

LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E A CONSERVAÇÃO DAS CAVERNAS NO BRASIL SOB O OLHAR DA MICROBIOLOGIA

ENVIRONMENTAL LEGISLATION AND BRAZILIAN CAVE CONSERVATION UNDER THE MICROBIOLOGY SIGH

Caio César Pires de Paula; Maria Elina Bichuette; Mirna Helena Regali Seleglim

Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR). Departamento de Ecologia e Biologia Evolutiva. Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais. São Carlos SP.

Contatos: piresdepaula@yahoo.com.br; lina.cave@gmail.com; seleglim@uol.com.br.

Resumo

Diante da atual legislação ambiental brasileira, em conjunto com a fraca fiscalização, o patrimônio espeleológico do país está em constante risco de ser impactado ou suprimido. O Decreto 6640/2008 trata do uso dos ambientes naturais subterrâneos, determinando a relevâncias das cavernas a serem protegidas ou impactadas/suprimidas. As Instruções Normativas 02/2009 e 02/2017, que regulamentam este decreto, é baseada em metodologias que não abrangem a complexidade dos sistemas biológicos subterrâneos. Os indicadores ambientais exigidos foram escolhidos sem um estudo profundo da sensibilidade de tais parâmetros em um ambiente singular como o subterrâneo. Nessas Instruções Normativas não são exigidos estudos da comunidade microbiana e do ciclo de nutrientes. Entretanto, a microbiota subterrânea possui um papel fundamental na dinâmica ecológica, além de apresentarem um grande potencial em abrigar novas espécies e possivelmente produtores de novos medicamentos e produtos biotecnológicos. Estudos que considerem a biomassa microbiana, diversidade taxonômica e funcional dessa microbiota e redes de interações microbianas, podem ser bons indicadores biológicos sobre o status ambiental de uma caverna. Incluir parâmetros microbiológicos no estudo do habitat cavernícola, permitiria a conservação de relações ecológicas como as redes tróficas, que suportam comunidades, a ciclagem de nutrientes e o funcionamento ecológico do ambiente subterrâneo.

Palavras-Chave: ambiente subterrâneo; microrganismos; cavernas e indicadores microbiológicos.

Abstract

Current Brazilian environmental legislation, coupled with weak enforcement, makes the country's speleological heritage at a constant risk of being impacted or suppressed. Decree 6640/2008 deals the use of natural subterranean environments, determining the relevance of the caves to be protected or impacted / suppressed. Normative Instructions 02/2009 and 02/2017, which regulate this decree, are based on methodologies that do not cover the complexity of subterranean biological systems. Required environmental indicators were chosen without an in-depth study of the sensitivity of such parameters in a singular environment such as the subterranean. These Normative Instructions do not require studies of the microbial community and nutrient cycle. However, the subterranean microbiota plays a fundamental role in ecological dynamics, as well as having great potential to house new species and possibly producers of new drugs and biotechnological products. Studies that consider microbial biomass, taxonomic and functional diversity of this microbiota and networks of microbial interactions, can be good biological indicators on the environmental status of the caves. Including microbiological parameters in cave studies, would allow the conservation of ecological relations such as trophic networks, which support communities, nutrient cycling and ecological functioning of the underground environment.

Key-Words: *subterranean environment; microorganisms; caves and microbiological indicators.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui um território com um enorme potencial espeleológico, considerando tanto as áreas cársticas quanto não cársticas. As paisagens cársticas geralmente são caracterizadas como áreas onde ocorre o intemperismo químico, por meio da

dissolução da rocha matriz (FORD; WILLIAMS, 1989; JONES et al., 2003). As cavernas localizadas em áreas cársticas podem estar presentes em diferentes litologias, não limitando apenas às rochas carbonáticas. As cavernas também podem ser encontradas em rochas como arenitos, quartzitos,

gnaisse, micaxistos, basaltos, formações ferruginosas e rochas vulcânicas alcalinas (TRAVASSOS, 2014). Em litologias não carbonáticas a gênese da caverna não é seguramente relacionada à processos de dissolução, pois nas cavernas em rochas siliclásticas, por exemplo, predominam os processos mecânicos (FREIRE et al., 2017).

Aproximadamente 2.368.000 km² do território brasileiro (cerca de 2.8% da área nacional) é coberto por afloramentos de rochas carbonáticas (SALLUN-FILHO; KARMANN, 2012). O carste brasileiro é caracterizado por regiões extensas, áreas amplas de calcário horizontal, os quais apresentam sistemas de drenagem com rios de baixo gradiente. Além disso, o carste pode ser dividido em três zonas: exocarste (ou zona externa), epicarste (ou zona de contato da rocha com o solo) e endocarste (ou zona subterrânea) (FORD; WILLIAMS, 1989; JONES et al., 2003). Nessa divisão as cavernas são encontradas no endocarste e são consideradas habitats que compõe parte do ecossistema subterrâneo.

Apesar da atuação da comunidade espeleológica brasileira desde 1935 - com a fundação do primeiro grupo de espeleologia da América Latina, em Ouro Preto (MG), por influência dos estudantes franceses da Escola de Engenharia de Minas (LE BRET, 1995) - a proteção das cavernas em termos jurídicos, surgiu muito posteriormente. Até o ano de 1987 não existiam instrumentos legais específicos sobre a proteção dos habitats cavernícolas, e a partir desse ano, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) instituiu o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, sendo que em 1988 as cavidades naturais subterrâneas foram incluídas na legislação brasileira como patrimônio natural da união (THEULEN; SESSEGOLO, 1990). Em 1990 foi assinado o primeiro Decreto (99.556/1990) que regulamentava a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional e apenas em 1997 o governo brasileiro criou o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), como o órgão oficial de fiscalização e proteção de cavidades, naquela ocasião alocado no IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Em 2009, o CECAV tornou-se parte da estrutura organizacional do ICMBio - Instituto Chico Mendes de

Conservação da Biodiversidade. Até março de 2018, a base de dados do CECAV (CANIE - Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas) apresentava 17.488 cavernas registradas (Figura 1). De todas as registradas, 9.537 (54,53%) estão em rochas carbonáticas, sendo que a maioria não estão localizadas em áreas protegidas (SALLUN-FILHO; KARMANN, 2012). As cavernas carbonáticas estão amplamente distribuídas nas regiões Sudeste (54,80%), Nordeste (19,80%), Centro Oeste (15,60%), Norte (7,50%) e Sul (2,30%) do país. Os estados com o maior número de cavernas registradas são Minas Gerais (4.601 cavernas), Bahia (993 cavernas) e Goiás (869 cavernas). Embora as estimativas cheguem a centenas de milhares de cavernas no Brasil, menos do que 5% são conhecidas (PILÓ; AULER, 2011), evidenciando que o Brasil precisa avançar na prospecção e conhecimento do seu patrimônio espeleológico. A adoção de um modelo de referência, baseado em dados estimados e modelos matemáticos, tem sido sugerida por pesquisadores para a avaliação do potencial espeleológico no Brasil. Este modelo considera a relação entre o número de cavernas conhecidas nas principais litologias em conjunto com o provável potencial espeleológico ainda não conhecido nessas litologias. Usando este modelo, o número de cavidades carbonáticas no Brasil ultrapassaria 150.000 cavidades naturais subterrâneas (SALLUN-FILHO; KARMANN 2012).

Paralelamente, a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) possui outra base de dados (CNC - Cadastro Nacional de Cavernas) que possui 6.660 cavernas registradas. Dentre esses registros, cerca de 4.283 cavernas (64,30%) estão em rochas carbonáticas. Existem diferenças no número de cavernas registradas nas bases de dados (CANIE e CNC). O CNC, por exemplo, permite alterar e excluir cavernas, inserir informações geomorfológicas e localização geográfica. Por outro lado, os dados do CECAV são obtidos em outras bases de dados (SBE / CNC e a extinta Redespeleo / Codex), e a migração de dados trouxe alguns erros. Por exemplo, uma mesma caverna podia ser registrada mais de uma vez com nomes diferentes. A adoção da validação de dados em campo auxiliou nas dúvidas, trabalho que vem sendo realizado há alguns anos pela equipe do CECAV.

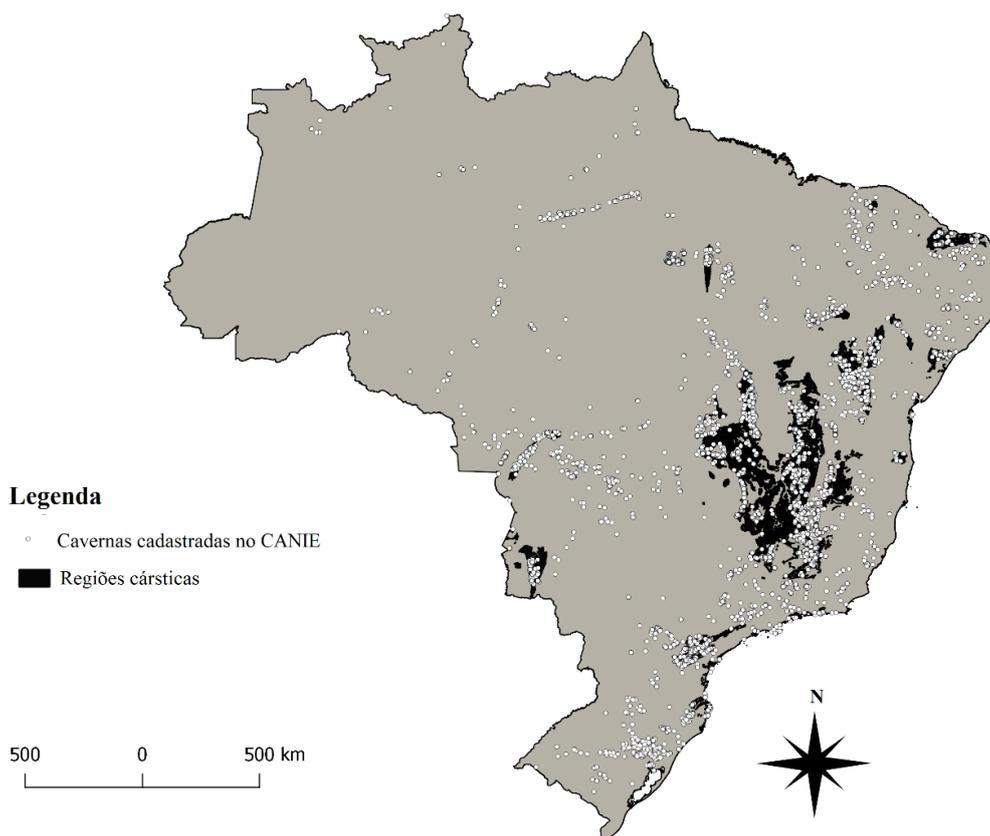


Figura 1. Mapa do Brasil destacando as áreas cársticas (áreas em preto) e as cavidades (pontos cinza) registradas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE).

2. A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E A CONSERVAÇÃO DAS CAVERNAS BRASILEIRAS

Em 1980, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) começou a elaborar normas e leis visando preservar o patrimônio espeleológico no Brasil, e desde então, diversos instrumentos regulatórios foram instituídos. Em 1988, prescrito pelo Decreto 99556/1990, a proteção do patrimônio espeleológico foi incluída na Constituição Federal definindo cavernas como patrimônio cultural, garantindo sua proteção e preservação ambiental para a atual e futuras gerações (BRASIL, 1988). Em 2008, o Decreto 6640, seguido pela Instrução Normativa MMA n° 02/2009 e atualizada pela Instrução Normativa MMA n° 02/2017, estabeleceram uma classificação das cavernas dentro de níveis de relevância, de acordo com critérios baseados na presença de atributos únicos (BRASIL, 2008). A legislação brasileira determina cerca de 70 parâmetros que devem ser considerados durante a avaliação da significância das cavernas. Esses parâmetros requerem estudos em diversas áreas, como geologia, antropologia e bioespeleologia. Quatro classes de relevância das cavernas foram designadas: cavernas de *Máxima Relevância* devem ser protegidas com uma zona de amortecimento de 250 metros, em situações que há falta de estudos

objetivos que permitam um ajuste da zona de amortecimento; cavernas de *Alta Relevância* podem ser impactadas, desde que duas cavernas similares e com igual significância (preferencialmente na mesma unidade geológica) sejam permanentemente protegidas; cavernas *Média Relevância* podem ser impactadas, mas é exigida uma compensação espeleológica, e cavernas de *Baixa Relevância* podem ser impactadas sem a necessidade de uma compensação ambiental (AULER; PILÓ, 2015, AULER et al., 2018).

A pesquisa em áreas subterrâneas brasileiras teve um avanço significativo nas últimas décadas, devido ao aumento do número de pesquisadores e pelas descobertas na pesquisa espeleológica, o qual ocorreu de forma mais intensa em determinadas cavernas e regiões. Têm sido frequentemente estudadas, as cavernas do Alto do Ribeira, no estado de São Paulo e Paraná; diversas áreas cársticas no estado de Minas Gerais (Peruaçu/Itacarambi, Cordisburgo), Bahia (Chapada Diamantina), Mato Grosso do Sul (Serra da Bodoquena e Bonito) e Goiás (São Domingos) (TRAJANO; BICHUETTE, 2010). Muitas dessas áreas cársticas são classificadas como Área Subterrânea de Alta Biodiversidade (GALLÃO; BICHUETTE, 2015). Todos os anos novas informações sobre a ecologia

das cavernas brasileiras destacam as suas singularidades e a importância de sua conservação.

Espeleólogos brasileiros têm criticado os critérios e as normas impostas pela legislação ambiental nacional, argumentando que os mesmos são incompletos/inadequados para precisamente classificar a relevância das cavidades subterrâneas e possibilitar sua conservação. A falta de fiscalização em áreas protegidas e o uso adequado dos habitats cavernícolas em atividades comerciais, como o turismo e extração mineral, também comprometem a sua conservação. Apesar de requerer estudos bioespeleológicos, as Instruções Normativas, que regulamentam a classificação das cavernas, não exigem estudos da microbiota e da ciclagem de nutrientes em ambientes subterrâneos (PAULA et al., 2016). Considerando a importância da microbiota na manutenção do equilíbrio do ecossistema subterrâneo, o uso de parâmetros microbianos em estudos espeleológicos pode contribuir na discussão sobre o fluxo energético e de nutrientes nos habitats cavernícolas.

3. A VIDA MICROBIANA EM CAVERNAS

Uma considerável diversidade de microrganismos pode ser encontrada em cavernas. Dentre eles podemos observar fungos filamentosos (principalmente em decorrência da alta umidade destes locais e temperatura praticamente estável); bactérias heterotróficas (que exigem compostos orgânicos de carbono e nitrogênio como fontes de energia) e bactérias autotróficas (que utilizam exclusivamente o CO₂ como fonte de carbono ou oxidam substâncias minerais como única fonte de energia para o seu desenvolvimento) (NORTHUP; LAVOIE, 2001; NOVÁKOVÁ, 2009; JURADO et al., 2010). A vida subterrânea é suportada por atividade fotossintética apenas na entrada da caverna e, em alguns casos, nas zonas de penumbra, onde a luz solar ainda consegue penetrar. Alternativas para a fixação de carbono em cavernas incluem quimioautotrofia e quimiolitotrofia pela oxidação de amônio, nitrito, enxofre, manganês ou ferro (NORTHUP; LAVOIE, 2001). Evidências indicam que esses microrganismos podem sustentar ecossistemas subterrâneos por meio da produção primária quimioautotrófica. Por outro lado, os microrganismos decompositores são responsáveis por processarem a matéria orgânica depositada nos condutos das cavernas, constituindo assim a base das cadeias alimentares detritívoras e suprindo os ciclos biogeoquímicos (WU et al., 2015).

As comunidades microbianas em cavernas podem ser observadas como colônias ou filamentos

na superfície das rochas; ou em camadas de biofilme em rochas e poças de água (Figura 2). No entanto, pouco é conhecido sobre a distribuição, dinâmica populacional e bioquímica dos microrganismos em cavernas (NORTHUP; LAVOIE, 2004; BARTON; JURADO, 2007). Nas últimas décadas espécies microbianas nunca antes descritas têm sido reveladas por pesquisas em habitats subterrâneos. Todos os estudos microbiológicos em cavernas brasileiras utilizaram técnicas dependentes de cultivo, com as quais se avalia obter cerca de 1% do total de microrganismos (MANDAL et al., 2014). Nos últimos anos foram desenvolvidos novos métodos para detectar os microrganismos no ambiente. As ferramentas moleculares, como a eletroforese em gel de gradiente desnaturante (DGGE) e as bibliotecas de clones, foram usadas por muitos pesquisadores para caracterizar microrganismos não cultiváveis (AETU et al., 2012). No entanto essas ferramentas não fornecem uma boa cobertura de toda a diversidade microbiana. Desde o surgimento do Sequenciamento de Nova Geração (NGS), o pool genético presente no ambiente pode ser sequenciado e avaliado, corroborando para uma ampla descrição da comunidade microbiana, além de possibilitar inferências sobre a sua diversidade funcional avaliando a presença de genes específicos previamente descritos na literatura científica (THOMAS et al., 2012).

Poucos estudos no mundo têm avaliado as comunidades microbianas em cavernas utilizando ferramentas de NGS, como o sequenciamento da região 16S rRNA que analisa a comunidade bacteriana (BARTON; NORTHUP, 2007; ORTIZ et al., 2014). No Brasil as pesquisas microbiológicas em cavernas são ainda mais incipientes (PAULA et al., 2016). O uso de métodos biomoleculares permite o acesso à diversidade microbiana não cultivável e aqueles táxons não descritos taxonomicamente. Algumas dessas novas espécies podem produzir compostos de uso biomédico e biotecnológico, tais como novos antibióticos (CHEEPHAN, 2012). Recentes estudos mostraram a comunidade microbiana subterrânea como uma importante fonte de substâncias orgânicas e como principais organismos nas vias metabólicas do ambiente, tais como fixação de CO₂ e N₂ (TETU et al. 2013, ORTIZ et al. 2014). Estudos geomicrobiológicos e da biodiversidade microbiana podem também auxiliar nosso conhecimento em como detectar vida em outros planetas, como Marte, devido as condições ambientais similares encontradas em algumas cavernas (BOSTON et al., 2001; BARTON; NORTHUP, 2007).



Figura 2. Aspecto macroscópico de diferentes comunidades microbianas em cavernas: (A) colônias - na caverna Revolucionários, Goiás; (B) filamentos e corpos de frutificação – na caverna Olhos D’água, Mina Gerais e (C) biofilme (setas) – caverna Toca do Charco, Minas Gerais.

Sabe-se que os microrganismos possuem um papel ecológico chave no ambiente subterrâneo por constituírem a base das cadeias alimentares. Além disso, atuam diretamente na ciclagem de nutrientes e nos fluxos energéticos (como os microrganismos saprofíticos que atuam na decomposição da matéria orgânica e algumas espécies produtoras primárias por meio da quimioautotrofia). Portanto, conhecer a comunidade microbiana e todos os processos que estes participam permitiria entendermos melhor a dinâmica ecológica em um ambiente subterrâneo. Essas informações poderiam ser muito úteis para avaliar previamente a fragilidade e singularidade de cada caverna. Além de possuir uma biodiversidade subestimada e praticamente desconhecida, a microbiota pode ser impactada por ações antrópicas e/ou explorações comerciais e, por consequência, alterar o fluxo energético e de nutrientes nos ambientes subterrâneos.

4. CONSERVAÇÃO MICROBIANA EM HABITAT CAVERNÍCOLA

As comunidades microbianas podem ser ameaçadas por uma gama de impactos no habitat cavernícola, tais como: enriquecimento de carbono orgânico nas trilhas turísticas (CHELIUS et al., 2009), compactação do sedimento (NORTHUP, 2011), importação de microrganismos exóticos associados com a visita humana (SHAPIRO, PRINGLE, 2010), presença de luz artificial (SMITH, OLSON, 2007), uso inapropriado de agroquímicos nos sistemas de bacias de drenagem, entre outros (NORTHUP, 2011; EPURE; BORDA, 2014).

Pesquisas atuais, no Brasil e no mundo, enfatizam a crucial importância das comunidades microbianas nas cavernas e sugerem que a sua conservação é vital para os ambientes subterrâneos. Um bom exemplo a ser citado é a caverna Lascaux, na França, a qual abriga algumas das mais

impressionantes pinturas rupestres do mundo todo (Figura 3). A interferência humana na caverna Lascaux, como escavações e turismo em massa, alteraram as relações tróficas estabelecidas entre bactérias, fungos e artrópodes e, por conseguinte, as dinâmicas populacionais desses organismos. O uso de luz artificial na caverna Lascaux, por exemplo, foi responsável pelo crescimento de um biofilme verde, composto majoritariamente pela alga *Chlorobotrys* (LEFÉVRE, 1974). Esse foi um dos primeiros relatos sobre alterações da microbiota, devido às interferências antrópicas no habitat cavernícola, afetando a dinâmica ecológica do ambiente (veja outros exemplos em ALLEMAND, 2003; ORIAL, MERTZ, 2006; BASTIAN et al., 2010). Tais mudanças na dinâmica ecológica microbiana da caverna Lascaux causaram danos nas pinturas rupestres, devido à falta de controle da visitação turística e ausência de um plano de manejo, acarretando no fechamento da caverna afim de proteger as pinturas históricas, reconstituir a comunidade microbiana cavernícola natural e mitigar os impactos causados pelo turismo (BASTIAN et al., 2010).

No caso da caverna Lascaux, como diversas cavernas brasileiras que possuem importância histórica, possivelmente a preservação da comunidade microbiana é necessária para a preservação de registros e vestígios das comunidades homínidas do passado. No entanto, o que dizer das cavernas menos conhecidas por esse valor histórico? Como preservar as interações entre organismos que não são visíveis a olho nu e conservar a dinâmica ecológica de uma caverna? É difícil elaborar meios de proteção para organismos que não são visíveis e sensibilizar a sociedade sobre a importância dessa vida microbiana em ambientes mais sensíveis às mudanças ambientais, como os habitats cavernícolas. Assim, ao invés de discutir a criação de medidas conservacionistas para as comunidades microbianas, alguns parâmetros microbianos podem ser utilizados para indicar a

relevância e estado de conservação dos ambientes subterrâneos. Dentre os diversos parâmetros utilizados como indicadores microbianos, podemos citar a biomassa microbiana, detecção de genes funcionais no ambientes, diversidade taxonômica e funcional e análises de redes ecológicas microbianas.

Nos Estados Unidos, a presença e abundância de algumas espécies bacterianas (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* e *Bacillus* spp.) são utilizadas como bioindicadores em cavernas americanas impactadas pelas atividades turísticas (LAVOIE, NORTHUP, 2006). Já no continente europeu, a caverna Altamira (Figura 3), localizada na Espanha, precisou ser fechada para todas as atividades exploratórias em 2002. Devido ao aumento do aporte de matéria orgânica pelas atividades turísticas, a contaminação da água de infiltração pelos centros urbanos localizados no entorno da caverna e a instalação de luz artificial no interior da mesma, houve um crescimento acelerado de alguns gêneros de fungos, principalmente *Fusarium* sp., e alguns microrganismos fotossintetizantes. Após o fechamento da caverna observou-se um decréscimo na concentração de matéria orgânica e compostos nitrogenados nas águas de infiltração, oriundas principalmente das áreas urbanizadas localizadas no entorno da caverna, e um maior controle da vegetação nativa na área epígea, bem como o restabelecimento da microbiota subterrânea natural (SAIZ-JIMENEZ et al., 2011). No Brasil um estudo recente demonstrou por meio de microcosmos que mudanças na concentração de matérias orgânica em sedimentos cavernícolas altera a abundância das populações de fungos considerados oportunistas, ou seja, aqueles com crescimento acelerado e rápido consumo da matéria orgânica lábil (MARQUES et al., 2016). Outras espécies de

fungos encontradas em cavernas são *Pseudogymnoascus destructans* e *Histoplasma capsulatum*, agentes patogênicos da Síndrome do Nariz Branco (SNB) em morcegos e Histoplasmose em humanos, respectivamente. Apesar de serem os fungos patogênicos mais conhecidos em cavernas, outras espécies de fungos podem se tornar prejudiciais à saúde humana, caso apresentem uma grande concentração de esporos no ambiente (BISWAS, BISWAS, 2017). Esses exemplos evidenciam a importância de estudos microbiológicos no monitoramento ambiental das cavernas exploradas comercialmente. As comunidades microbianas e seus parâmetros deveriam ser monitorados periodicamente visando a detecção de desequilíbrios populacionais de determinados grupos microbianos; e possibilitando o acompanhamento da qualidade do ambiente subterrâneo, de forma rápida e acurada.

Estudos recentes têm demonstrado o uso das redes ecológicas microbianas como uma ferramenta eficiente para realizar o diagnóstico ambiental e inferir a relevância ecológica de uma área (BISSET et al., 2013; RÖLING et al., 2014; SAUVADET et al., 2016; KARIMI et al., 2017). Ao contrário das redes tróficas, o uso das redes ecológicas de co-ocorrência fornece uma visão integrada de todas as relações existentes entre a comunidade microbiana e uma matriz ambiental (KARIMI et al., 2017). De forma resumida, a combinação de todas essas interações pode levar à relação evolutiva conjunta dos organismos no ambiente (sendo denominada uma relação positiva conhecida como co-ocorrência), uma relação evolutiva oposta (relação negativa conhecida como co-exclusão) ou pode ocorrer a ausência de interações, ou interação nula (GROSS, 2008).



Figura 3. Imagens das pinturas rupestres observadas na (A) caverna Lascaux, França (BASTIAN et al., 2010); (B) caverna Altamira, Espanha (SAIZ-JIMENEZ et al., 2011); (C) Gruta do Janelão, Minas Gerais, Brasil.

A análise das redes de co-ocorrência em comunidades microbianas pode ser considerada um preditor da resposta funcional de um ecossistema de acordo com a dinâmica dos componentes da matriz ambiental (BOUCHEZ et al, 2016). A complexidade das redes ecológicas de co-ocorrência está diretamente ligada a resistência das comunidades que serão impactadas (VACHER et al., 2016). Em geral, as redes ecológicas microbianas de co-ocorrência tornam-se menos complexas em ambientes mais impactados. Portanto, a estrutura da rede ecológica microbiana irá refletir processos ecológicos como a decomposição, desnitrificação, produção de biomassa e compostos orgânicos, diversidade taxonômica com uma maior sensibilidade e uma resposta mais rápida às mudanças ambientais.

No habitat cavernícola o uso das redes microbianas de co-ocorrência pode ser uma ótima ferramenta para auxiliar o monitoramento ambiental, respondendo de forma rápida e eficiente às mudanças que afetam as comunidades subterrâneas, ou como um método adicional para inferir o grau de significância das cavernas, conforme as categorias estabelecidas pelo Decreto 6640. O desenvolvimento de estudos microbiológicos em cavernas em conjunto com a fauna subterrânea, abrangendo diversas litologias, poderiam identificar a existência de táxons microbianos que co-ocorrem na presença de espécies subterrâneas troglóbias ou ainda evidenciar os habitats que possuem redes de interações mais frágeis do ponto de vista ecológico. A partir de relações robustas entre a microbiota e a fauna subterrânea, as cavernas poderiam ser diagnosticadas e monitoradas em um menor tempo e com uma maior precisão em relação às mudanças ambientais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conservação efetiva dos ambientes subterrâneos necessita de uma legislação ambiental condizente com os seus objetivos e testes de metodologia, ampliando as análises para universos distintos e complexos que fazem parte do funcionamento deste intrínseco ecossistema. Apesar dos esforços em diversas áreas da ciência em caracterizar o ambiente subterrâneo, a legislação brasileira não cita em nenhum regulamento o uso de estudos e pesquisas microbianas como uma ferramenta para auxiliar o diagnóstico e o monitoramento do habitat cavernícola. Caso os microrganismos de uma caverna fossem percebidos como organismos chaves na manutenção das comunidades subterrâneas, potencialmente patogênicos, ou até mesmo fontes de novos

fármacos para tratamento de doenças, a sociedade, os cientistas e o governo estariam mais dispostos a discutir a conservação e o manejo de comunidades microbianas nesses ambientes. Um dos exemplos de esforços feitos na conservação de microrganismos cavernícolas foi a criação do IDEC (Imagery Data Extraction Collaborative) por pesquisadores da Universidade do Novo México. O IDEC é um programa educacional sobre microrganismos cavernícolas, estimulando, envolvendo e educando os visitantes, com discussões sobre o papel desses organismos no ambiente subterrâneo e como se dá a conservação das comunidades microbianas nesses habitats (NORTHUP, 2011). Portanto umas das maneiras mais simples de aprofundar o conhecimento sobre a microbiota cavernícola, e consequentemente da fauna subterrânea como um todo, é conduzindo pesquisas mais aprofundadas sobre os impactos que afetam as comunidades microbianas em cavernas e medidas de conservação eficientes afim de garantir o equilíbrio das relações ecológicas nesse ambiente. Essas informações podem ser úteis para educar os visitantes das cavernas sobre problemas e soluções que cercam o patrimônio espeleológico brasileiro, e ajudar o governo e os administradores das unidades de conservação a desenvolverem um bom planejamento para o uso e o gerenciamento de cavernas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processos 2008/05678-7, 2010/08459-4 e 2015/24763-9), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 303715/2011-1, 308557/2014-0 e 310378/2017-6; PROJETO UNIVERSAL-457413/2014-0) pelo financiamento e suporte aos projetos vinculado a este trabalho. Aos órgãos ambientais pela permissão de coleta que subsidiaram parte deste trabalho: Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (SISBIO/ICMBIO); Goiás - Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos (SECIMA). Os autores são gratos ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais pela infraestrutura para desenvolver parte deste trabalho e à Tamires Zepon por conceder o uso da imagem da Figura 2(C).

REFERÊNCIAS

- ADETUTU, E.M.; THORPE, K.; SHAHSAVARI, E.; BOURNE, S.; CAO, X.; FARD, R.M.N.; BALL, A.S. Bacterial community survey sediments at Naracoorte Caves, Australia. **International Journal Speleology**, v.41, n.2, p. 137-147, 2012.
- ALLEMAND, L. Qui sauvera Lascaux? **Recherche**, v.363, p. 26–33, 2003.
- AULER, A.S.; PILÓ, L.B. Caves and mining in Brazil: the dilemma of cave preservation within a mining context. In: **Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- AULER, A.S.; SOUZA, T.A.; SÉ, D.C.; SOARES, G.A. A review and statistical assessment of the criteria for determining cave significance. **Geological Society, London, Special Publications**, v.466, n.1, p. 443-459, 2018.
- BARTON, H.A.; JURADO, V. What's up down there? **Microbial diversity in caves**, 2007.
- BARTON, H.A.; NORTHUP, D.E. Geomicrobiology in cave environments: past, current and future perspectives. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.69, n.1, p.163-178, 2007.
- BASTIAN, F.; JURADO, V.; NOVÁKOVÁ, A.; ALABOUVETTE, C.; SÁIZ-JIMÉNEZ, C. The microbiology of Lascaux cave. **Microbiology**, v.156, n.3, p. 644-652, 2010.
- BISSETT, A.; BROWN, M.V.; SICILIANO, S.D.; THRALL, P.H. Microbial community responses to anthropogenically induced environmental change: towards a systems approach. **Ecology Letters**, v.16, n.1, p.128–139, 2013.
- BISWAS, D.; BISWAS, J. Major Deteriorative, Pathogenic and Beneficial Fungi Reported from Various Subterranean Caves of the World: A Mini Review. **International Journal of Ecosystem**, v.7, n.1, p.11-16, 2017.
- BOSTON, P.J.; SPILDE, M.N.; NORTHUP, D.E.; MELIM, L.A.; SOROKA, D.S.; KLEINA, L.G.; CROSSEY, L.J. Cave biosignature suites: microbes, minerals, and Mars. **Astrobiology**, v.1, n.1, p.25-55, 2001.
- BOUCHEZ, T.; BLIEUX, A.L.; DEQUIEDT, S.; DOMAIZON, I.; DUFRESNE, A.; FERREIRA, S.; GODON, J.J.; HELLAL, J.; JOULIAN, C.; QUAISER, A.; MARTIN-LAURENT, F.; MAUFFRET, A.; MONIER, J.M.; PEYRET, P.; SCHIMITT-KOPLIN, P.; SIBOURG, O.; D'OIRON, E.; BISPO, A.; DEPORTES, I.; GRAND, C.; CUNY, P.; MARON, P.A.; RANJARD, L. Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. **Environmental chemistry letters**, v.14, n.4, p.423-441, 2016.
- CHEEPHAM N. **Cave microbiomes: A novel resource for drug discovery** (Vol. 1). Springer Science & Business Media, 2012.
- CHELIUS, M.K.; BERESFORD, G.; HORTON, H.; QUIRK, M.; SELBY, G.; SIMPSON, R.T.; MOORE, J.C. Impacts of alterations of organic inputs on the bacterial community within the sediments of Wind Cave, South Dakota, USA. **International Journal of Speleology**, v.38, n.1, p.1, 2009.
- EPURE, L.; BORDA, D. Groundwater contamination and the relationship between water chemistry and biotic components in a karst system (Bihor Mountains, Romania). **Travaux de l'Institut de Speologie Emile Racovitza**, v.53, n.1, p.69-84, 2014.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst geomorphology and hydrology**. London: Unwin Hyman, 1989.
- FREIRE, L.M.; LIMA, J.S.; VERÍSSIMO, C.U.V.; SILVA, E.V. Carste em Rochas Não Carbonáticas: contribuição ao estudo geomorfológico em cavernas de arenito da Amazônia Paraense (Karst in Non-Carbonate Rocks: contribution in geomorphological study in sandstones caves of the Paraense Amazon). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.10, n.6, p.1829-1845, 2017.

- GALLÃO, J.E.; BICHUETTE, M.E. Taxonomic distinctness and conservation of a new high biodiversity subterranean area in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.87, n.1, p.209-217, 2015.
- GROSS K Positive interactions among competitors can produce species-rich communities. **Ecology Letters**, v.11, n.9, p.929–936, 2008.
- JONES, W.K.; HOBBS, W. K.; WICKS, H.H.III.; CURRIE, C.M.; HOSE, R.R.; KERBO, L.D.; GOODBAR, R.C.; TROUT, J.R. Recommendations and guidelines for managing caves on protected lands. Charles Town: **Karst Waters Institute**, 2003.
- JURADO, V.; LAÍZ, L.; RODRIGUEZ-NAVA, V.; BOIRON, P.; HERMOSIN, B.; SANCHEZ-MORAL, S.; SAIZ-JIMENEZ, C. Pathogenic and opportunistic microorganisms in caves. **International Journal of Speleology**, v.39, n.1, p.15-24, 2010.
- KARIMI, B.; MARON, P.A.; BOURE, N.C.P.; BERNARD, N.; GILBERT, D.; RANJARD, L. Microbial diversity and ecological networks as indicators of environmental quality. **Environmental chemistry letters**, v.15, n.2, p.265-281, 2017.
- LAVOIE, K.H.; NORTHUP, D.E. Bacteria as indicators of human impacts in caves. In: Rea GT (ed) **7th National cave and karst management symposium, proceedings**. NCKMS Steering Committee, Albany, NY, pp 40–47, 2006.
- LE BRET, M. **Maravilhoso Brasil Subterrâneo**. Jundiaí: Japi, 204 p., 1995.
- LEFÉVRE, M. La maladie verte de Lascaux. **Studies Conservation**, v.19, p.126–156, 1974.
- MANDAL, S.; SANGA, Z.; NACHIMUTHU, S.K. Metagenomic analysis of bacterial community composition among the cave sediments of Indo-Burman biodiversity hotspot region. **PeerJ PrePrints**, v.2, p.e631v1, 2014.
- MARQUES, E.L.S.; DIAS, J.C.T.; SILVA, G.S.; PIROVANI, C.P.; REZENDE, R.P. Effect of organic matter enrichment on the fungal community in limestone cave sediments. **Genetics and Molecular Research Journal**, v.10, 2016.
- NORTHUP, D.E.; LAVOIE, K.H. Geomicrobiology of caves: a review. **Geomicrobiology Journal**, v.18, p.199-222, 2001.
- NORTHUP, D.E.; LAVOIE, K.H. Microbiology in caves. In: GUNN J. **Encyclopedia of cave and karst science**. New York, Fitzroy Dearborn Publishers, p. 506-509, 2004.
- NORTHUP, D.E. Managing microbial communities in caves. In: **Karst Management**. Springer, Dordrecht, p.225-240, 2011.
- NOVAKOVÁ, A. Microscopic fungi isolated from the Domica Cave system (Slovak Karst National Park, Slovakia): a review. **International Journal of Speleology**, v.38, n.1, p.71-82, 2009.
- ORIAL, G.; MERTZ, J.D. Étude et suivi des phénomènes microbiologiques. **Monumental**, v.2, p. 76–86, 2006.
- ORTIZ, M.; LEGATZKI, A.; NEILSON, J.W.; FRYSLIE, B.; NELSON, W.M.; WING, R.A.; MAIER, R.M. Making a living while starving in the dark: metagenomic insights into the energy dynamics of a carbonate cave. **The ISME journal**, v.8, n.2, p.478, 2014.
- PAULA, C.C.P.; MONTOYA, Q.V.; RODRIGUES, A.; BICHUETTE, M.E.; SELEGHIM, M.H.R. Terrestrial filamentous fungi from Gruta do Catão (Sao Desiderio, Bahia, Northeastern Brazil) show high levels of cellulose degradation. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.78, n.3, p.208–217, 2016.
- PILÓ, L.B.; AULER, A.S. Introdução à Espeleologia. In: **Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Belo Horizonte: Instituto Terra Brasilis, pp. 7-23, 2011.

- RÖLING, W.F.M.; VAN-BODEGOM, P.M.; TRINGE, S.G.; RÖLING, M.; CELL, M. Toward quantitative understanding on microbial community structure and functioning: a modeling-centered approach using degradation of marine oil spills as example. **Frontiers in Microbiology**, v.5, p.1–12, 2014.
- SAIZ-JIMENEZ, C. Cave conservation: A microbiologist's perspective. In: **Cave Microbiomes: A Novel Resource for Drug Discovery**. Springer, New York, NY, p.69-84, 2013.
- SALLUN-FILHO, W.; ALMEIDA, L.H.S.; BOGGIANI, P.C.; KARMANN, I. Characterization of quaternary tufas in the Serra do André Lopes karst, southeastern Brazil. **Carbonates and evaporites**, v.27, n.3-4, p.357-373, 2012.
- SAUVADET, M.; CHAUVAT, M.; CLUZEAU, D.; MARON, P.A.; VILLENAVE, C.; BERTRAND, I. The dynamics of soil micro-food web structure and functions vary according to litter quality. **Soil Biology & Biochemistry**, v.95, p.262–274, 2016.
- SHAPIRO, J.; PRINGLE, A. Anthropogenic influences on the diversity of fungi isolated from caves in Kentucky and Tennessee. **The American Midland Naturalist**, v.163, n.1, p.76-86, 2010.
- SMITH, T.; OLSON, R. A taxonomic survey of lamp flora (Algae and Cyanobacteria) in electrically lit passages within Mammoth Cave National Park, Kentucky. **International Journal of Speleology**, v.36, n.2, p.6, 2007.
- THEULEN, V.; SESSEGOLO, G.C. Estratégias para conservação das cavernas brasileiras. **13th International Congress of Speleology**, Brasília, Brazil, 2001. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais26cbe/26CBE_695-698.pdf.
- TETU, S.G.; BREAKWELL, K.; ELBOURNE, L.D.; HOLMES, A.J.; GILLINGS, M.R.; PAULSEN, I.T. Life in the dark: metagenomic evidence that a microbial slime community is driven by inorganic nitrogen metabolism. **The ISME journal**, v.7, n.6, p.1227, 2013.
- THOMAS, T.; GILBERT, J.; MEYER, F. Metagenomics-a guide from sampling to data analysis. **Microbial Informatics and Experimentation**, v.2, n.3, p.1-12, 2012.
- TRAJANO, E.; BICHUETTE, M.E. Diversity of Brazilian subterranean invertebrates, with a list of troglomorphic taxa. **Subterranean Biology**, v.7, p.1-16, 2010.
- TRAVASSOS, L.E.P. Carstologia e a pesquisa científica. **Revista Territorium Terram**, v.2, p.2-14, 2014.
- VACHER, C.; TAMADDONI-NEZHAD, A.; KAMENOVA, S.; PEYRARD, N.; MOALIC, Y.; SABBADIN, R.; SCHWALLER, L.; CHIQUET, J.; SMITH, M.A.; VALLANCE, J.; FIEVET, V.; JAKUSCHKIN, B.; BOHAN, D.A. Learning ecological networks from next generation sequencing data. **Advances in Ecological Research**, v.54, p.1-39, 2016.
- WU, Y., TAN L., LIU W., WANG B., WANG J., CAI Y., LIN X. Profiling bacterial diversity in a limestone cave of the western Loess Plateau of China. **Frontiers in Microbiology**, v.6, p.244, 2015.

Fluxo editorial:

Recebido em: 07.12.2018

Aprovado em: 08.02.2019



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp