnicas em cavidades no âmbito do licenciamento, sugerindo que a classificação de impactos relacionados à presença de material particulado pode, em alguns casos, ser avaliada como reversível; ii) organizar procedimentos que poderão ser replicados em outros estudos e empreendimentos e; iii) direcionar a necessidade de monitoramento espeleológico como uma etapa fundamental das ações de remoção da poeira. De fato, a continuidade do monitoramento espeleológico nas quatro cavidades alvo de limpeza será fundamental para certificar as conclusões preliminares desse estudo.

A limpeza de material particulado das cavidades, mesmo que parcialmente, contribuiu para gerar outras informações relevantes, tendo em vista o entendimento da dinâmica sedimentar, tais como:

• As diferenças na composição química e na granulometria do material coletado nas cavidades pode sinalizar diferentes origens ou processos associados, o que reafirma a complexidade da dinâmica dos aerossóis em cavernas;

• A remoção do material particulado sinalizou configurações distintas em termos de consolidação desses sedimentos. Aliados a outros fatores, como o recobrimento do MP por sedimentos autóctones mais recentes, esse aspecto oferece indicativos temporais sobre a deposição;

• Em cavernas com dinâmica mais ativas, do ponto de vista hidrossedimentar, o MP tende a não se acumular de forma marcante.

Considerando o período que compreende as etapas de pré-limpeza e pós-limpeza, não foram observadas diferenças nas variáveis biológicas entre cavidades que passaram pela ação de remoção de material particulado e aquelas que não passaram. Sendo assim, até o momento, não há evidências de que a aplicação do método tenha provocado algum efeito (negativo ou positivo) nos ecossistemas cavernícolas contemplados pelo trabalho.

Embora se tenha ciência que efeitos sobre a fauna subterrânea possam se manifestar após vários períodos de amostragem, é importante salientar que os padrões de limpeza foram distintos entre as quatro cavidades. Para as cavernas LOC-0147 e LOC-0226, estimou-se, respectivamente, que 10% e 40% das áreas totais foram limpas; enquanto para a LOC-0149 e LOC-0191, 80% e 70% de suas extensões puderam ser abarcadas. Dessa forma, é plausível esperar que tais ambientes possam responder, ao longo do tempo, de maneira distinta entre si, às ações aplicadas.

Devido ao pouco conhecimento acerca da influência do material particulado sobre a fauna cavernícola, cabe ressaltar que o incremento de informações a serem obtidas com a continuidade do monitoramento ao longo do tempo neste trabalho poderá favorecer a compreensão de aspectos importantes da análise de impacto ambiental ao patrimônio espeleológico.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Genilson Rodrigues pelo auxílio nas atividades de campo, à Ana Clara Mariante e Ayslah Viana pelo apoio em laboratório, e ao Diego Pujoni pela colaboração técnica nas análises estatísticas do estudo.

REFERÊNCIAS

CARSTE CIÊNCIA AMBIENTAL. **Estudos espeleológicos: LOC Complexo Germano. Demais áreas operacionais e linha de transmissão.** Relatório técnico. Belo Horizonte. 232 p. 2019.

CARSTE CIÊNCIA AMBIENTAL. **Programa de Monitoramento de Material Particulado do Projeto LOC-Complexo Germano.** Relatório técnico. Belo Horizonte. 40 p. 2020a.

CARSTE CIÊNCIA AMBIENTAL. **Programa de Monitoramento de Material Bioespeleológico LOC-Complexo Germano.** Relatório técnico. Belo Horizonte. 38 p. 2020b.

GUIMARÃES, L.S.P.; HIRAKATA, V.N. **Uso do Modelo de Equações de Estimativas Generalizadas na análise de dados longitudinais**. Revista HCPA. Porto Alegre. Vol. 32, n. 4, p. 503-511, 2012.

GRIGGS, M.B. Even Caves Need a Spring Cleaning. **Smart News**. 2014. Disponível em: smithsonianmag.com. Acesso em: janeiro de 2021.

HILDRETH-WERKER, V.; WERKER, J.C. Overview of Cave Restoration in Hildreth-Werker, V., and Werker, J.C., eds., **Cave Conservation and Restoration**, Huntsville, Ala., National Speleological Society,p. 293-302, 2006.

HORROCKS, R.D.; OHMS, M. Cave Lint and Dust Removal Projects in Hildreth-Werker, V., and Werker, J.C., eds., **Cave Conservation and Restoration**, Huntsville, Ala., National Speleological Society,p. 351–362, 2006.

MARECH, R. Fighting Fluff. **National Parks Magazine**. 2014. Disponível em: https://www.npca.org/articles/950-fighting-fluff. Acesso em: janeiro de 2021.

PALMER, A.N. **Cave Geology**. Cave Books, Dayton, OH, 454 p. 2007.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019 URL https://www.R-project.org/ Acesso em: julho de 2021.