

# TÓPICOS EM ESPELEOLOGIA



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Tópicos em espeleologia

1ª ed.

Piracanjuba-GO  
Editora Conhecimento Livre  
Piracanjuba-GO

1ª ed.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Barbosa, Frederico Celestino  
B238T Tópicos em espeleologia

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2023

53 f.: il

**DOI:** 10.37423/2023.edcl822

**ISBN:** 978-65-5367-420-2

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. cavidades-naturais 2. cavernas 3. espeleólogo I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 570

<https://doi.org/10.37423/2023.edcl822>

**O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.**

# EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

## Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

MSc Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Wesley Pacheco Calixto

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

MSc Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

MSc Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

## SUMÁRIO

|                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 .....</b>                                                                                       | <b>5</b>  |
| TOLERÂNCIA A METAIS DE MICRORGANISMOS ISOLADOS DE SOLO DE CAVERNA FERRÍFERA NO PARÁ                           |           |
| Brenda Almeida Lima                                                                                           |           |
| Jéssica Rosset                                                                                                |           |
| Rafael dos Santos Scherer                                                                                     |           |
| José Augusto Pires BITENCOURT                                                                                 |           |
| Mayara Maria de SOUZA                                                                                         |           |
| Fabiana Gisele da Silva PINTO                                                                                 |           |
| <b>DOI 10.37423/231008309</b>                                                                                 |           |
| <b>CAPÍTULO 2 .....</b>                                                                                       | <b>19</b> |
| DISTRIBUIÇÃO DE CAVERNAS NO BIOMA CERRADO                                                                     |           |
| Ana Karolyna Nunes Amaral                                                                                     |           |
| Luis Felipe Soares CHEREM                                                                                     |           |
| Renata Santos Momoli                                                                                          |           |
| <b>DOI 10.37423/231008339</b>                                                                                 |           |
| <b>CAPÍTULO 3 .....</b>                                                                                       | <b>36</b> |
| ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO DE CAVIDADES FERRÍFERAS. MINAS DE N4 E N5, CARAJÁS, BRASIL. |           |
| Adimir Fernando Rezende                                                                                       |           |
| Rafael Guimarães de Paula                                                                                     |           |
| Marcelo Roberto Barbosa                                                                                       |           |
| Leandro Alves Caldeira Luzzi                                                                                  |           |
| Iuri Viana Brandi                                                                                             |           |
| <b>DOI 10.37423/231008365</b>                                                                                 |           |

# Capítulo 1



10.37423/231008309

## TOLERÂNCIA A METAIS DE MICRORGANISMOS ISOLADOS DE SOLO DE CAVERNA FERRÍFERA NO PARÁ

*Brenda Almeida Lima*

*Universidade Estadual do Oeste do Paraná*

*Jéssica Rosset*

*Universidade Estadual do Oeste do Paraná*

*Rafael dos Santos Scherer*

*Grupo de Espeleologia de Marabá*

*José Augusto Pires BITENCOURT*

*Instituto Tecnológico Vale*

*Mayara Maria de SOUZA*

*Universidade Estadual do Oeste do Paraná*

*Fabiana Gisele da Silva PINTO*

*Universidade Estadual do Oeste do Paraná*



**Resumo:** As comunidades microbianas possuem uma adaptação específica às condições de baixo teor de nutrientes e alto teor de ferro, explorando diversas vias metabólicas, incluindo capacidades como biomineralização e intemperismo de rochas para garantir a sobrevivência no ecossistema de cavernas. Enquanto alguns metais, como cobre (Cu) e ferro (Fe), são essenciais para o metabolismo microbiano, níveis elevados podem ser tóxicos. Por outro lado, o chumbo (Pb), embora não seja essencial, é tóxico mesmo em níveis de traço. Recentemente, tecnologias têm sido desenvolvidas com o propósito de mitigar ou recuperar a contaminação ambiental por metais tóxicos, destacando-se a biorremediação microbiana. Este estudo teve como objetivo isolar, identificar e caracterizar bactérias que são tolerantes aos metais Fe, Cu e Pb em amostras de solo da caverna GEM-1467. Foram obtidos 15 isolados bacterianos, os quais foram submetidos ao método de microdiluição para determinar a concentração inibitória mínima (CIM) de Fe, Cu e Pb. Os resultados revelaram a notável tolerância das bactérias isoladas a concentrações elevadas desses metais, indicando seu potencial uso como ferramenta biotecnológica na remediação de áreas contaminadas.

**Palavras-Chave:** Cave; Solo; Microrganismos; Tolerância; Metais.

## 1. INTRODUÇÃO

As cavernas são ecossistemas considerados oligotróficos e apresenta características específicas que determinam a microbiota local (GHOSH; KUISIENE; CHEEPHAM, 2017), sendo as comunidades microbianas as menos exploradas (BARTON; JURADO, 2007). Vários microrganismos já foram isolados de diferentes cavernas em todo o mundo, principalmente, bactérias (Gram positivas e Gram negativas) (GULECAL-PEKTAS, 2016; YASIR, 2018), e fungos (BELYAGOUBI et al., 2018) que podem apresentar diversas funções metabólicas (ZADA et al., 2021), como produção de antimicrobianos (RANGSEEKAEW; PATHOM-AREE, 2019), enzimas hidrolíticas (HAMED; KAFSHNOUCHI; RANJBARAN, 2019) e mecanismo de resistência à metais (PAWLOWSKI et al., 2018), sendo assim fontes promissoras para abordagens de isolamento e triagem em biotecnologia microbiana (HAMED; KAFSHNOUCHI; RANJBARAN, 2019).

O ambiente cavernícola abriga uma grande variedade de microrganismos que utilizam minerais que figuram de forma proeminente na formação de depósitos minerais secundários e microestruturas mineralizadas incomuns reconhecidas como bioassinaturas (RIQUELME et al., 2015), onde a redução microbiana de Fe (III) contribui para a formação potencial de cavernas em Formação Ferrífera Bandada (FFB), minério de ferro e canga (PARKER et al., 2018), evidenciando assim que as comunidades microbianas se adaptam especificamente as condições de baixo teor de nutrientes (MA et al., 2021) e de alto teor de ferro.

Em vista disso, os microrganismos cavernícolas exploram diferentes vias metabólicas, incluindo a capacidade de biomineralização e intemperismo das rochas, para sobreviver no ecossistema cavernícola (SANCHEZ-MORAL et al., 2012), estimulando a competição entre as linhagens microbianas e fazendo com que estes desenvolvam estratégias de sobrevivência, adaptando-se à presença de substâncias tóxicas, como os metais, alterando a sensibilidade dos componentes celulares essenciais, proporcionando um grau de proteção natural (BRUINS, et.al, 2000).

Alguns metais são essenciais para o metabolismo microbiano, como o cobre (Cu) e ferro (Fe), mas em níveis elevados podem se tornar tóxicos. Diferentemente o chumbo (Pb) que não é essencial, mas tóxico mesmo em níveis de traço (BRAVO et al., 2018), sendo que sua presença em altas concentrações no meio ambiente, não apenas desencadeia processos de co-seleção, mas também aumenta o nível de tolerância aos antibióticos, devido à co-regulação de genes de resistência (NATH et al., 2019).

Novas tecnologias têm sido desenvolvidas com o objetivo de reduzir ou recuperar a contaminação ambiental por metais tóxicos, como por exemplo a biorremediação microbiana. Este processo inclui a degradação do poluente por reações bioquímicas (HALTTUNEN, et al., 2006), alterando o estado de oxidação do metal, permitindo a sua desintoxicação. Independente das reações que ocorram, provavelmente, o metal ainda pode permanecer no local, já que as bactérias possuem capacidade para concentrar ou remover metais, seja em forma de precipitados ou de substâncias voláteis, transformando os elementos químicos em compostos menos tóxicos e mais facilmente disponíveis (SINGH; CAMEOTRA, 2004). Já nas leveduras têm-se a inibição da atividade metabólica (VAN DER HEGGEN et al. 2010), impedindo a assimilação do íon amônio e inibindo a síntese proteica (CHEN; WANG, 2007).

O conhecimento acerca desses microrganismos e sobre seus mecanismos de resistência, despertam grande interesse na comunidade científica devido à possibilidade de seu uso na descontaminação por resíduos orgânicos e inorgânicos, presentes no meio ambiente. Para esse fim, são utilizadas metodologias que buscam o isolamento e seleção dessas bactérias, a fim de descobrir novas espécies que possam apresentar potencial biotecnológico para biorremediação de ambientes contaminados. Deste modo, o objetivo do presente trabalho foi isolar e caracterizar microrganismos tolerantes aos metais Fe, Cu e Pb de solo de caverna ferrífera no Pará.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 COLETA DAS AMOSTRAS

O local de estudo é uma caverna na Serra da Bocaina, localizada no Parque Nacional dos Campos Ferruginosos, no município de Canaã dos Carajás, Pará. Com base em dados secundários do Relatório de Diagnóstico e Análise de Relevância de 235 cavernas da Serra da Bocaina, Canaã dos Carajás (PA) (Piló et al., 2014), selecionou-se a caverna GEM-1467 (SB-0051) considerando as características de relevância, litotologia, morfologia, hidrologia, presença ou ausência de matéria orgânica e presença de solo.

A coleta ocorreu sob a licença do Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade (SISBIO) nº 79255-1. As amostras foram coletadas na estação seca, na camada superficial da caverna, nos primeiros 10 cm. A caverna foi classificada em zonas, de acordo com Trajano e Bichuette (2006), coletando-se de 100 a 500 g de solo de três pontos em cada zona, ou seja, três na zona afótica (ausência de luz), três na disfótica (penumbra) e três na entrada, totalizando 9 pontos de amostragem.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos estéreis (ziplock), com o auxílio da pá de jardinagem estéril, sendo limpa a cada coleta com álcool 70%, identificadas com o nome/número da caverna, número da amostra, data da coleta e nome do coletor responsável, e armazenadas em caixa térmica a 4°C para posterior análise.

## 2.2 ISOLAMENTO E PRESERVAÇÃO DE MICRORGANISMOS

No laboratório de Microbiologia e Biotecnologia (LAMIBI) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), as amostras de solo foram peneiradas, homogeneizadas e retiradas subamostras (10 g) e enriquecidas em frascos de vidro de 500 mL contendo 90 mL de meio salino mineral (MSM), com 0,81g de NaCl em 90 mL de água destilada. As amostras foram incubadas em agitador orbital (150 rpm) a 28°C, por 24 horas. Após esse período, foi realizada diluições em série, sendo retiradas alíquotas de 100 µL das diluições de 10<sup>-2</sup> a 10<sup>-3</sup> e semeadas na superfície do meio Luria Bertani (LB), com o auxílio da alça de Drigalski. As placas foram incubadas (28°C) no período de 24 a 72 h. As linhagens microbianas isoladas foram conservadas em meio Ágar Estoque e a -80 °C.

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS LINHAGENS MICROBIANAS

As linhagens microbianas foram caracterizadas fenotipicamente, baseadas em suas características morfológicas e tintoriais, usando o método de Gram.

## 2.4 ENSAIO DE TOLERÂNCIA A METAIS POR CONCENTRAÇÃO INIBITÓRIA MÍNIMA (CIM)

O teste de tolerância aos metais pesados foi realizado a partir da determinação da concentração inibitória mínima (CIM). A CIM foi realizada em placa de 96 poços para cultivo de células de acordo com Wiegand et al. (2008) com modificações. Os isolados foram inoculados em 90 µL de caldo Triptona de Soja (TSB), e posteriormente aplicado 100 µL da solução mãe contendo 2.000 mg/L dos seguintes sais metálicos: nitrato de ferro [Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>], nitrato de cobre [Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] e nitrato de chumbo [Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>], usando a técnica de diluição seriada, nas concentrações de 1.9 a 1000 mg/L. O inóculo de 10 µL da suspensão bacteriana foi aplicado em cada poço, ajustado a partir da escala 0,5 de Mc Farland (1 x 10<sup>8</sup> UFC/mL). O controle negativo foi realizado somente com TSB, TSB e solução de metal e apenas solução de metal. Para o controle positivo foi utilizado TSB e suspensão bacteriana. As placas foram incubadas a 30°C por 24h. Após o período de incubação, foi aplicado nos poços 10 µL da solução reveladora incolor de cloreto de 2,3,5-trifeniltetrazólio (TTC) e incubado na estufa por mais 2 horas. A leitura do teste de CIM foi realizada através da mudança de coloração da solução reveladora, considerando o

resultado positivo a presença de coloração rosa ou avermelhada e negativo a ausência de coloração (MOHR et al., 2017).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 ISOLAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS LINHAGENS MICROBIANAS

Foram isoladas 15 linhagens microbianas, sendo 11 bactérias e 4 leveduras. Das 11 linhagens bacterianas, 9 apresentaram a forma de bacilo e 2 de cocos, sendo 7 linhagens Gram-Positivas, 4 Gram-negativas (Tabela 1). A zona de entrada apresentou maior número de linhagens isoladas (6), seguida da zona de penumbra (5) e zona afótica (4). As leveduras que foram isoladas encontravam-se somente na zona de penumbra (2) e afótica (2).

#### 3.2 AVALIAÇÃO DE TOLERÂNCIA A METAIS

Todas as 15 linhagens isoladas demonstraram capacidades de crescimento e tolerância em diferentes concentrações de metais. O cobre (Cu) foi tóxico para GSF302 e GSA201 a 31,25 ppm, resultando na inibição dessas linhagens, mas para as outras 13 linhagens a CIM variou de 62,5 a 250 ppm (Tabela 2).

A tolerância máxima observada foi a chumbo (Pb) em GSF101, GSF202, GSF301, GSP101, GSA101 e GSA201, nas concentrações de 500 e 1000 ppm, destacando-se a maior resistência nos isolados da zona de penumbra.

Nas concentrações mais baixas para cada metal, todos os isolados foram resistentes o que sinaliza que os microrganismos cavernícolas crescem em concentrações superiores aos valores máximos de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430.

Destaca-se no presente trabalho que não houve CIM para o Fe, demonstrando assim, que todos os isolados foram tolerantes as concentrações inferiores a 2000 ppm de Fe.

**Tabela 1:** Caracterização morfológica tintorial e fenotípica de 15 isolados de solo da caverna GEM-1467

| Isolados | Forma  | Coloração de GRAM |
|----------|--------|-------------------|
| GSF101   | Bacilo | Positivo          |
| GSF102   | Bacilo | Positivo          |
| GSF201   | Bacilo | Negativo          |
| GSF202   | Bacilo | Positivo          |
| GSF301   | Bacilo | Positivo          |
| GSF302   | Bacilo | Positivo          |

|        |               |          |
|--------|---------------|----------|
| GSP101 | Bacilo        | Positivo |
| GSP102 | Leveduriforme | --       |
| GSP201 | Leveduriforme | --       |
| GSP301 | Cocos         | Negativo |
| GSP302 | Cocos         | Negativo |
| GSA101 | Bacilo        | Positivo |
| GSA201 | Bacilo        | Negativo |
| GSA301 | Leveduriforme | --       |
| GSA302 | Leveduriforme | --       |

**Tabela 2:** Valores de Concentração Inibitória Mínima (CIM) dos metais chumbo (Pb), cobre (Cu) e ferro (Fe) dos isolados de solo da caverna GEM-1467

| Isolados | Metais (ppm) |       |    |
|----------|--------------|-------|----|
|          | Pb           | Cu    | Fe |
| GSF101   | 1000         | 62,5  | -- |
| GSF102   | --           | 125   | -- |
| GSF201   | --           | 250   | -- |
| GSF202   | 1000         | 125   | -- |
| GSF301   | 500          | 62,5  | -- |
| GSF302   | --           | 31,25 | -- |
| GSP101   | 1000         | 62,5  | -- |
| GSP102   | --           | 250   | -- |
| GSP201   | --           | 250   | -- |
| GSP301   | --           | 125   | -- |
| GSP302   | --           | 125   | -- |
| GSA101   | 1000         | 125   | -- |
| GSA201   | 1000         | 31,25 | -- |
| GSA301   | --           | 250   | -- |
| GSA302   | --           | 250   | -- |

--: não determinada a CIM >2000 ppm

#### 4. DISCUSSÃO

O ensaio de tolerância a metais demonstrou que todas as 15 linhagens microbianas isoladas não apresentaram CIM para o nitrato de Fe, e este é um metal de origem natural, que se apresenta como material de processos geológicos ou afloramentos rochosos. A composição e concentração desse metal está relacionada a litologia (SOUZA et al., 2018) em FFB da caverna analisada.

As Bactérias Redutoras de Nitrato (BRN), são microrganismos anaeróbios facultativos (GARBOSSA, 2003), sendo assim a atividade das BRN é estimulada pela presença do nitrato, pois o metabolismo é energeticamente mais favorável do que a redução do sulfato (MAXWELL et al., 2003). Segundo Piló e Auler (2011), foram identificados espeleotemas nas cavernas S11D-83 e N4WS-67, espeleotemas de

óxidos-hidróxidos, fosfatos e sulfatos de Al e/ou Fe, podendo assim inferir que a tolerância em todas as concentrações ao nitrato de Fe por todos os isolados estimula o crescimento desses microrganismos, e podem competir mais intensamente por fonte de carbono e nutrientes, pois BRN são capazes de oxidar sulfetos resultando na remoção do sulfeto já formado do ambiente e em aumento do potencial redox, inibindo o crescimento das Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) (SOUSA; CAMMAROTA; SÉRVULO, 2010). Cabe destacar a existência de espécies de BRS capazes de também utilizar o nitrato como receptor final de elétrons, tendo como consequência a não formação do sulfeto biogênico (BODTKER et al., 2009).

O nitrato é a forma mais completamente oxidada de nitrogênio, e formado durante os estágios finais de decomposição biológica (GARBOSSA, 2003), porém em concentrações tóxicas de metal podem afetar as atividades microbianas incluindo produtividade primária, metanogênese, fixação de nitrogênio, respiração, motilidade, ciclagem biogeoquímica de carbono, nitrogênio, fósforo e outros elementos, decomposição da matéria orgânica e síntese enzimática (GADD, 2009). A tolerância ao Fe pelos isolados pode ter se dado também pelo processo de captação dos metais por bioacumulação e biossorção (MUSTAPHA; HALIMOON, 2015), visto que microrganismos de cavernas ferríferas utilizam minerais como ferro e manganês (DAVIS et al., 2020), demonstrando potencial de quimiautotrofia microbiana, onde a produção de nitrato e, portanto, potencialmente de ácido nítrico, por microrganismos oxidantes de amônia, podendo assim contribuir para a oxidação do ferro exacerbando a corrosão e alterando a dinâmica do pH em áreas cobertas por incrustações microbianas (RANALLI et al. 2009; ZANARDINI et al., 2019).

Os metais podem exercer um importante efeito como agentes seletivos para bactérias exógenas e genes de resistência a antibióticos (HU et al., 2016; DICKINSON et al., 2019) e o Cu é um agente muito conhecido e utilizado para prevenir o crescimento microbiano (GRASS et al., 2011; VINCENT et al., 2016). A inibição pelo Cu foi observada em todos os isolados microbianos variando nas diferentes concentrações (Tabela 2), e que essa resistência pode resultar de modificações nas estruturas celulares bacterianas que apresentam adaptações em altas concentrações de metais pesados (GHANI et al., 2012). As cepas bacterianas resistentes a metais pesados podem compartilhar adaptações em comum com bactérias resistentes a antimicrobianos (IANEVA, 2009),

A resistência bacteriana à metais tóxicos e a antimicrobianos apresentam indícios de co-evolução e desenvolveram vários mecanismos de resistência e desintoxicação, e a capacidade de tolerar metais tóxicos é principalmente mediada por plasmídeo (PAL et al., 2017). A toxicidade à metais pesados no

solo depende da localização geográfica, diversidade bacteriana e concentração de metais (RAJEEV et al., 2021). O presente estudo demonstra que os isolados submetidos nas concentrações pré-determinadas de Fe, Cu e Pb, pode suportar um alto nível desses metais, quando comparado com Resolução CONAMA nº 430, em que os valores máximos permitidos para o Fe é 15,0 mg/L, Cu 1,0 mg/L e de Pb 0,5 mg/L (BRASIL, 2011).

Os sedimentos de cavidades subterrâneas ferríferas são depósitos ricos em metais e oferecem oportunidades para isolar novos microrganismos resistentes a metais pesados ou descobrir novas rotas metabólicas para ciclagem de metais pesados (XU et al., 2013), como no caso do Pb em que 13 isolados não apresentaram CIM, e que estes podem estar usando do mecanismo metabólico de produção de lipopeptídios com propriedades biossurfactantes e antimicrobianas (ROCCO, 2020). As leveduras toleram metais pesados, os quais se adaptam e crescem em altas concentrações de metais (IRAM et al., 2013), sendo que as linhagens GSP102, GSP201, GSA301 e GSA302 foram resistentes a todas as concentrações de Pb e Fe, e apresentaram a mesma tolerância ao Cu em 250 ppm (Tabela 2). Estudos demonstram que linhagens fúngicas podem ser tolerantes a metais como Cu e Pb, sendo bastante utilizados na remoção e tratamento de águas residuais e de solos contaminados com metais pesados (PARAMESWARI; LAKSHMANAN; THILAGAVATHI, 2010).

Considerando os mecanismos de interação das bactérias e leveduras com íons metálicos e sua capacidade de resistência e tolerância aos metais, esses microrganismos podem ser utilizados em processos de biorremediação de ambientes impactados por metais pesados (IRAM; NASIR, 2012). Os processos microbianos de biotransformação e bioacumulação são os que estão envolvidos na remediação de metais pesados, sendo que a bioacumulação representa o cenário mais estratégico para investimento em tecnologia de biorremediação microbiana, visto seu potencial para ser implementado em programas/ações de recuperação de áreas impactadas por metais pesados (SANTOS et al., 2018).

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou que as linhagens microbianas isoladas de solo da caverna GEM-1467 apresentaram resistência ao Fe, e isso se explica pela presença desse metal na litologia da caverna estudada. Quanto ao Cu, as linhagens apresentaram diferentes graus de tolerância entre 31,25 a 250 ppm, diferentemente do Pb em que 6 isolados apresentaram CIM de 500 e 100 ppm. Cabe salientar

que nossos isolados apresentaram tolerância a concentrações elevadas de Fe, Cu e Pb, acima dos valores máximos permitidos pela legislação brasileira.

Deste modo, os isolados da caverna GEM-1467 são potenciais para a aplicabilidade biotecnológica em biorremediação, devido a capacidade de sobrevivência em altas concentrações dos metais analisados, proporcionando assim alternativas de estudos posteriores com os isolados cavernícolas ferríferos para o tratamento e recuperação de áreas contaminadas por metais.

## REFERÊNCIAS

- BARTON, Hazel A.; JURADO, Valme. What's up down there? Microbial diversity in caves. 2007.
- BELYAGOUBI, Larbi et al. Antimicrobial activities of culturable microorganisms (actinomycetes and fungi) isolated from Chaabe Cave, Algeria. *International Journal of Speleology*, v. 47, n. 2, p. 8, 2018.
- BØDTKER, Gunhild et al. Microbial analysis of backflowed injection water from a nitrate-treated North Sea oil reservoir. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, v. 36, n. 3, p. 439-450, 2009.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho CONAMA.
- BRAVO, Gabriela Batista Gomes. Resistência aos metais cobre, chumbo e zinco em bactérias gram-positivas isoladas em ambiente aquático. Dissertação (Mestrado)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental. Londrina, 2018.
- BRUINS, M. R.; KAPIL, S.; OEHME, F. W. Microbial resistance to metals in the environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 45, n. 3, p. 198-207, 2000.
- CHEN, Can; WANG, Jianlong. Response of *Saccharomyces cerevisiae* to lead ion stress. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 74, n. 3, p. 683-687, 2007.
- DAVIS, Madison C. et al. Surface runoff alters cave microbial community structure and function. *PloS one*, v. 15, n. 5, p. e0232742, 2020.
- DICKINSON, Andrew William et al. Heavy metal pollution and co-selection for antibiotic resistance: A microbial palaeontology approach. *Environment international*, v. 132, p. 105117, 2019.
- GADD, Geoffrey Michael. Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, v. 84, n. 1, p. 13-28, 2009.
- GARBOSSA, Luis Hamilton Pospissil. Desenvolvimento e avaliação de sistema de leito fixo- reator misto radial seguido de reator anóxico horizontal para a remoção de matéria orgânica e de nitrogênio de esgoto sanitário. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. São Carlos, 2003.
- GHANI, Abdul et al. Heavy metals and nutritional composition of some selected herbal plants of Soon Valley, Khushab, Punjab, Pakistan. *African Journal of Biotechnology*, v. 11, n. 76, p. 14064-14068, 2012.
- GHOSH, Soumya; KUISIENE, Nomeda; CHEEPHTAM, Naowarat. The cave microbiome as a source for drug discovery: reality or pipe dream?. *Biochemical Pharmacology*, v. 134, p. 18-34, 2017.
- GRASS, Gregor; RENSING, Christopher; SOLIOZ, Marc. Metallic copper as an antimicrobial surface. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 77, n. 5, p. 1541-1547, 2011.

GULECAL-PEKTAS, Yasemin. Bacterial diversity and composition in Oylat Cave (Turkey) with combined Sanger/pyrosequencing approach. *Polish Journal of Microbiology*, v. 65, n. 1, p. 9, 2016.

HALTTUNEN, T.; SALMINEN, S.; TAHVONEN, R. Rapid removal of lead and cadmium from water by specific lactic acid bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, v. 114, n. 1, p. 30-35, 2007.

HAMED, Javad; KAFSHNOUCHI, Maghsoud; RANJBARAN, Mohsen. A study on actinobacterial diversity of Hampoeil cave and screening of their biological activities. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 26, n. 7, p. 1587-1595, 2019.

HU, Hang-Wei et al. Field-based evidence for copper contamination induced changes of antibiotic resistance in agricultural soils. *Environmental Microbiology*, v. 18, n. 11, p. 3896-3909, 2016.

IANEVA, O. D. Mechanisms of bacteria resistance to heavy metals. *Mikrobiologichnyi Zhurnal* (Kiev, Ukraine: 1993), v. 71, n. 6, p. 54-65, 2009.

IRAM, Shazia et al. Heavy metal tolerance of filamentous fungal strains isolated from soil irrigated with industrial wastewater. *Biologia*, v. 58, n. 3, 2012.

IRAM, Shazia et al. Heavy metal tolerance of fungus isolated from soil contaminated with sewage and industrial wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 22, n. 3, 2013.

MA, Liyuan et al. Microbial Interactions Drive Distinct Taxonomic and Potential Metabolic Responses to Habitats in Karst Cave Ecosystem. *Microbiology Spectrum*, v. 9, n. 2, p. e01152-21, 2021.

MAXWELL, S. et al., The Simulation of nitrate-reducing bacteria (NRB) in oil field systems to the control sulphate-reducing bacteria (SRB), microbiologically influenced corrosion (MIC) and reservoir souring. An introduction review. *Energy Institute, LONDON*, 2003.

MOHR, Laura Cassol et al. Efeito antimicrobiano de nanopartículas de ZnO E TiO<sub>2</sub> frente as bactérias *S. aureus* e *E. coli*. In: *Revista do Congresso Sul Brasileiro de Engenharia de Alimentos*. 2017.

MUSTAPHA, Mohammed Umar; HALIMOON, Normala. Screening and isolation of heavy metal tolerant bacteria in industrial effluent. *Procedia Environmental Sciences*, v. 30, p. 33-37, 2015.

NATH, Soumitra et al. Isolation and identification of metal-tolerant and antibiotic-resistant bacteria from soil samples of Cachar district of Assam, India. *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 7, p. 1-9, 2019.

PAL, Chandan et al. Metal resistance and its association with antibiotic resistance. *Advances in Microbial Physiology*, v. 70, p. 261-313, 2017.

PARAMESWARI, E. et al. Biosorption and metal tolerance potential of filamentous fungi isolated from metal polluted ecosystem. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, v. 9, n. 4, p. 664-671, 2010.

PARKER, Ceth W. et al. Fe (III) reducing microorganisms from iron ore caves demonstrate fermentative Fe (III) reduction and promote cave formation. *Geomicrobiology Journal*, v. 35, n. 4, p. 311-322, 2018.

PAWLOWSKI, Jan et al. The future of biotic indices in the ecogenomic era: Integrating (e) DNA metabarcoding in biological assessment of aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, v. 637, p. 1295-1310, 2018.

PILÓ, L. B. et al. Diagnóstico e análise de relevância das cavernas da Serra da Bocaina. Belo Horizonte: Carste Consultores Associados, 2014. 179 p.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S. Mineralogia de Espeleotemas em rochas ferríferas da Região de Carajás, Pará. Instituto do Carste. Belo Horizonte. 60 p. (Inédito). 2011.

RAJEEV, Meora et al. Exploring the impacts of heavy metals on spatial variations of sediment-associated bacterial communities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 209, p. 111808, 2021.

RANALLI, Giancarlo; ZANARDINI, Elisabetta; SORLINI, Claudia. Biodeterioration—including cultural heritage. In *Encyclopedia of Microbiology*. Schaechter M. (ed). Oxford, UK: Elsevier, pp. 191–205. 2009.

RANGSECKAEW, Pharada; PATHOM-AREE, Wasu. Cave actinobacteria as producers of bioactive metabolites. *Frontiers in Microbiology*, v. 10, p. 387, 2019.

RIQUELME, Cristina et al. Actinobacterial diversity in volcanic caves and associated geomicrobiological interactions. *Frontiers in Microbiology*, v. 6, p. 1342, 2015.

ROCCO, Débora Hidalgo Espinetti. Análise da bioacumulação de chumbo, cobre e cádmio em meio aquoso utilizando *Bacillus subtilis*. Dissertação (Mestrado)- Universidade de Sorocaba. Programa de Pós- Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais. Sorocaba, 2020.

SANCHEZ-MORAL, Sergio et al. The role of microorganisms in the formation of calcitic moonmilk deposits and speleothems in Altamira Cave. *Geomorphology*, v. 139, p. 285-292, 2012.

SANTOS, Sidnei Cerqueira et al. Mapeamento Tecnológico de Processos Microbianos Aplicados na Biorremediação de Metais Pesados. *Cadernos De Prospeção*, v. 11, ed. 8, 2018.

SINGH, Pooja; CAMEOTRA, Swaranjit Singh. Enhancement of metal bioremediation by use of microbial surfactants. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, v. 319, n. 2, p. 291-297, 2004.

SOUSA, Kally Alves de; CAMMAROTA, Magali Christe; SÉRVULO, Eliana Flávia Camporese. Efeito da aplicação de nitrato na redução biogênica de sulfeto sob diferentes concentrações iniciais de bactérias redutoras de nitrato e sulfato. *Química Nova*, v. 33, p. 273-278, 2010.

SOUZA, Ana Kely Rufino et al. Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. *Acta Biomedica Brasiliensia*, v. 9, n. 3, p. 95-106, 2018.

TRAJANO, Eleonora, *Biologia subterrânea: introdução* / Eleonora Trajano, Mana Elina Bichuette. - São Paulo; Redespeleo, 2006.

VAN DER HEGGEN, Maarten et al. Lead toxicity in *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 88, n. 6, p. 1355-1361, 2010.

VINCENT, Marin; HARTEMANN, Philippe; ENGELS-DEUTSCH, Marc. Antimicrobial applications of copper. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v. 219, n. 7, p. 585-591, 2016.

WIEGAND, Irith; HILPERT, Kai; HANCOCK, Robert EW. Agar and broth dilution methods to determine the minimal inhibitory concentration (MIC) of antimicrobial substances. *Nature Protocols*, v. 3, n. 2, p. 163-175, 2008.

XU, Lin et al. *Halomonas zincidurans* sp. nov., a heavy-metal-tolerant bacterium isolated from the deep-sea environment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 63, n. Pt\_11, p. 4230-4236, 2013.

YASIR, Muhammad. Analysis of bacterial communities and characterization of antimicrobial strains from cave microbiota. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 49, p. 248-257, 2018.

ZADA, Sahib et al. Cave Microbes as a Potential Source of Drugs Development in the Modern Era. *Microbial Ecology*, p. 1-12, 2021.

ZANARDINI, Elisabetta et al. Nutrient cycling potential within microbial communities on culturally important stoneworks. *Environmental Microbiology Reports*, v. 11, n. 2, p. 147-154, 2019.

## Capítulo 2



10.37423/231008339

# DISTRIBUIÇÃO DE CAVERNAS NO BIOMA CERRADO

*Ana Karolyna Nunes Amaral*

*Universidade Federal de Goiás*

*Luis Felipe Soares CHEREM*

*Universidade Federal de Goiás*

*Renata Santos Momoli*

*Universidade Federal de Goiás*



**Resumo:** Cavidades naturais subterrâneas são formadas a partir da dissolução das rochas em contato com uma solução acidificada, sendo mais comuns em ambientes carbonáticos. O bioma Cerrado é detentor de uma grande quantidade dessas cavidades cadastradas nas bases de dados do CANIE/CECAV. O objetivo deste trabalho foi identificar a distribuição das cavernas no Cerrado em relação à atributos do meio físico (geologia, geomorfologia e solos) e territoriais (unidades da federação e unidades de conservação). Foi possível identificar que as cavernas se concentraram na região sudeste do Bioma Cerrado, onde 78 % estão sobre as rochas carbonáticas da província do São Francisco, nos Crátons Neoproterozóicos, predominantemente sobre o Grupo Bambuí. Dentre as cavidades, 21% estão situadas em Unidades de Conservação, sendo que 71 % encontram-se em áreas de uso sustentável e 28,9 % em áreas de proteção integral. Em relação aos solos, conforme a escala do mapeamento utilizado, as cavidades subterrâneas localizam-se principalmente sob Argissolos e Cambissolos, porém estudos detalhados relataram predominância da ocorrência em solos pouco evoluídos como Neossolos Litólicos. Aponta-se com este estudo a importância do cadastramento e da espacialização de dados espeleológicos, os quais servirão como base para o desenvolvimento de novos estudos e também poderá auxiliar em ações de planejamento de uso sustentável de áreas públicas e privadas. Destaca-se ainda a necessidade de uma base de dados em escala de maior detalhe, o qual permitirá uma visão mais fidedigna da área em questão.

**Palavras-Chave:** Cavidades naturais subterrâneas; Carste; Meio Físico; Cerrado.

## 1. INTRODUÇÃO

O termo caverna deriva da palavra em latim “cavus”, que tem por significado “buraco”. Este é utilizado para se referir a qualquer cavidade natural subterrânea em rocha, com dimensões que permitam acesso a seres humanos. Este também é conhecido por gruta, lapa, toca, abismo, fuma e buraco (CONAMA, 2004; CPRM, 2014).

Estas cavidades são formadas pela dissolução da rocha em contato com uma solução aquosa acidificada, principalmente em rochas carbonáticas e também em litologias siliciclásticas e ferríferas (AULER, 2019). No Brasil são encontradas diversas cavernas em diferentes litologias, a exemplo das cavernas de quartzito na Chapada Diamantina (BA), as de arenito localizada no Piauí na região da Serra da Capivara e as localizadas em afloramentos ferruginosos, a exemplo das cavidades presentes no quadrilátero ferrífero em Minas Gerais (HARDT, 2009; MORAIS; SOUZA, 2009; CARMO et al., 2011).

O bioma Cerrado possui a maior quantidade de cavidades naturais subterrâneas identificadas no território brasileiro (JANSEN; PEREIRA, 2014). Isto decorre, principalmente, da ampla distribuição territorial das rochas carbonáticas do grupo Bambuí e do grupo Paranoá nas áreas ocupadas pelo bioma (AULER, 2019; CASTRO; DARDENNE, 1995;

CAMPOS et al., 2013). O elevado número de registros de cavidades pode ser reflexo, também, da convergência de dois fatores: da expressiva atuação de espeleólogo(a)s, tendo a região sudeste do Brasil como celeiro mais tradicional, de atividades como a mineração, cujos impactos ambientais requerem levantamento de cavidades para compor o Estudo e Relatório de Impactos Ambientais (EIA-RIMA) para obtenção de licenças. Tal condição se reflete no aumento gradual da quantidade de cavidades registradas nos últimos anos, em estados com mineração em ascensão, como observado atualmente no estado do Pará.

Além disso, o Cerrado possui abundante fauna e flora endêmica, sendo conhecido como a savana mais biodiversa do mundo (KLINK; MACHADO, 2005). É no Cerrado que brotam as nascentes das bacias hidrográficas dos importantes rios Paraná, São Francisco e Tocantins e, é nele também que incidem as principais transformações do uso da terra e expansão da fronteira agrícola (SILVA; CASTRO, 2015; NUNES; CASTRO,

2021). As condições naturais dos solos, relevo, rochas, águas, fauna e flora do Cerrado conferem ao bioma, simultaneamente, alta fragilidade ambiental e alto potencial de uso produtivo, condições que requerem medidas de conservação de moderada complexidade para uso sustentável.

O registro de coordenadas geográficas de cavidades em bases de dados disponíveis em repositórios acessíveis é uma ferramenta preciosa para o planejamento da gestão de uma área, seja pública ou privada, de uso intensivo ou uso restrito. O Cadastro Nacional de Cavernas (CNC), gerido pela Sociedade Brasileira de Espeleologia, abriga desde 1969, registros de cavernas, como as primeiras cadastradas por Pierre Martin, até as atuais 8242 distribuídas pelo Brasil, cadastradas por diversos grupos de espeleologia, servindo de base para outros tipos de plataforma de informação (SBE, 1990).

Criado em 2004, o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), vinculado ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV/ICMBio) também possibilita o registro das coordenadas, entre outras informações, das cavidades nacionais, sendo o repositório oficial com mais de 20147 cavernas catalogadas. O registro espacial da localização das cavidades é fundamental para o desenvolvimento de ações de planejamento de uso sustentável.

Os dados que alimentam ambos bancos de dados, CNC e o CANIE, são provenientes de ações financiadas ou não, públicas e/ou privadas como projetos de pesquisa, compensações ambientais, expedições, etc. e por meio de estudos espeleológicos realizados como subsídio ao licenciamento ambiental, pesquisas científicas aplicadas, material bibliográfico e de outras bases de dados (ICMBIO, 2021).

Diante disto, o presente trabalho tem como objetivo, identificar a distribuição espacial das cavidades subterrâneas catalogadas pelo CECAV, em relação à atributos físicos (província geológica, domínios morfoestruturais e solos) e territoriais (unidades de conservação e estados da federação) do bioma Cerrado.

## 2. METODOLOGIA

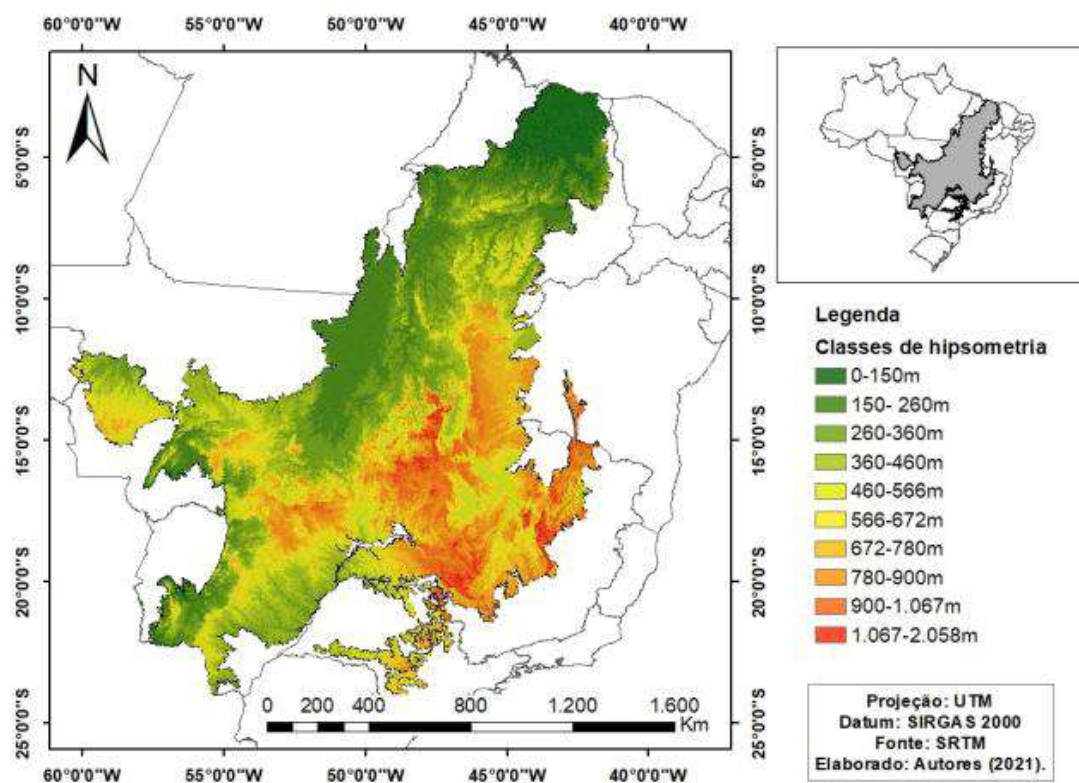
### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no bioma Cerrado. Esta possui uma área de 204,7 milhões de hectares, o que equivale a aproximadamente 22% do território nacional. Seu clima predominante é o tropical semiúmido (Aw), conforme a classificação de Köppen, característica de duas estações bem definidas,

uma seca (outono/inverno) que vai de maio a setembro e outra chuvosa (primavera/verão) que ocorre de outubro a abril (NASCIMENTO; NOVAIS, 2020).

A vegetação no bioma varia desde as formações florestais, as savânicas até as campestres. Sendo estas ainda subdivididas em diversas fitofisionomias. Em relação aos recursos hídricos, o Cerrado contribui com oito das doze regiões hidrográficas brasileiras. O mesmo ainda possui em suas dependências as nascentes do rio Paraguai, Parnaíba, São Francisco e Tocantins (LIMA, 2011).

Este apresenta um relevo bastante diverso, onde conforme Ribeiro e Walter, (1998), ocupa altitudes que variam de cerca de 300 metros, como na Baixada Cuiabana (Mato Grosso), até altitudes superiores a 1.600 metros, como na Chapada dos Veadeiros (Goiás) (Figura 1). Porém de maneira geral, este apresenta-se em sua maioria como um relevo suavemente ondulado.



**Figura 1:** Mapa hipsométrico do Cerrado.

**Fonte:** SRTM.

## 2.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia do presente trabalho consistiu em caracterizar a distribuição de cavernas dentro do limite do bioma Cerrado, em relação a atributos físicos (relevo, geologia e solos) e territoriais (unidades de conservação e da federação).

As informações geográficas relacionadas aos limites das unidades federativas e das unidades de conservação, foram adquiridas a partir da Base Cartográfica Contínua do Brasil, em sua última versão, em uma escala de 1:250.000 (IBGE, 2021).

Os dados de províncias geológicas, de domínios morfoestruturais do relevo e de pedologia, foram adquiridos a partir do Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil realizado pelo IBGE. Este consiste em uma compilação de informações de recursos naturais produzidos no Brasil, os quais a partir de um processo contínuo de atualização, foram padronizados a uma escala de 1:250.000 (IBGE, 2018).

Foram adquiridos também, a partir da base de dados do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), informações relacionadas ao registro de coordenadas espaciais de cavernas, pelo Cadastro Nacional de Informações Espelológicas (ICMBIO, 2021) e o mapeamento de áreas com ocorrências de cavernas no Brasil, as quais disponibilizam informações relacionadas a litologia dessas regiões. Devido a esses dados serem oriundos de uma compilação de diversos mapeamentos realizados em todo o território, sua escala mínima é de 1:250.000.

O software utilizado para o cruzamento das informações, cálculos de porcentagem e elaboração dos mapas, foi o ArcGis 10.3.

### 3.RESULTADOS

De acordo com os dados do CECAV/CANIE, foi possível indicar que o bioma Cerrado possui dentro do seu território, um total de 9225 cavernas conhecidas, estando localizado em sua grande maioria na região sudeste, predominantemente no estado de Minas Gerais, que dispõem de mais de 60 % das cavidades.

Os estados de Goiás e do Tocantins são as unidades federativas que sucedem o ranking, totalizando juntos um total de 1848 cavidades cadastradas. A distribuição em relação aos demais estados pode ser visualizada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Distribuição de cavernas no Bioma Cerrado.

| Estados            | Cavernas | %    |
|--------------------|----------|------|
| Minas Gerais       | 5962     | 64,6 |
| Goiás              | 1002     | 10,9 |
| Tocantins          | 846      | 9,2  |
| Mato Grosso        | 508      | 5,5  |
| Mato Grosso do Sul | 260      | 2,8  |

|                  |     |     |
|------------------|-----|-----|
| Bahia            | 244 | 2,6 |
| Distrito Federal | 157 | 1,7 |
| Maranhão         | 107 | 1,2 |
| Piauí            | 85  | 0,9 |
| São Paulo        | 34  | 0,4 |
| Paraná           | 20  | 0,2 |
| Pará             | 0   | 0   |
| Rondônia         | 0   | 0,0 |

**Fonte:** Adaptado de CECAV/CANIE.

Destaca-se que a predominância de cavidades cársticas nestas regiões, estão relacionadas às formações geológicas presentes.

Conforme o mapa de províncias geológicas do Cerrado, é possível identificar uma predominância de cavidades cársticas na província do São Francisco, correspondendo a 78 % do total identificado (Figura 2).

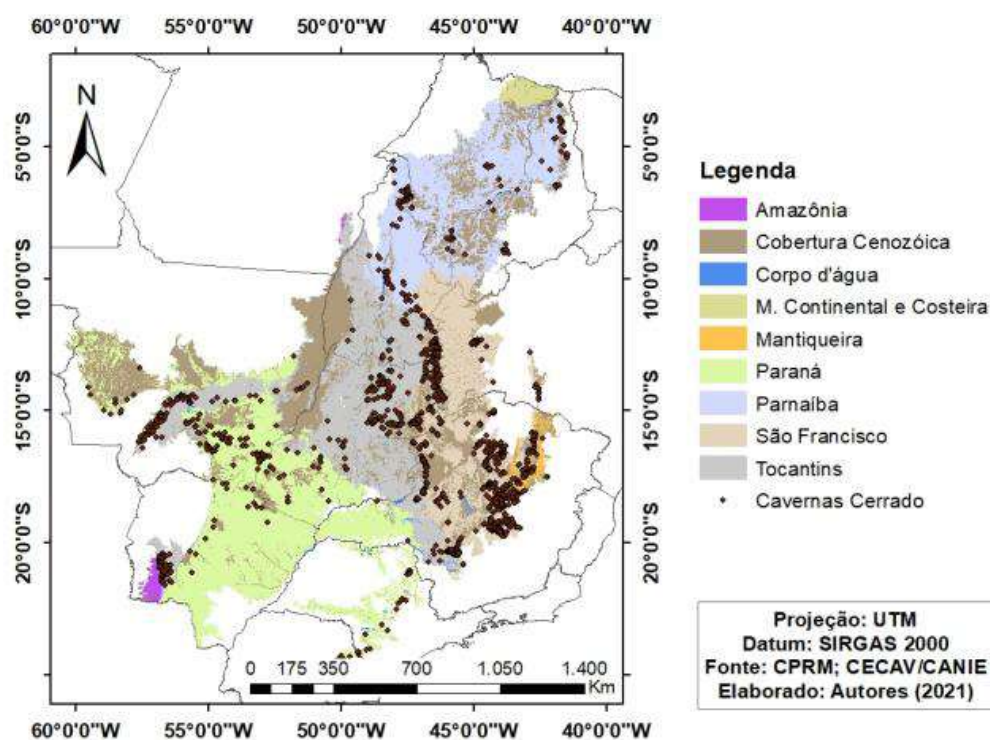


Figura 2: Distribuição de cavernas dentre as províncias geológicas. Fonte: Adaptado de CPRM e CECAV.

A segunda província com maior número de cavidades subterrâneas foi a do Tocantins, apresentando um percentual de 12,3 %. Sobre esta, estão localizadas as rochas do Grupo Paranoá (95,7%, para ser mais exato), o qual possui uma área de 24.325 km<sup>2</sup> e onde estão cadastradas 247 cavernas. Este grupo

geológico é característico de uma sequência psamo-pelito-carbonatada o qual possui relação com a Faixa de Dobramentos Brasília (CAMPOS et al., 2013).

Destaca-se também, que a província geológica do São Francisco possui duas importantes Províncias Espeleológicas, sendo estas Grupo Una e o Grupo Bambuí, sendo este último localizado nos limites da área de estudo (CARVALHO JÚNIOR et al., 2008).

O Grupo Bambuí recobre grandes áreas do Cráton do São Francisco, possuindo uma área aproximada de 150.000 km<sup>2</sup>, sendo que aproximadamente 108.000 km<sup>2</sup> estão sobre o Cerrado, com 6302 cavernas cadastradas. Suas rochas datam do período neoproterozóico, onde são identificadas, entre outras litologias, camadas de calcários e dolomito, principalmente pelas formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré (MARTÍNEZ, 2007).

Entre as áreas de ocorrência de cavernas, observa-se que predominantemente, estas se localizam em rochas carbonáticas (86,09%) porém, destaca-se aqui, que estas ocorrem também em um ambiente não carbonático. Conforme a Tabela 2, observa-se que cerca de 14% das cavernas identificadas, estão localizadas em ambientes de rochas siliclásticas, ferríferas, granitoides e vulcânicas.

**Tabela 2.** Litologia predominante nas cavernas catalogadas.

| Litologia            | Cavernas | %     |
|----------------------|----------|-------|
| Rochas carbonáticas  | 7984     | 86,54 |
| Rochas siliclásticas | 923      | 10,00 |
| Rochas ferruginosas  | 99       | 1,07  |
| Rochas vulcânicas    | 5        | 0,05  |
| Rochas granitoides   | 4        | 0,04  |
| Não classificado     | 210      | 2,27  |

**Fonte:** Adaptado CECV/CANIE.

Sabe-se que devido a escala do mapa de geologia utilizado, 1:250.000, essas correlações podem não representar fidedignamente a litologia informada. Uma vez, que a distribuição das formações geológicas e litologias apresentam forte heterogeneidade. Porém, a análise buscou demonstrar de uma maneira regionalizada, quais são as litologias predominantes nos ambientes de cavernas.

Conforme Hard e Pinto (2009), cavidades subterrâneas podem ocorrer também em ambientes não carbonáticos, sendo necessário uma exposição mais prolongada e intensa dos fatores intempéricos sobre essas litologias (PILÓ; AULER, 2009; MORAIS; SOUZA, 2009).

Os domínios morfoestruturais compreendem as grandes unidades estruturais do relevo, com base em seus aspectos geológicos. São representados em escala regional, gerando modelos de relevo com características próprias que apresentam relações comuns com a estrutura de formação (IBGE, 2009).

Em relação aos domínios morfoestruturais, aponta-se que 68,4 % das cavidades estão sobre os Crátons Neoproterozóicos seguidos pelos Cinturões Neoproterozóicos - período correspondente a cerca de 1000 milhões a 541 milhões anos atrás - que corresponde a 21,1 % do total de feições cadastradas, conforme a Figura 3.

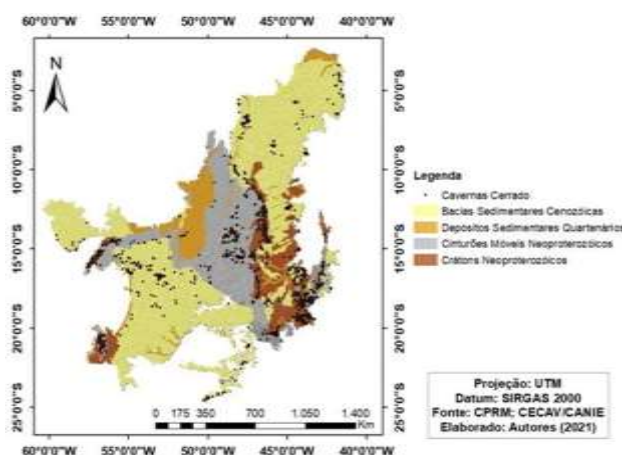


Figura 3: Distribuição de cavernas em relação Domínios Morfoestruturais do relevo.

Os demais domínios são do Éon Fanerozóico ( $\pm 545$  milhões de anos até o presente), os quais apresentam, bacias sedimentares da Era Cenozóica ( $\pm 65$  milhões de anos até o presente) e depósitos sedimentares do período Quaternário ( $\pm 1,6$  milhões de anos até o presente). Estes representam um percentual de 9,6% e 0,9%, em relação a distribuição de cavernas na área do Cerrado.

Conforme IBGE (2009), os Crátons Neoproterozóicos são ambientes marcados por planaltos residuais, chapadas e depressões interplanálticas, tendo como embasamento metamorfitos e granitóides, muita das vezes associadas a coberturas sedimentares. Um exemplo deste tipo de ambiente é a região da Serra Geral, na divisa entre Goiás e Bahia, que está sobre o Cráton do São Francisco (CHEREM; VARAJÃO, 2014).

Neste Cráton são encontradas rochas que compõem o Grupo Bambuí, como também faixas de rochas xistosas, graníticas ou gnáissicas arqueanas, que afloram na superfície e compõem o embasamento. Estas rochas estão cobertas pelos sedimentos fanerozóicos que formam o aquífero Urucuaia. Nestas regiões são comuns encontrar resquícios de rochas carbonáticas à medida que as rochas sobrejacentes são exumadas (CAMPOS; DARDENNE, 1997).

Em relação aos solos, observa-se que 51,18 % das cavidades subterrâneas estão localizadas sob os Argissolos, seguidos pelos Cambissolos (18,12%) e Neossolos (17,87%), (Tabela 3).

**Tabela 3.** Distribuição de cavernas nos solos do Cerrado.

| Solos                     | Cavernas | %     |
|---------------------------|----------|-------|
| Argissolos                | 4722     | 51,18 |
| Cambissolos               | 1672     | 18,12 |
| Neossolos                 | 1379     | 14,87 |
| Latossolos                | 801      | 8,68  |
| Chernossolos              | 173      | 1,87  |
| Plintossolos              | 91       | 0,98  |
| Nitossolos                | 88       | 0,95  |
| Gleissolos                | 25       | 0,27  |
| Vertissolos               | 1        | 0,01  |
| Outros (não classificado) | 273      | 2,95  |

**Fonte:** Adaptado de IBGE (2018).

Os dados obtidos, de ocorrência de cavidades, para as variáveis avaliadas: estados da federação, província geológica, litologia, domínios morfoestruturais e solos apresentam uma importante questão de escala a refletir. A escala de detalhe utilizada para obter as coordenadas (metros, no caso de UTM) é compatível com a escala (normalmente 1:500.000 ou menor) dos mapas-base utilizados (geologia, litologia e solos) nos levantamentos em nível de país, ou como nesse caso, de bioma? As relações estabelecidas estariam sendo sub ou superestimadas?

No caso dos solos, fica evidente essa desproporcionalidade entre estimativa e realidade ao utilizar um mapa-base de solos, por exemplo, na escala 1:250.000. Este identificado como mapa de reconhecimento, com detalhamento limitado, não permite identificar manchas de solos pequenas, menores que 2,5 km<sup>2</sup>. A adoção de mapa-base nessa escala leva a uma generalização daqueles solos de maior amplitude de distribuição no Bioma, como é o caso dos Latossolos (solos profundos com textura homogênea) e dos Argissolos (solos profundos e com textura heterogênea) e à subestimação da ocorrência dos solos que ocupam áreas relativamente menores, como os Nossolos Litólicos (solos rasos com rocha a menos de 50 cm de profundidade) e Gleissolos (solos saturados em áreas úmidas), por exemplo.

Estudos relativos ao projeto Solos do Carste, vinculado à Universidade Federal de Goiás e com o apoio de membros do Pequeno Espeleogruppo de Pesquisa e Extensão, vem contribuindo para incrementar os conhecimentos sobre os solos desenvolvidos nos arredores das cavernas de Goiás.

Mapeamentos de solos, em escala de detalhe (1:10.000), realizados em terrenos cársticos do Grupo Paranoá, na região de Vila Propício e de Niquelândia, revelou que nas proximidades das aberturas das cavidade subterrâneas estão, frequentemente, presentes solos rasos a muito rasos (com espessura máxima de 50 cm).

Por estarem alojadas em corpos rochosos maciços ou fragmentados, as cavernas, principalmente suas aberturas, são marcadas pela presença de rochas aflorando à superfície ou com uma camada variável, mas pouco espessa de solo. Assim, verificou-se a predominância de solos jovens e rasos, a exemplo dos Neossolos Litólicos, no carste de Vila Propício (GONÇALES, 2018; PINTO, 2020) e Niquelândia, Goiás e em Lagoa Santa, MG (Figura 4).

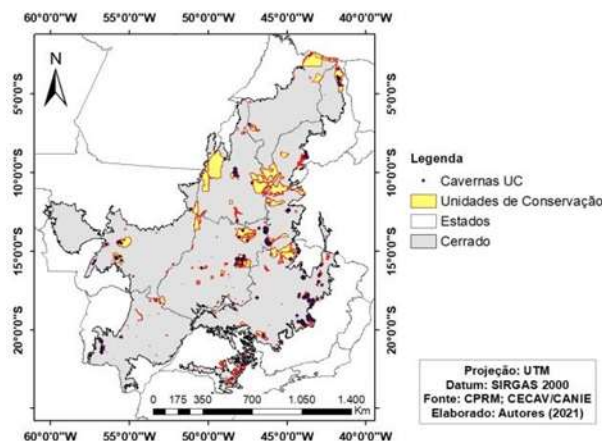


**Figura 4:** Solos rasos a muito rasos, da classe dos Neossolos Litólicos, no topo (A), na zona intermediária (B) e na base de maciço carbonático que abriga cavernas.

Apesar dos Neossolos Litólicos predominarem próximos às aberturas das cavidades, o desenvolvimento ou continuidade da cavidade pode se dar abaixo de outras classes de solos.

Destaca-se também, que devido às práticas agropecuárias exercidas no bioma, em sua maioria, sem nenhum manejo conservacionista, proporcionam um ambiente com elevada erosão, o que consequentemente gera uma grande quantidade de solos perdidos, o que próximo a uma cavidade subterrânea gera diversos impactos, a exemplo do preenchimento de condutos e o assoreamento de rios subterrâneos (URICH, 2002).

Em relação à presença de cavernas em áreas protegidas por lei e definidas no Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC (ICMBIO, 2021), observou-se que apenas 21% estão localizadas em unidades de conservação (UC's) (municipais, estaduais e federais), sendo que 71% estão em unidades de uso sustentável e 28,9 % em áreas proteção integral (Figura 5).



**Figura 5:** Distribuição das cavernas em relação as unidades de conservação.

As cavernas presentes em UC's de proteção integral como parques e reservas, estão menos sujeitas a impactos do que as demais, pois o uso da terra é limitado, com restrições bem definidas quanto ao uso e exploração de seus recursos naturais. Entretanto, a maior parte das cavernas está desprotegida, pois se encontra em áreas sem nenhuma proteção ou em áreas que permitem o uso sustentável. As áreas protegidas de uso sustentável são especialmente delicadas, pois apresentam proteção efetiva questionável, devido à ausência de políticas públicas sustentáveis de uso da terra e concentram 71% das cavernas.

Aponta-se que em Minas Gerais, do total das feições cadastradas, 23 % localizam-se em áreas de unidades de conservação. Para Goiás o percentual foi um pouco maior, cerca de 25%. Destaca-se aqui o Distrito Federal, que está quase que totalmente inserido em áreas de preservação ambiental (APA

Planalto Central, APA Descoberto, APA São Bartolomeu e outras), sendo que todas as suas 157 cavernas cadastradas, se localizam inseridas neste tipo de unidade territorial.

A proteção legal das cavernas está novamente sob risco, uma vez que o Decreto Federal Nº 6.640 de 7 de novembro de 2008, que preconiza que as cavidades subterrâneas somente poderão ser alvo de atividades mediante ao licenciamento ambiental (BRASIL, 2008) foi alterado pelo decreto 10.935/2022, reduzindo ainda mais a proteção às cavernas brasileiras.

## 4. CONCLUSÕES

Com base no levantamento realizado, conclui-se assim, que as cavidades naturais subterrâneas identificadas até o momento para Cerrado são 9225 unidades, cerca de 20 % a mais do que o identificado em Jansen e Pereira (2014).

A unidade federativa com maior quantidade de feições identificadas foi Minas Gerais, seguido por Goiás e Tocantins. Em relação à geologia, a província com maior quantidade de cavidades identificadas foi a do São Francisco (78%).

As cavernas catalogadas, encontram-se em sua maioria sobre rochas carbonáticas (86%), porém também foram identificadas essas feições em rochas não carbonáticas. No grupo Bambuí estão localizadas 70,2 % das cavernas, e no grupo Paranoá 2,6%. Em relação aos domínios morfoestruturais, 68,4 % estão sobre os Crátons Neoproterozóicos.

Apesar da indicação de quase 70% das cavidades estarem sob Argissolos e Cambissolos, levantamentos de campo revelaram que os solos mais recorrentes em áreas próximas às cavernas do carste goiano e mineiro pertencem à classe dos Neossolos Litólicos. Assim, destaca-se que o mapeamento utilizado não foi o suficiente para identificar as diferenças pedológicas em áreas menores, havendo assim uma generalização do tipo de solos, que pode ocorrer também em relação à geologia e à litologia.

De acordo com a espacialização nas unidades de conservação, apenas 21% das cavidades estão localizadas nestas áreas, sendo que 71 % encontram-se dentro de unidades de uso sustentável e 28,9 % em unidades de proteção integral.

Conclui-se, que a quantidade de cavidades naturais identificadas no bioma Cerrado, deve-se às características físicas presente em seu território, que em conjunto com as condições climáticas, favorecem a dissolução rochosa e consequentemente a formação de cavernas, somada aos esforços

de espeleólogo(a)s brasileiro(a)s em levantamentos de campo. E apesar da grande quantidade de dados já disponíveis, destaca-se, pelo alto potencial espeleológico que novas pesquisas podem, ainda, identificar inúmeras cavernas no Cerrado, como em todo o território brasileiro. Uma vez que, com a especialização destas é possível realizar novos estudos na área da espeleologia, como também auxiliar em ações de planejamento de uso sustentável de áreas públicas e privadas.

## REFERÊNCIAS

- AULER, A. Histórico, ocorrência e potencial de cavernas no Brasil. In: RUBBIOLI, E.; AULER, A.; MENIN, D.; BRANDI, R. Cavernas: Atlas do Brasil Subterrâneo. Brasília: ICMBio, 2019. 340 p.
- BRASIL. Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Diário Oficial da União, de 7 de novembro de 2008. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Decreto\\_6640\\_Comentado.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Decreto_6640_Comentado.pdf). Acessado: 30 de novembro de 2021.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A.; BERBET-BORN, M.; MARTINS, E. S.; GUIMARÃES, R. F., GOMES, R.
- A. T. Ambientes cársticos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2008. p. 185-218.
- CASTRO, Paulo de Tarso Amorin; DARDENNE, Marcel Auguste. O CONGLOMERADO SAMBURÁ (GRUPO BAMBUÍ, NEOPROTEROZÓICO) E ROCHAS SEDIMENTARES ASSOCIADAS NO FLANCO LESTE DA SERRA DA PIMENTA, SW DE MINAS GERAIS: UM SISTEMA DE FAN DELTA. Geonomos, 1995.
- CARMO, F. F.; CARMO, F. F.; SALGADO, A.A. R.; JACOBI, C. M. Novo sítio espeleológico em sistemas ferruginosos, no Vale do Rio Peixe Bravo, norte de Minas Gerais, Brasil. Espeleo-tema, v. 22, n. 1, p. 25-39, 2011.
- CAMPOS, José Eloi Guimarães; DARDENNE, Marcel Auguste. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. Revista Brasileira de Geociências, v. 27, n. 3, p. 269-282, 1997.
- CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A.; FREITAS-SILVA, F. H.; MARTINS-FERREIRA, M. A. C.
- Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. Brazilian Journal of Geology, v. 43, n. 3, p. 461-476, 2013.
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C. O Papel da Lito-estrutura do Carste na Morfodinâmica Cenozóica da Serra Geral de Goiás (GO/TO/BA): aproximações iniciais. Revista Geonorte, v. 5, n. 19, p. 180- 184, 2014.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO nº 347, de 10 de setembro de 2004. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. 2004. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Legislacao/Res\\_CONAMA\\_347\\_2004.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Legislacao/Res_CONAMA_347_2004.pdf). Acessado: 01 de dezembro de 2021.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Espeleologia: o estudo das cavernas. 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Canal-Escola/Espeleologia%3A- o estudo-das-cavernas-1278.html>. Acessado em: : 01 de dezembro de 2021.
- HARDT, R.; PINTO, S. A. F. Carste em litologias não carbonáticas. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 10, n. 2, 2009.

ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas. 2021. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>. Acessado em: 01 de dezembro de 2021.

ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Disponível em:

<https://www.icmbio.gov.br/educacaoambiental/politicas/snuc.html>. Acessado em: 25 de fevereiro de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ESTATÍSTICA E GEOGRAFIA (IBGE). Base Cartográfica Contínua do Brasil, escala 1:250.000 – BC250, Versão 2021. Documentação técnica geral. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2021. Disponível em: [https://geoftp.ibge.gov.br/cartas\\_e\\_mapas/bases\\_cartograficas\\_continuas/bc250/versao2021/informacoes\\_tecnicas/bc250\\_documentacao\\_tecnica.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versao2021/informacoes_tecnicas/bc250_documentacao_tecnica.pdf). Acessado: 26 de fevereiro de 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ESTATÍSTICA E GEOGRAFIA (IBGE). Manual técnico de geomorfologia. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2009. Disponível em:

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv66620.pdf>. Acessado: 25 de novembro de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Mapeamento de recursos naturais do Brasil-Escala 1: 250.000. 2018. Acessado: [https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/geologia/levantamento\\_geologico/vetores/escala\\_250\\_mil/DOCUMENTACAO\\_TECNICA\\_MRN.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_geologico/vetores/escala_250_mil/DOCUMENTACAO_TECNICA_MRN.pdf). Disponível em: 26 de fevereiro de 2022.

GONÇALES, L.M. Compactação do solo em trilhas turísticas no carste de Vila Propício. Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Ciências Ambientais. Universidade Federal de Goiás. 2018.

JANSEN, D. C.; PEREIRA, K. N.; Distribuição e caracterização das cavernas brasileiras segundo a base de dados do CECAV. Revista Brasileira de Espeleologia, v. 2, n. 4, p. 47-70, 2014.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. Megadiversidade, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.

LIMA, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. Ciência e cultura, v. 63, n. 3, p. 27-29, 2011.

MARTNEZ, M. I. Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais. 2007. MORAIS, F; SOUZA, L. B. Cavernas em arenito na porção Setentrional da Serra do Lajeado Estado do Tocantins, Brasil. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 9, n. 2, p. 1-13, 2009.

NASCIMENTO, Diego Tarley Ferreira; NOVAIS, Giuliano Tostes. Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. Elisée–Revista de Geografia da UEG, v. 9, n. 2, 2020.

NUNES, E. D.; CASTRO, S. S. Degradação de fitofisionomias do Cerrado e impactos erosivos hídricos lineares no sudoeste de Goiás-Brasil. Sociedade & Natureza, v. 33, 2021.

PILÓ, L. B.; AULER, A. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia. 2009. p. 181-186.

PINTO, A. B. Caracterização granulométrica de sedimentos da Caverna Samambaia e Lapa do Boqueirão. Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Geografia Bacharelado. Universidade Federal de Goiás. 2020.

RIBEIRO, J. F. WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. Embrapa Cerrados-Capítulo em livro científico (ALICE), 1998.

SBE - SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA. Cadastro nacional de cavidades naturais: Índice de dados sobre as cavernas do Brasil. Comissão de Cadastro, Espeleometria e Províncias Espeleológicas (CCEPE).1990. 222 p.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. Transformações no uso da terra e na estrutura de solos no Cerrado em áreas de expansão da cana-de-açúcar: o caso da microrregião de Quirinópolis. Ateliê Geográfico. Goiás. 2015.

URICH, P. B. Land use in karst terrain: review of impacts of primary activities on temperate karst ecosystems. Wellington: Department of Conservation, 2002.

## Capítulo 3



10.37423/231008365

# ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO DE CAVIDADES FERRÍFERAS. MINAS DE N4 E N5, CARAJÁS, BRASIL.

*Adimir Fernando Rezende*

*Vale SA*

*Rafael Guimarães de Paula*

*Vale SA*

*Marcelo Roberto Barbosa*

*Vale SA*

*Leandro Alves Caldeira Luzzi*

*Vale SA*

*Iuri Viana Brandi*

*Vale SA*



**Resumo:** O monitoramento sismográfico de cavernas naturais subterrâneas, além de atender a legislação ambiental brasileira vigente, contribui para a sustentabilidade das atividades de mineração e a proteção do patrimônio espeleológico. O acompanhamento dos desmonte de rochas com uso de explosivos em regiões de cavernas é de fundamental importância, possibilitando um melhor planejamento de lavra, sem comprometer a integridade física das cavernas. Este trabalho foi desenvolvido nas minas de ferro N4 e N5 em Carajás durante o monitoramento sismográfico de cavernas, previsto no Plano Básico Ambiental. Serão apresentadas as principais variáveis que devem ser consideradas neste tipo de monitoramento, e o resultado de análise estatística, onde foram identificadas as variáveis mais significativas nas correlações com a variável sismográfica selecionada - velocidade de vibração de partícula.

**Palavras-Chave:** Carajás; Cavernas naturais; Monitoramento sismográfico.

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades de monitoramento espeleológico são previstas pela legislação ambiental brasileira, e fazem parte de Planos Básicos Ambientais (PBA) para acompanhar o comportamento de cavidades em áreas de mineração. O monitoramento sismográfico é um dos monitoramentos integrantes do PBA.

A prática de detonação com o uso de explosivo para desmonte de rochas em atividades de mineração, ou mesmo em obras urbanas, tem sido usada ao longo do tempo para a otimização dos custos e aumento do ritmo de produção. No entanto, é fonte emissora de ondas sísmicas, registradas por sismógrafos, e pode representar potencial de dano à integridade física de cavidades. Esta possibilidade de danos é entendida aqui como sendo de aspectos relacionados à sua morfologia original, suas formações secundárias (espeleotemas, ou sedimentos clásticos), bem como ainda piso, paredes e tetos (Santos Junior, 2017). 2

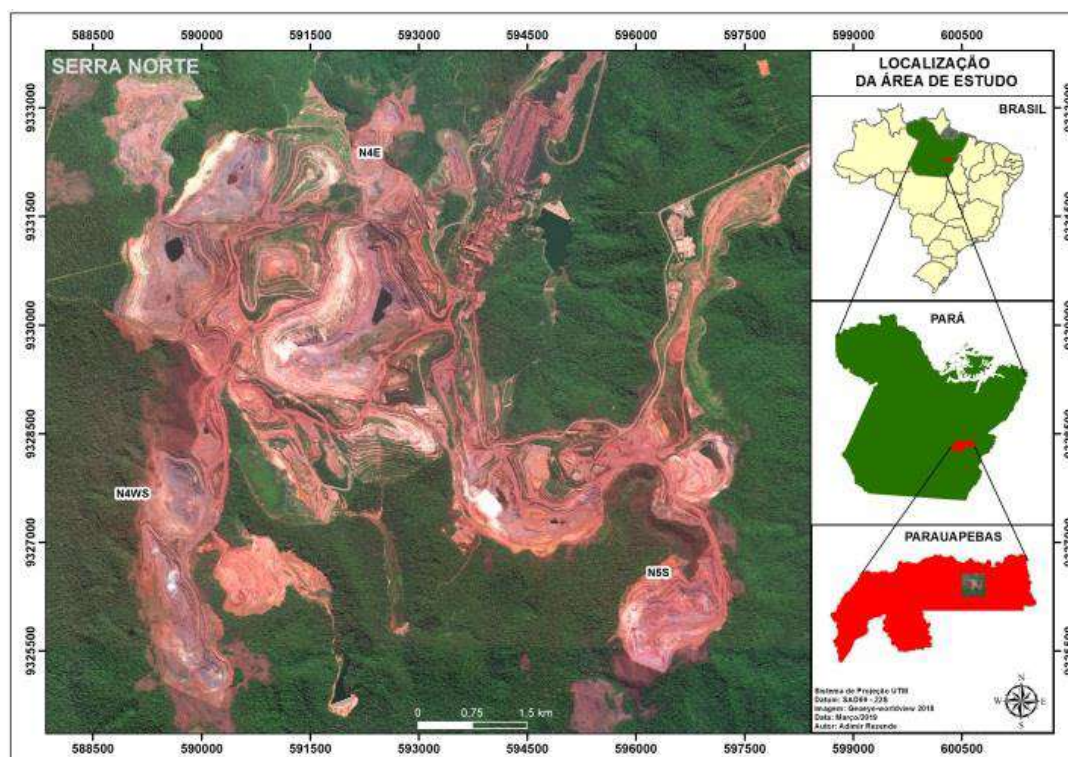
De acordo com a literatura, existem inúmeras variáveis que devem ser consideradas em monitoramentos sismográficos de uma maneira geral, algumas facilmente controláveis (cargas de explosivos, distâncias, posição topográfica e outras) e algumas de controles mais complexos (anisotropia das rochas, aspectos estruturais, graus de intemperismo e outras). Neste trabalho, realizado nas minas de ferro N4 e N5 em Carajás, foram comparadas as matrizes de correlação das variáveis, selecionadas como as mais significativas para o monitoramento sismográfico de cavidades ferríferas. Esta comparação tentou buscar o entendimento de qual (is) a (s) variável (is) que mais influenciavam nas vibrações sismográficas.

Os autores entendem que este estudo poderá contribuir no planejamento de mina e no estabelecimento de planos de fogo mais ajustados à medida que as operações se aproximam dos locais de ocorrência de cavidades.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A região de Carajás está localizada no sudeste do estado do Pará e apresenta um conjunto de serras de topo aplainado (platôs) com altitude média de 650m. Esses platôs se destacam por apresentar uma expressiva ocorrência de cavidades em suas bordas como resultado dos processos de dissecação do

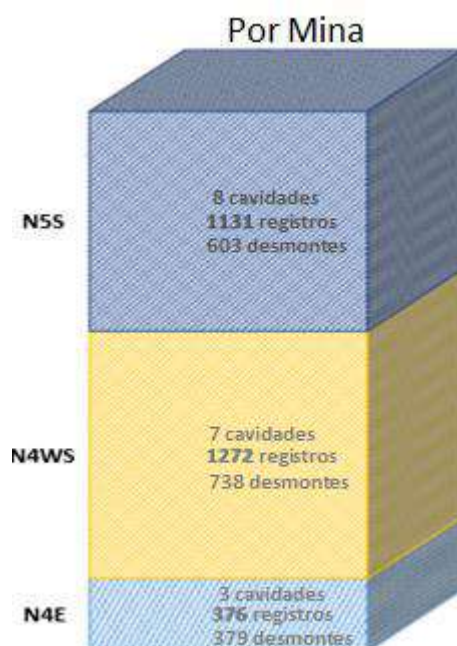
relevo. A área de estudo localiza-se em Serra Norte, mais precisamente nos platôs N4 e N5, em três minas de ferro denominadas N4E, N4WS e N5S, no município de Parauapebas (Figura 1).



**Figura 1:** Localização da área de estudo

### 3. METODOLOGIA

Foram selecionadas 18 cavidades estrategicamente distribuídas pelas 3 minas (8 cavidades em N5S, 7 cavidades em N4WS e 3 cavidades em N4E) para monitoramento sismográfico contínuo, seguindo o critério de maior proximidade das diversas frentes de lavra. Este monitoramento foi efetuado no período de maio de 2014 a novembro de 2017, quando foram obtidos 2.758 registros sismográficos, provenientes de 1.720 desmontes de rocha com uso de explosivos (Figura 2).



**Figura 2:** Distribuição dos dados por mina

Com o uso do software *Blastware*, versão 10.74, (Instantel), foi gerado um sismograma para cada registro sismográfico e selecionada a variável velocidade de vibração de partícula (Vp), como sendo a variável principal a ser correlacionada com as demais variáveis.

Foram utilizados 13 sismógrafos de engenharia, sendo 10 do modelo micromate, da canadense Instantel, e 3 modelos EZ Pluz da americana Geosonics (Figura 3).



**Figura 3:** Sismógrafos utilizados nos estudos

Os sismógrafos utilizados atendem aos requisitos da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT 9653/2018, e possuem sistema de verificação interna por pulso eletrônico (auto checagem), memória para armazenamento de eventos sísmicos, e registra instantaneamente os valores de velocidade de vibração de partícula nas três direções mutuamente perpendiculares, longitudinal/radial, transversal e vertical (L, T, V). As calibrações foram feitas por empresas certificadas, tendo ambos sido configurados para registrarem eventos sísmicos de 0,51 mm/s até 254 mm/s, na faixa de frequência a partir de 2 Hz e 4Hz.

Os sismógrafos foram instalados no interior das cavidades com a fixação dos geofones sempre no teto com uso de gesso, (Figura 4). O uso de gesso, além de provocar menos impacto no local durante a instalação e remoção, testes de laboratório comprovaram que a transmissão da energia é melhor do que a fixação por parafusos (GOULART, 2014). Nesse contexto, a instrução normativa 9653/2018 da ABNT, também orienta para o uso de gesso ou outro material adesivo, para que os sensores fiquem o mais perfeitamente solidário ao meio de propagação.



**Figura 4:** Geofone fixado no teto da cavidade com uso de gesso

### 3.1 VARIÁVEIS SELECIONADAS

Os diversos tipos de variáveis (mais ou menos controláveis), que participam nos resultados de propagação das ondas sísmicas em maciços rochosos são amplamente divulgadas na literatura (Silva, 2012, Opperman et.al., 2015 e Santos Junior, 2017). As variáveis consideradas no presente trabalho

fazem parte desta literatura, e foram selecionadas como as mais significativas para serem acompanhadas durante o longo período de monitoramento.

A partir dos planos de fogo fornecidos pela equipe de desmonte de rochas, foram obtidas as variáveis, carga máxima por espera (CME), carga total (CT) e diâmetro dos furos (Diam). Já as variáveis distância (Distância), área do polígono desmontado (Área), e a cota do local do desmonte (Cota), foram fornecidas pela área de planejamento de mina da mineradora responsável pelas minas de N4 e N5. Na tabela 1 são apresentados detalhes de todas as variáveis deste estudo, as quais serão correlacionadas com a variável sismográfica, Velocidade de Vibração de Partícula (Vp).

**Tabela 1:** Detalhe das variáveis selecionadas

| Sigla            | Descrição                                       | Un             | Forma de Aquisição         | Responsável            |
|------------------|-------------------------------------------------|----------------|----------------------------|------------------------|
| <b>Vp</b>        | Velocidade de partícula resultante              | mm/s           | Sismógrafo                 | Equipe de Espeleologia |
| <b>Distancia</b> | Distância entre a área do desmonte e a cavidade | m              | Calculada com software GIS | Equipe de Espeleologia |
| <b>Area</b>      | Área do polígono de desmonte                    | m <sup>2</sup> | Plano de lavra             | Equipe de Curto Prazo  |
| <b>Cota</b>      | Cota topográfica do desmonte                    | m              | Plano de fogo              | Equipe de Desmonte     |
| <b>CT</b>        | Carga total de explosivos                       | Kg             | Plano de fogo              | Equipe de Desmonte     |
| <b>CME</b>       | Carga máxima por espera                         | Kg             | Plano de fogo              | Equipe de Desmonte     |
| <b>Diam</b>      | Diâmetro dos furos                              | Polegada       | Plano de fogo              | Equipe de Desmonte     |

### 3.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Foram elaboradas matrizes de correlação entre as variáveis envolvidas no monitoramento sismográfico de cavidades, para entendimento de quais delas mais influenciavam a Velocidade de Vibração de Partícula (Vp). Foi utilizada a linha da estatística descritiva pelo coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), amplamente utilizada neste tipo de análise.

Segundo Vargas, 2019, o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) ou coeficiente de correlação produto-momento ou o  $r$  de Pearson mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. É um índice adimensional com valores situados ente -1,0 e 1.0 inclusive, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. Este coeficiente, normalmente representado pela letra " $r$ " assume apenas valores entre -1 e 1.

$r = 1$  Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.

$r = -1$  Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis - Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui.

$r=0$  Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

No entanto, pode existir uma outra dependência que seja "não linear". Assim, o resultado  $r=0$  deve ser investigado por outros meios.

Como parâmetro de interpretação do Coeficiente de Pearson ( $r$ ), foi utilizada a metodologia e classificação desenvolvida por Shimakura (2006), atribuindo um valor qualitativo aos valores numéricos de coeficiente (Figura 5).

| Valor de $\rho$ (+ ou -) | Interpretação              |
|--------------------------|----------------------------|
| 0.00 a 0.19              | Uma correlação bem fraca   |
| 0.20 a 0.39              | Uma correlação fraca       |
| 0.40 a 0.69              | Uma correlação moderada    |
| 0.70 a 0.89              | Uma correlação forte       |
| 0.90 a 1.00              | Uma correlação muito forte |

**Figura 5:** Atribuição de valores qualitativos aos valores numéricos (fonte: Shimakura, 2006)

Todo o tratamento estatístico foi desenvolvido no *software R*, com pacote *corrplot*, que promove uma exibição gráfica e intervalo de confiança, com o método de visualização denominado "*number*".

#### 4. RESULTADOS

Foram geradas cinco matrizes de correlação, para entender o comportamento da velocidade de vibração de partícula em relação as demais variáveis.

A primeira matriz foi elaborada com todo o conjunto de variáveis, considerando todos os desmontes sem limites de distância até as cavidades. Quatro outras matrizes foram geradas segmentadas por faixas de distâncias, em intervalos de 50m, iniciando com os desmontes em 250m, aproximando-se até 50m da cavidade, (250-200m, 200-150m, 150-100m, e 100-50m).

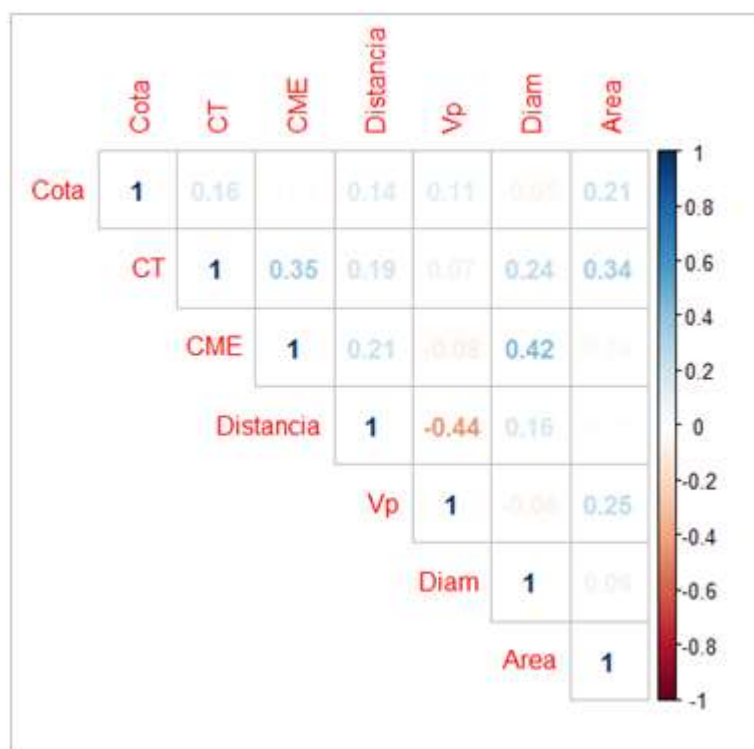
Ressalta-se que a variável distância é considerada entre o centróide do polígono de desmonte, e a localização do ponto de medição, (geofone), instalado na cavidade.

##### 4.1 MATRIZ CONSIDERANDO TODOS OS DESMONTES SEM LIMITE DE DISTÂNCIA DAS CAVIDADES MONITORADAS

Ao realizar essa análise com todas as variáveis de forma integrada, verificou-se que, de uma maneira geral, as correlações são fracas entre si. Olhando-se especificamente para a variável sismográfica; Velocidade Vibração de Partícula ( $V_p$ ), nota-se uma correlação negativa moderada apenas com a

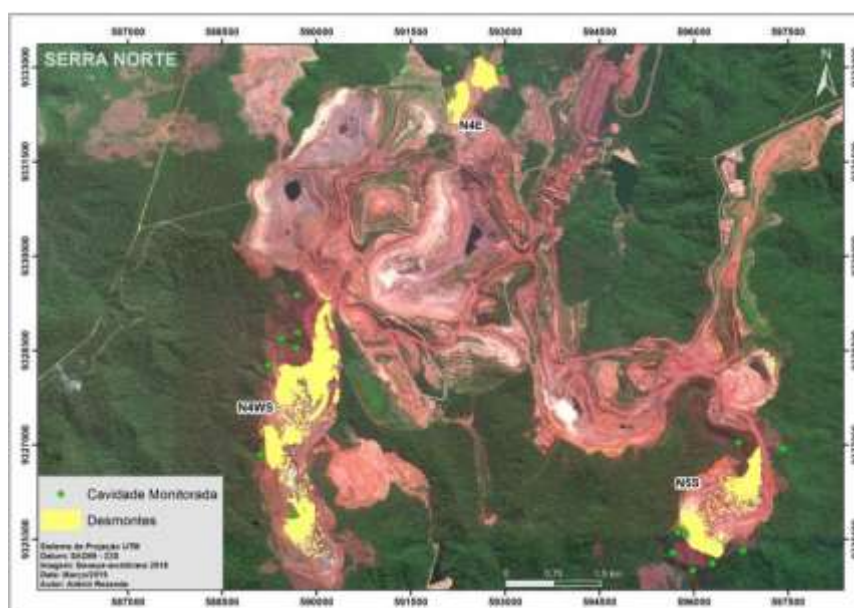
variável distância, coerente com a realidade e com o postulado de que a amplitude de uma onda sísmica decresce com o inverso da distância da fonte”. (IAG - USP, 2019).

A Figura 6 mostra a matriz com as correlações fracas em função da análise de todas as variáveis de forma integrada e sem limite de distância.



**Figura 6:** Matriz de correlação das variáveis analisadas de forma integrada e sem limite de distância. Notar a correlação negativa moderada (-0,44) entre a Velocidade de Vibração de Partícula (Vp) e a Distância.

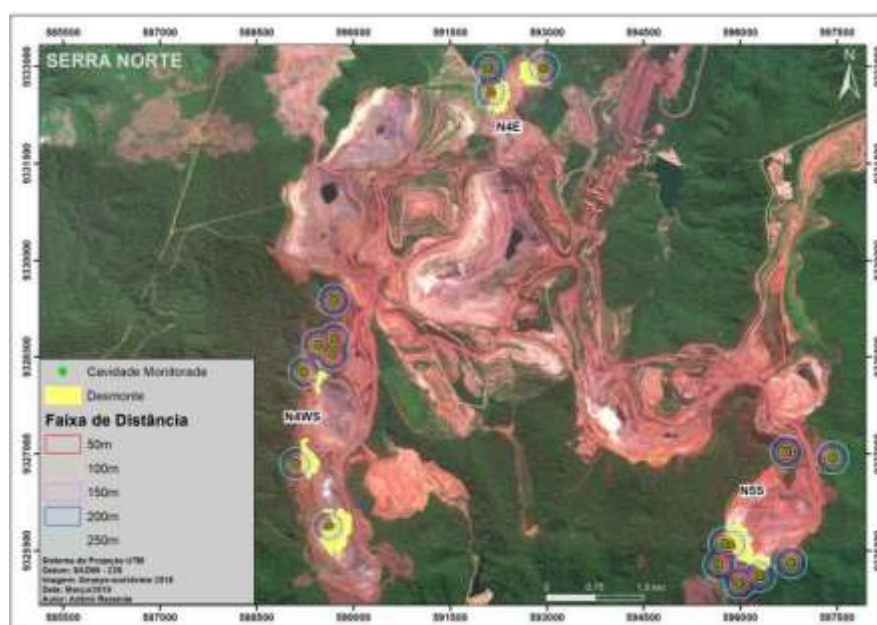
A figura 7 mostra a localização das cavidades monitoradas e os locais dos desmontes sem limites de distâncias.



**Figura 7:** Localização das cavidades monitoradas e os locais dos desmontes sem limites de distâncias.

#### 4.2 MATRIZES CONSIDERANDO APENAS DESMONTES DENTRO DE FAIXAS ENTRE 250 E 50M DAS CAVIDADES MONITORADAS (FAIXAS EM INTERVALOS DE 50M)

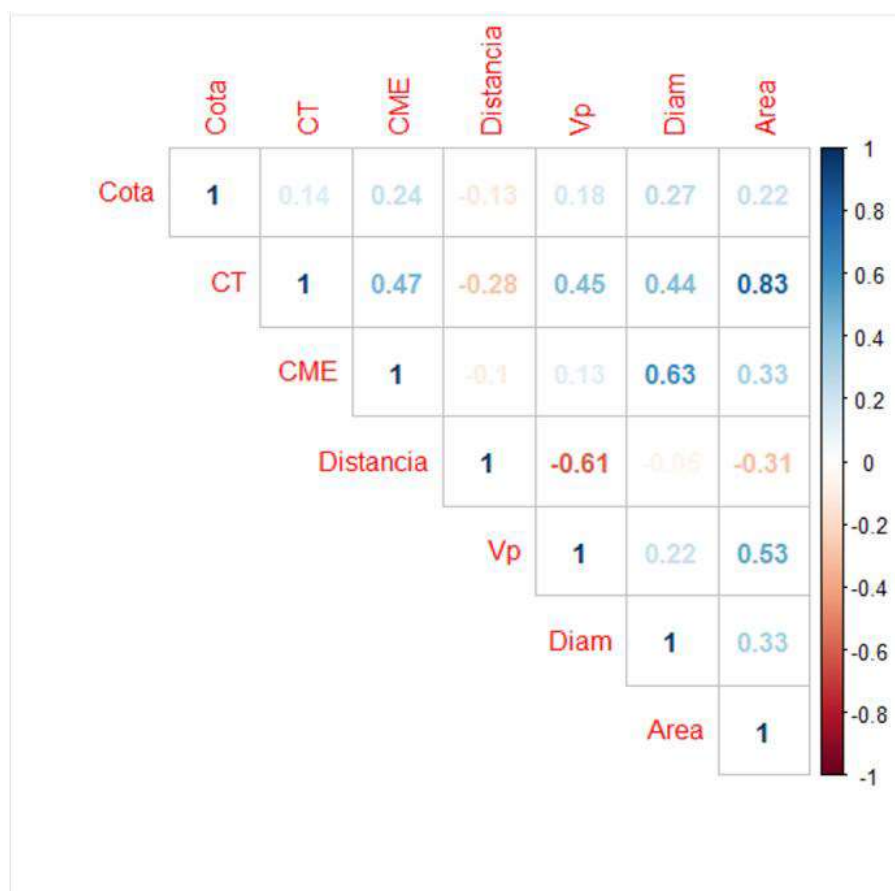
Tendo em vista as correlações fracas observadas entre as variáveis, quando analisadas sem limites de distâncias, entre os desmontes e as cavidades monitoradas, foram então feitas segmentações por faixas de distância, iniciando com os desmontes em 250m, aproximando-se até 50m das cavidades monitoradas (faixas de 250-200m, 200-150m, 150-100m, e 100-50m) (Figura 8).



**Figura 8:** Desmontes dentro das faixas de distância iniciando em 250m até 50m das cavidades monitoradas (faixas de 250-200m, 200-150m, 150-100m, e 100-50m).

#### 4.3 MATRIZ CONSIDERANDO APENAS DESMONTES DENTRO DA FAIXA ENTRE 250 E 200M DAS CAVIDADES MONITORADAS

Ao realizar essa análise com uma menor distância das cavidades (faixa de 250 a 200m), verificou-se que, de uma maneira geral, as correlações melhoraram passando a moderadas entre si. Olhando-se especificamente para a variável sismográfica Velocidade Vibração de Partícula (Vp), nota-se uma correlação igualmente negativa moderada com a variável distância, e uma correlação positiva moderada com a carga total, com este último já demonstrando que a carga total de explosivos passa a interferir levemente nos resultados sismográficos (Figura 9).

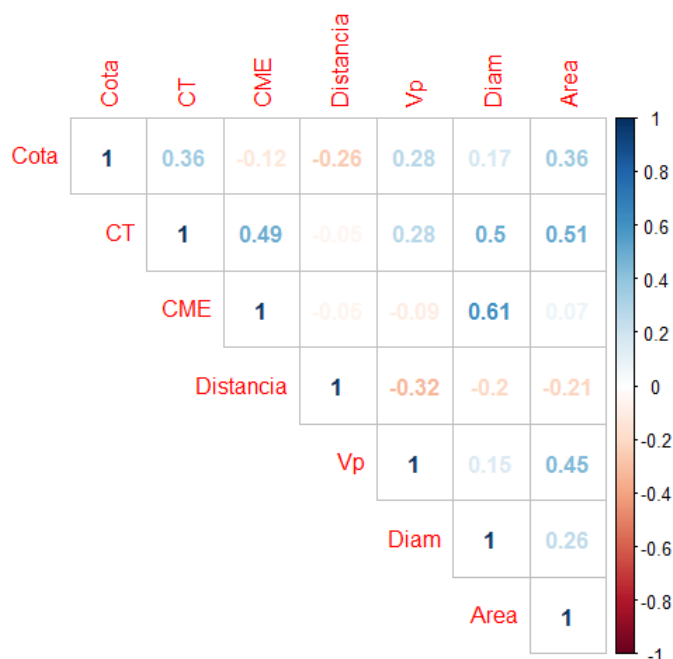


**Figura 9:** Matriz de correlação considerando os desmontes dentro da faixa entre 250 e 200m das cavidades monitoradas. Notar a correlação positiva moderada (0,45) entre a Velocidade de Vibração de Partícula (Vp) e a Carga Total e negativa moderada (-0,61) com a Distância.

#### 4.4 MATRIZ CONSIDERANDO APENAS DESMONTES DENTRO DA FAIXA ENTRE 200 E 150M DAS CAVIDADES MONITORADAS

Ao realizar essa análise com uma menor distância das cavidades, (faixa de 200 a 150m), verificou-se que, de uma maneira geral, as correlações continuam moderadas entre si. Olhando-se

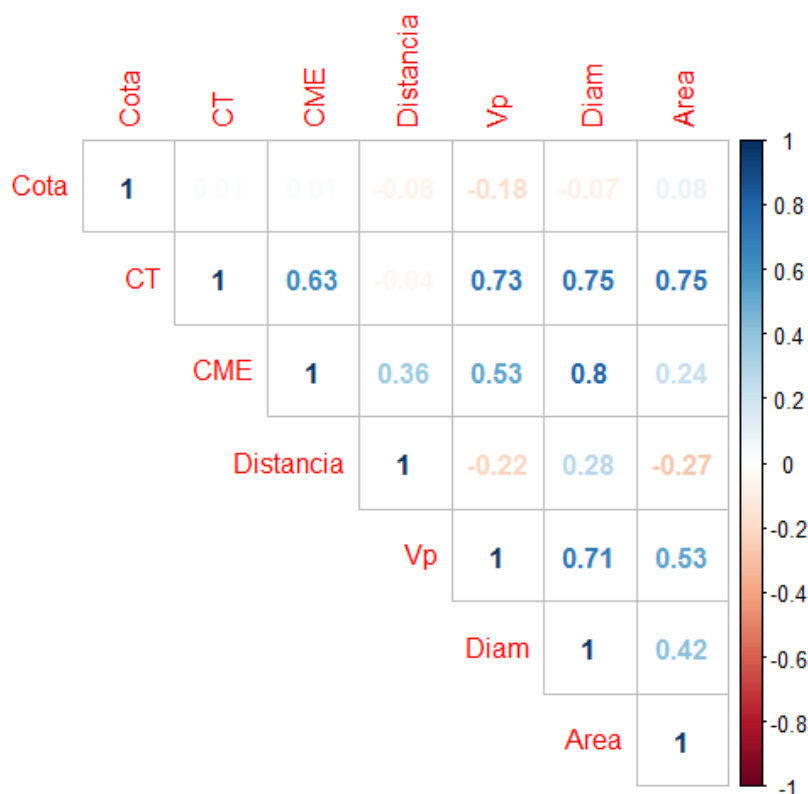
especificamente para a variável sismográfica Velocidade Vibração de Partícula (Vp), nota-se uma correlação voltando a ser fraca, porém mantendo a relação negativa inversa com a variável distância, e uma correlação também fraca direta com carga total (Figura 10).



**Figura 10:** Matriz de correlação considerando os desmontes dentro da faixa entre 200 e 150m das cavidades monitoradas. Notar a correlação negativa fraca (-0,32) entre a Velocidade de Vibração de Partícula (Vp) e a Distância.

#### 4.5 MATRIZ CONSIDERANDO APENAS DESMONTES DENTRO DA FAIXA ENTRE 150 E 100M DAS CAVIDADES MONITORADAS

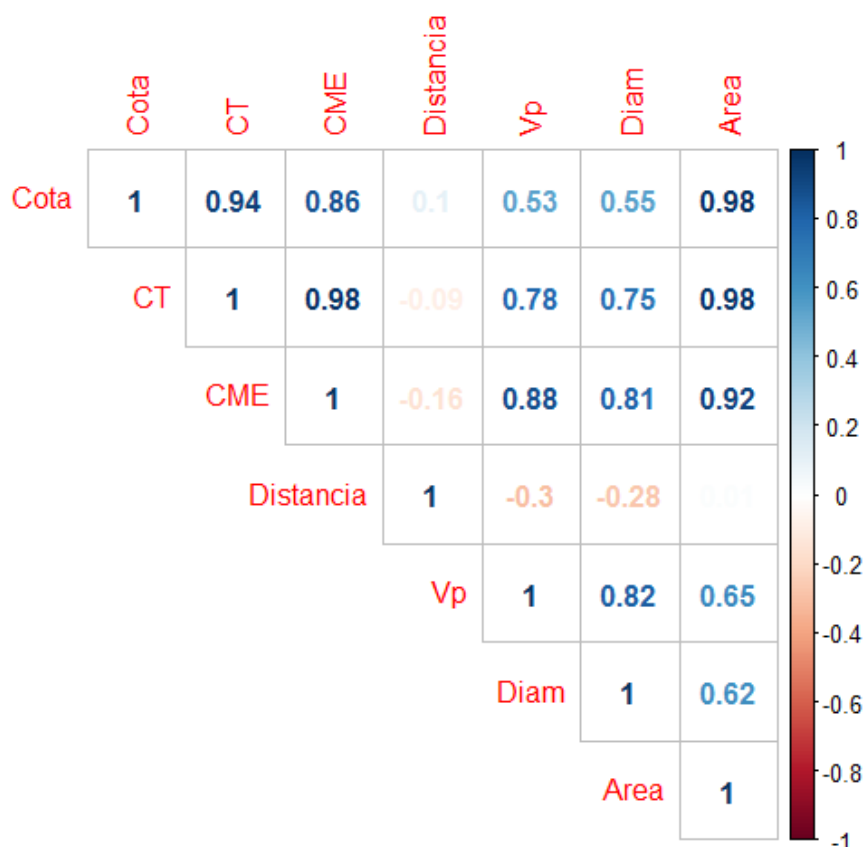
Ao realizar essa análise com uma menor distância das cavidades, (faixa de 150 a 100m) verificou-se que, de uma maneira geral, as correlações melhoraram passando a fortes entre si. Olhando-se especificamente para a variável sismográfica Velocidade Vibração de Partícula (Vp), nota-se uma correlação passando a forte direta com carga total, demonstrando que a carga total de explosivos passa a interferir substancialmente nos resultados sismográficos (Figura 11).



**Figura 11:** Matriz de correlação considerando os desmontes dentro da faixa entre 150 e 100m das cavidades monitoradas. Notar a correlação positiva forte (0,73) entre a Velocidade de Vibração de Partícula (Vp) e a Carga Total e positiva moderada (0,53) com a Carga Máxima por Espera (CME).

#### 4.6 MATRIZ CONSIDERANDO APENAS DESMONTES DENTRO DA FAIXA ENTRE 100 E 50M DAS CAVIDADES MONITORADAS

Ao realizar essa análise com uma menor distância das cavidades, (faixa de 100 a 50m) verificou-se que, de uma maneira geral, as correlações continuam fortes entre si. Olhando-se especificamente para a variável sismográfica Velocidade Vibração de Partícula (Vp), nota-se uma correlação continuando forte direta, porém agora com a Carga Máxima por Espera, demonstrando que a carga por espera de explosivos passa a interferir substancialmente nos resultados sismográficos (Figura 12).



**Figura 12:** Matriz de correlação considerando os desmontes dentro da faixa entre 100 e 50m das cavidades monitoradas. Notar a correlação positiva forte (0,78) entre a Velocidade de Vibração de Partícula (Vp) e a Carga Total e positiva forte (0,88) com a Carga Máxima por Espera (CME).

## 5. CONCLUSÕES

A variável Distância se mostrou como a principal na correlação com os valores da variável Velocidade de Vibração de Partícula (Vp), notando-se uma correlação negativa moderada, coerente com a realidade, que quanto mais distante o desmonte, menor as vibrações sismográficas na cavidade.

Todas as variáveis só mostram boa correlação quando segregadas por faixas de distância. Dentro da faixa de 50 a 100m tem forte correlação. Entre 100 a 150m continua a forte correlação. A partir de 150m em diante as correlações são fracas.

Em relação com a variável Velocidade de Vibração de Partícula (Vp), para distâncias de 50 a 150m, as variáveis Carga Máxima por Espera (CME) e Carga Total (CT) são igualmente importantes, apresentando correlações positivas fortes.

Para distâncias acima de 150m as correlações enfraquecem mantendo-se a variável distância como a mais relevante em relação a variável Velocidade de Vibração de Partícula ( $V_p$ ).

## REFERÊNCIAS

GOULART, K. C. C.; COSTA, J.F.C.L.; KOPPE, J.C.; CATEN, C.T. Influência do Acoplamento de Sismógrafos na Resposta da Vibração de Partículas ou Velocidade de Partículas” UFRGS

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: Contribuição Técnica à Análise de Estudos Ambientais / Marcos Pinho. [et al.] – Brasília: ICMBio, 2016. 47 p. ; Il. Color. ISBN 978 -85-61842-63-5

ICMBIO - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais/ Marcos Pinho. [et al.] – Brasília: ICMBio, 2016. 47 p. ; Il. Color. ISBN 978 -85-61842-63-5

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 347, de 10 de setembro 2004. Dispõe sobre a proteção do Patrimônio Espeleológico. Diário Oficial da União, 13 de setembro de 2004. Disponível em: < 171 <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452>>. Acessado em: 09 mar. 2019.

MINITAB, Minitab Statistical Software, Release 13. User`s Guide 1/2 USA:2000.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9653:2018. Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

OPPERMANN, J. P. Z.; SCHAARCHMIDT, R.G.; MENDONÇA, C.S.; VALDEMERI, D.C.; MUNARETTI, E. Redução de Vibrações em Áreas de Baixa Frequência na Pedreira E.V. - Estância Velha RS. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Ambiental, Bento Gonçalves, RS, Maio de 2015. 09 pág.

VALE S.A., Relatório Consolidado de Monitoramento Sismográfico. Plano Básico Ambiental Consolidado Complexo Minerador Ferro Carajás. Pará, Dezembro de 2018.

SANTOS JUNIOR, E. J. Modelagem Estocástica Aplicada na Estimativa do Raio de Proteção de Cavidades Naturais Subterrâneas. Ouro Preto, MG, 2017. 117 pág.

SILVA, T. C. Avaliação da Carga Máxima por Espera Através de Lei de Atenuação Visando a Minimização de Danos Decorrentes das Operações de Desmonte de Rochas nas Escavações da Arena Pernambuco. Recife, PE, 2012. 143 pág.

IAG - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Sismologia e Ondas Sísmicas. Disponível em <[www.iag.usp.br/~eder](http://www.iag.usp.br/~eder)>

Sismologia\_f. - Acessado em: 15 mar. 2019.

SHIMAKURA, S.E. Correlação. In: CE003 - Estatística II.Paraná: Dep. de Estatística da Universidade Federal do Paraná: 71-78p. 2006.

VALE S.A, Programa de Gestão Espeleológica (Terceira Revisão). Plano Básico Ambiental Consolidado Complexo Minerador Ferro Carajás. Junho de 2015.

VALENTIM, R.F.; OLIVITO, J. P. R. Unidade Espeleológica Carajás: Delimitação dos Enfoques Regional e Local, Conforme Metodologia da IN-02/2009 MMA. VALE S.A - Gerência de Espeleologia e Tecnologia, Belo Horizonte - MG, 2011.

VARGAS, V. C. C. Correlação. UFSC, Disponível

em<[http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Correlacao/Correlacao\\_Pearson\\_Spearman\\_Kendall.pdf](http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Correlacao/Correlacao_Pearson_Spearman_Kendall.pdf).  
Acessado em: 27 mar. 2019.

# TÓPICOS EM ESPELEOLOGIA



[conhecimentolivre.org/home](http://conhecimentolivre.org/home)



[contato@conhecimentolivre.org](mailto:contato@conhecimentolivre.org)



[editoraconhecimentolivre](#)



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE