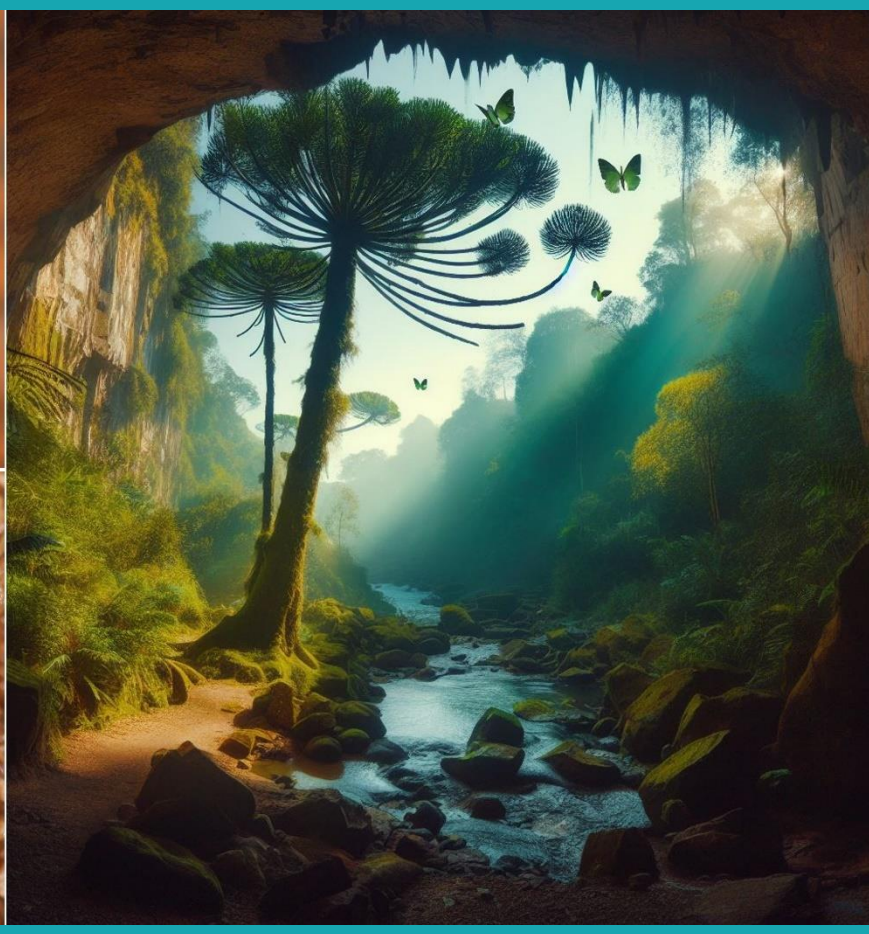
RELATÓRIO FINAL DE ATIVIDADES DE PESQUISA

INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS EM DISTINTAS ESCALAS NA COMPOSIÇÃO E RIQUEZA DE INVERTEBRADOS CAVERNÍCOLAS NA MATA ATLÂNTICA DO NORTE DO PARANÁ







Leandro Mata da Rocha Melo
Marconi Souza Silva
Rodrigo Lopes Ferreira

Universidade Federal de Lavras - UFLA
Instituto de Ciências Naturais - ICN
Departamento de Ecologia e Conservação - DEC
Centro de Estudos em Biologia Subterrânea - CEBS

Apoio









Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica - TCCE 01/2021

SUMÁRIO

Apresentação 5
ARTIGO I - ECOLOGIA DE INVERTEBRADOS TERRESTRES EM CAVERNAS NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ 8
1 Introdução 10
2 Objetivos 13
2.1.1 Objetivo Geral 13
2.1.2 Objetivos Específicos 13
2.1.3 Hipóteses 13
3.1 Coleta dos Invertebrados nas cavernas 18
3.2 Mensuração da Estrutura de Habitat nas cavernas 18
3.3 Triagem e Identificação dos Invertebrados 19
3.4 Determinação de troglomorfismos nos Invertebrados 20
3.5 Determinação das distâncias geográficas entre as cavernas e as distâncias até as minerações 21
3.6 Análise de Dados 21
3.6.1 Dados Abióticos 22
3.6.2 Dados Bióticos 22
4 Resultados 23
4.1 Caracterização da estrutura de habitat no piso das cavernas 23
4.2 Riqueza e composição de invertebrados cavernícolas 26
4.2 Relação entre as variáveis abióticas e a fauna 31
5 Discussão 40
5.1 Influência da características físicas, tróficas e microclimáticas das cavernas 41
5.2 Similaridade da fauna entre as faixas calcárias 42
6 Considerações Finais 44
Agradecimentos 44
Referências 46
Artigo II. DIVERSIDADE DE INVERTEBRADOS TROGLÓBIOS EM CAVERNAS NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ 52
1 Introdução 54
2 Metodologia 56
2.1 Análise de dados 58
3 Resultados 58
3.1 Riqueza histórica de invertebrado em cavernas do Paraná 58
3.1 Riqueza atual de troglóbios em cavernas do Paraná 59
4 Discussão 69
4.1 Riqueza de invertebrados troglóbios em cavernas do Paraná 69
5 Considerações Finais 71
6. Agradecimentos 72
Referências 73
Artigo III. CAVERNAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ 77
1 Introdução 79
2 Objetivos 80
Objetivo Geral 80
3 Hipóteses 80

4 Metodologia 82
4.1 Área de Estudo 82
4.2 Coleta de Dados 82
4.3 Análise dos Dados 83
4.3.1 Relevância Biológica 83
4.3.2 Grau de Impacto Humano 84
4.3.3 Índice de Prioridade de Conservação de Cavernas (CCPi) 84
5 Resultados 85
6 Discussão 95
6.1 Proteção de cavernas no Brasil 95
6.2 Índices utilizados para a proteção de cavernas 96
6.3 Vulnerabilidade da fauna cavernícola 97
6.4 Estudo em cavernas e áreas prioritárias para conservação no estado do Paraná 98
7 Considerações Finais 101
Agradecimentos 101
Referências 102

Figura 1. Ambiente subterrâneo com as suas peculiaridades de reduzida luminosidade, oligrotrofia e elevada estabilidade nas condições de temperatura e umidade, revelando um ambiente único e frágil. Foto da caverna Piedade, municÍpio de Rio Branco do Sul, faixa carbonática Votuverava. 14

Apresentação

Este relatório é composto por três manuscritos, que serão submetidos a periódicos científicos visando a sua publicação. Teve como objetivo central, avaliar os padrões de composição e riqueza de invertebrados em cavernas na Mata Atlântica do norte do Paraná em diferentes escalas, investigando como as características dos habitats que influenciam a estrutura da comunidade de invertebrados. Além disso, empregamos o Índice de Prioridade de Conservação de Cavernas (*CCPi*) para identificar áreas e cavernas que demandam prioridade de medidas de conservação.

O primeiro manuscrito que será submetido ao periódico internacional "*Community Ecolgy"* investigou a influência das variáveis de substratos físicos e tróficos, microclima, distância da entrada e distância de áreas de mineração sobre a estruturação espacial das comunidades de invertebrados em 23 cavernas calcárias no norte do estado do Paraná, Brasil. As cavernas foram analisadas em diferentes escalas, utilizando quadrantes (1x1m) como microescala, setores (3x10m) como mesoescala, e as faixas Capiru, Votuverava e Itaiacoca como macroescala, para investigar as respostas das comunidades em relação às variáveis mencionadas. Os resultados obtidos neste estudo destacam a influência significativa de variáveis como a diversidade de abrigo e distância da entrada, na composição das comunidades de invertebrados em cavernas calcárias do Paraná. Essas descobertas não apenas contribuem para nosso entendimento sobre a ecologia desses ambientes subterrâneos, mas também têm implicações práticas para a conservação.

O segundo manuscrito, que será submetido à "*Revista Brasileira de Espeleologia*", faz uma comparação da riqueza de organismos troglóbios conhecidos em 23 cavernas no estado do Paraná antes e após a realização deste estudo. Nossos resultados indicam que a fauna troglóbia do Paraná era praticamente desconhecida até o início deste trabalho. Mesmo cavernas sujeitas a uma única coleta durante nossa pesquisa revelaram uma diversidade de espécies troglóbias superior ao conhecimento prévio. A aplicação de métodos de coleta em micro e mesoescalas, incluindo uma análise minuciosa de substratos, demonstrou ser fundamental para a coleta eficiente desses organismos. Assim, nossos resultados apontam para a presença de uma diversidade de troglóbios nas cavernas do Paraná que anteriormente estava praticamente desconhecida.

Esses achados têm implicações significativas para a biodiversidade e a conservação de espécies endêmicas e ameaçadas. A elucidação de uma riqueza significativa de espécies

troglóbias anteriormente não documentadas destaca a necessidade premente de intensificar os esforços de pesquisa e conservação nas cavernas do Paraná. Essa diversidade recém-descoberta não apenas enriquece o conhecimento científico, mas também destaca a importância de estratégias de conservação mais abrangentes e direcionadas para esses ambientes subterrâneos.

No terceiro manuscrito, que será submetido ao periódico "*Environmental Management*", empregamos o Índice de Prioridade de Conservação de Cavernas (CCPi) para classificar as 23 cavernas estudadas no norte do estado do Paraná, visando avaliar sua relevância para a conservação. Para alcançar tal classificação, conduzimos um levantamento dos impactos humanos em cada cavidade, que foi realizado concomitantemente às coletas de invertebrados em cada uma das cavernas avaliadas. Além disso, utilizamos dados sobre a riqueza biológica de cada caverna. Os resultados obtidos revelaram que 10 cavernas são de extrema prioridade de conservação, indicando uma necessidade imediata de medidas protetivas. Outras 10 cavernas foram classificadas como de alta prioridade, demandando atenção especial para a preservação. Duas cavernas foram designadas com prioridade média, e apenas uma caverna apresentou baixa prioridade de conservação.

Os resultados deste estudo não apenas orientam ações prioritárias de conservação, mas também advém de uma metodologia robusta que pode ser aplicada em futuros esforços de preservação em ambientes subterrâneos. Essa estratégia visa assegurar a proteção efetiva desses ecossistemas no estado do Paraná, promovendo a sustentabilidade e a manutenção dos ecossistemas subterrâneos.



ARTIGO 1

ECOLOGIA DE INVERTEBRADOS TERRESTRES EM CAVERNAS NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ

ARTIGO I - ECOLOGIA DE INVERTEBRADOS TERRESTRES EM CAVERNAS NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ

Artigo a ser submetido ao periódico Community ecology

Leandro Mata da Rocha Melo[1,2], Rodrigo Lopes Ferreira[1,2], Marconi Souza Silva[1,2],

[1]Centro de Estudos em Biologia Subterrânea, Departamento de Ecologia e Conservação, Instituto de Ciências Naturais, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, P.O. Box 3037, Lavras CEP 37200-000, Minas Gerais, Brasil
[2]Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, Universidade Federal de Lavras, Lavras CEP 37200-000, Minas Gerais, Brasil

Resumo

Este artigo teve como objetivo avaliar a influência dos elementos físicos, tróficos e microclimáticos sobre a composição e riqueza da fauna de invertebrados terrestres em cavernas na Mata Atlântica do estado do Paraná. Avaliamos 23 cavidades localizadas em três faixas calcárias distintas: 12 cavernas na faixa Itaiacoca, 6 cavernas na faixa Capiru e 5 cavernas na faixa Votuverava. Dentro das cavernas, foram avaliadas características do habitat, e a composição e riqueza da fauna de invertebrados, utilizando coleta ativa em mesoescala através de setores (3x10m) e em microescala através de quadrantes (1x1m), considerando as faixas calcárias como macroescala. Foram encontradas 365 espécies de invertebrados, distribuídas em pelo menos 40 ordens distintas. Os resultados revelaram que, em microescala, as variáveis que mais influenciaram a composição foram a distância da entrada e a distância entre as cavernas. Para os setores (mesoescala), a diversidade de abrigo e a temperatura foram as principais variáveis preditoras de variação na composição faunística. Além disso, as faixas calcárias determinaram diferença significativa na composição de espécies não troglóbias, sugerindo que as características locais de cada faixa carbonática exercem uma influência marcante na composição destes organismos. A partir desses resultados, foram identificados elementos que determinam a identidade faunística subterrânea nas cavernas estudadas, fornecendo subsídios para a implementação de ações de conservação do patrimônio espeleológico na região. Além disso, a elucidação desses elementos ambientais contribuirá para o desenvolvimento de abordagens teóricas e práticas, podendo ser aplicada em outras regiões e contribuindo para o aprimoramento das diretrizes legislativas relacionadas ao patrimônio espeleológico brasileiro.

Palavras Chaves: Ecologia, Diversidade, Fauna de Cavernas.

1 Introdução

A análise da composição e riqueza das comunidades de invertebrados que ocorrem em cavernas representa uma importante ferramenta na elucidação de padrões ecológicos relacionados a biodiversidade nos ambientes subterrâneos. Assim, estudos desenvolvidos em cavernas ao longo do mundo vêm buscando avaliar as principais características físicas, tróficas e microclimáticas que atuam na manutenção da diversidade de invertebrados cavernícolas em diferentes escalas. Até o momento, destacam-se fatores relacionados à projeção linear da caverna, espeleogênese, presença de corpos de água (poças, lagos, riachos), microclimas favoráveis (temperatura e umidade), estrutura do substrato (espeleotemas, fragmentos de rochas de diferentes tamanhos e texturas) e disponibilidade de recursos orgânicos (guano, raízes, carcaças) (Tobin et al., 2013; Mammola et al., 2015; Bento et al., 2016; Lunghi et al., 2017; Kozel et al., 2019; Cardoso et al., 2022).

Estudos em escalas mais amplas são essenciais para abordar questões macroecológicas. Desta forma, análises em diferentes escalas são imprescindíveis para compreender os elementos que determinam os processos que ocorrem em todo o sistema (Cardoso et al., 2022). Fatores como a distância entre cavernas, o tipo de rocha, e a estrutura da paisagem têm determinado identidades faunísticas únicas e distribuição limitadas de muitas espécies de invertebrados (Souza-Silva et al., 2020; Rabelo et al., 2021; Souza-Silva et al., 2021). Além disto, as preferências da fauna por microhabitats específicos dentro de cavernas são muitas vezes determinadas por questões comportamentais, fisiológicas e morfológicas inerentes às distintas categorias ecológico-evolutivas dos animais cavernícolas (trogloxenos, troglófilos, troglóbios) (Howarth, 1983; Souza-Silva et al., 2021).

Em função do grau de isolamento e estabilidade atmosférica dos ambientes de cavernas, a sua integridade ambiental pode ser facilmente alterada frente a impactos naturais, ou antropogênicos, afetando diretamente microhabitats e sua fauna associada (Ferreira & Horta 2001; Souza-Silva et al., 2015). Tais alterações ambientais podem afetar os recursos utilizados pelas espécies e as suas interações. As respostas podem ser variadas para diferentes táxons, podendo ser positivas ou negativas. Cada espécie de invertebrado explora recursos específicos e, se a oferta ou a natureza desses recursos for modificada pelas mudanças nos microhabitats, é esperado que as espécies também sejam afetadas (Hamilton-Smith 2004; Romero 2009; Faille et al., 2015, Pacheco et al., 2020). Dentre os organismos que utilizam as cavernas ao longo do seu ciclo de vida, os troglóbios são os mais especializados, compreendendo cavernícolas obrigatórios (Sket 2008). Dada a

extrema especificidade desses organismos, a compreensão de quais microhabitats estão intrinsicamente associados a eles desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de estratégias de conservação voltadas para a mitigação dos efeitos negativos sobre sua distribuição e abundância. À medida que exploramos as relações entre os microhabitats, a composição da fauna e os fatores ambientais em cenários subterrâneos, esperamos que a similaridade da fauna seja menor quanto maior a distância entre as cavernas e ocorra menor dispersão entre as faixas calcárias, enquanto uma maior heterogeneidade de habitat estará relacionada à maior diversidade de espécies.

O ambiente cavernícola se destaca pela sua notável estabilidade ambiental nas condiçoes de temperatura e umidade e pela constante ausência de luz (Poulson & White, 1969). Em geral, as condições de temperatura e umidade nas cavernas variam menos do que no ambiente externo (epígeo) circundante (Barr & Kuehne, 1971). Os produtores primários são praticamente inexistentes no ambiente cavernícola, com exceção de algumas bactérias quimioautotróficas que utilizam ferro ou enxofre como doadores de elétrons (Culver, 1982). Isso resulta no predomínio de organismos fragmentadores e decompositores nas comunidades cavernícolas, uma vez que toda a energia ou alimento presente nas cavernas provém do meio epígeo. A movimentação dos recursos orgânicos para dentro e fora das cavernas ocorre de forma contínua ou em "pulsos", transportada por agentes físicos ou biológicos (Souza-Silva et al., 2011). A disseminação de matéria orgânica particulada acontecem por meio de rios, ribeirões ou aberturas verticais no teto e nas paredes das cavernas. Essas fontes de recursos desempenham um papel crucial para as comunidades terrestres e aquáticas. Além disso, a matéria orgânica dissolvida, juntamente com bactérias e protozoários presentes em águas de percolação, penetra através do calcário ou em fendas e fraturas. Fezes ou cadáveres de animais que transitam nas cavernas regularmente também representam fontes significativas de recursos, especialmente em cavernas permanentemente secas. Portanto, o tipo de recurso e a forma de disseminação no sistema são fatores determinantes importantes na composição e abundância da fauna no ambiente cavernícola (Souza-Silva et al., 2011, Cardoso, et al., 2022, Souza-Silva & Ferreira 2022, DuPreez et al., 2023). A distribuição dos organismos no meio hipógeo pode ser influenciada por diversos fatores, sendo a disponibilidade de recursos alimentares um dos mais importantes (Ferreira & Martins 1998). Além disso, a colonização de cavernas por muitos organismos ocorre através das entradas, tornando a distância da entrada até o interior um fator significativo na distribuição de alguns grupos (Ferreira & Pompeu 1997, Souza -Silva et al 2021)

Em função das suas afinidades ecológicas e evolutivas dos organismos com o ambiente cavernícola podemos categoriza-los em três grupos (Holsinger & Culver 1988), adaptado do sistema de Schinner e Racovitza): 1. Troglóxenos, organismos frequentemente encontrados no ambiente subterrâneo, mas que saem regularmente para se alimentar, muitas vezes nas proximidades das entradas das cavernas, atuando como importadores de energia do meio epígeo, principalmente em cavernas permanentemente secas (Ferreira & Martins, 1998). 2. Troglófilos, capazes de completar seu ciclo de vida tanto no meio hipógeo quanto epígeo, geralmente ocorrendo em ambientes úmidos e sombreados (Machado et al., 2003). Certas espécies podem alternar entre troglóxenas e troglófilas dependendo das condições, como a disponibilidade de alimento. 3. Troglóbios, restritos ao ambiente cavernícola e frequentemente apresentando várias especializações (morfológicas, fisiológicas ou comportamentais) decorrentes da evolução em resposta às pressões seletivas existentes em cavernas ou à ausência das pressões seletivas típicas do meio epígeo (Culver & Pipan 2019).

O desenvolvimento da pesquisa sobre a fauna cavernícola brasileira a partir da década de 80 representou um marco significativo na compreensão e conservação desses ecossistemas subterrâneos únicos. Contudo, a observação de que poucas cavernas foram objeto de estudo intensivo, em sua maioria cavernas calcárias, ressalta a necessidade premente de expandir os esforços de pesquisa e conservação para garantir a preservação desses ambientes delicados e frequentemente negligenciados. O estudo intensivo de cavernas permite a identificação de espécies endêmicas, ou seja, aquelas encontradas exclusivamente em determinadas regiões ou ambientes subterrâneos. Além disso, muitas dessas espécies podem estar sob ameaça, tornando essas cavernas alvos prioritários para a conservação. A expansão da pesquisa para um número mais amplo de cavernas permite uma avaliação abrangente do impacto das atividades humanas sobre esses ecossistemas. Identificar e compreender as ameaças, como a degradação do habitat e a poluição, torna-se crucial para desenvolver estratégias eficazes de conservação. A pesquisa intensiva em cavernas proporciona uma base sólida para o monitoramento de mudanças ambientais ao longo do tempo. Isso inclui alterações climáticas, variações na qualidade dos habitats e outras perturbações que podem afetar a fauna cavernícola. A identificação de cavernas com importância ecológica excepcional pode levar ao estabelecimento de áreas protegidas. Essas áreas desempenham um papel fundamental na conservação da biodiversidade subterrânea, fornecendo refúgio para espécies endêmicas e contribuindo para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Além disto, a pesquisa e divulgação de informações sobre a

fauna cavernícola podem desempenhar um papel crucial na educação ambiental e no engajamento da comunidade. Ao conscientizar o público sobre a importância desses ecossistemas, cria-se um apoio mais amplo para a conservação e adoção de práticas sustentáveis.

Os resultados da pesquisa intensiva podem influenciar a formulação de políticas de conservação mais eficazes. A inclusão de dados sólidos sobre a fauna cavernícola em iniciativas de conservação amplia a compreensão da biodiversidade e fornece subsídios para a tomada de decisões informadas.

Diante da escassez de estudos intensivos, é imperativo expandir as pesquisas sobre a fauna cavernícola brasileira, diversificando os tipos de cavernas investigadas, os métodos e abordagens aplicadas. Essas ações não somente enriquecerão nosso conhecimento sobre a biodiversidade subterrânea, mas também fortalecerão as iniciativas de conservação, contribuindo para a preservação a longo prazo desses ambientes únicos e frágeis (Figura 1).

2 Objetivos

2.1.1 Objetivo Geral

I) Avaliar a influência de variáveis tróficas, físicas e microclimáticas na estruturação das comunidades de invertebrados em cavernas na Mata Atlântica do norte do Paraná, considerando distintas escalas de amostragem.

2.1.2 Objetivos Específicos

I) Promover um disgnóstico da fauna de invertebrados terrestres encontrados nos ambientes de cavernas na Mata Atlântica do norte do Paraná;

II) Avaliar possíveis variações na estrutura das comunidades de invertebrados cavernícolas terrestres (composição e riqueza) influenciadas pela heterogeneidade de habitat em escala local e regional na Mata Atlântica do norte do Paraná.

2.1.3 Hipóteses

I) Os padrões de diversidade nas cavernas podem estar relacionados às distintas faixas carbonáticas (Capiru, Itaiacoca e Votuverava) devido à distintas possibilidades de interconectividade. Por sua vez, as dispersões da fauna de invertebrados entre feições descontínuas seriam dificultadas (especialmente para espécies terrestres e restritas a habitats subterrâneos) devido à impermeabilidade de outros relevos adjacentes, consequentemente confinando a distribuição de espécies;

II) Os preditores de habitat em nível local (especialmente as condições altamente restritivas dos ambientes subterrâneos) seriam os principais determinantes da ausência ou presença das espécies nas cavernas, sobrepondo-se aos preditores em escala regional. Assim, os padrões de diversidade seriam explicados por processos baseado em nicho operando em microescala (e.g. ocupação de micro-habitats, dependência de recursos ou de condições microclimáticas).



Figura 1. Ambiente subterrâneo com as suas peculiaridades de reduzida luminosidade, oligrotrofia e elevada estabilidade nas condições de temperatura e umidade, revelando um ambiente único e frágil. Foto da caverna Piedade, municÍpio de Rio Branco do Sul, faixa carbonática Votuverava.

3 Desenho amostral

Este estudo foi executado em cavernas localizadas nas faixas calcárias Capiru, Votuverava e Itaiacoca, localizadas na região metropolitana de Curitiba no estado do Paraná, abrangendo os municípios de Colombo, Senges, Castro, Campo Largo, Rio Branco do Sul, Almirante Tamandaré, Itaperuçu, Cerro Azul, Adrianópolis e Doutor Ulysses (Figura 2). As faixas calcárias Itaiacoca, Votuverava e Capiru são constituídas pelas rochas metassedimentares do Grupo Carbonático Açungui. Essa região se caracteriza pelo clima subtropical úmido, com invernos brandos e chuvas bem distribuídas durante o ano, estando

inserida em uma região do bioma Mata Atlântica, contendo floresta com Araucária (Florest Ombrófila Mista) e a Floresta Atlântica propriamente dita (Floresta Ombrófila Densa) (Sessegolo et al., 2006).

Foram amostradas 23 cavernas, 12 dessas na faixa calcária Itaiacoca, cinco cavernas estão localizadas na faixa calcária Votuverava e outras seis cavernas localizadas na faixa calcária Capiru (Tabela 1, Figura 3).

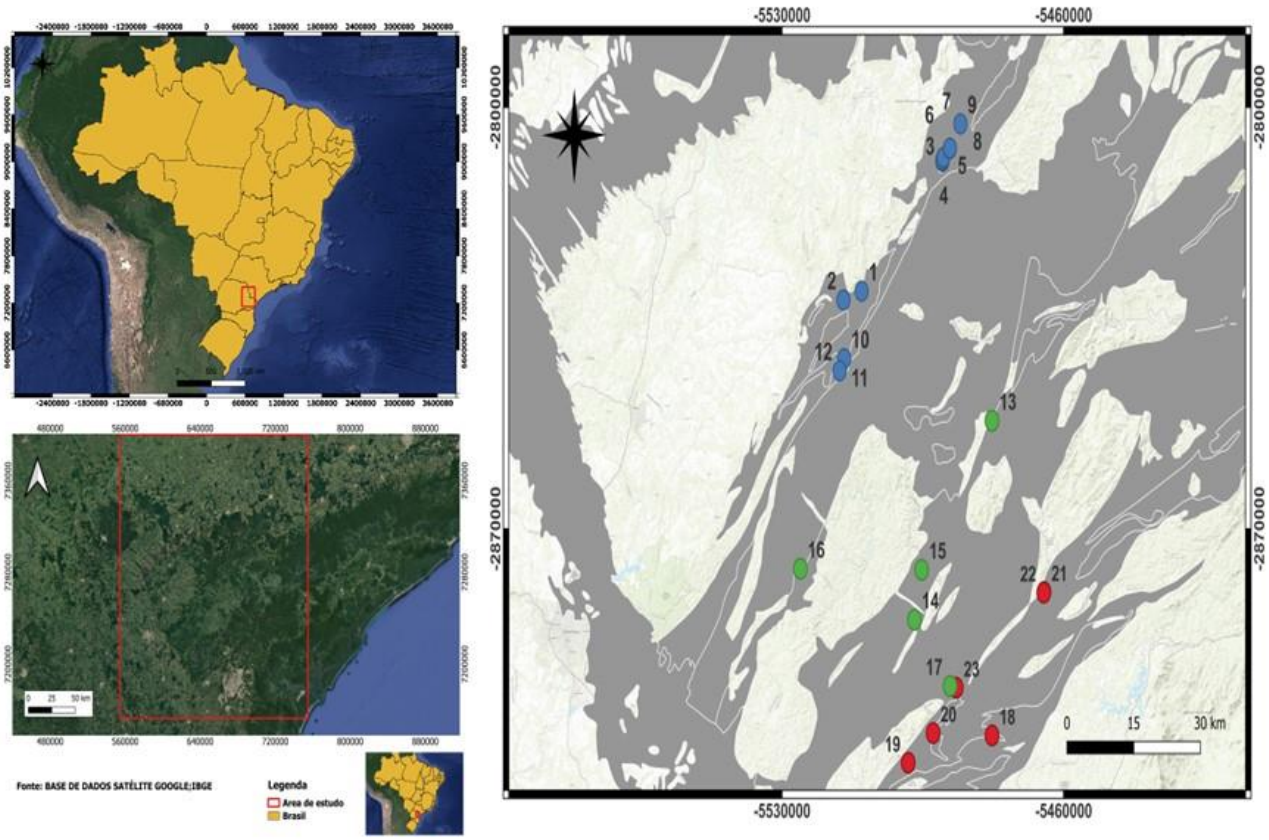


Figura 2. Localização da área de estudo em diferentes escalas. Os círculos azuis representam as cavidades localizadas na faixa calcária Itaiacoca; os círculos verdes as cavernas da faixa Votuverava e em vermelho as cavernas da faixa Capiru. Os nomes das cavernas estão listados na tabela 1 com os números correspondentes presentes no mapa.

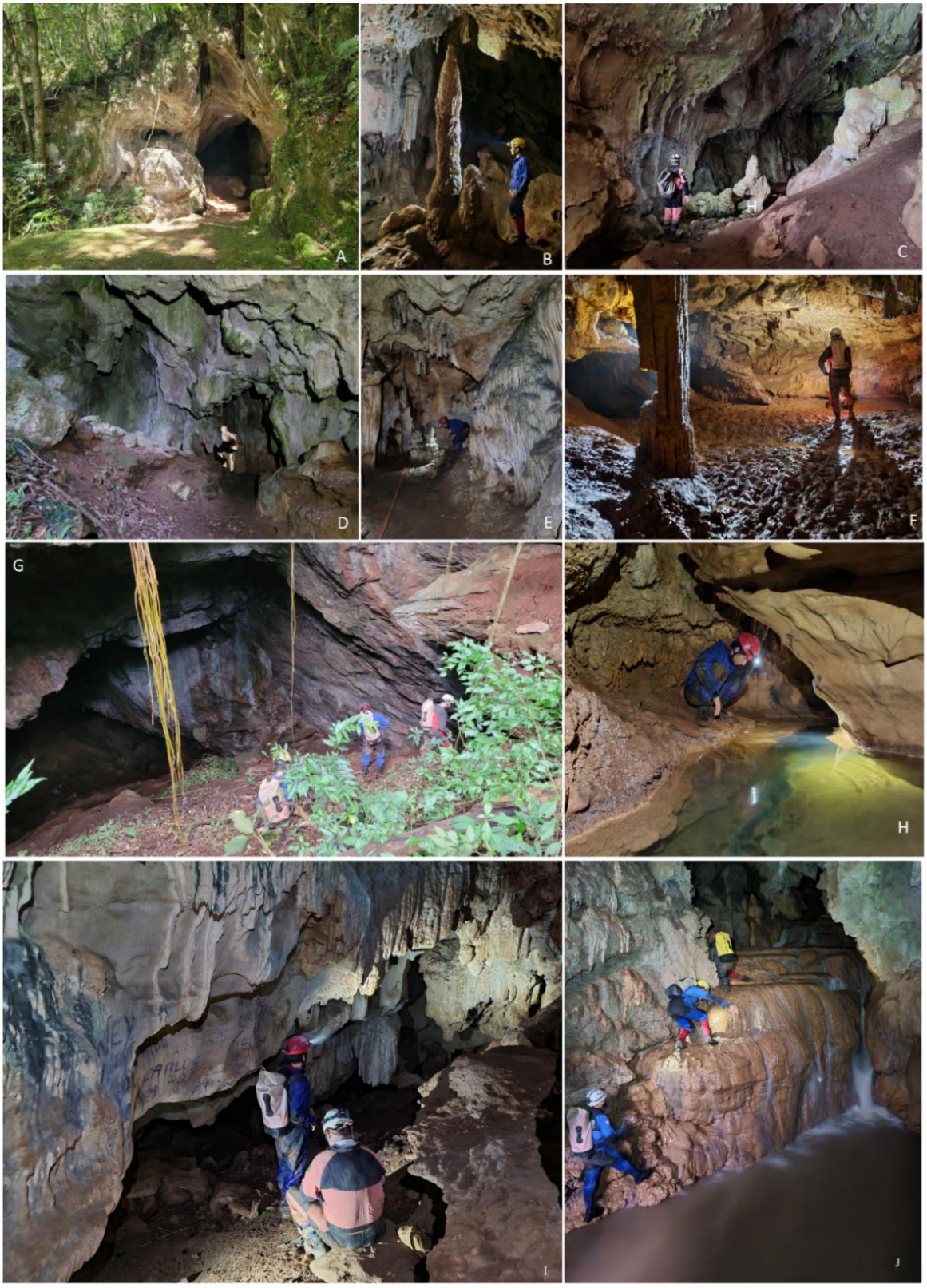


Figura 3. Exemplos de cavernas amostradas no estudo de avaliação da influência de fatores ambientais em distintas escalas na composição e riqueza de invertebrados cavernícolas na Mata Atlântica do Paraná. (Caverna Jesuitas (A, B e E), Caverna Varzeão (C e D), Caverna de Itaperussu (F), Caverna da Piedade (G), Caverna Toquinhas (H, I), Caverna Lancinha (J)

Tabela 1. Cavernas amostradas no estado do Paraná, Brasil. Os números sobrescritos correspondem a localização no mapa da Figura 2. Abreviaturas do nome das cavernas (Abrev), Faixas calcárias, latitute e longitude em UTM, o número de setores (Set) e quadrantes (Quad). Ressurgência (Ress). Itaiacoca (ITA), Votuverava (VOT), Capiru (CAP).

Caverna	Abrev.	Faixa	Latitude	Longitude	Set.	Quad.
Varzeão[1]	GV	ITA	7275042	651909	8	24
Malfazido[2]	GM	ITA	7273761	647782	4	12
Ress. do Feital[3]	GRF	ITA	7294326	670403	4	12
Dá a volta[4]	GDV	ITA	7294572	670427	2	6
Arco de Pedra[5]	GAP	ITA	7294581	670419	1	3
Casa de Pedra[6]	GCP	ITA	7294947	670668	1	3
Pocinho[7]	GPO	ITA	7296230	672123	4	12
Pocinho[8] 2	GPO2	ITA	7296306	672130	1	3
Pinhalzinho[9]	GPNA	ITA	7299940	674573.00	5	15
Chiquinho[10]	GHC	ITA	7264965	647839	2	6
Chiquinho[11]	GHC2	ITA	7264954	647825	3	9
Pinheiro Seco[12]	GPS	ITA	7263142	646809	6	18
Bom Sucesso[13]	GBS	VOT	7255243	681136	3	9
Bromados[14]	GBR	VOT	7225641	663298	4	12
Piedade[15]	GPI	VOT	7233100	664985	3	9
Pinheirinho[16]	GPNE	VOT	7233572	637641	5	15
Toquinhas[17]	GT	VOT	7215636	671190	3	9
Bacaetava[18]	GBA	CAP	7208130	680519	6	18
Ermida[19]	GER	CAP	7204278	661607.00	2	6
Itaperussu[20]	GI	CAP	7208651	667277	4	12
Jesuítas[21]	GJ	CAP	7229413	692528	4	12
Fadas[22]	GF	CAP	7229326	692470	1	3
Lancinha[23]	GL	CAP	7215358	672566	4	12

3.1 Coleta dos Invertebrados nas cavernas

A amostragem dos invertebrados foi realizada em setores (3x10m) e quadrantes (1x1m) separadamente através de busca intuitiva direta (direct intuitive Search -DIS) (Wynne et al. 2019, Pacheco et al. 2020), e coleta ativa com o auxílio de pinças e pincéis umedecidos em álcool 70% (Figura 4). As coletas foram realizadas em setores e quadrantes, por uma equipe de biólogos com experiência em fauna de cavernas. Todo o tempo em minutos dispendido em cada unidade amostral foi registrado com o uso de cronômetro digital.

3.2 Mensuração da Estrutura de Habitat nas cavernas

A análise da estrutura do habitat no piso das cavernas foi feita através de inspeção visual e quantificação da área de superfície ocupada por distintos componentes orgânicos e inorgânicos dentro de setores e quadrantes (Figura 4). Cada setor foi caracterizado de acordo com o protocolo adaptado, proposto por Hughes & Peck (2008) para ambientes aquáticos e aplicado por Pacheco et al. (2020) em ambientes de cavernas. Para tal, o setor foi dividido em sua maior extensão, em dez secções perpendiculares de um metro por três metros. Nas dez secções foram medidas as porcentagens de área ocupada por distintos elementos do substrato, orgânicos e inorgânicos. Posteriormente, para obtenção de um único valor para cada substrato foi feito uma operação de soma das porcentagens de áreas ocupadas por cada tipo de substrato e dividido por 100 (Souza-Silva et al. 2021).

Por outro lado, nos quadrantes, os componentes dos substratos foram avaliados por meio de fotografias. As fotografias digitais (4000 x 3000 pixels) foram registradas em campo em posição vertical (90º) usando uma câmera Canon powershot SX50, HS. As fotografias de cada quadrante foram analisadas em laboratório através do software IMAGEJ (Rasband 1997), no qual os substratos presentes foram mensurados de acordo com sua área de ocupação (Pacheco et al. 2020). Medidas de temperatura e umidade foram mensuradas em cada setor, com auxílio de um termohigrômetro digital disposto no piso desses por pelo menos quinze minutos (Souza-Silva et al. 2021).



Figura 4. Coleta dos invertebrados em setores e quadrantes no interior das cavernas, utilizando pinças, pincéis e potes com álcool 70%. Foto da Caverna Jesuitas, município de Cerro Azul, Faixa carbonática de Capiru.

3.3 Triagem e Identificação dos Invertebrados

Todos os espécimes de invertebrados coletados foram conservados em potes contendo álcool 70% para posterior identificação e separação em morfótipos em laboratório (Figura 5) (Oliver & Beattie 1996). Os testemunhos encontram-se depositados na coleção de invertebrados cavernícolas (ISLA) do Centro de Estudos em Biologia Subterrânea da Universidade Federal de Lavras (biologiasubterranea.com.br).



Figura 5. Atividades de Triagem e Identificação dos Invertebrados e tabulação dos dados para análises, realizadas nas dependências do Centro de Estudos em Biologia Subterrânea (CEBS) da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

3.4 Determinação de troglomorfismos nos Invertebrados

A determinação de espécies potencialmente troglóbias foi realizada através da identificação de troglomorfismos, que são indicativos de isolamento e evolução no ambiente cavernícola. Os troglomorfismos frequentemente observados foram redução ou ausência das estruturas oculares e da pigmentação, bem como o alongamento de apêndices sensoriais e locomotores (Figura 6) (Culver & Pipan 2019). Testemunhos foram depositados na Coleção de Invertebrados Subterrâneos de Lavras (ISLA), vinculada ao Centro de Estudo em Biologia Subterrânea (CEBS) na Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil.



Figura 6. troglomorfismos em invertebrados; Despgimentação, alongamento de apêndices sensoriais e locomotores e redução ou ausência das estruturas oculares. A) *Peridontodesmella* sp., B) *Eukoenenia* sp., C) *Trichorhina* sp., D) Gonyleptidae sp.1, E) *Crypturodesmus* sp., F) Gonyleptidae sp2.

3.5 Determinação das distâncias geográficas entre as cavernas e as distâncias até as minerações

A variável distância geográfica entre as cavernas foi obtida através do registro de coordenadas geográficas da entrada das cavernas por meio de um GPS Garmin 64s. O Software Google Earth Pro foi utilizado para plotagem dos pontos das cavidades e medição da proximadade com atividades de mineração.

3.6 Análise de Dados

Com base nas categorias de substratos apresentadas na tabela 2, obtivemos a diversidade de substrato, diversidade de abrigos e diversidade de recursos através do índice de Shannon-Weaver (Buttigieg & Ramette 2014). A disponibilidade de abrigo para os invertebrados foi calculada pela soma cascalho grosso, blocos rochosos e detritos orgânicos em cada transecto. Para a disponibilidade de recrusos tróficos consideramos guano, fezes, raízes, detritos orgânicos, criptógamos, fanerógamas, algas, actinomicetos, basidiomicetos, carcaça de animais e pteridófitas.

3.6.1 Dados Abióticos

Os valores de porcentagem de área ocupada por cada componente dos substratos no piso das cavernas foram obtidos com base na área ocupada por cada elemento.

Análise de correlação de Spearman foi usada para avaliar a influência da distância da entrada sobre a diversidade e disponibilidade de substratos, diversidade e disponibilidade de abrigos e diversidade e disponibilidade trófica no piso das cavernas, usando quadrantes e setores como unidades amostrais (Gallucci, 2019). A correlação de Sperman foi usada para avaliar a influência da diversidade e disponibilidade de substratos, diversidade e disponibilidade de abrigos e diversidade e disponibilidade trófica sobre o tempo de coleta da fauna no piso das cavernas, usando quadrantes e setores como unidades amostrais.

A análise de similaridade (ANOSIM) baseada em distância Euclidiana foi utilizada para identificar diferenças na composição dos elementos do substrato, diversidade de substratos, diversidade de abrigos e diversidade trófica, entre as faixas carbonáticas, cavernas, usando setores e quadrantes como unidades amostrais (Buttigieg and Ramette 2014; Clarke et al. 2001).

Por fim, apresentamos uma representação visual da matriz de dados dos elementos do substrato de acordo com a distribuição espacial dos transectos e quadrantes ao longo das cavernas (depois de transformado em raiz quadrada), em um Shadeplot. A distribuição dos substratos no piso das cavernas foram reordenadas em uma análise de agrupamento utilizando o Índice de Associação de Whittaker (Whittaker 1952; Clarke et al. 2014).

A análise de variância, ou ANOVA, foi usada para comparar diferenças nas médias de valores entre diferentes grupos de variavéis (Riqueza de espécies, distância das cavernas até a mineração mais próxima, temperutura, umidade, diversidade e disponibilidade de substratos, diversidade e disponibilidade de abrigos e diversidade e disponibilidade trófica) (Gallucci 2019).

3.6.2 Dados Bióticos

Para obter valores de abundância e riqueza dos invertebrados foi realizada a contagem dos indivíduos e de morfótipos de cada unidade amostral (diversidade alfa).

A similaridade da fauna troglóbia e não troglóbia foi obtida pelo índice de Bray-Curtis e contrastada em escala métrica multidimensional (MDS) com reamostragem pelo método Bootstrap.

A análise de similaridade (ANOSIM) baseada no índice de Bray-Curtis foi utilizada para identificar diferenças na composição da fauna de invertebrados entre as faixas calcárias, utilizando cavernas quadrantes e setores como unidades amostrais (Anderson et al., 2015).

A curva de rarefação baseada no indivíduo foi usada para obter o número esperado de espécies em cada faixa calcária, feitas separadamente para setor e quadrantes (Chao & Jost 2012).

3.6.3 Relação entre as variáveis abióticas e a fauna das cavernas

A influência das características do substrato sobre a composição, abundância (similaridade de Bray-Curtis) e riqueza da fauna (distância Euclidiana), foi avaliada através de modelo linear baseado em distância (DistLM), método Forward step-wise e o critério de seleção de modelo Akaike corrigido para pequenas amostras (AICc) (Anderson et al. 2015). A análise de redundância baseada em distância (dbRDA) foi posteriormente usada para avaliar o percentual de ajuste dos dados ao modelo juntamente com a proporção de explicação da variação dos dados (Clarke & Gorley, 2006). Estas análises foram feitas de maneira independente para setor e quadrantes e para fauna não troglóbia e fauna tróglóbia (Pacheco et al 2020). As variáveis incluídas foram: a diversidade do substrato, diversidade de abrigos, diversidade trófica, temperatura, umidade, distância geografica entre as cavernas, distância da entrada e distância de mineração como variáveis preditoras.

4 Resultados

4.1 Caracterização da estrutura de habitat no piso das cavernas

Os substratos presentes nos pisos das cavernas estão detalhados na Tabela 2, incluindo suas abreviações e classificações como recurso, abrigo ou geral. A análise de similaridade (ANOSIM), baseada em distância Euclidiana não revelou diferença significativa na composição dos substratos entre as faixas calcárias para os setores e quadrantes. As proporções dos componentes dos substratos no piso e suas relações com a distância da entrada estão representados na Figura 7.

Tabela 2. Lista dos substratos encontrados nas cavernas amostrados, as abreviações utilizadas e sua classificação para a realização das análises. Hardpan = Argila compactada

Substrato	Abreviação	Classificação
Guano	GA	trófico
Fezes	FC	trófico
Raízes	RT	trófico
Serrapilheira	LFL	trófico/abrigo
Galho	BR	trófico/abrigo
Tronco	TRU	trófico/abrigo
Curso de água	WC	Geral
Criptógamos	CR	trófico
fanerógamas	PHA	trófico
Algas	AL	trófico
Actinomicetes	ACT	trófico
Basidiomicetos	BAS	trófico
Rocha Lisa	SR	abrigo
Rocha rugosa	RR	abrigo
Matacão	BD	abrigo
Bloco	CBD	abrigo
Cascalho	GR	abrigo
Areia	SND	geral
Silte/argila/lama	SCM	geral
Espeleotema	SP	geral
Hardpan	HP	geral
Substrato inorgânico	OTI	geral
Greta de contração	CG	abrigo
piso escorrimento	FR	geral
Termiteiros	TM	geral
Carcaça de animais	CRC	trófico
Pteridófitos	PT	trófico
Concha	CON	abrigo

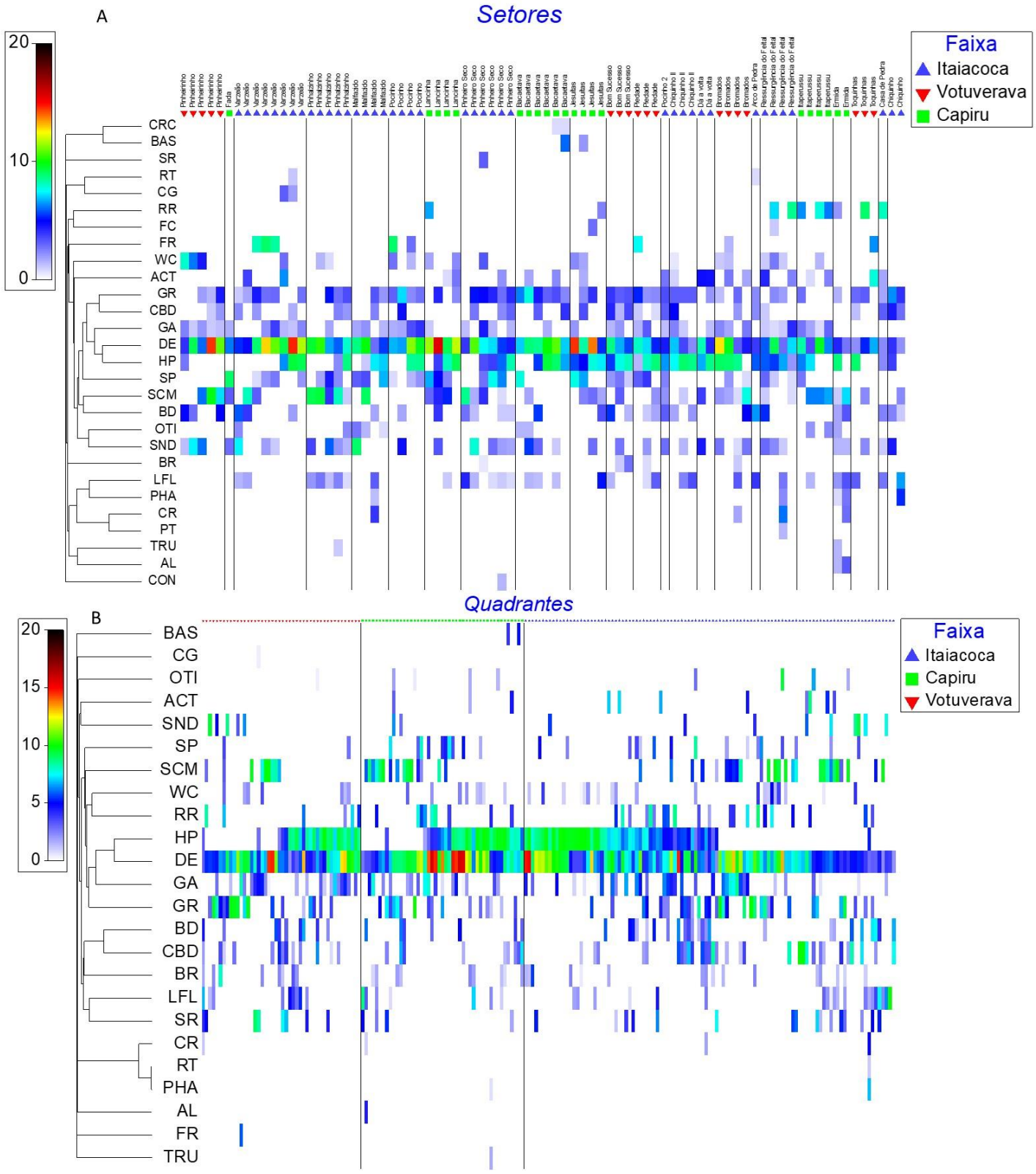


Figura 7. Variações na distribuição e porcentagem de área ocupada (valores de 0 a 20) dos componentes do substrato no piso das cavernas e suas associações com a distância da entrada (DEE) nos setores (A) e quadrantes (B). O dendrograma a esquerda agrupa as unidades amostrais de acordo com o índice de associação de Whittaker.

Nos setores analisados, constatou-se que elementos do substrato, como hardpan, guano, espeleotemas e blocos estão associados à distância em relação à entrada, ocorrendo em locais mais profundos nas cavernas. Por outro lado, elementos como carcaças de animais, conchas, algas, troncos e basidiomicetos mostram uma menor associação com a distância da entrada das cavernas, ocorrendo em locais próximos da entrada.

Nos quadrantes os elementos dos substratos que tiveram maior associação com a distância da entrada foram guano, hardpan, cascalho e rocha rugosa. Tais substratos ocorreram em locais mais distantes das entradas. Por outro lado, troncos, basidiomicetos, carcaça de animais e piso com escorrimento foram encontrados nos quadrantes mais próximos às entradas (Figura 10).

4.2 Riqueza e composição de invertebrados cavernícolas

Como anteriormente mencionado, foram amostradas 23 cavernas, com a realização de 80 setores e 240 quadrantes. No entanto, apenas 200 quadrantes apresentaram a presença de fauna, resultando em 40 quadrantes sem a coleta de invertebrados. Nossas amostras revelam um total de 365 espécies de invertebrados, distribuídas em pelo menos 40 ordens distintas. Alguns representantes são mostrados na figura 8.

Entre as faixas calcárias, a formação Capiru apresentou a maior riqueza média de espécies, 53.8 espécies, seguida pela formação Itaiacoca com uma média de 52.6 espécies, enquanto a formação Votuverava apresentou uma média de 48.2 espécies (Figura 10), considerando os invertebrados coletados em setores, quadrantes e em coletas gerais pelas cavernas. Em todas as escalas Araneae, Diptera e Acari foram os grupos mais ricos em diversidade de espécies (Figura 9).

Em relação à fauna troglóbia, 27 morfótipos foram identificadas: *Eukoenenia* sp1 (Palpigradi: Eukoeneniidae), *Eukoenenia* sp2 (Palpigradi: Eukoeneniidae), *Eukoenenia* sp3 (Palpigradi: Eukoeneniidae), *Eukoenenia* sp4 (Palpigradi: Eukoeneniidae), *Pseudochthonius* sp1 (Pseudoscorpiones: Chtoniidae), *Pseudochthonius* sp2 (Pseudoscorpiones: Chtoniidae), Gonyleptidae sp1 (Opiliones), Gonyleptidae sp2 (Opiliones), Gonyleptidae sp3 (Opiliones), Hahniidae sp.1 (Araneae), Prodidomidae sp1 (Araneae), Prodidomidae sp2 (Araneae), *Acherontides aff. Eleonorae* (Collembola: Hypogastruridae), *Arrhopalites* sp1 (Collembola: Arrhopalitidae), *Arrhopalites* sp2 (Collembola: Arrhopalitidae), Entomobryomorpha sp1 (Collembola), Entomobryomorpha sp2 (Collembola), Symphypleona sp1 (Collembola), Symphypleona sp2 (Collembola), Philosciidae sp1 (Isopoda), Plathyarthridae sp1 (Isopoda), *Trichorhina* sp1 (Isopoda: Plathyarthridae), *Peridontodesmella* sp 1 (Diplopoda:

Pyrgodesmidae), Pyrgodesmidae sp2 (Diplopoda), Pyrgodesmidae sp3 (Diplopoda), *Crypturodesmus* sp.1 (Diplopoda: Oniscodesmiddae), Pyrgodesmidae sp2, Pyrgodesmidae sp3, e Stylommatophora sp1.

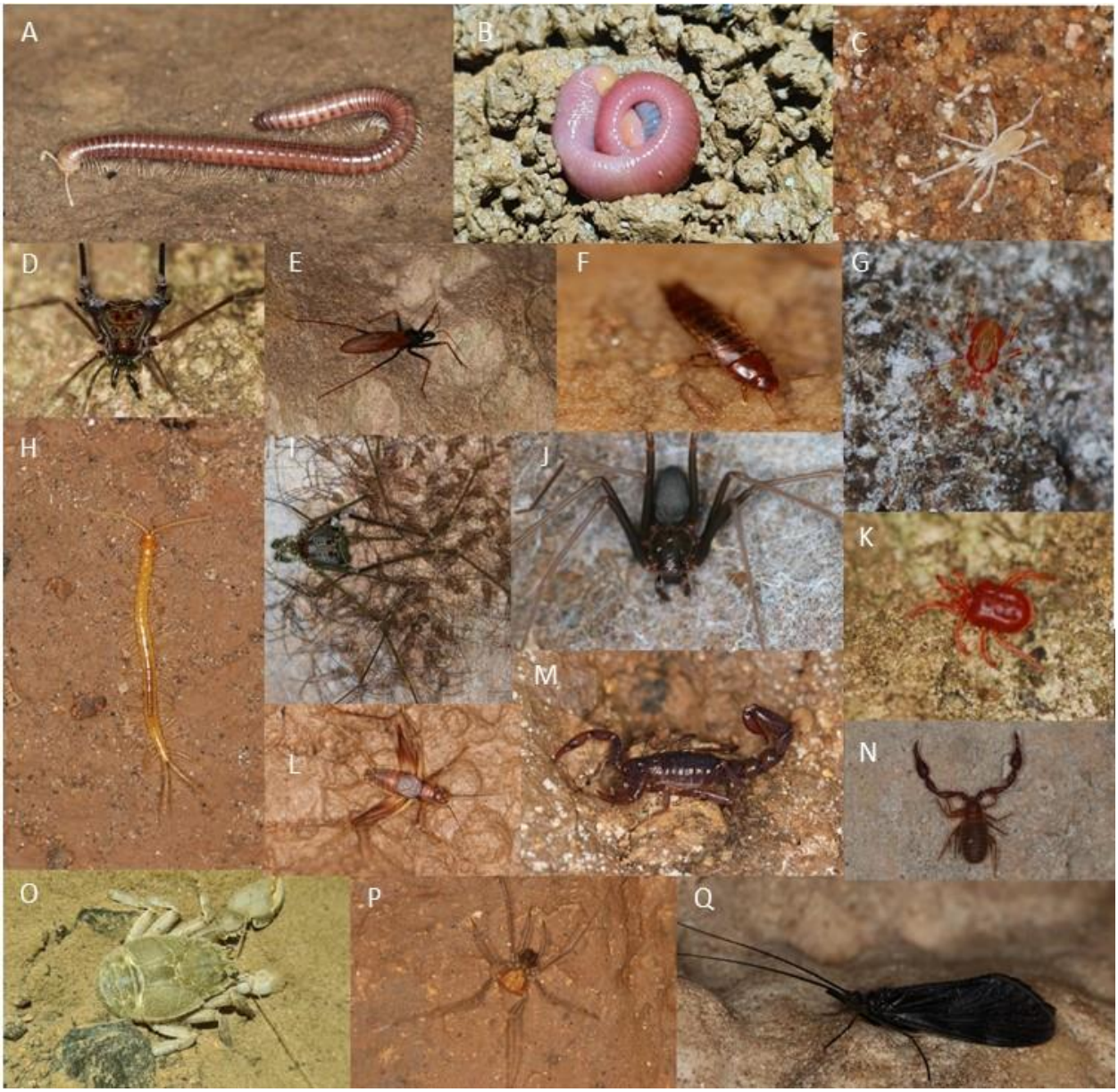


Figura 8. Invertebrados coletados em 23 cavernas de três faixas carbonaticas na região metropolitana de Curitiba, Paraná. A) *Pseudonannolene* sp. B) Hirudinida sp. C) Rhagidiidae sp1. D) Gonyleptidae sp1. E) *Zelurus travassosi* F) Staphylinidae sp. G) *Erythracarus* sp2. H) *Cryptops* sp. I) *Serracutisoma* sp. J) *Loxosceles* sp. K) Trombidiformes sp3. L) *Endecous* sp. M) Bothriuridae sp. N) Chernetidae sp. O) *Aegla* sp. P) *Daguerreia inermis* sp2. Q) Trichoptera sp.

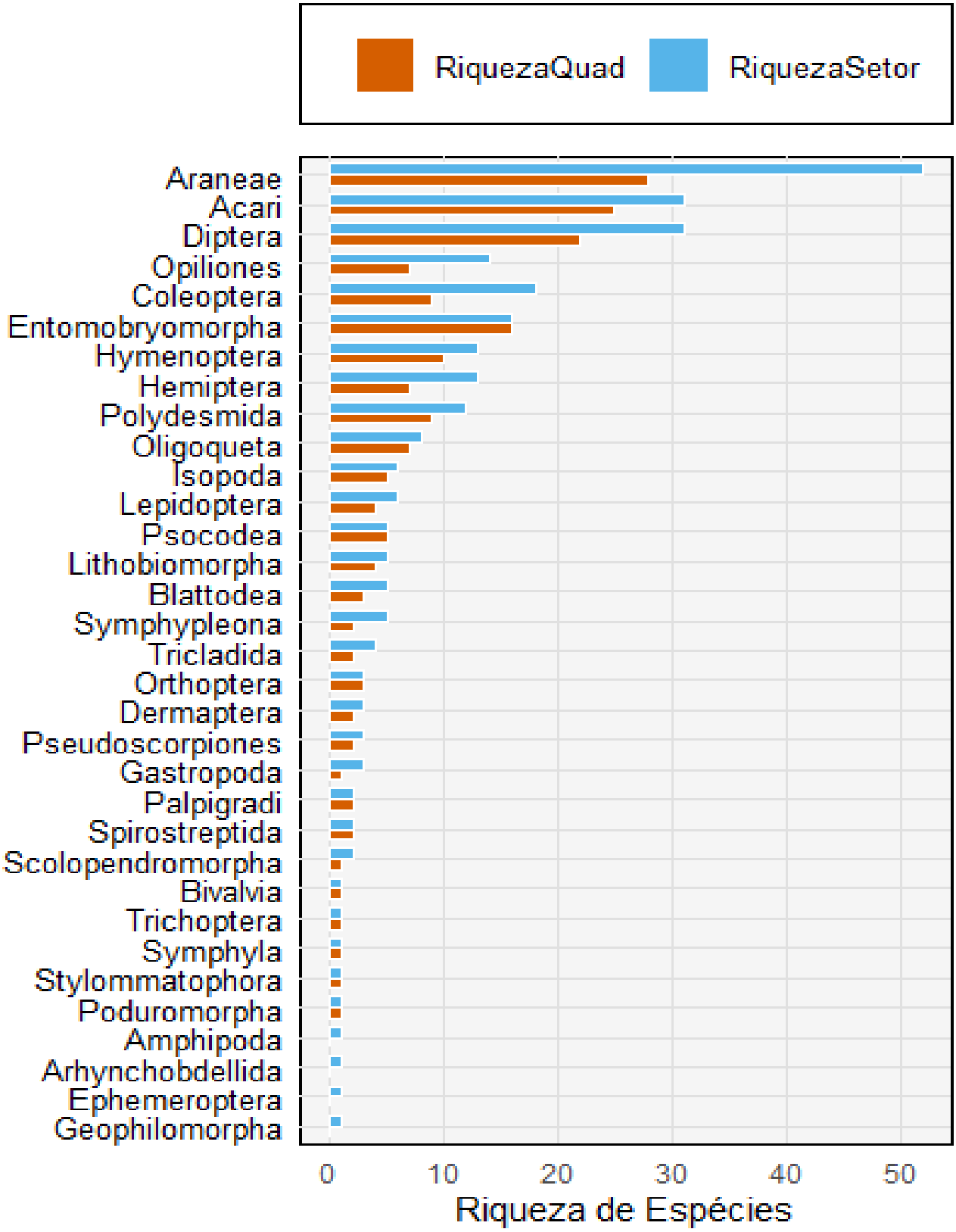


Figura 9. Riqueza de espécies de invertebrados em distintos taxons, observados em 23 cavernas no estado do Paraná. Linhas azuis representa a riqueza nos setores e as linhas laranjas representa a riqueza nos quadrantes. Quadrantes (Quad)

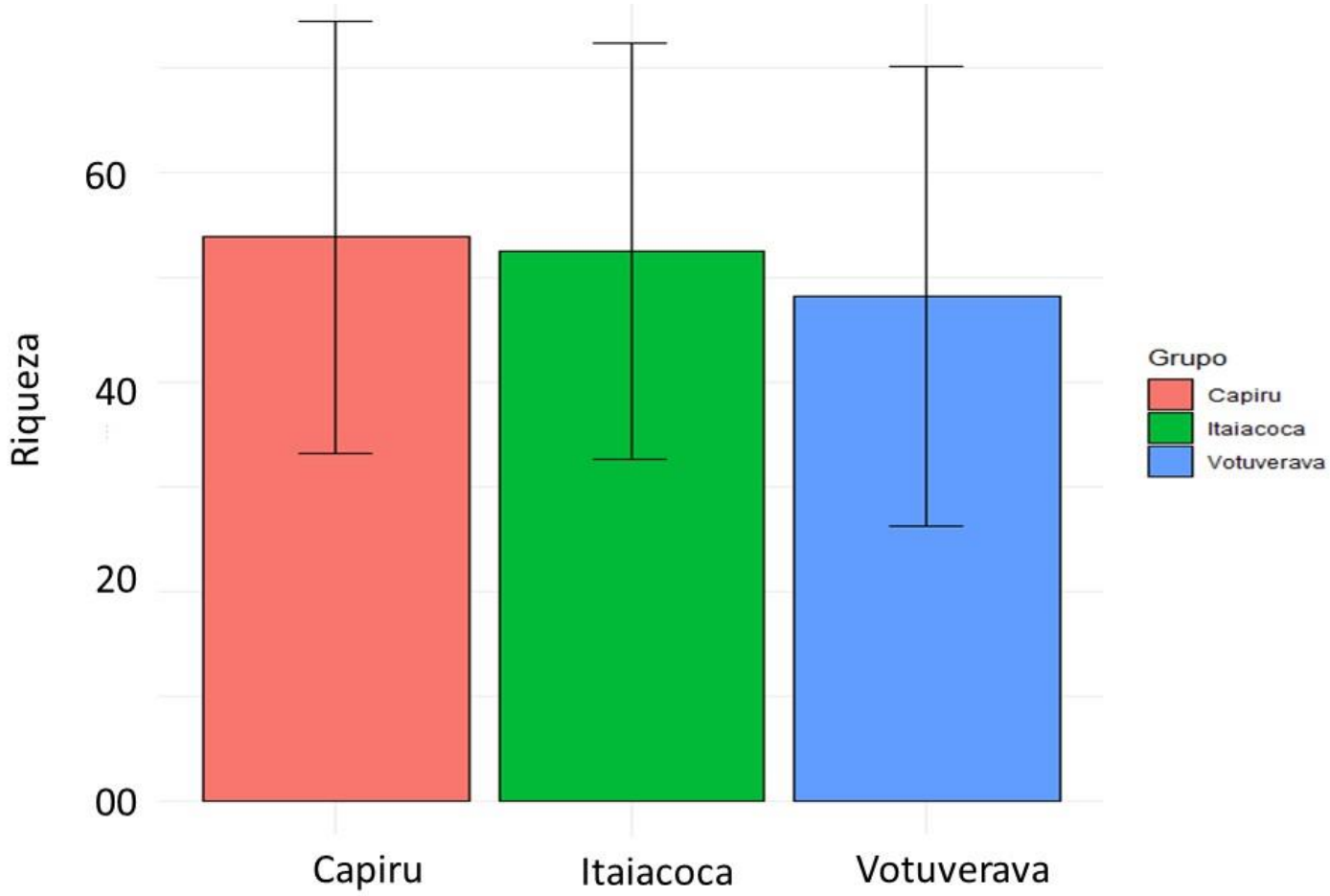


Figura 10. Número médio de espécies (riqueza) observados em 23 cavernas de três faixas calcárias da região metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil.

A ANOSIM revelou diferenças significativas na composição da fauna cavernícola em algumas das escalas analisadas. Nos quadrantes, as faixas Itaiacoca e Votuverava apresentaram a maior similaridade, seguida por Itaiacoca e Capiru, enquanto as formações Votuverava e Capiru apresentaram diferença significatica na composição da fauna com o valor de Rglobal=0,1 e valor p=0,01.

Nos setores, resultados semelhantes foram obtidos, com as faixas Itaiacoca e Votuverava apresentando a maior similaridade, seguidas por Itaiacoca e Capiru, enquanto as faixas Votuverava e Capiru apresentaram diferença significativa na composição da fauna com valor do Rglobal=0,14 e valor de p=0,01.

Em relação às cavernas, a análise de similaridade ANOSIM revelou diferenças significativas na composição da fauna, apresentando um R global de 0,23 com um P global de 0,011. Além disso, ao examinar as cavernas por faixas não foi observada diferença significativa na composição da fauna.

Para os troglóbios não houve diferença significativa na composição da fauna entre as cavernas. A figura 11 mostra a dispersão da similaridade entorno da média para quadrantes, setores, cavernas (fauna total e troglóbios).

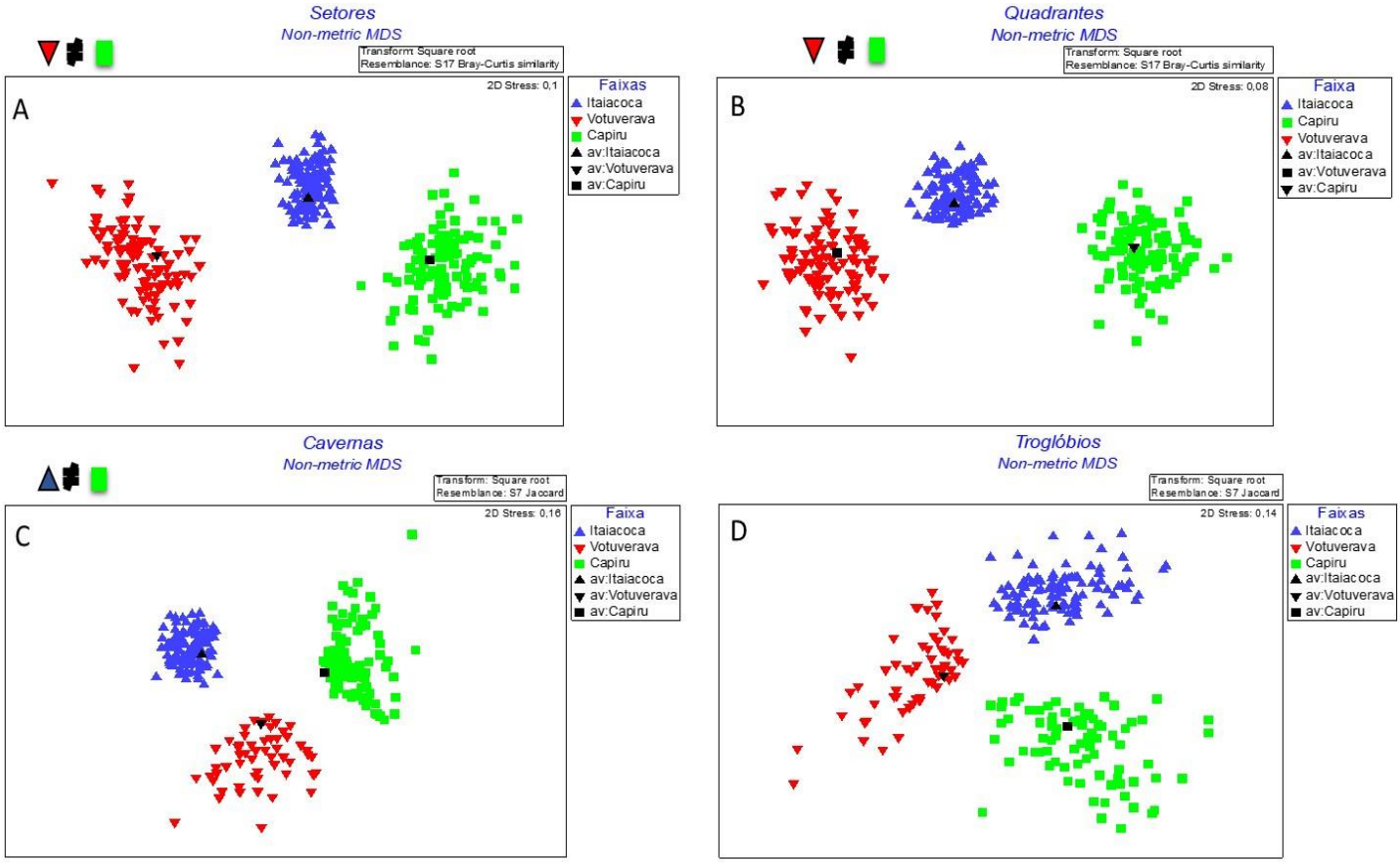


Figura 11. Multidimensional escala (MDS) mostrando a dispersão em torno da média (av) na similaridade da fauna em setores (A), quadrantes (B), cavernas (C) e troglóbios (D). A dispersão dos pontos indica a variação na composição da fauna dentro de cada faixa calcária. Faixas com pontos mais dispersos têm maior variabilidade, enquanto faixas com pontos mais agrupados são mais homogêneas. Os símbolos acima dos gráficos demonstram as faixas calcárias que apresentaram diferença significativa na composição da fauna na escala analisada. Triângulo vermelho: Faixa Votuverava, Quadrado verde: Faixa Capiru e Triângulo azul: Faixa Itaiacoca.

As curvas de rarefação baseada no número de indivíduos (abundância) realizadas separadamente para setores e quadrantes nas faixas calcárias, mostrou que nos setores a riqueza de espécies é potencialmente maior do que o amostrado, revelando uma elevada riqueza potencial para estas cavernas (Figura 12).

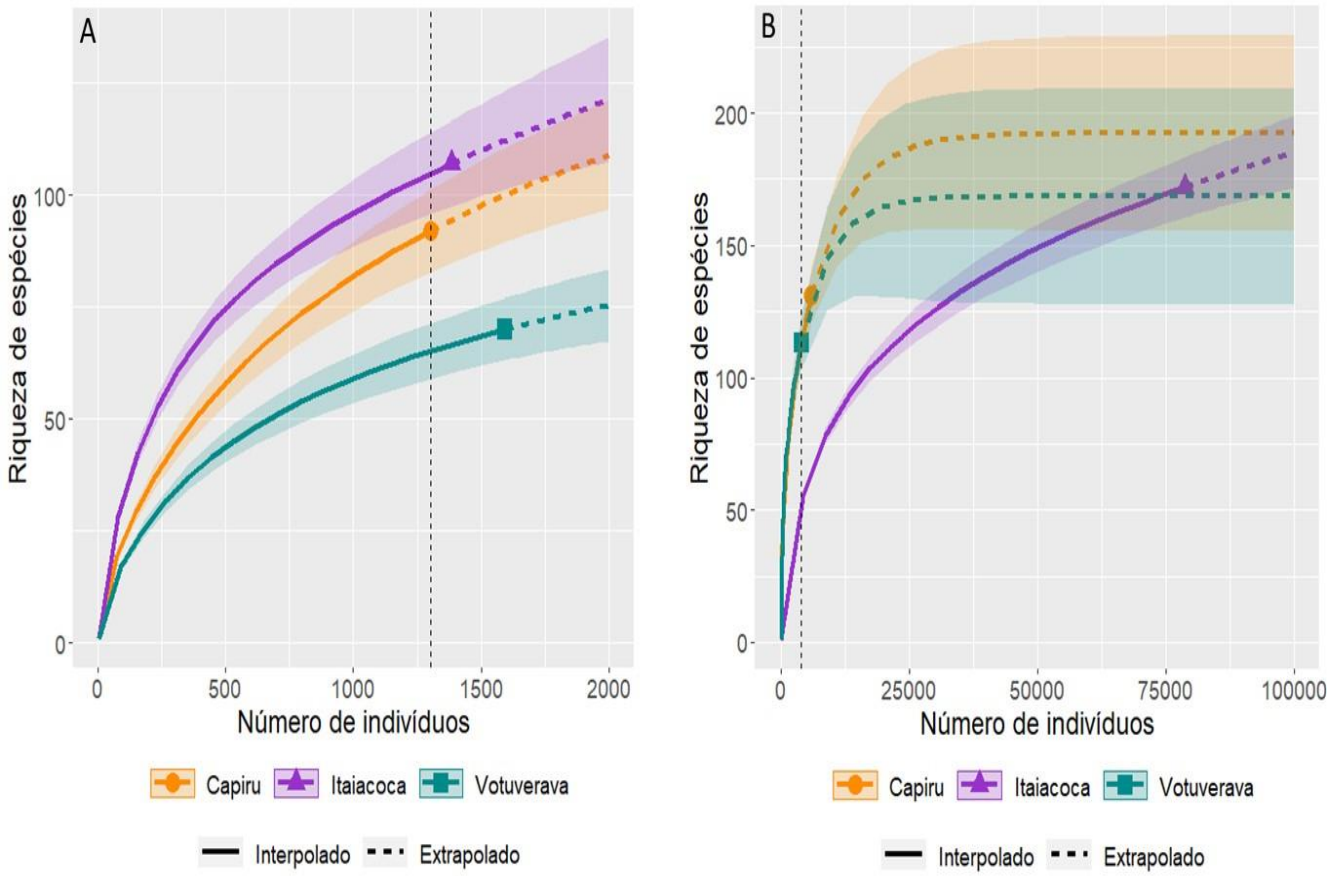


Figura 12. Curvas de rarefação baseada em indivíduos. A) Curva de rarefação realizada em microescala (Quadrantes) B) Curva de rarefação realizada em mesoescala (setores). Linha tracejada preta, representa a comunidade com menor abundância, as linhas coloridas contínuas representam a riqueza e abundância de espécies coletadas, enquanto as tracejadas representam a extrapolação dos dados.

4.2 Relação entre as variáveis abióticas e a fauna nas cavernas

A análise de DistLM revelou que nos setores apenas a diversidade de abrigo e a temperatura atuaram como variáveis preditoras de variações na composição (AICc=661,9; R^2=0,06; P=0,04). Para os quadrantes, as variáveis que determinaram significativamente a composição foram a distância da entrada e a distância entre as cavernas (AICc=1685,6; R^2=0,025; P=0,001).

A análise de Redundância Baseada em Distância (dbRDA) nos setores, indicou 46% de ajuste ao modelo e 9% de resposta ao conjunto de variáveis testadas. Para os quadrantes o dbRDA teve 54.9% de ajuste ao modelo e 3.5% das variáveis testadas determinando a variação da fauna (Figura. 13).

Nenhuma das variáveis abióticas determinou variações na riqueza de espécies de invertebrados nas cavernas estudadas.

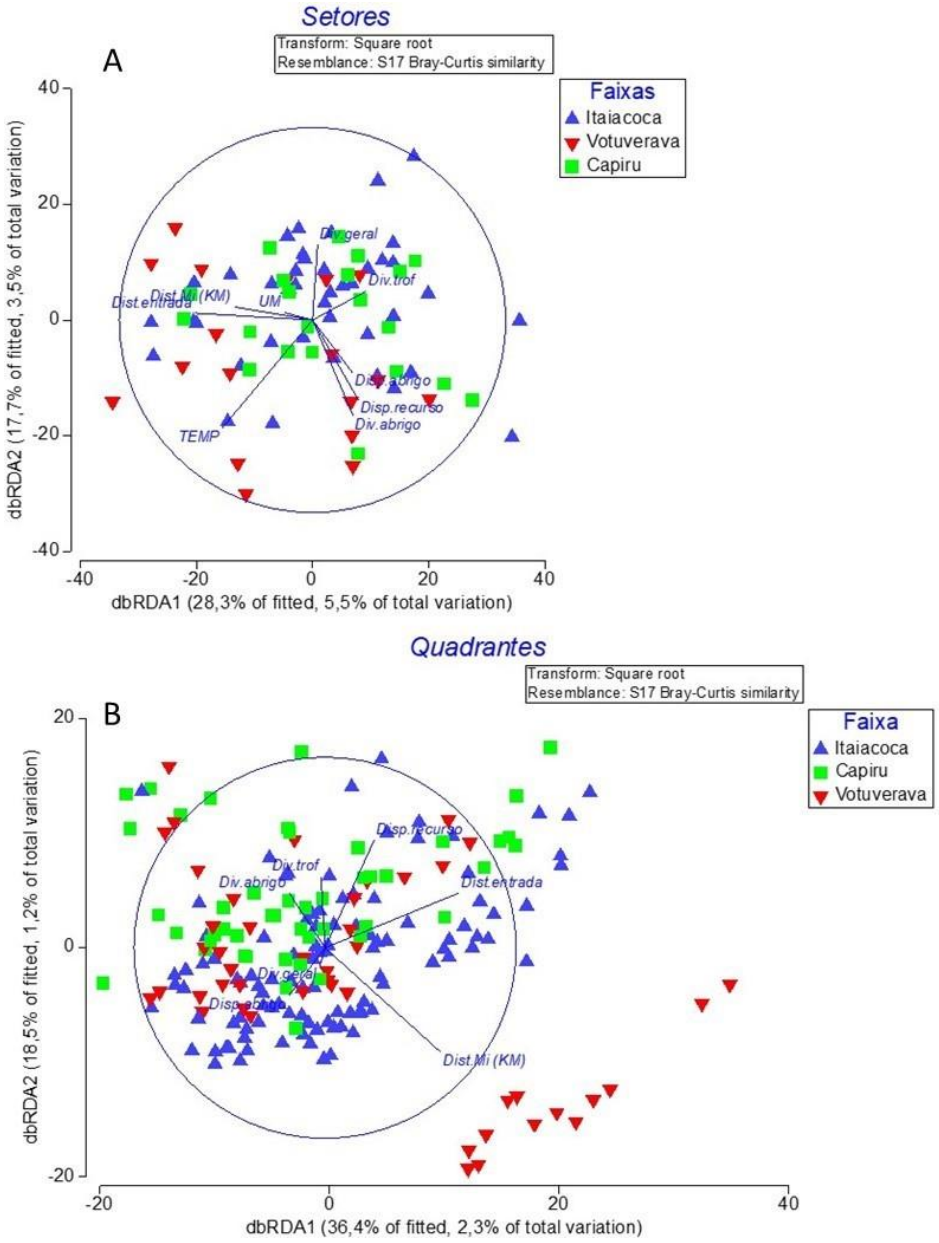


Figura 13. Análise de redundância baseada em distância (dbRDA) mostrando a distribuição dos valores das variáveis ambientais e a sua influência na determinação da composição da fauna das cavernas da região Norte do Paraná em Setores (A) e Quadrantes (B).

4.3 Correlação entre as variáveis abióticas

Os testes de correlação de Spearman nos setores e quadrantes demonstraram a relação entre as variáveis abióticas estudadas. No que diz respeito aos setores, observou-se uma relação significativa entre a distância da entrada e todas as variáveis testadas, com exceção da distância da mineração e da umidade.

Por outro lado, destaca-se que a umidade apresentou apenas uma relação negativa significativa com a temperatura. Todos os resultados obtidos através da correlação de Spearman nos setores estão presentes na tabela 3.

Além disso, as Figuras 14 e 15 e a tabela 3 exibem graficamente a relação significativa entre o tempo de coleta e a relação com à distância da entrada nos setores.

Tabela 3. Matriz de correlação de spearman mostrando as relações entre as variáveis testados nos setores. Umidade (UM), temperatura (TEMP), Diversidade (Div), Disponibilidade (Disp), Distância geografica (dist), Mineração (Mi).

Correlation Matrix

	UM	TEMP	Dist.entrada	Div.trof	Div.abrigo	Div.geral	Disp.recurso	Disp.abrigo	Dist,Mi (KM)	Tempo.coleta
UM	—									
TEMP	-0.300 **	—								
Dist.entrada	-0.054	0.185	—							
Div.trof	0.032	-0.056	-0.324 **	—						
Div.abrigo	0.116	-0.090	-0.323 **	0.314 **	—					
Div.geral	0.162	-0.102	-0.285 *	0.319 **	0.400 ***	—				
Disp.recurso	0.065	-0.152	-0.315 **	0.277 *	0.081	0.198	—			
Disp.abrigo	0.086	-0.087	-0.273 *	0.080	0.381 ***	0.384 ***	-0.009	—		
Dist,Mi (KM)	0.117	0.439 ***	-0.012	-0.224 *	0.054	-0.006	-0.054	-0.013	—	
Tempo.coleta	0.107	0.034	-0.478 ***	0.440 ***	0.523 ***	0.390 ***	0.388 ***	0.158	-0.006	—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

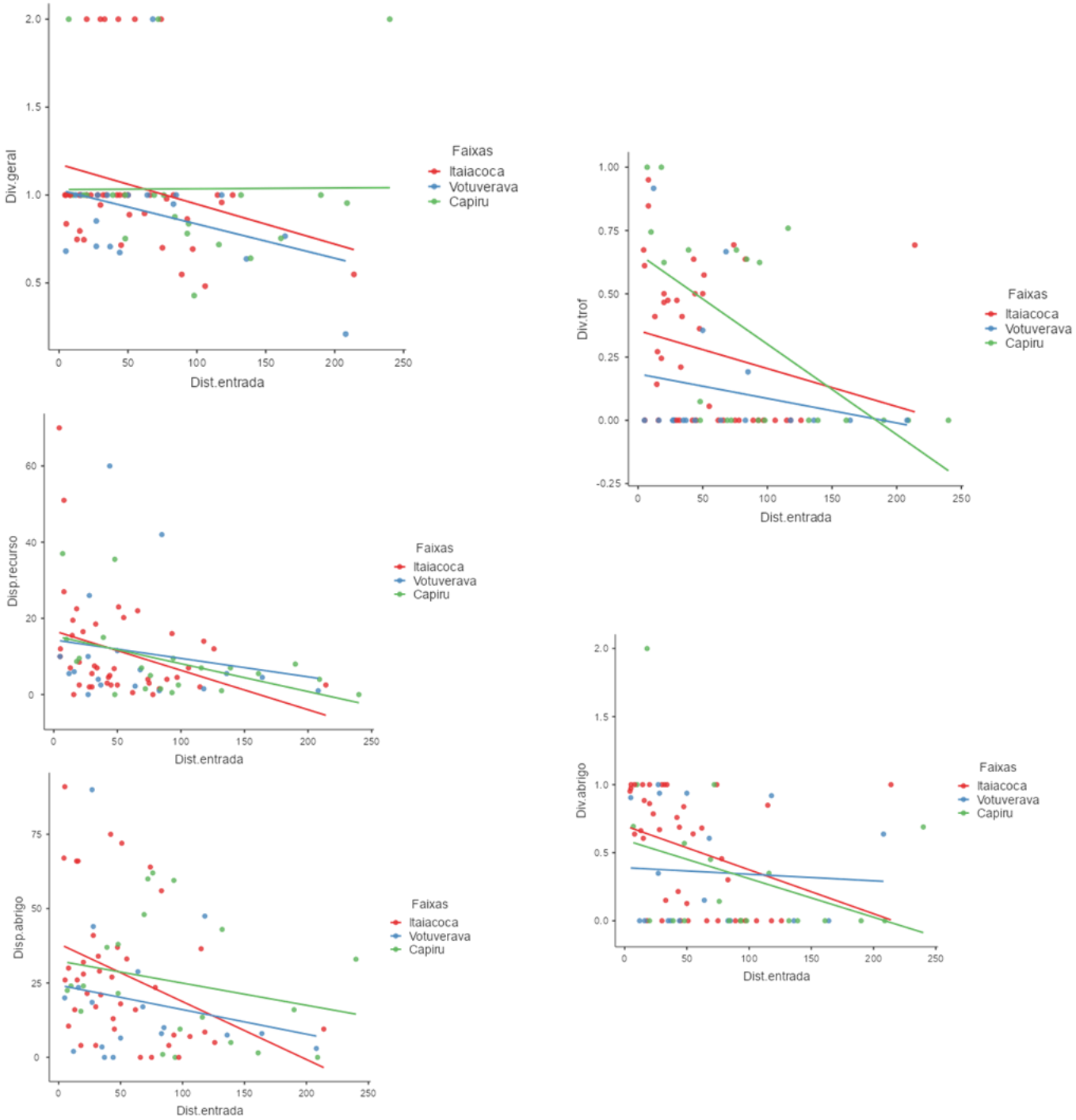


Figura 14. Relação entre diversidade e disponibilidade de substratos, de abrigos e trófica com a distância da entrada nos setores de coleta. Diversidade (Div), Disponibilidade (Disp), Distância (dist).

A diversidade geral dos substratos diminuiu com a distância da entrada nas faixas Votuverava e Itaiacoca, enquanto nas cavernas da faixa Capiru ela se manteve constante ao longo da cavidade. Observa-se uma redução tanto na diversidade trófica quanto na diversidade de abrigos em todas as faixas, à medida que a distância da entrada aumenta.

Esse mesmo padrão é evidente quando se considera a disponibilidade de recursos e abrigos, mostrando uma diminuição gradual com o afastamento da entrada.

Assim, pode-se observar que as regiões próximas às entradas das cavernas exibem uma maior heterogeneidade de habitats, contrastando com as áreas mais profundas, que tendem a apresentar habitats mais homogêneos.

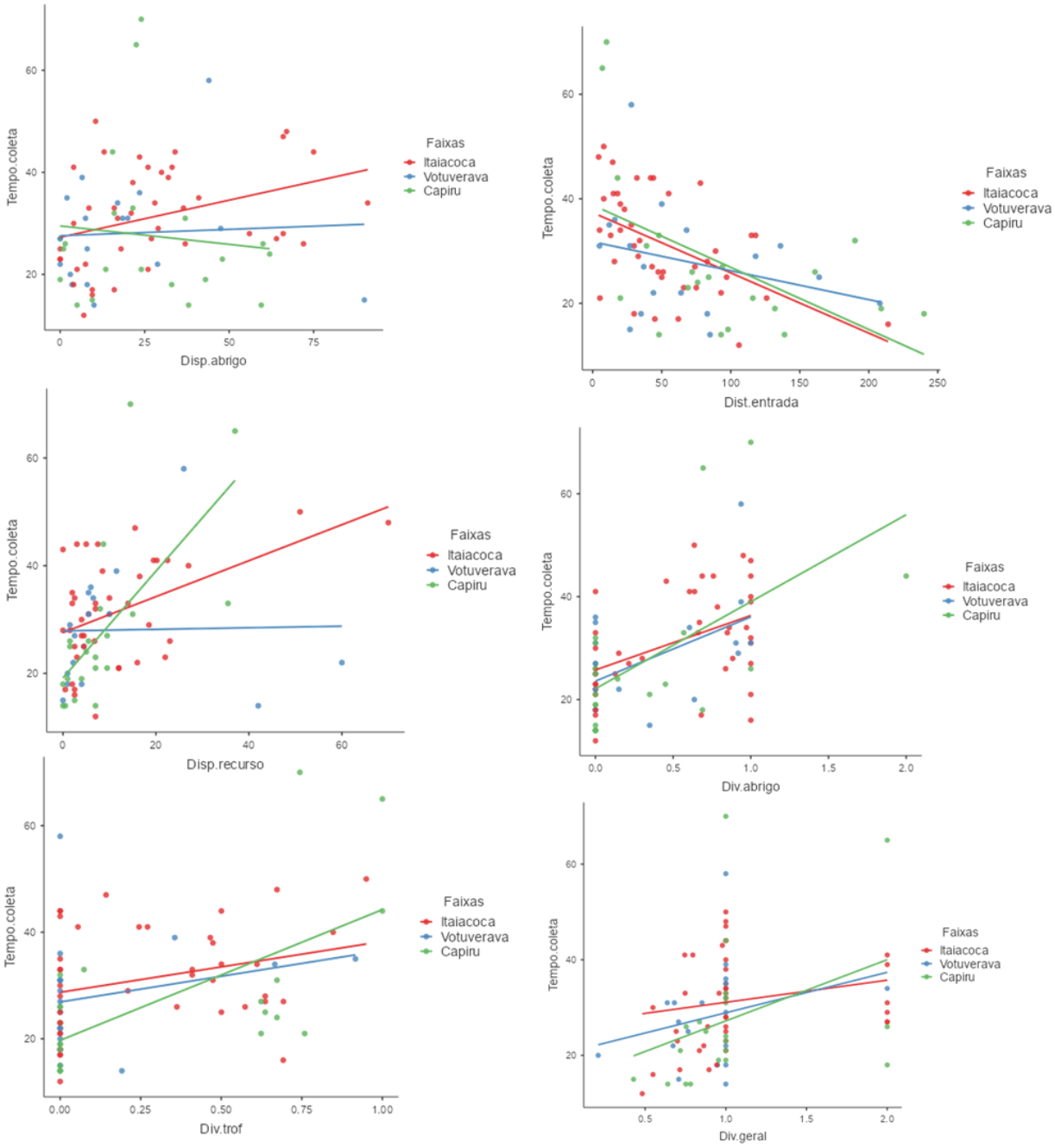


Figura 15. Testes de correlação de Spearman demonstrando a relação entre o tempo de coleta e a diversidade e disponibilidade de substratos, de abrigos e trófica e distância da entrada (metros) nos setores de coleta. Diversidade (Div), Disponibilidade (Disp), Distância (dist).

O intervalo de tempo dedicado à coleta nos setores mostrou uma redução proporcional em relação ao aumento na distância da entrada. Isso sugere que ambientes mais homogêneos proporcionam uma menor diversidade de habitats para a fauna, resultando em coletas mais rápidas devido ao menor número de locais a serem investigados. Esse padrão também é evidenciado pelo aumento no tempo de coleta à medida que a diversidade de substratos aumenta, indicando que a exploração de áreas mais diversas demanda mais tempo para uma investigação minuciosa.

Os resultados obtidos através da correlação de Spearman para as variáveis nos quadrantes estão expostos na tabela 4. As figuras 15 e 16 demonstram graficamente a relação entre a distância da entrada e o tempo de coleta para alguma das variáveis testadas.

Tabela 4. Matriz de correlação de spearman mostrando as relações entre as variáveis testados nos quadrantes. Umidade (UM), temperatura (TEMP), Diversidade (Div), Disponibilidade (Disp), Distância geografica (dist), Mineração (Mi).

Correlation Matrix

	Dist.entrada	Div.trof	Div.abrigo	Div.geral	Disp.recurso	Disp.abrigo	Dist.Mi (KM)	tempo.coleta
Dist.entrada	—							
Div.trof	-0.310 ***	—						
Div.abrigo	-0.415 ***	0.246 ***	—					
Div.geral	-0.112	0.131	0.529 ***	—				
Disp.recurso	-0.166 *	0.354 ***	-0.068	0.220 **	—			
Disp.abrigo	-0.254 ***	0.043	0.508 ***	0.380 ***	-0.147 *	—		
Dist.Mi (KM)	-0.080	-0.051	-0.041	-0.005	0.027	0.135	—	
tempo.coleta	-0.307 ***	0.163 *	0.274 ***	0.087	0.086	0.234 ***	0.059	—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

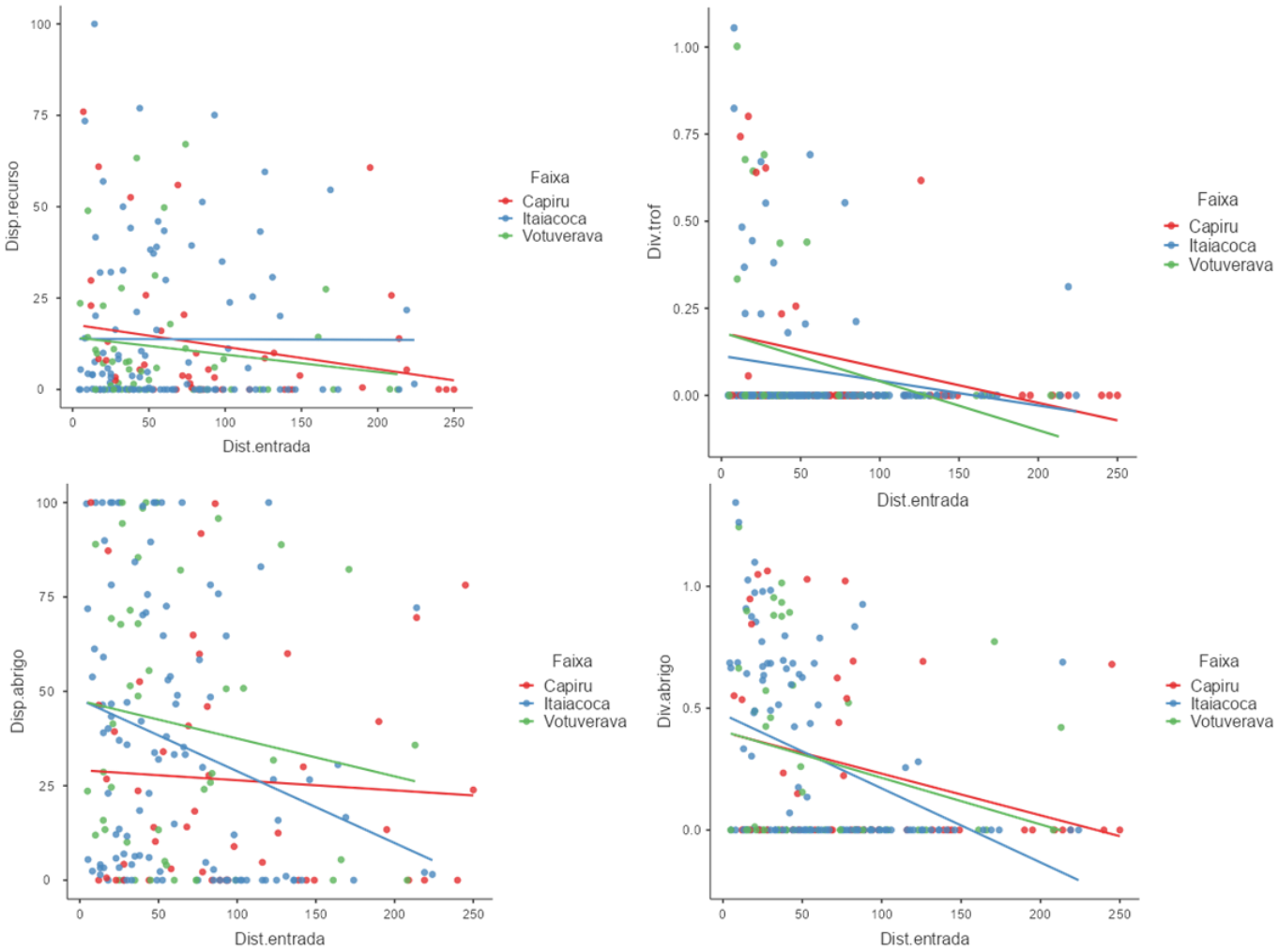


Figura 16. Relação entre a distância da entrada com a disponibilidade de recurso, disponibilidade de abrigo, diversidade trófica e diversidade de abrigo nos quadrantes de coleta. Diversidade (Div), Disponibilidade (Disp), Distância (dist).

Da mesma forma que nos setores, a diversidade de substratos nos quadrantes mostrou-se significativa e negativamente relacionada à distância da entrada e . Isso significa que os quadrantes situados mais profundamente nas cavidades exibiram uma menor heterogeneidade de habitats para a fauna. Além disso, observa-se que o tempo de coleta diminui à medida que a distância da entrada aumenta e, por outro lado, aumenta conforme a diversidade de substratos se intensifica (Figura 17).

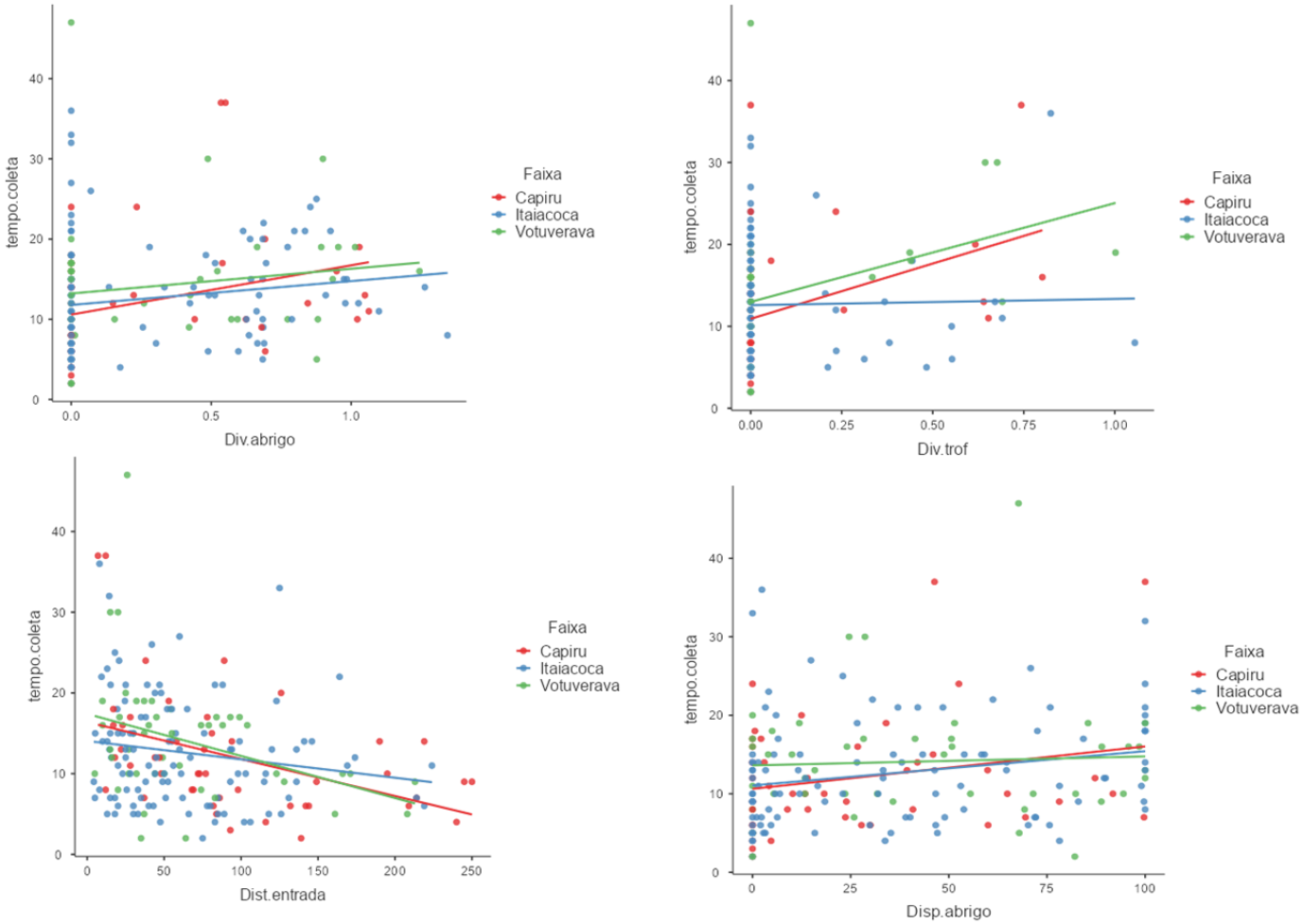


Figura 17. Relação entre o tempo de coleta com a disponibilidade de recurso, disponibilidade de abrigo, diversidade trófica e diversidade de abrigo nos quadrantes de coleta.

4.4 Análise de variância das variáveis abióticas entre as faixas carbonáticas

Testes de ANOVA revelam diferenças significativas na média de algumas das variáveis testadas entre as faixas calcárias Itaiacoca, Votuverava e Capiru (Tabela 5). Para distância de mineração foi encontrada diferença significativa entre as três faixas calcárias e o mesmo foi encontrado para temperatura. Assim, as cavernas nas diferentes faixas calcárias apresentam variações significativas em suas médias de temperatura e distância de minerações (Tabela 5).

Essa análise estatística revelou, ainda, diferenças significativas na média de umidade entre a faixa Itaiacoca e as demais faixas. Isso indicou que as cavernas nessa faixa exibem níveis de umidade mais elevados em comparação com as faixas Capiru e Votuverava (Figura 18).

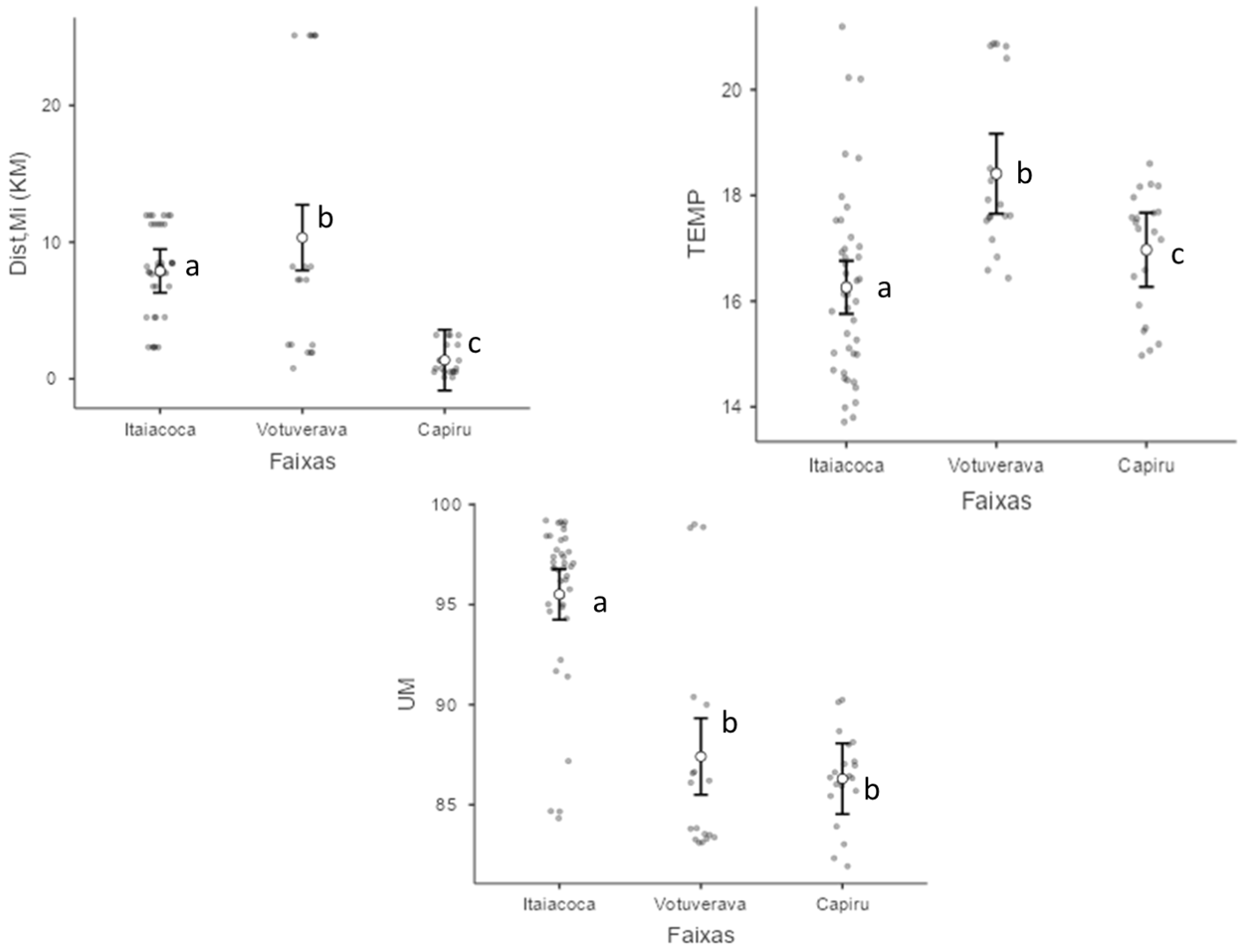


Figura 18. Variação na média de valores em relação à distância da mineração, temperatura e umidade nas faixas calcárias. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa entre as médias nas faixas calcárias, enquanto letras diferentes indicam que há diferença entre as médias.

Tabela 5. Resultados significativos no teste de ANOVA entre as faixas calcárias Capiru, Votuverava e Itatiacoca. Para detalhes veja figura 17. Distância da mineração mais próxima (Dist. Mineração), Umidade (Umid.), temperatura (Temp.), Soma dos Quadrados (S Quad), quadrado médio (Quad M).

Dist. Mineração	S Quad	gl	Quad M	F	p
Modelo Global	892	2	446.1	17.1	< .001
Faixas	892	2	446.1	17.1	< .001
Resíduos	2014	77	26.1		
Umidade	**S Quad**	**gl**	**Quad M**	**F**	**p**
Modelo Global	1525	2	762.3	46.0	< .001
Faixas	1525	2	762.3	46.0	< .001
Resíduos	1276	77	16.6		
Temperatura	**S Quad**	**gl**	**Quad M**	**F**	**p**
Modelo Global	57.9	2	28.94	11.1	< .001
Faixas	57.9	2	28.94	11.1	< .001
Resíduos	200.1	77	2.60		

5 Discussão

Os resultados deste estudo destacam que, embora não tenhamos encontrado diferenças significativas na composição do substrato entre as faixas calcárias, observamos que a composição da fauna é influenciada, nos setores, pela diversidade de abrigo e a temperatura enquanto, nos quadrantes, pela distância da entrada e a distância entre as cavernas. Além disso, foi observado que a similaridade da fauna variou significativamente entre as faixas calcárias Capiru e Itaiacoca, enquanto na meso e microescala a similaridade variou entre as faixas mais próximas, Capiru e Votuverava.

Portanto, de acordo com nossas hipóteses, a distância geográfica entre as cavernas pode dificultar a dispersão de espécies, promovendo uma singularidade faunística entre as faixas carbonáticas. Para as diferenças observadas na micro e meso escala, demonstra que mesmo regiões mais próximas podem apresentar diferenças na composição da fauna, devido a processos e condições locais, como características do ambiente subterrâneo e processos baseados em nicho operando em micro e mesoescala, como a disponibilidade e diversidade de recurso e abrigo (Simões et al. 2015; Zagmajster et al. 2018; Mammola et al. 2020).

Em relação aos setores (mesoescala) foi observado que a diversidade de abrigo e a temperatura atuaram como os principais preditores na variação da composição da fauna. Para os quadrantes (microescala) a distância da entrada e a distância entre as cavernas foram determinantes na composição da fauna. Portanto, a fauna das cavernas do Paraná

pode responder significativamente a uma série de fatores ambientais atuando em diferentes escalas.

5.1 Influência da características físicas, tróficas e microclimáticas das cavernas

A distância da entrada mostrou correlação significativa com a disponibilidade e diversidade de abrigo e recurso. Assim, as cavernas do norte do Paraná demonstram um gradiente de disponibilidade dessas condições da entrada até as regiões mais profundas das cavernas. A influência da distância da entrada, conforme observado, é consistentemente documentada na literatura como um fator crucial nas características físicas e microclimáticas das cavernas. Essa característica cria uma heterogeneidade de habitats dentro da mesma cavidade, favorecendo espécies com preferências distintas por micro-habitats (Pellegrini et al., 2016; Pacheco et al., 2020; Nicolosi et al., 2021; Oliveira et al., 2022).

Em relação à influência da umidade, estudos têm demonstrado que ambientes mais úmidos em cavernas suportam uma maior diversidade de espécies (Culver & Pipan, 2009; Moldovan et al., 2014). No entanto, os resultados de nosso estudo contradizem essa tendência, uma vez que as faixas calcárias com maior umidade não apresentaram uma média mais elevada na riqueza de espécies. Portanto, sugere-se que, ao contrário das expectativas, a fauna das cavernas do norte do Paraná não está sendo influenciada de maneira significativa pela variação de umidade nos ambientes subterrâneos, mesmo a umidade variando significativamente entre as faixas carbonáticas. Destaca-se, no entanto, que os valores de unidade nas cavernas presentes nas três faixas são bastante elevados, e esta pode ser uma das razões pelas quais não foi observada esta relação. Resumindo, as cavernas já se apresentam em condições de elevada umidade (mesmo aquelas nas quais os valores foram menores) de forma que a fauna tende a já não mais responder a esta variável pois as variações observadas já se encontram acima dos valores que podem ser limitantes.

Nossos resultados revelam que a temperatura exerce uma influência significativa na composição da fauna em mesoescala. Estudos indicam que dentre as espécies subterrâneas, aquelas que habitam as regiões mais profundas das cavernas demonstram menor tolerância as variações de temperatura. Por outro lado, essas espécies de locais mais profundos estão relativamente mais protegidas contra as flutuações térmicas em comparação com aquelas que residem nas partes mais próximas a entrada (Colado et al., 2022). Essa dinâmica sugere que a fauna das cavernas paranaenses pode apresentar uma considerável vulnerabilidade às mudanças climáticas. Em um cenário de alterações

climáticas, as espécies de habitats mais superficiais teriam uma margem de tolerância reduzida, o que poderia impactar significativamente a composição dessas comunidades subterrâneas (Arribas et al., 2012; Colado et al., 2022; Deutsch et al., 2008).

A diversidade de abrigos determinou a composição das espécies em mesoescala. A presença de uma variedade de substratos proporciona inúmeros macro e micro espaços, ampliando a disponibilidade abrigos e recursos. Estes espaços não apenas servem como abrigo contra variações ambientais e predação, mas também como locais de reprodução, oferecendo condições microclimáticas mais favoráveis para algumas espécies de invertebrados (Ferreira et al. 2009, Cardoso et al. 2022). Essa multiplicidade de microambientes propicia um suporte ecológico mais amplo, contribuindo para a complexidade e diversidade da fauna nas cavernas estudadas.

Em microescala, a distância da entrada e a distância entre as cavernas emergiram como variáveis significativamente relacionadas à composição da fauna. A influência da distância da entrada sobre a composição da fauna é documentada na literatura, evidenciando um gradiente de condições e recursos que se estende desde a entrada até as áreas mais profundas das cavernas. Esse gradiente resulta na formação de diferentes micro-habitats ocupados por espécies distintas, destacando as diferentes interações ecológicas ao longo das cavernas (Prous et al., 2015; Mammola & Isaia, 2018; Lunghi & Manenti, 2020).

A distância geográfica entre as cavernas e a diferença na composição de espécies pode estar relacionada ao fato de que muitas especies que habitam as cavernas são originalmente de ambientes epígeos, encontrando em cavernas recursos alimentares e abrigos (Rabelo et al., 2021). Portanto, a discrepância na composição de espécies pode estar mais associada à fauna epígea de cada local onde as cavernas estão inseridas do que à composição dos substratos entre as cavernas, uma vez que estes não apresentaram diferenças significativas entre as escalas analisadas. Esse contexto ressalta a importância de considerar as interações entre a fauna epígea e as espécies cavernícolas ao interpretar as variações na composição faunística entre diferentes cavernas.

5.2 Similaridade da fauna entre as faixas calcárias

Considerando as escalas micro e meso, foi observado que apenas as faixas Capiru e Votuverava apresentaram diferenças significativas na composição da fauna. Considerando estas escalas de análise, essas duas faixas mostraram-se mais dissimilares entre si do que em relação à faixa Itaiacoca, apesar da maior distância geográfica desta última.

É imortante destacar que, contrariamente ao que é frequentemente observado na literatura, onde cavernas mais distantes tendem a apresentar composições de fauna mais distintas (Souza-Silva et al., 2020), as cavernas nas faixas Capiru, Votuverava e Itaiacoca parecem não seguir essa tendência. As duas faixas que mostraram-se mais dissimilares foram justamente aquelas mais próximas uma da outra. Assim, a proximidade geográfica entre estas duas faixas não resulta em uma maior troca de espécies entre elas, como seria esperado.

Esses achados indicam que fatores específicos das faixas Capiru e Votuverava podem estar desempenhando um papel preponderante na determinação da composição da fauna, independentemente da proximidade geográfica. Essa singularidade destaca a importância de considerar variáveis locais e específicas ao avaliar a diversidade biológica em ambientes subterrâneos.

As cavernas localizadas na faixa Capiru estão em estreita proximidade com áreas de mineração, uma situação que frequentemente resulta em uma série de impactos negativos nas cavernas, conforme observado por Donato et al. (2014). A proximidade dessas cavernas a atividades de mineração suscita preocupações sobre a possibilidade de alterações significativas nos ambientes de superfície afetarem as cavernas adjacentes. A literatura relata que instabilidades ambientais em áreas superficiais podem desencadear mudanças na riqueza e composição das comunidades biológicas em cavernas próximas, ressaltando o papel crítico desses ambientes como refúgios para a fauna (Tscharntke et al., 2002; Fraga et al., 2023). Paralelamente a esses desafios ambientais, é importante notar que as cavernas na faixa Capiru exibiram a maior média de riqueza de espécies entre as três faixas analisadas.

Ao realizar uma análise em macroescala das cavernas, a aplicação da ANOSIM revelou diferenças significativas entre esses ambientes subterrâneos. Este resultado destaca que, mesmo entre cavernas próximas, as comunidades subterrâneas podem apresentar variações na composição de espécies, corroborando com descobertas anteriores (Simões et al., 2015; Zagmajster et al., 2018; Mammola et al., 2020).

Essas divergências composicionais entre cavernas em uma mesma região podem ser atribuídas a variações nas características dos substratos e nas condições microclimáticas. Tais fatores podem criar um ambiente altamente heterogêneo ao longo das cavernas, influenciando a diversidade e distribuição das espécies presentes. Essa heterogeneidade contribui para a redução da similaridade faunística entre as cavernas

(Pellegrini et al., 2016; Pacheco et al., 2020; Nicolosi et al., 2021; Furtado Oliveira et al., 2022).

Assim, a compreensão das variações nas características dos substratos e nas condições microclimáticas torna-se crucial para explicar as diferenças observadas nas comunidades subterrâneas.

6 Considerações Finais

O conjunto de informações deste estudo revela que ao explorar diferentes escalas, desde microescala até macroescala, e examinar variáveis ambientais específicas, foi possível identificar padrões na composição da fauna de invertebrados cavernícolas terrestres no norte do estado do Paraná, Brasil.

A análise em microescala destacou a influência significativa da distância da entrada e da distância entre cavernas na determinação da composição faunística. Por outro lado, a mesoescala revelou que a diversidade de abrigo e a temperatura emergiram como fatores chave que moldam as variações na composição faunística. Algumas faixas calcárias demonstraram diferenças significativas na composição de espécies, reforçando a relevância das características locais de cada cavidade na determinação da composição de espécies.

Os resultados sugerem que o entendimento preciso das características específicas de cada caverna é essencial para compreender a diversidade e distribuição das espécies subterrâneas. Este conhecimento não só respalda a implementação de estratégias de conservação direcionadas para o patrimônio espeleológico na região, mas também contribui para o aprimoramento de abordagens teóricas e práticas em estudos similares em outras localidades.

Em suma, a pesquisa fornece valiosas informações para a preservação de ecossistemas subterrâneos, destacando a importância de considerar variáveis locais e específicas ao avaliar a biodiversidade em cavernas. Esses resultados não apenas enriquecem o entendimento da ecologia subterrânea, mas também têm implicações práticas relevantes para a conservação e a legislação relacionada ao patrimônio espeleológico brasileiro.

Agradecimentos

Agradecemos a Mater Natura e Margem Mineração pelo apoio financeiro em atendimento ao termo de compromisso de compensação espeleólogica TCCE nº 01/2021/ICMBio. Ao programa de Pós-graduação em Ecologia Aplicada (PPGEco-UFLA),

ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) e ao Instituto Água e Terra (IAT). Agradecemos ao grupo de estudos espeleológicos do Paraná (GEEP Açungui), em especial à Gisele Sessegolo, Darci Paulo Zakrzewski e Kléber Mise, pelo apoio na localização das cavernas. Agradecemos a Pedro Henrique Mendes, Gabriel Vaz, Felipe Carvajal, Paulo César Reis e Priscila Emanuela pelo auxílio na coleta dos invertebrados. Giovanna Monticelli, Julio Vaz, Guilherme Prado e Pedro Henrique Mendes, pela ajuda na identificação dos invertebrados.

Referências

ANDERSON, MJ.; SANTANA-GARCON, J. Measures of precision for dissimilarity-based multivariate analysis of ecological communities. **Ecology letters**, v. 18, n. 1, p. 66-73, 2015.

ARRIBAS, P et al. Evaluating drivers of vulnerability to climate change: a guide for insect conservation strategies. **Global Change Biology**, v. 18, n. 7, p. 2135-2146, 2012.

BARR, TC.; KUEHNE, RA. Ecological studies in the Mammoth cave system of Kentucky: II. The ecosystem. **ANN SPELEOL. VOL 26, NO 1, P 47-96, 1971. ILLUS.**, 1971.

BENTO, DDM.; FERREIRA RL.; PROUS, X.; SOUZA-SILVA, M.; BELLINI, B.C.; VASCONCELLOS, A. Seasonal variations in cave invertebrate communities in the semiarid Caatinga, Brazil. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 78, n. 2, p. 61-71, 2016.

BUTTIGIEG, PL; RAMETTE, A. A guide to statistical analysis in microbial ecology: a community-focused, living review of multivariate data analyses. **FEMS microbiology ecology**, v. 90, n. 3, p. 543-550, 2014.

CARDOSO, RC; FERREIRA, RL; SOUZA-SILVA, M. Multi-spatial analysis on cave ecosystems to predict the diversity of subterranean invertebrates. **Basic and Applied Ecology**, v. 65, p. 111-122, 2022.

CHAO, A; JOST, L. Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. **Ecology**, v. 93, n. 12, p. 2533-2547, 2012.

CLARKE, KR et al. Exploring interactions by second-stage community analyses. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 338, n. 2, p. 179-192, 2006.

CLARKE, KR; WARWICK, RM. Change in marine communities. **An approach to statistical analysis and interpretation**, v. 2, p. 1-168, 2001.

COLADO, R et al. Climatic stability, not average habitat temperature, determines thermal tolerance of subterranean beetles. **Ecology**, v. 103, n. 4, p. e3629, 2022.

CULVER, DC. **Cave life: evolution and ecology**. Harvard University Press, 1982.

CULVER, DC.; PIPAN, T; SCHNEIDER, K. Vicariance, dispersal and scale in the aquatic subterranean fauna of karst regions. **Freshwater Biology**, v. 54, n. 4, p. 918-929, 2009.

CULVER, DC.; PIPAN, T. **The biology of caves and other subterranean habitats**. Oxford University Press, 2019.

DEUTSCH, CA. et al. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 18, p. 6668-6672, 2008.

DE FRAGA, R et al. Caves as wildlife refuges in degraded landscapes in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 6055, 2023.

DONATO, CR; RIBEIRO, AS; SOUTO, LS. A conservation status index, as an auxiliary tool for the management of cave environments. **International Journal of Speleology**, v. 43, n. 3, p. 8, 2014.

DU PREEZ, G. C. et al. Nematode dynamics in an African dolomite cave: What is the role of environmental filtering in spatial and temporal distribution?. **Basic and Applied Ecology**, v. 71, p. 18-32, 2023.

FAILLE, A.; BOURDEAU, C.; DEHARVENG, L. Weak impact of tourism activities on biodiversity in a subterranean hotspot of endemism and its implications for the conservation of cave fauna. **Insect Conservation and Diversity**, v. 8, n. 3, p. 205-215, 2015.

FERREIRA R.L. & POMPEU P.S. Fatores que influenciam a riqueza e a diversidade da fauna associada a depósitos de guano na gruta Taboa, Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. **O Carste** 2: 30-33, 1997.

FERREIRA, RL; MARTINS, RP. Diversity and distribution of spiders associated with bat guano piles in Morrinho cave (Bahia State, Brazil). **Diversity and distributions**, p. 235-241, 1998.

FERREIRA, RL; HORTA, LCS. Natural and human impacts on invertebrate communities in Brazilian caves. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 61, p. 7-17, 2001.

FERREIRA, RL; MARTINS, RP. Mapping subterranean resources: The cave invertebrates distribution as indicator of food availability. **Revista Brasileira de Zoociências**, v. 11, n. 2, 2009.

GALLUCCI, M. General analyses for linear models. **GAMLj**, 2019. https://www.jamovi.org/

HAMILTON-SMITH E. Tourist caves. In: **Gunn J. (ed.**), Encyclopedia of caves and karst science. Fitzroy Dearborn, New York, 726-729, 2004.

HOWARTH, FG. Ecology of cave arthropods. **Annual review of entomology**, v. 28, n. 1, p. 365-389, 1983.

HOLSINGER, JR.; CULVER, DC. The invertebrate cave fauna of virginia and a part of eastern tennessee-zoogeography and ecology. **Brimleyana**, n. 14, p. 1-162, 1988.

HUGHES, RM.; PECK, DV. Acquiring data for large aquatic resource surveys: the art of compromise among science, logistics, and reality. **Journal of the North American Benthological Society**, v. 27, n. 4, p. 837-859, 2008.

KOZEL, P et al. Distributional dynamics of a specialized subterranean community oppose the classical understanding of the preferred subterranean habitats. **Invertebrate Biology**, v. 138, n. 3, p. e12254, 2019.

LUNGHI, E; MANENTI, R; FICETOLA, GF. Cave features, seasonality, and subterranean distribution of non-obligate cave dwellers. **PeerJ**, v. 5, p. e3169, 2017.

LUNGHI, E; MANENTI, R. Cave communities: From the surface border to the deep darkness. **Diversity**, v. 12, n. 5, p. 167, 2020.

MACHADO, S. F.; FERREIRA, RL; MARTINS, RP. Aspects of the population ecology of Goniosoma sp. (Arachnida Opiliones Gonyleptidae) in limestone caves in southeastern Brazil. **Tropical Zoology**, v. 16, n. 1, p. 13-31, 2003.

MAMMOLA, S; ISAIA, M; ARNEDO, MA. Alpine endemic spiders shed light on the origin and evolution of subterranean species. **PeerJ**, v. 3, p. e1384, 2015.

MAMMOLA, S; ISAIA, M. Cave communities and species interactions. **Cave ecology**, p. 255-267, 2018.

MAMMOLA, S. et al. Fundamental research questions in subterranean biology. **Biological Reviews**, v. 95, n. 6, p. 1855-1872, 2020.

MAMMOLA, S; HESSELBERG, T; LUNGHI, E. A trade-off between latitude and elevation contributes to explain range segregation of broadly distributed cave-dwelling spiders. **Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research**, v. 59, n. 2, p. 370-375, 2021.

MOLDOVAN, OT; Popa I; Giurginca A; Moldovan M. Influence of some environmental factors on invertebrate communities in Romanian caves. **North-Western Journal of Zoology**, 10(1), 141-150, 2014.

NICOLOSI, G et al. Microhabitat selection of a Sicilian subterranean woodlouse and its implications for cave management. **International Journal of Speleology**, 2021.

OLIVER, I; BEATTIE, AJ. Invertebrate morphospecies as surrogates for species: a case study. **Conservation biology**, v. 10, n. 1, p. 99-109, 1996.

OLIVEIRA, LF et al. Recreational caving impacts of visitors in a high-altitude cave in Bolivian Andes: main effects on microhabitat structure and faunal distribution. **International Journal of Speleology**, v. 51, n. 2, p. 2, 2022.

PACHECO, GSM et al. The role of microhabitats in structuring cave invertebrate communities in Guatemala. **International Journal of Speleology**, v. 49, n. 2, p. 8, 2020.

PELLEGRINI, T et al. Linking spatial scale dependence of land-use descriptors and invertebrate cave community composition. **Subterranean Biology**, v. 18, p. 17-38, 2016.

POULSON, TL.; WHITE, WB. The Cave Environment: Limestone caves provide unique natural laboratories for studying biological and geological processes. **Science**, v. 165, n. 3897, p. 971-981, 1969.

PROUS, X; FERREIRA, RL; JACOBI, CM. The entrance as a complex ecotone in a Neotropical cave. **International Journal of Speleology**, v. 44, n. 2, p. 5, 2015.

RABELO ML; SOUZA-SILVA, M; FERREIRA RL. Epigean and hypogean drivers of Neotropical subterranean communities. **Journal of Biogeography**, v. 48, n. 3, p. 662-675, 2021.

RASBAND, W. S. ImageJ 1.43 u. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. 1997.

ROMERO, A. Cave biology: life in darkness. **Cambridge University Press**, 2009.

SESSEGOLO, G. *et al*. Conhecendo cavernas: Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba: **GEEP Açungui**, 108 p. Il. 2006.

SIMÕES, MH; SOUZA-SILVA, M; FERREIRA, RL. Cave physical attributes influencing the structure of terrestrial invertebrate communities in Neotropics. **Subterranean Biology**, v. 16, p. 103-121, 2015.

SKET, B. Can we agree on an ecological classification of subterranean animals. **Journal of Natural History**, v. 42, n. 21-22, p. 1549-1563, 2008.

SOUZA-SILVA, M; MARTINS, RP; FERREIRA, RL. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the Brazilian Atlantic Rain Forest. **Biodiversity and Conservation**, v. 20, p. 1713-1729, 2011.

SOUZA-SILVA, M; MARTINS, RP; FERREIRA, RL. Cave conservation priority index to adopt a rapid protection strategy: a case study in Brazilian Atlantic rain forest. **Environmental management**, v. 55, n. 2, p. 279-295, 2015.

SOUZA-SILVA, M; INIESTA, LFM; FERREIRA, RL. Cave lithology effect on subterranean biodiversity: A case study in quartzite and granitoid caves. **Acta Oecologica**, v. 108, p. 103645, 2020.

SOUZA-SILVA, M et al. Habitat selection of cave-restricted fauna in a new hotspot of subterranean biodiversity in Neotropics. **Biodiversity and Conservation**, v. 30, n. 14, p. 4223-4250, 2021.

SOUZA-SILVA, M; FERREIRA, R. L. Dinâmica trófica em ambientes de cavernas. In: **Robson Zampaulo e Xavier Prous. (Org.). Fauna Cavernícola do Brasil. 1ed.Belo Horizonte: Rupestre**, v. 1, p. 59-81, 2022.

TOBIN, BW.; HUTCHINS, BT.; SCHWARTZ, BF. Spatial and temporal changes in invertebrate assemblage structure from the entrance to deep-cave zone of a temperate marble cave. **International Journal of Speleology**, v. 42, n. 3, p. 4, 2013.

TSCHARNTKE, Teja et al. Characteristics of insect populations on habitat fragments: a mini review. **Ecological research**, v. 17, p. 229-239, 2002.

WHITTAKER, RH. A study of summer foliage insect communities in the Great Smoky Mountains. **Ecological monographs**, v. 22, n. 1, p. 2-44, 1952.

WYNNE, J. Judson et al. Fifty years of cave arthropod sampling: techniques and best practices. **International Journal of Speleology**, v. 48, n. 1, p. 4, 2019.

ZAGMAJSTER, M et al. Subterranean biodiversity patterns from global to regional scales. **Cave ecology**, p. 195-227, 2018.



Artigo 2

DIVERSIDADE DE INVERTEBRADOS TROGLÓBIOS EM CAVERNAS DA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ

Artigo II. DIVERSIDADE DE INVERTEBRADOS TROGLÓBIOS EM CAVERNAS DA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ

Artigo a ser submetido ao periódico Revista Brasileira de espeleologia

Leandro Mata da Rocha Melo[1,2], Rodrigo Lopes Ferreira[1,2], Marconi Souza Silva[1,2],

[1]Centro de Estudos em Biologia Subterrânea, Departamento de Ecologia e Conservação, Instituto de Ciências Naturais, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, P.O. Box 3037, Lavras CEP 37200-000, Minas Gerais, Brasil
[2]Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, Universidade Federal de Lavras, Lavras CEP 37200-000, Minas Gerais, Brasil

Resumo

Esse estudo teve como objetivo realizar uma revisão da riqueza de invertebrados troglóbiosnas faixas calcárias Itaiacoca, Votuverava e Capiru, no estado do Paraná, Brasil. Para tal, utilizamos dados da literatura e dados de campo provenientes de 23 cavernas calcárias. Os dados de campo foram obtidos por meio de coletas ativas de invertebrados, utilizando setores (3x10) e quadrantes (1x1). Dessa forma, microhabitats foram exaustivamente investigados para a coleta dos invertebrados. Ao total, foram amostrados 80 setores e 240 quadrantes nas 23 cavernas, entre novembro de 2022 e julho de 2023, com um evento amostral por caverna, excetuando-se a gruta do Varzeão, que teve dois eventos de coleta devido às suas dimensões. Este estudo revelou uma maior riqueza de espécies nas cavernas do Paraná em comparação ao anteriormente conhecido, destacando as grutas Pinhalzinho, Pinheiro Seco e Varzeão como as mais ricas em espécies troglóbias. Dados da literatura relatavam 7 espécies de invertebrados troglóbios/troglomórficos nas cavernas estudadas e 186 espécies não troglóbias em cavernas do Paraná. Os dados deste trabalho aumentaram para 31 o número de espécies troglóbias conhecidas para o estado do Paraná. As informações geradas neste estudo auxiliarão na compreensão da biodiversidade e identidade faunística das cavernas nas faixas calcarias de Itaiacoca, Votuverava e Capiru, revelando que o estado Paraná abriga uma biodiversidade de organismos estritamente cavernícolas maior do que se era conhecido, assim dando respaldo para a implantação de medidas de conservação do patrimônio espeleológico na região.

Palavras-Chave: Ecologia; Conservação; Fauna de Cavernas

1 Introdução

O conhecimento sobre a fauna cavernícola no Brasil remonta a meados do século XX, inicialmente centrado em trabalhos taxonômicos que visavam a identificação e classificação das espécies animais presentes (MANGABEIRA-FILHO 1942; WYGODZINSK 1950). À medida que avançava para o final do século XX, observou-se uma transição gradual para estudos que incorporaram abordagens mais ecológicas. Nesse período, a atenção dos pesquisadores expandiu-se para além da catalogação das espécies, buscando compreender as interações ecológicas, os padrões de distribuição e a dinâmica de populações subterrâneas (TRAJANO; GNASPINI, 1991; GNASPINI-NETO, 1989; TRAJANO; MOREIRA, 1991, TRAJANO et al. 1999). Essa mudança na abordagem de pesquisa destacou a importância não apenas da diversidade taxonômica, mas também da singularidade ecológica desses ambientes.

Entretanto, os esforços de coleta de dados usados para quantificar a diversidade das comunidades de invertebrados, por muito tempo negligenciaram microhabitats específicos dentro das cavernas (FERREIRA, 2005). Além do pequeno tamanho corporal que dificulta sua visualização, invertebrados cavernícolas têm a sua distribuição associada a microhabitats com condições especificas (locais úmidos, embaixo de blocos, habitats heterogêneos e distante das entradas) e recursos (troncos, guano, biofilmes microbianos) (PACHECO *et al*, 2020; NICOLOSI *et al*., 2021; SOUZA-SILVA *et al* 2021). Assim, em muitos casos, a distribuição espacial de comunidades de invertebrados terrestres em cavernas é fortemente influenciada pela distribuição de recursos alimentares e requisitos de habitat (FERREIRA; MARTINS, 2001; PROUS *et al*., 2015).

Desta forma, pesquisas que direcionam seus métodos de coleta para microhabitats específicos tendem a revelar um maior número de espécies troglóbias (CARDOSO et al 2021; SOUZA-SILVA et al 2021; BENTO et al 2021), mesmo com um número reduzido de eventos amostrais. Esse enfoque emerge como uma abordagem essencial para o entendimento da biodiversidade em locais onde a realização de um inventariamento prolongado se torna difícil ou impraticável.

As classificações dos organismos cavernícolas têm evoluído ao longo do tempo, muito embora o sistema proposto por Schiner-Racovitza (1907) ainda continue sendo amplamente utilizado em diferentes países do mundo. No contexto do Brasil, o sistema de classificação é o proposto por Schiner-Racovitza, com algumas modificações, oferecendo uma abordagem que diferencia esses organismos com base em considerações ecológico-

evolutivas. Quatro categorias principais delineiam suas relações com ambientes subterrâneos.

Organismos acidentais compreendem indivíduos que adentram cavernas sem apresentar quaisquer pré-adaptações para a vida subterrânea. Já os troglóxenos utilizam as cavernas para diferentes finalidades, como para alimentação, abrigo ou reprodução, mas dependem de ambientes de superfície para completar seu ciclo de vida. Os troglófilos são organismos cavernícolas facultativos, podendo ou não completar todo o seu ciclo de vida em cavernas. Por fim, os troglóbios são os mais especializados à vida subterrânea, apresentando populações viáveis exclusivamente em ambientes cavernícolas (SKET 2008).

Os organismos estritamente cavernícolas podem ser reconhecidos por meio de modificações fisiológicas, comportamentais e principalmente morfológicas, chamadas de troglomorfismos (CHRISTIANSEN, 1962). Tais características consistem principalmente na redução dos olhos e asas, despigmentação e aumento dos apêndices locomotores e sensoriais (CHRISTIANSEN 2012). No contexto da legislação brasileira, um dos importantes critérios para a classificação da relevância de cavernas é a presença de troglóbios (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA 2022). A relevância das cavernas, por sua vez, determina quais poder ser permanentemente impactas (mesmo destruídas) ou nâo, o que ressalta a importância de estudos para a descoberta desses organismos.

Importantes estudos sobre a fauna de invertebrados em cavernas no Estado do Paraná vêm sendo realizados há décadas (PINTO-DA-ROCHA, 1995; SESSEGOLO, 2006; BENÁ; VANIN, 2014), revelando espécies endêmicas e ameaçadas. Por outro lado, poucas espécies troglóbias haviam sido registradas para o estado, mesmo considerando as extensas faixas carbonáticas presentes no norte do Estado e as grandes e numerosas cavernas a elas associadas. Assim, diante do exposto, o refinamento e padronização de metodologias de amostragens deve ser considerado para uma eficiente caracterização biológica dos ecossistemas subterrâneos do Paraná, onde a riqueza de espécies é alta e o conhecimento pode ainda ser considerado incipiente.

Nesta perspectiva, esse estudo teve como objetivo realizar uma atualização da diversidade de troglóbios nas faixas calcárias de Itaiacoca, Votuverava e Capiru, no estado do Paraná, utilizando dados da literatura e uso de dados de campo, priorizando a amostragem em microhabitats e em distintas escalas espaciais.

2 Metodologia

Este estudo foi realizado em 23 cavernas localizadas nas faixas calcárias Itaiacoca, Votuverava e Capiru, no estado do Paraná, Brasil. Na faixa Capiru foram realizadas coletas em 6 cavernas, sendo elas: Gruta do Bacaetava, Ermida, Itaperussu, Jesuítas e Fadas. Na faixa Votuverava 5 cavernas foram amostradas: Gruta Bom Sucesso, Bromados, Piedade, Pinheirinho e Toquinhas. Por fim, na faixa Itaiacoca, 12 cavernas foram amostradas: Gruta da Ressurgência do Feital, Pocinho, Pocinho 2, Dá a Volta, Malfazido, Pinhalzinho, Chiquinho, Chiquinho 2, Arco de Pedra, Casa de Pedra e Pinheiro Seco.

As faixas calcárias Itaiacoca, Votuverava e Capiru são constituídas pelas rochas metassedimentares do Grupo Carbonático Açungui. Essa região se caracteriza pelo clima subtropical úmido, com invernos brandos e chuvas bem distribuídas durante o ano, estando inseridos em uma região do bioma Mata Atlântica, contendo floresta com Araucária (Florest Ombrófila Mista) e a Floresta Atlântica propriamente dita (Floresta Ombrófila Densa) (Sessegolo et al., 2006).

A amostragem dos invertebrados foi realizada em setores (3x10 m) e quadrantes (1x1 m) através de coleta ativa com auxílio de pinças e pincéis (FIG. 1). Complementarmente, a busca ativa e coleta dos invertebrados também foi realizada em distintos locais das cavidades. Neste caso, microhabitats foram exaustivamente inspecionados a fim de se obter uma maior riqueza de espécies (Souza-Silva et al 2021).

Todo o material coletado foi armazenado em potes contendo álcool 70% para posterior triagem e separação dos morfótipos, realizada no Centro de Estudos em Biologia Subterrânea (CEBS), na Universidade Federal de Lavras.

A determinação de espécies potencialmente troglóbias foi realizada através da identificação de troglomorfismos, que são indicativos de isolamento e evolução no ambiente cavernícola. Os troglomorfismos frequentemente observados foram redução ou ausência das estruturas oculares e da pigmentação, bem como o alongamento de apêndices sensoriais e locomotores (Figura 6) (Culver & Pipan 2019). Testemunhos foram depositados na Coleção de Invertebrados Subterrâneos de Lavras (ISLA), vinculada ao Centro de Estudo em Biologia Subterrânea (CEBS) na Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Adicionalmente, realizamos uma pesquisa bibliográfica em julho de 2023, com o objetivo de compilar listas de espécies troglóbias identificadas em cavernas no estado do Paraná. Para tanto, conduzimos uma busca sistemática em diversos bancos de dados, incluindo Scielo, Web of Science e Google Acadêmico. Devido à escassez de artigos científicos dedicados ao tema, ampliamos nossa análise para incluir resumos publicados em

anais de congressos e relatórios técnicos, desde que fossem relevantes para a nossa pesquisa. As informações obtidas a partir da revisão da literatura sobre a fauna cavernícola troglóbia presente no estado proporcionou uma base para a comparação com a riqueza de espécies de organismos troglóbios coletadas no presente estudo.

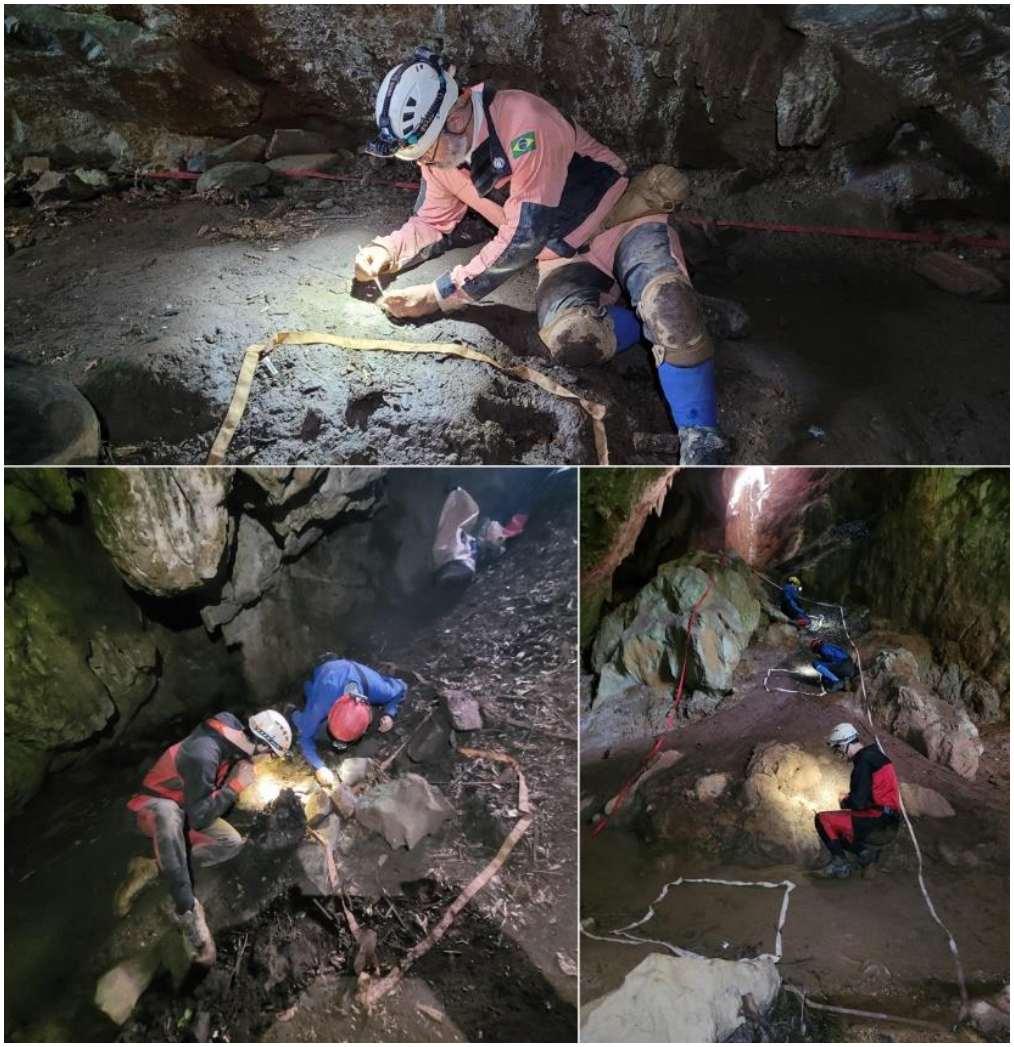


Figura 1. Coleta de invertebrados nos setores e quadrantes nas cavernas das faixas calcárias de Itaiacoca, Votuverava e Capiru no Norte do estado do Paraná.

2.1 Análise de dados

Para obter valores de riqueza dos invertebrados troglóbios foi realizada a contagem dos morfótipos de cada unidade amostral (diversidade alfa).

A similaridade da fauna troglóbia entre as diferentes faixas calcárias foi obtida pelo índice de Bray-Curtis e contrastada em escala métrica multidimensional (MDS) com reamostragem pelo método Bootstrap. A análise de similaridade (ANOSIM) baseada no índice de Bray-Curtis foi utilizada para identificar diferenças na composição da fauna de invertebrados troglóbios entre as faixas calcárias,utilizando cavernas como unidades amostrais (ANDERSON et al., 2015).

Apresentamos uma representação visual da matriz de dados da fauna de troglóbios de acordo com a distribuição espacial nas cavernas (depois de transformado em raiz quadrada), em um Shadeplot. A distribuição dos troglóbios nas cavernas foi reordenada em uma análise de agrupamento utilizando o Índice de Associação de Whittaker (WHITTAKER 1952; CLARKE et al., 2014).

A análise de variância, ou ANOVA, foi usada para comparar diferenças nas médias de valores de riqueza entre faixas carbonáticas (GALLUCCI, 2019).

3 Resultados

3.1 Riqueza histórica de invertebrados em cavernas do Paraná

Estudos históricos sobre cavernas no Paraná registraram a presença de oito espécies troglóbias. Entre elas, destacam-se duas mencionadas em uma abrangente pesquisa realizada por Pinto-Da-Rocha (1995): o colêmbolo *Acherontides* sp. e o Diplopoda *Katantodesmus* sp. Ambas as espécies foram associadas ao guano de morcegos. Importante destacar que *Katantodesmus* mencionado nos estudos de Pinto-Da-Rocha (1995) na verdade compreendem diplópodes do gênero *Crypturodesmus* (Trajano et al. 2000). Posteriormente, dois novos registros foram adicionados na Gruta da Lancinha, com a identificação de *Ideoroncus* cavicola e *Arrhopalites paranaensis* como novas espécies troglóbias.

Em investigações subsequentes, a Gruta do Varzeão revelou-se como habitat de mais duas espécies restritas a cavernas, sendo identificadas o opilião Tricommatinae sp. e o diplópoda *Crypturodesmus* sp. (Sessegolo et al., 2006). Finalmente, Bená & Vanin (2014) descreveram uma nova espécie de besouro da família Carabidae (*Coarazuphium ricardoi*), coletada na Gruta do Varzeão. Por fim, Cardoso e Araújo (2014), descreveram o anfípodo

Hyalella formosa para uma caverna arenítica localizada no município de Ponta Grossa. Com esses registros, um total de oito espécies troglóbias foram documentadas no estado do Paraná, proporcionando uma visão inicial da riqueza desta fauna para o estado. É importante destacar que o único registro de uma espécie troglóbia, fora de cavernas carbonáticas do grupo Açungui, no Paraná, compreende o anfípodo *Hyalella formosa*, associado a uma caverna arenítica. Assim, este registro pontual não foi utilizado nas análises de comparações de fauna troglóbia, que focaram especificamente nas cavernas carbonáticas das faixas Itaiacoca, Votuverava e Capiru.

3.1 Riqueza atual de troglóbios em cavernas do Paraná

Em relação à fauna troglóbia, 27 morfótipos foram identificadas nesse estudo: *Eukoenenia* sp1 (Palpigradi: Eukoeneniidae), *Eukoenenia* sp2 (Palpigradi: Eukoeneniidae), *Eukoenenia* sp3 (Palpigradi: Eukoeneniidae), *Eukoenenia* sp4 (Palpigradi: Eukoeneniidae), *Pseudochthonius* sp1 (Pseudoscorpiones: Chtoniidae), *Pseudochthonius* sp2 (Pseudoscorpiones: Chtoniidae), Gonyleptidae sp1 (Opiliones), Gonyleptidae sp2 (Opiliones), Gonyleptidae sp3 (Opiliones), Hahniidae sp.1 (Araneae), Prodidomidae sp1 (Araneae), Prodidomidae sp2 (Araneae), *Acherontides aff. Eleonorae* (Collembola: Hypogastruridae), *Arrhopalites* sp1 (Collembola: Arrhopalitidae), *Arrhopalites* sp2 (Collembola: Arrhopalitidae), Entomobryomorpha sp1 (Collembola), Entomobryomorpha sp2 (Collembola), Symphypleona sp1 (Collembola), Symphypleona sp2 (Collembola), Philosciidae sp1 (Isopoda), Plathyarthridae sp1 (Isopoda), *Trichorhina* sp1 (Isopoda: Plathyarthridae), *Peridontodesmella* sp 1 (Diplopoda: Pyrgodesmidae), Pyrgodesmidae sp2 (Diplopoda), Pyrgodesmidae sp3 (Diplopoda), *Crypturodesmus* sp.1 (Diplopoda: Oniscodesmiddae), Pyrgodesmidae Sp2, Pyrgodesmidae Sp3, e Stylommatophora sp1. (FIG. 2).



Figura 2. Algumas das espécies troglóbias coletadas no Norte do Paraná entre os anos 2022 e 2023. A) *Peridontodesmella* sp1; B) *Crypturodesmus* sp1; C) Pyrgodesmidae sp1; D) Gonyleptidae sp1; E) Gonyleptidae sp2; F) Gonyleptidae sp3; G) Gonyleptidae sp4; H) *Pseudochthonius* sp1; I) Prodidomidae sp1; J) *Eukoenenia* sp1; K) *Eukoenenia* sp2; L) *Eukoenenia* sp3; M) Platyarthridae sp1; N) *Trichorhina* sp1; O) Philosciidae sp1; P) *Acherontides eleonorae*; Q) Arrhopalitidae sp1; R) Stylommatophora sp1.

Entre as 23 cavernas amostradas, apenas seis apresentavam registros de espécies troglóbias, segundo indicado na síntese de Pinto-da-Rocha (1995) e informações adicionais provenientes da literatura. Esses dados históricos mostravam que a gruta do Varzeão se destacava por abrigar a maior riqueza de troglóbios, com quatro registros identificados.

O número de troglóbios coletados neste estudo foi maior ou igual, em todas as cavernas, ao encontrado em estudos anteriores (FIG. 3). As grutas de Pinheiro Seco, Pinhalzinho e Varzeão apresentaram a maior riqueza de invertebrados cavernícolas obrigatórios, com sete espécies cada, sendo que anteriormente se tinha registro de quatro espécies troglóbias para a gruta Varzeão, apenas uma espécie troglóbia para a gruta Pinheiro Seco e nenhuma ocorrência de troglóbio para a gruta Pinhalzinho (PINTO-DA-ROCHA 1995; SESSEGOLO et al., 2006; BENÁ & VANIN 2014).

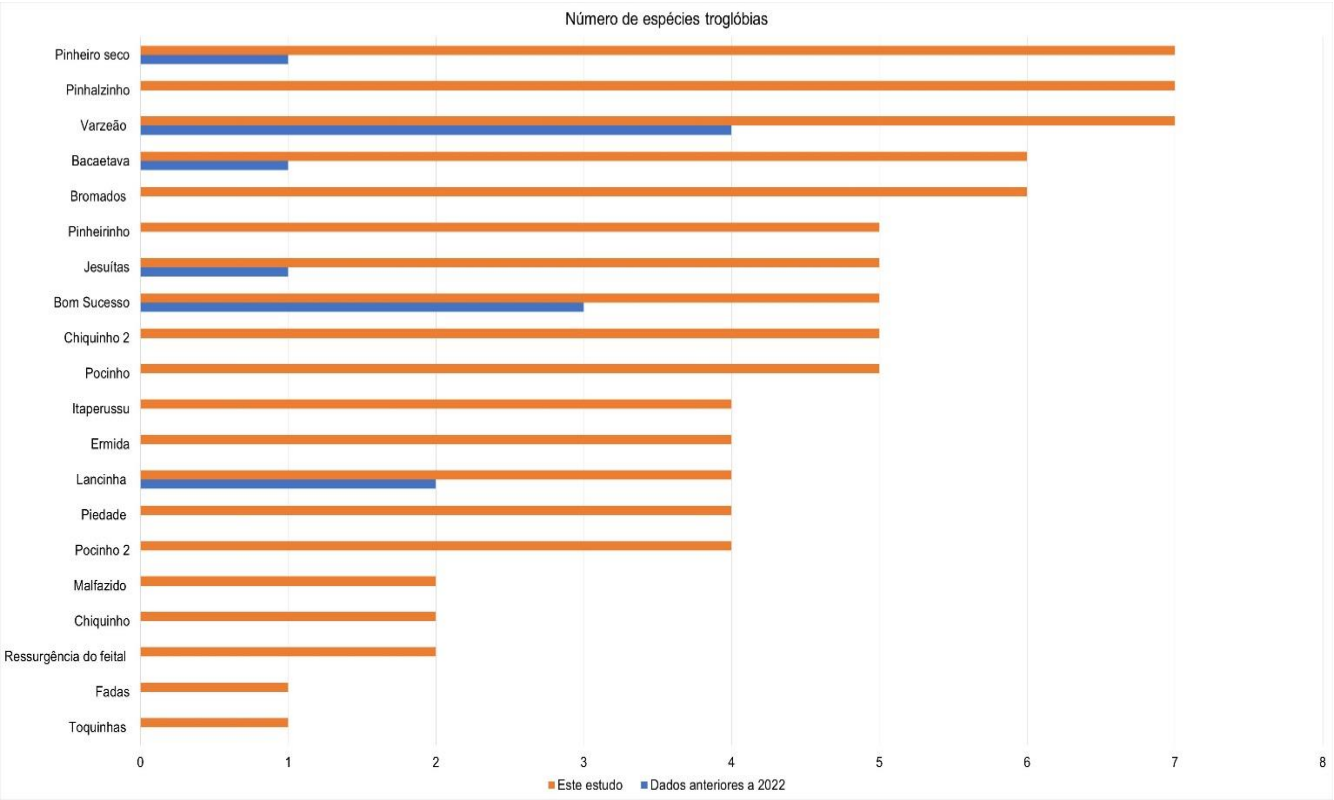


Figura 3. Comparação do número de espécies troglóbias coletadas nos anos de 2022 e 2023 em relação aos dados históricos (anterior a 2022). As barras em alaranjado representam as espécies coletadas neste estudo, enquanto as barras em verde indicam as espécies coletadas em outros estudos realizados antes de 2022.

Outras quatorze cavernas para as quais não havia registro de organismos troglóbios, após este trabalho, apresentam ao menos uma espécie de organismo cavernícola obrigatório (TAB. 1).

Tabela 1. Composição de espécies de troglóbios coletados no estudo de 2022 e 2023 e coletados em estudos anteriores a está dada nas cavernas do Paraná. *Os registros de *Katantodesmus* fora aqui corrigidos para *Crypturodesmus*.

Caverna	**Município**	**Ocorrência de troglóbios no Paraná até 2021**	**Ocorrência de troglóbios no Paraná após este estudo**
Bom Sucesso	Cerro Azul	*Acherontides aff. eleonorae*, *Crypturodesmus* sp.*	*Crypturodesmus* sp., *Eukoenenia* sp. 1, *Eukoenenia* sp. 2, Gonyleptidae sp. 2, *Trichorhina* sp. Chtoniidae sp 1.
Pinheiro seco	Castro	*Acherontides aff. eleonorae*.	*Acherontides aff. eleonorae*, *Crypturodesmus* sp., Gonyleptidae sp 1., Stylommatophora sp., *Eukoenenia* sp. 2, Trichorhina sp, Hahniidae sp.
Varzeão	Dr. Ulysses	*Coarazuphium ricardoi*, *Acherontides aff. eleonorae*, *Crypturodesmus* sp., Tricommatinae sp.	*Acherontides aff. eleonorae*, *Crypturodesmus* sp. Stylommatophora sp. *Trichorhina* sp, Chtoniidae sp1. Arrhopalites sp1, Arrhopalites sp2.
Ressurgência do Feital	Dr. Ulysses	Nenhum	*Crypturodesmus* sp., Pyrgodesmidae sp 1.
Pocinho	Dr. Ulysses	Nenhum	*Acherontides aff. eleonorae*, Prodidomidae sp 1., Pyrgodesmidae sp 1., Stylommatophora sp., Pyrgodesmidae sp. 3
Pocinho 2	Dr. Ulysses	Nenhum	*Acherontides aff. eleonorae*, Prodidomidae sp 1. Pyrgodesmidae sp. 3. Entomobryomorpha sp. 1
Pinhalzinho	Sénges	Nenhum	*Acherontides aff. eleonorae,* Crypturodesmus sp., Pyrgodesmidae sp 1., Stylommatophora sp. *Trichorhina* sp. Pyrgodesmidae sp. 3, Philosciidae sp.
Chiquinho	Castro	Nenhum	Stylommatophora sp. *Trichorhina* sp.
Chiquinho 2	Castro	Nenhum	*Crypturodesmus* sp., Stylommatophora sp., *Eukoenenia* sp 3, *Trichorhina* sp. Pyrgodesmidae sp. 3.
Jesuítas	Cerro Azul	*Acherontides aff. eleonorae*	Entomobryomorpha sp. 1, *Acherontides aff. eleonorae*, Symphypleona sp2, Entomobryomorpha sp. 2, *Trichorhina* sp.
Fadas	Cerro Azul	Nenhum	Entomobryomorpha sp. 1.

Pinheirinho	Campo Largo	Nenhum	Entomobryomorpha sp. 2, *Acherontides aff. eleonorae*, Symphypleona sp1. Stylommatophora sp, *Crypturodesmus* sp.
Itaperuçu	Itaperussu	Nenhum	*Acherontides aff. eleonorae*, Symphypleona sp1, Stylommatophora sp, *Crypturodesmus* sp. Entomobryomorpha sp1.
Piedade	Rio Branco do Sul	Nenhum	*Acherontides aff. eleonorae*, *Trichorhina* sp. Stylommatophora sp, *Crypturodesmus* sp.
Bromados	Rio Branco do Sul	Nenhum	*Acherontides aff. eleonorae*, *Trichorhina* sp., Pyrgodesmidae sp4. Stylommatophora sp, *Crypturodesmus* sp, *Eukoenenia* sp4.
Malfazido	Dr. Ulysses	Nenhum	*Acherontides aff. eleonorae*, Pyrgodesmidae sp3.
Lancinha	Rio Branco do Sul	*Ideoroncus cavicola*, *Arrhopalites paranaensis*	*Acherontides aff. eleonorae, Crypturodesmus* sp, *Trichorhina* sp, Chtoniidae sp 2.
Bacaetava	Colombo	*Acherontides aff. eleonorae*	*Acherontides aff. eleonorae*, Symphypleona sp2, *Arrhopalites* sp1, Prodidomidae sp 2. Gonyleptidae sp 3., Plathyarthridae sp1.
Ermida	Almirante Tamandare	Nenhum	Symphypleona sp 1., *Trichorhina* sp, Stylommatophora sp. Pyrgodesmidae sp4.
Toquinhas	Rio Branco do Sul	Nenhum	*Crypturodesmus sp*.

A figura 5 apresenta a distribuição das espécies troglóbias em cada caverna, fornecendo informações sobre a relação de coocorrência dessas espécies dentro do mesmo ambiente subterrâneo, bem como informações sobre a abundância relativa das espécies. O collêmbola *Acherontides*, em particular, demonstra uma ampla distribuição nas cavernas carbonáticas do Paraná, sendo identificado em 14 das 23 cavernas estudadas, sempre associados ao guano e tronco de arvores e em grande abundância (Figura 4), principalmente quando se consideram os padrões de organismos troglóbios, que geralmente ocorrem em baixas densidades.

Neste estudo, não foram registrados organismos troglóbios em apenas três cavernas (13%): Gruta dá a Volta, Ponte de Pedra e Casa de Pedra. As demais cavernas (87%) apresentaram ao menos um organismo estritamente cavernícola.



Figura 4. Elevada abundância de Collembola *Acherontides aff. Eleonorae* associado ao guano na gruta Pinheiro Seco. A espécie se mostrou amplamente distribuida em várias cavernas da região Norte do estado do Paraná. Para detalhes veja tabela 1.

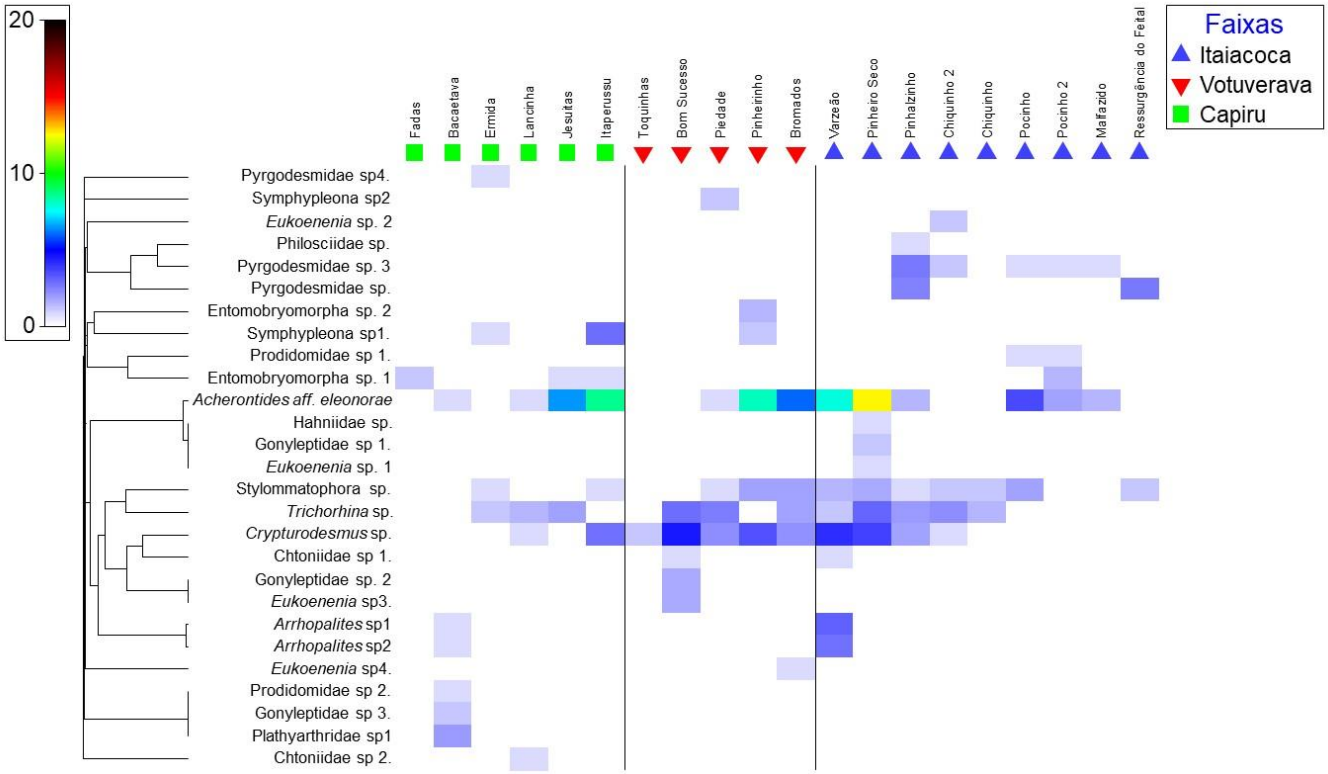


Figura 5. Distribuição da abundância de 27 espécies troglóbias nas cavernas do Norte do Paraná. As cores representam a abundância logaritmizadas (Log(X+1)) das espécies em cada cavidade (valores de 0 à 20). O dendrograma a esquerda agrupa as espécies que tiveram coocorrência nas cavidades. A parte superior mostra as cavernas onde foram realizadas as coletas.

A análise de similaridade e a ANOVA não reveleram diferenças significativas na composição (Figura 6) e riqueza da fauna de espécies troglóbias (Figura 7) entre as faixas carbonáticas Votuverava, Capiru e Itaiacoca. A figura 8 mostra a distribuição da riqueza de espécies entre as cavernas amostradas.

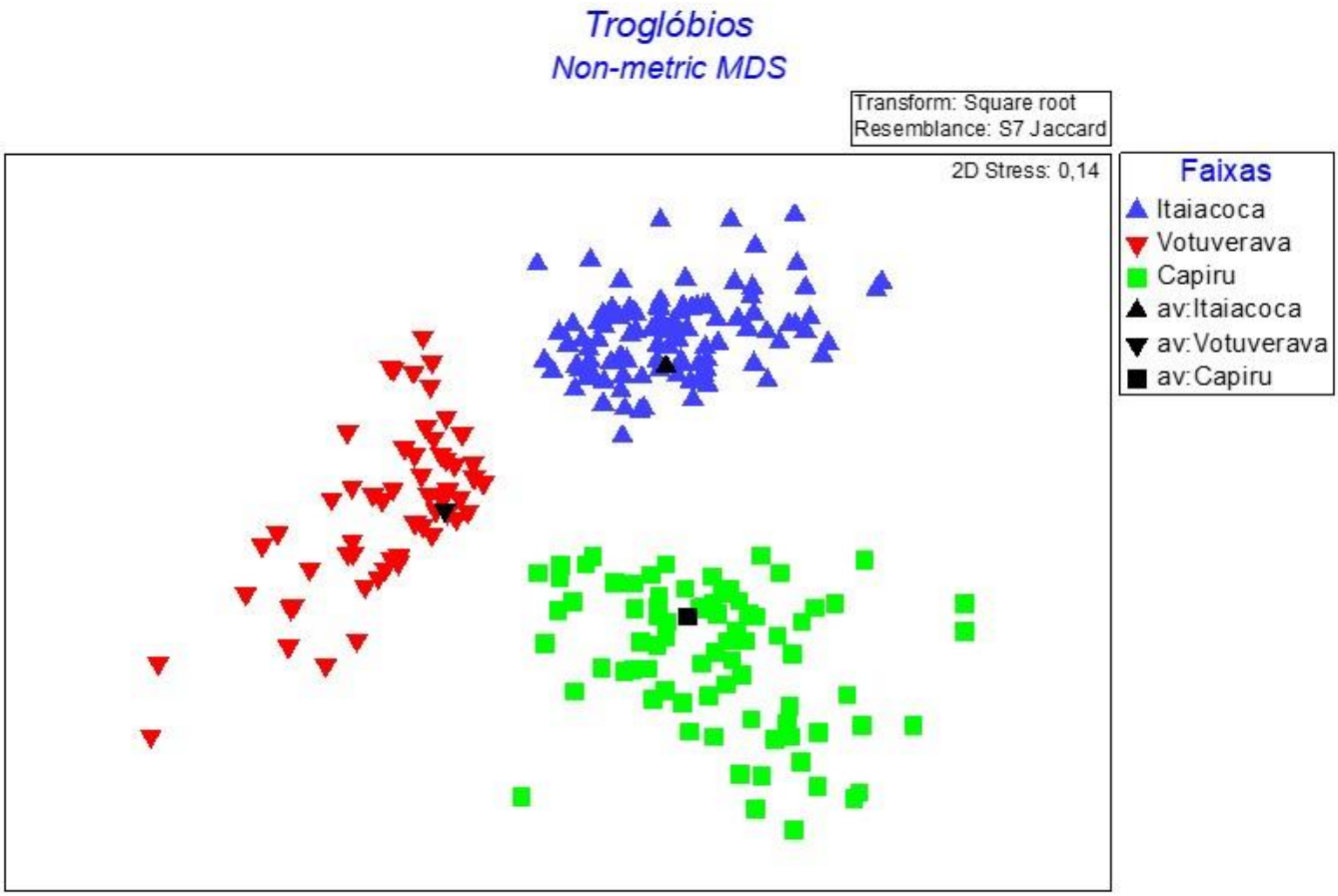


Figura 6. Gráfico de escala multidimensional (MDS) mostrando a dispersão em torno da média (av) na similaridade da fauna troglóbia em cavernas da região Norte do estado do Paraná, nas faixas carbonáticas Votuverava, Capiru e Itaiacoca. A dispersão dos pontos indica a variação na composição da fauna dentro de cada faixa calcária. Faixas com pontos mais dispersos têm maior variabilidade, enquanto faixas com pontos mais agrupados são mais homogêneas. Triângulo vermelho faixa votuverava, triângulo azul faixa Itaiacoca e quadrado verde faixa Capiru.

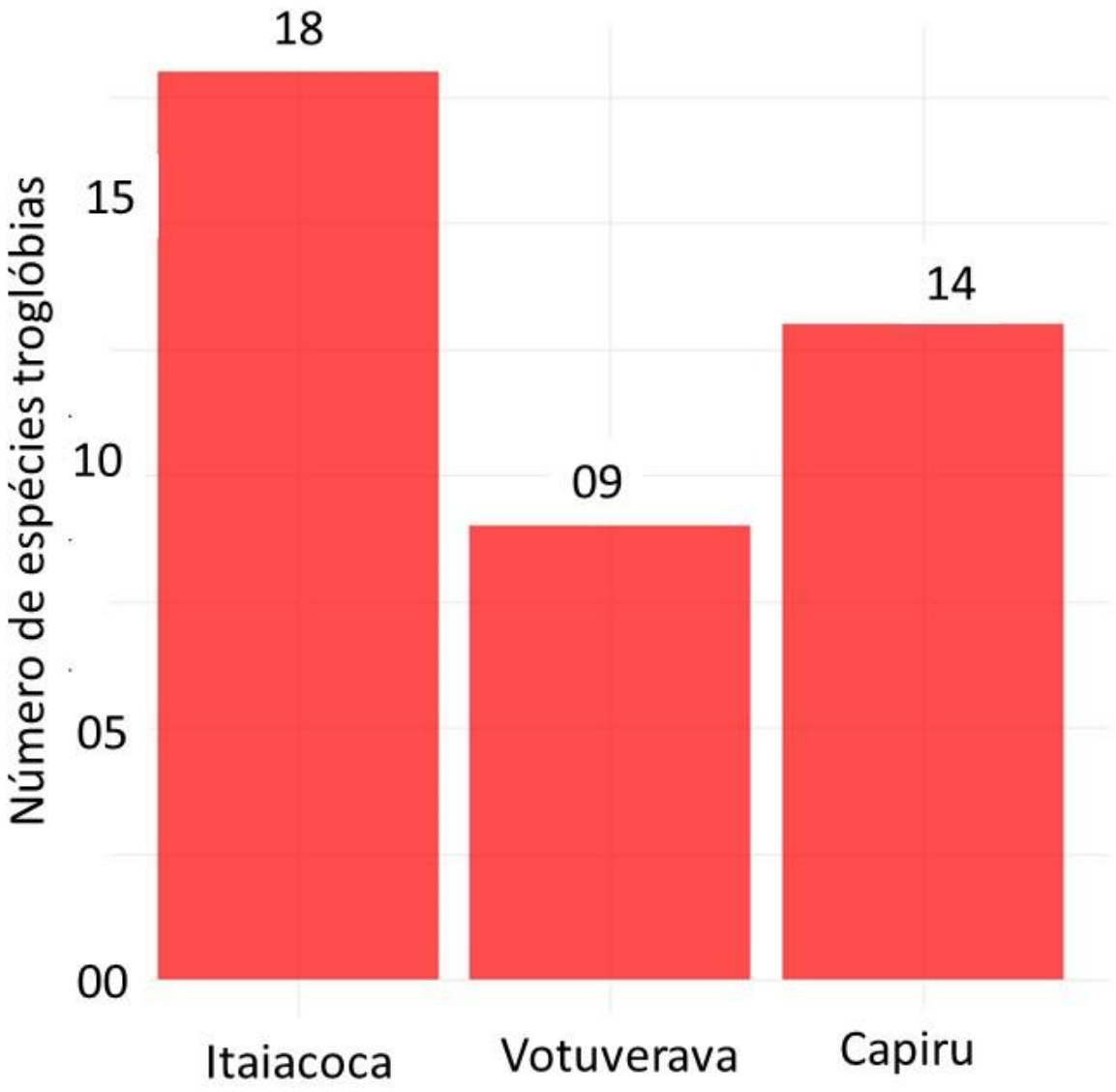


Figura 7. Número total de espécies de invertebrados troglóbios nas faixas carbonáticas na região Nortedo estado do Paraná.

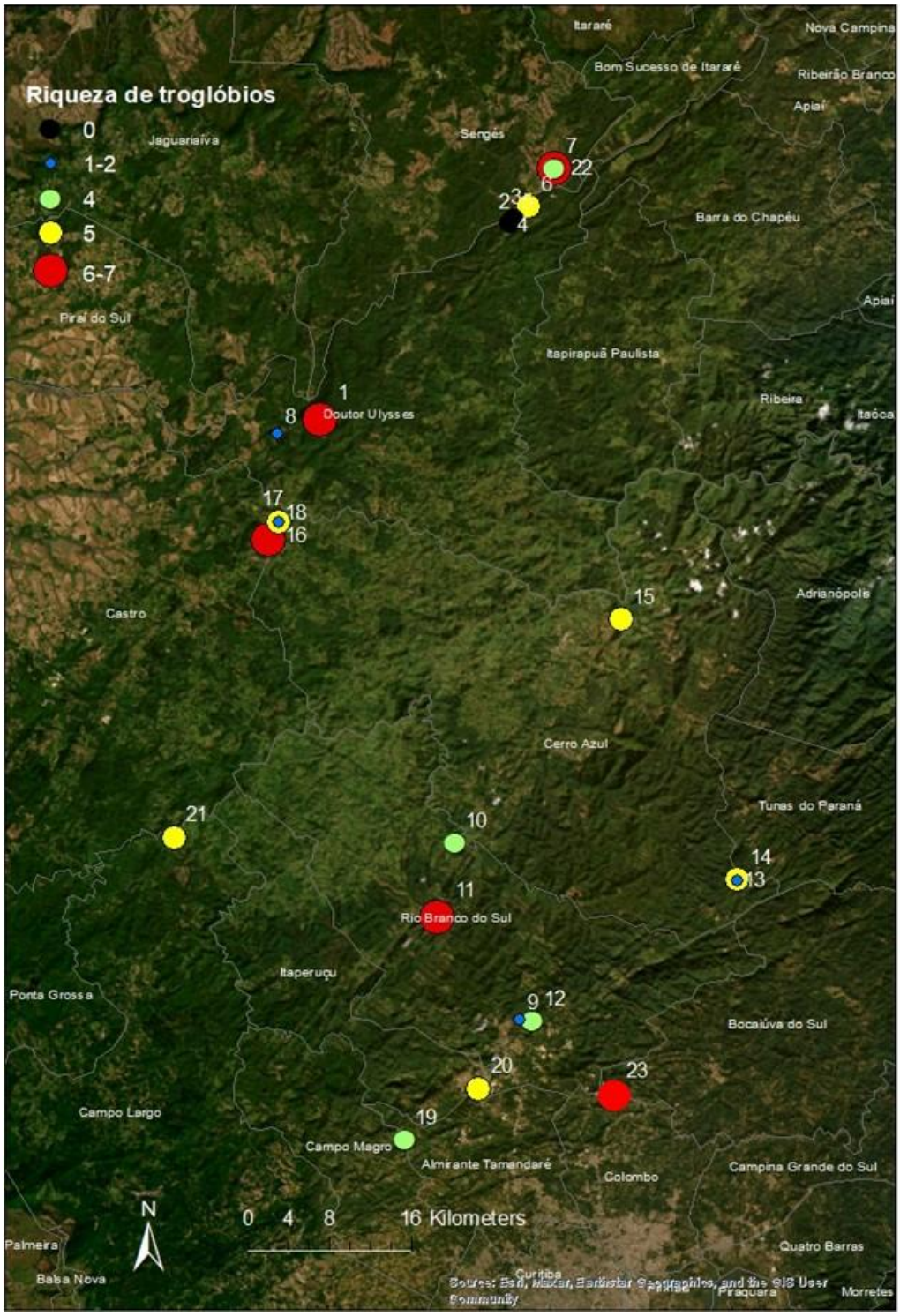


Figura 8. Riqueza de troglóbios por caverna. 1) Varzeão; 2) Arco de Pedra; 3) Casa de Pedra; 4) Ressurgência do Feital; 5) Dá a Volta; 6) Pocinho; 7) Pocinho 2; 8) Malfazido; 9) Toquinhas; 10) Piedade; 11) Bromados; 12) Lancinha; 13) Fadas; 14) Jesuítas; 15) Bom Sucesso; 16) Chiquinho; 17) Chiquinho 2; 18) Pinheiro Seco; 19) Ermida; 20) Itaperussu; 21) Pinheirinho; 22) Pinhalzinho; 23) Bacaetava.

4 Discussão

4.1 Riqueza de invertebrados troglóbios em cavernas do Paraná

Antes deste estudo, havia um menor conhecimento sobre a diversidade de organismos troglóbios para o estado do Paraná. Mesmo a Gruta da Lancinha, que foi intensamente investigada quanto à sua fauna, apresentava apenas duas espécies previamente classificados como troglóbias (PINTO-DA-ROCHA 1995; SESSEGOLO et al., 2006). No entanto, em uma única campanha de coleta nesta caverna realizada durante este estudo, identificou-se a presença de mais quatro organismos troglomórficos e possivelmente troglóbios.

Esse incremento ressalta a eficácia das coletas em microhabitats, evidenciando a maior capacidade de registrar organismos potencialmente troglóbios. Como resultado, a Gruta da Lancinha agora conta com um total de seis espécies troglóbias. A descoberta de novas espécies nesta caverna é ainda mais relevante uma vez que a mesma apresenta uso turístico.

Organismos troglóbios são altamente suscetíveis à alterações em seus habitats, já que são especializados a viverem em habitats específicos que apresentam estreitas variações microclimáticas e ambientais. Portanto, pequenas modificações nessas condições podem ter um efeito negativo na sua distribuição e abundância (HAMILTON-SMITH, 2004; MAMMOLA *et al*., 2020).

Em todas as cavernas estudadas observou-se uma elevada intensidade de impactos. A exemplo disso, a gruta Pinheiro Seco apresenta diversas modificações antrópicas como o turismo religioso, locais dinamitados, vandalismo em espeleotemas, além de diversas outras alterações observadas em todo o seu desenvolvimento. A coleta de sete espécies troglóbias nessa cavidade reforça a relevância da preservação da caverna e sua importância para a fauna cavernícola obrigatória presente no estado do Paraná.

Ressalta-se, adicionalmente, a relevância das grutas Varzeão e Pinhalzinho, onde foram registradas sete espécies troglóbias em cada uma durante a condução deste estudo. Enquanto a gruta Varzeão já havia sido objeto de pesquisas prévias, que documentaram quatro espécies troglóbias (PINTO-DA-ROCHA 1995; BENA & VANIN 2014), a gruta Pinhalzinho, até então, não tinha sido explorada nesta perspectiva, evidenciando a falta de estudos na região.

O número significativo de espécies troglóbias em ambas as grutas especialmente na Pinhalzinho, destaca a importância de ampliar a pesquisa para o maior número possível de cavernas na região. Essa abordagem revela-se crucial para evitar a perda de informações

biológicas valiosas e ressalta a necessidade contínua de explorar e compreender a rica biodiversidade presente nas cavernas do estado do Paraná.

O collêmbola *Acherontides* foi uma das primeiras espécies troglóbias registradas no Paraná (PINTO-DA-ROCHA, 1995), em nosso estudo, observamos a ampla distribuição desse organismo, que ocorreu em 14 (60,9%) das cavernas estudadas e em abundâncias que superavam a casa dos milhares de indivíduos em algumas cavidades, como visto na gruta Pinheiro Seco. Muito embora os colêmbolos sejam altamente diversificados em habitats subterrâneos em todo o mundo, a área de distribuição da maioria das espécies tende a ser pequena, devido à limitada capacidade de dispersão desse grupo (GIBERT e DEHARVENG, 2002). Portanto, a extensa distribuição de *Acherontides* levanta questões intrigantes sobre se essa característica é resultado da presença de espécies crípticas na região ou se representa uma característica inerente à própria espécie. A realização de estudos adicionais (especialmente moleculares) é crucial para aprofundar nossa compreensão dessa distribuição e determinar os fatores que influenciam a ecologia e a dinâmica populacional do *Acherontides* nas cavernas do Paraná.

É fundamental salientar que, dentre as 23 cavernas investigadas, 20 delas ((87%), possuem organismos troglóbios. Somente em três cavernas (13%) não foram registrados tais organismos: a Gruta Dá a Volta, Arco de Pedra e Casa de Pedra. Em uma comparação com o estudo de Pinto-da-Rocha (1995), que analisou 28 cavernas, apenas duas espécies troglóbias foram identificadas. Essa disparidade revela não apenas a diversidade de organismos troglóbios nas cavernas estudadas neste trabalho, mas também ressalta a evolução e aprimoramento das técnicas de coleta e identificação ao longo do tempo (SOUZA-SILVA et al., 2011; PELLEGRINI e FERREIRA, 2012). Esses resultados enfatizam a importância da atualização constante de métodos de pesquisa para garantir uma compreensão mais abrangente da biodiversidade cavernícola.

Destaca-se ainda que a Gruta dá a Volta é a maior caverna do estado do Paraná. Portanto, é pertinente ressaltar que estudos adicionais podem proporcionar uma amostragem mais abrangente dessa caverna em particular. Considerando que os organismos troglóbios podem ocorrer em baixas densidades e alto endemismo como visto em diversos estudos realizados no Brasil (FERREIRA et al., 2004; FERREIRA et al., 2005; GNASPINI & TRAJANO 1994; PINTO-DA-ROCHA 1995; PROUS & FERREIRA 2009; Souza-Silva 2008; SOUZA-SILVA et al., 2021), é crucial realizar um maior número de coletas antes de concluir que a maior caverna do estado não abriga organismos estritamente cavernícolas.

As duas últimas, por outro lado, são cavernas de pequeno desenvolvimento, caracterizadas por extensas entradas que propiciam uma significativa incidência de luz. Dessa forma, essas cavernas estão sujeitas a uma influência considerável do meio externo, resultando em uma fauna que têm grande similaridade morfológica a de ambientes epígeos (SOUZA-SILVA & FERREIRA, 2016).

A importância de estudos sistemáticos para uma caracterização faunística abrangente de cavernas tem outros exemplos claros no mundo (DEHARVENG & BEDOS, 2018; WHITE & CULVER, 2011). Assim, além da relevância da precisão espacial da busca e dos métodos utilizados para coletar a fauna, a frequência das coletas de amostras pode influenciar diretamente a riqueza observada (SOUZA & FERREIRA, 2016). É difícil supor que uma caverna teve sua riqueza de espécies esgotada em uma única amostragem. A dificuldade de amostragem de ambientes subterrâneos está relacionada à inacessibilidade de fissuras, mesocavernas e habitats intersticiais. Assim, existe uma clara necessidade de coletas sucessivas quando se pretende documentar efetivamente a biodiversidade subterrânea. Contudo, devemos considerar que para estudos comparativos, métodos de avaliação rápida podem ser utilizados com sucesso (SOUZA-SILVA et al., 2015; SIMÕES et al., 2015), desde que tenha sido utilizado um método de amostragem eficiente e padronizado. Neste caso, nós podemos esperar que cavernas com muitas espécies troglóbias se destaquem em relação às demais, mesmo com poucos eventos de coleta. Além disso, a falta de métodos padronizados também podem dificultar o estabelecimento de áreas que requerem prioridade para conservação.

5 Considerações Finais

Os resultados deste estudo enfatizam a relevância da investigação da heterogeneidade de microhabitats em cavernas como um modo para ampliar o registro da riqueza de espécies de invertebrados. Além disso, o método empregado revelou uma eficiência superior na coleta de espécies troglóbias, tornando-se essencial para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes na conservação da fauna subterrânea. Considerando a maior vulnerabilidade desses organismos a eventos estocásticos e impactos antrópicos, a aplicação desse método torna-se ainda mais crucial.

Portanto, o Paraná abriga uma elevada riqueza de espécies troglóbias que era anteriormente subestimada, destacando a importância de estudos adicionais em diversas cavernas. Essa abordagem permitirá a descoberta e proteção de mais espécies, destacando a necessidade contínua de utilizar diferentes metodologias de coleta e explorar a

heterogeneidade de microhabitats em cavernas. Esses esforços são cruciais para ampliar o conhecimento sobre a diversidade de invertebrados subterrâneos e promover a conservação dessas espécies únicas.

6. Agradecimentos

Agradecemos a Mater Natura e Margem Mineração pelo apoio financeiro em atendimento ao termo de compromisso de compensação espeleólogica TCCE nº 01/2021/ICMBio. Ao programa de Pós-graduação em Ecologia Aplicada (PPGEco-UFLA), ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) e ao Instituto Água e Terra (IAT). Agradecemos ao grupo de estudos espeleológicos do Paraná (GEEP Açungui), em especial à Gisele Sessegolo, Darci Paulo Zakrzewski e Kléber Mise, pelo apoio na localização das cavernas. Agradecemos a Pedro Henrique Mendes, Gabriel Vaz, Felipe Carvajal, Paulo César Reis e Priscila Emanuela pelo auxílio na coleta dos invertebrados. Giovanna Monticelli, Julio Vaz e Guilherme Prado, pela ajuda na identificação dos invertebrados.

Referências

BENÁ, D. C. A new troglobitic species of *Coarazuphium* Gnaspini, Vanin & Godoy (Coleoptera, Carabidae, Zuphiini) from a cave in Paraná State, Southern Brazil. **Zootaxa**, v. 3779, n. 2, p. 288-296, 2014.

BENTO, D. M et al. Subterranean “oasis” in the Brazilian semiarid region: neglected sources of biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, v. 30, p. 3837-3857, 2021.

BRASIL. Decreto n. 10.935, de 12 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 jan. 2022. Seção 1 - Extra A, p. 1. Disponível em: www.in.gov.br/web/dou/-/ decreto-n-10.935-de-12-de-janeiro-de-2022-373591582. Acesso em: 08/12/2023.

CARDOSO, R. C; FERREIRA, R. L; SOUZA-SILVA. Priorities for cave fauna conservation in the Iuiú karst landscape, northeastern Brazil: a threatened spot of troglobitic species diversity. **Biodiversity and Conservation**, v. 30, n. 5, p. 1433-1455, 2021.

CHRISTIANSEN, K. A. Proposition pour la classification des animaux cavernicoles. **Memoires Spelunca**, [*s.l.*], v. 2, p. 76- 78, July 1962.

CHRISTIANSEN, K. A. Morphological adaptations. *In*: WHITE, W. B.; CULVER, D. C. (ed.). **Encyclopedia of caves**. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier; Academic. p. 517–528, 2012.

DEHARVENG, L; BEDOS, A Diversity of terrestrial invertebrates in subterranean habitats. **Cave ecology**, p. 107-172, 2018.

FERREIRA, R. L. **A medida da complexidade ecológica e suas aplicações na conservação e manejo de ecossistemas subterrâneos**. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 161 p, 2004.

FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. **O Carste**, Belo Horizonte, v. 17, n. 3, p. 106-115, jul. 2005.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Cavernas em risco de ‘extinção’. **Ciência Hoje**, v. 29, p. 20-28, 2001.

GALLUCCI, M. General analyses for linear models. **GAMLj**, 2019. https://www.jamovi.org/

GIBERT, J; DEHARVENG, L. Subterranean Ecosystems: A Truncated Functional Biodiversity. **BioScience**, v. 52, n. 6, p. 473-481, 2002.

GNASPINI-NETO, P. Análise comparativa da fauna associada a depósitos de guano de morcegos cavernícolas no Brasil: primeira aproximação. **Revista Brasileira de Entomologia**, Curitiba, v. 33, n. 2, p. 183-192, jun. 1989.

GNASPINI, P.; TRAJANO, E. Brazilian cave invertebrates, with a checklist of troglomorphic taxa. **Revista Brasileira de Entomologia**, Curitiba, v. 38, n. 3/4, p. 549-584, dez. 1994.

HAMILTON-SMITH, E. Tourist caves. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**, Fitzroy Dearborn, p. 726-729, 2004.

HERNANDES, F. A.; FERES, R. J. F. Diversity and seasonal occurrence of mites (Acari) in a rubber tree crop (*Hevea brasiliensis*, Muell. Arg.) in northwestern São Paulo, Brazil. **Neotropical entomology**, v. 35, p. 523-535, 2006.

MAMMOLA, S. *et al*. Fundamental research questions in subterranean biology. **Biological Reviews**, v. 95, n. 6, p. 1855-1872, 2020.

MANGABEIRA FILHO, O. 7ª Contribuição ao estudo dos Flebotomus (Diptera: Psychodidae): descrição dos machos de 24 novas espécies. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 37, p. 111-218, 1942.

NICOLOSIL, G. *et al*. Microhabitat selection of a Sicilian subterranean woodlouse and its implications for cave management. International **Journal of Speleology**, v. 50, n. 1, p. 53-63, 2021.

PACHECO, G. S. M. *et al*. The role of microhabitats in structuring cave invertebrate communities in Guatemala. **International Journal of Speleology**, v. 49, n. 2, p. 8, 2020.

PELLEGRINI, T. G; FERREIRA, R.L. Management in a neotropical show cave: planning for invertebrates conservation. **International Journal of Speleology**, v. 41, n. 2, p. 27, 2012.

PINTO-DA-ROCHA, R. Sinopse da fauna cavernícola do Brasil (1907-1994). **Papéis avulsos de Zoologia**, v. 39, p. 61-173, 1995.

PROUS, X.; FERREIRA, R. L. Estrutura das comunidades cavernícolas na Caatinga: subsídios para a conservação. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ESTUDOS DO CARSTE, 3., 2009, São Carlos. **Resumos.** São Carlos: Redespeleo Brasil. p. 62-63, 2009.

Prous, X., F. R. L.; Jacobi, C. M. The entrance as a complex ecotone in a Neotropical cave. **International Journal of Speleology**, 44 (2), 177-189, 2015.

Racovitza, E. Essai sur les problèmes biospéologiques**. Archives de Zoologie Expéri**-Mentale et Générale, 4a ser, (6), 371-488, 1907.

SKET, Boris. Can we agree on an ecological classification of subterranean animals?. **Journal of Natural History**, v. 42, n. 21-22, p. 1549-1563, 2008.

SESSEGOLO, G. *et al*. Conhecendo cavernas: Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba: **GEEP Açungui**, 108 p. Il. 2006.

SOUZA-SILVA, M; FERREIRA, R.L. The first two hotspots of subterranean biodiversity in South America. **Subterranean Biology**, v. 19, p. 1-21, 2016.

SOUZA-SILVA, M. *et al*. Habitat selection of cave-restricted fauna in a new hotspot of subterranean biodiversity in Neotropics. **Biodiversity and Conservation**, v. 30, n. 14, p. 4223-4250, 2021.

SOUZA-SILVA, M. **Ecologia e conservação das comunidades de invertebrados cavernícolas na mata atlântica brasileira**. 2008. 225 p. Mestrado (Doutorado em Ecologia Conservação e Manejo da Vida Silvestre) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Caracterização ecológica de algumas cavernas do Parque Nacional de Ubajara (Ceará) com considerações sobre o turismo nestas cavidades. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 9, n. 1, p. 59-71, 2009.

SOUZA-SILVA, M; MARTINS, R.P; FERREIRA, R.L. Cave conservation priority index to adopt a rapid protection strategy: a case study in Brazilian Atlantic rain forest. **Environmental management**, v. 55, p. 279-295, 2015.

SIMÕES, MH; SOUZA-SILVA, M; FERREIRA, RL. Cave physical attributes influencing the structure of terrestrial invertebrate communities in Neotropics. **Subterranean Biology**, v. 16, p. 103-121, 2015.

TRAJANO, E; GNASPINI, P. Composição da fauna cavernícola brasileira, com uma análise preliminar da distribuição dos táxons. **Revista Brasileira de Zoologia**, São Paulo, v. 3, n. 7, p. 383-407, jul. 1991.

TRAJANO E; MOREIRA J. R. A. Estudo da fauna de cavernas da província espeleológica arenítica Altamira-Itaituba, Pará. **Rev. Bras. Biol**., v. 51, n. 1, p. 13-29, 1991.

TRAJANO, E., GOLOVATCH, S. I., GEOFFROY, J. J., PINTO-DA-ROCHA, R., & FONTANETTI, C. S. Synopsis of Brazilian cave-dwelling millipedes (Diplopoda). **Papéis avulsos de Zoologia**, 41, 259-287. 1999.

WHITE, W.; CULVER, D.C. (Ed.). **Encyclopedia of caves**. Academic Press, 2011.

WHITTAKER, Robert H. A study of summer foliage incest communities in the Great Smoky Mountains. **Ecological monographs**, v. 22, n. 1, p. 2-44, 1952.

WYGODZINSKY, P. XX. on the genus Mirambulus Breddin, 1901, with general notes on the subfamily Vesciinæ (Reduviidæ, Hemiptera). **Journal of Natural History**, v. 3, n. 27, p. 265-268, 1950.



ARTIGO 3 - **CAVERNAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ**

Artigo III. **CAVERNAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ**

Artigo a ser submetido ao periódico Environmental Management

Leandro Mata da Rocha Melo[1,2], Rodrigo Lopes Ferreira[1,2], Marconi Souza Silva[1,2],

[1]Centro de Estudos em Biologia Subterrânea, Departamento de Ecologia e Conservação, Instituto de Ciências Naturais, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, P.O. Box 3037, Lavras CEP 37200-000, Minas Gerais, Brasil
[2]Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, Universidade Federal de Lavras, Lavras CEP 37200-000, Minas Gerais, Brasil

Resumo

Cavernas são ecossistemas conhecidos por sua estabilidade ambiental e pela reduzida disponibilidade de recursos alimentares. Esses ambientes abrigam uma fauna adaptada a essas condições, de modo que diferentes impactos podem resultar na perda significativa dessa biodiversidade, especialmente para as espécies restritas aos ambientes subterrâneos (troglóbios), que são as mais vulneráveis a diferentes tipos de alterações no habitat. A compreensão dos impactos que afetam as cavernas, aliada à análise detalhada de sua composição faunística e riqueza de espécies, desempenha um papel crucial na formulação de medidas efetivas de conservação. Nesse contexto, adaptamos o Índice de Prioridade de Conservação em Cavernas (CCPi), originalmente proposto por Souza-Silva (2015), para categorizar cavernas inseridas na Mata Atlântica da região norte do estado do Paraná, um local altamente ameaçado por ações humanas. Avaliamos as prioridades de conservação, considerando tanto os impactos humanos quanto a riqueza biológica nas cavernas com o objetivo de indicar prioridades de conservação. Para atingir esse propósito, conduzimos estudos de invertebrados terrestres usando setores (3x10m) e quadrantes (1x1m) em 23 cavernas. Complementamos a caracterização da fauna através de vistoria detalhada em microhabitats potenciais ao longo das cavernas. Paralelamente, realizamos uma qualificação dos impactos antrópicos em cada caverna e seu entorno imediato. As principais alterações observadas foram o desmatamento, destruição de espeleotemas, pisoteamento, presença de lixo e pichações. A relevância biológica foi extremamente alta para 8 cavernas (34.8%), alta para outras 11 (47.8%), média para 4 (17.4%), enquanto nenhuma caverna foi classificada como de baixa relevância quando analisada a riqueza biológica separadamente. Os resultados revelam que 10 cavernas (43.5%) foram classificadas como de prioridade extremamente alta, outras 10 (43.5%) como alta, 2 (8.7%) como média e apenas 1 (4.3%) caverna como baixa prioridade de conservação. As cavernas apresentaram variações em relação aos impactos e à riqueza biológica, indicando a necessidade de medidas de preservação distintas. Mesmo aquelas classificadas como de baixa relevância requerem a implementação de ações de conservação para manter sua fauna e o equilíbrio do ecossistema subterrâneo. A classificação de cavernas prioritárias para conservação utilizando o CCPi visa direcionar a devida atenção e a implementação de ações específicas de conservação para essas cavernas. Esperamos que essas informações contribuam para a conscientização e efetiva preservação desses ambientes, assegurando a sua biodiversidade e suas condições ambientais.

Palavras Chave: Carste, ambientes subterrâneos, Preservação, Impactos, diversidade.

1 Introdução

Cavernas são ambientes com grande valor geológico, arqueológico, paleontológico e biológico, atraindo a atenção de cientistas, espeleólogos e turistas em todo o mundo. No entanto, a preservação desses ecossistemas enfrenta desafios significativos, decorrentes de ameaças que variam desde impactos humanos até mudanças climáticas (Mammola et al., 2019).

Ambientes cavernícolas geralmente apresentam alta estabilidade ambiental e ausência de luz. Devido à ausência de organismos fotossintetizantes, esses ecossistemas carecem de produção primária e são, portanto, considerados oligotróficos (Culver & Pipan 2009). Dependem, em grande medida, da importação de recursos vindos do ambiente externo e da atividade de movimentação de animais para importar recursos (Culver & Pipan 2009). Consequentemente, alterações no ambiente externo tem o potencial de causar impactos significativos tanto nos próprios ecossistemas cavernícolas quanto nos organismos que neles habitam (Ferreira & Horta 2001, Souza-Silva et al 2015).

Dentro dos ambientes subterrâneos, uma diversidade de organismos apresenta relações distintas com o ambiente, e podemos categorizá-los em pelo menos três grupos. Os troglóxenos são organismos que utilizam a caverna em algum momento do seu ciclo de vida, desempenhando um papel essencial ao aportar recursos, como guano de morcegos e aves. Troglófilos são os organismos cavernícolas facultativos podendo completar todo o seu ciclo de vida fora como dentro das cavernas. Por fim, os troglóbios são organismos restritos e altamente especializados à vida nos ambientes subterrâneos, apresentando especializações morfológicas e fisiológicas que lhes permitem viver exclusivamente nesses locais (Sket 2008).

Cavernas desempenham um importante papel nos ecossistemas em que se inserem, podendo atuar como locais de recarga para sistemas de drenagem subterrânea (Elliott 2000). Além disso, elas abrigam espécies que exercem funções cruciais nos ecossistemas externos. A exemplo disso, podemos citar os morcegos, que desempenham na polinização, dispersão de sementes e de consumo de pragas agrícolas (Medellin et al. 2017). Além disso, cavernas podem servir como área de refúgio para a fauna epígea quando as condições externas passam por grandes variações ambientais (Fraga et al. 2023).

A singularidade dos ambientes subterrâneos propicia condições extremas que favorecem a colonização por microorganismos. Esses organismos, para se adaptarem, produzem metabólitos secundários únicos. Essas substâncias podem possuir amplo valor biotecnológico, exibindo propriedades antimicrobianas, antifúngicas, antivirais e até mesmo

anticancerígenas. Essa diversidade de potenciais benefícios destaca o valor desses compostos para aplicações em diversas áreas, como agricultura, medicina e indústrias alimentícias (Sadoway et al 2013; Abdelghani et al. 2021). Dessa forma, a interconexão entre os ecossistemas subterrâneos e as aplicações biotecnológicas dos microorganismos que neles prosperam destaca a importância global da preservação de cavernas na promoção da biodiversidade e na contribuição para o desenvolvimento sustentável.

Sistemas cársticos em todo o mundo enfrentam desafios crescentes devido ao aumento das atividades humanas nas áreas circundantes, bem como ao aumento do turismo em ambientes subterrâneos (Alexander 2021; Chiarini et al. 2022, Ferreira et al. 2022). Essa realidade exige uma avaliação e monitoramento urgentes dos impactos sobre esses ecossistemas, para evitar danos maiores ao património espeleológico. Com essa finalidade, já foram desenvolvidos e aplicados diversos índices de avaliação de impacto em regiões cársticas e cavernas (Calo e Parise 2006; Van-Beynen e Townsend 2005; Biswas 2010; Van-Beynen et al. 2012; Donato et al. 2014; Simões et al. 2014; Souza-Silva et al. 2015), fornecendo resultados valiosos que contribuem para a conservação e restauração de áreas ameaçadas.

Nesse contexto, o presente estudo adotou a metodologia proposta por Souza-Silva e colaboradores (2015) que considera, além dos impactos incidentes sobre as cavernas, os componentes biológicos das cavernas na análise. Portanto, representa uma abordagem que não negligencia os invertebrados cavernícolas, oferecendo uma análise de grau apropriado para avaliar a conservação e determinar a relevância biológica das cavernas estudadas do estado do Paraná, Brasil (Figuras 1 e 2).

2 Objetivos

Objetivo Geral

I) Sugerir áreas prioritárias para conservação de cavernas calcárias no norte do estado do Paraná, através da análise de impactos e relevância biológica das cavernas. Para tal construímos as hipóteses destacadas abaixo.

3 Hipóteses

H1) Cavernas que recebem um fluxo considerável de visitantes frequentemente apresentam um aumento proporcional nos impactos ambientais associados a essas atividades. A presença humana, muitas vezes, resulta em perturbações nos ecossistemas subterrâneos, podendo incluir a deposição de resíduos, alterações na qualidade do ar e do

solo, bem como perturbações sonoras. Diante desse contexto, cavernas sujeitas à maior visitação devem apresentar índices mais elevados de prioridade de conservação, a fim de mitigar e monitorar esses potenciais impactos.

H2) cavernas com um desenvolvimento mais extenso e com um maior número de entradas, proporcionam um ambiente para uma diversidade mais rica de fauna. Essa diversidade pode abranger tanto espécies troglóbias, exclusivamente encontradas em ambientes subterrâneos, quanto espécies não troglóbias que utilizam as cavernas de forma permanente, sazonal ou como refúgio. A presença de ambas as categorias da fauna, contribuirá para elevar a classificação dessas cavernas no Índice de Prioridade de Conservação de Cavernas (CCPi).



Figura 1. Substituição de vegetação nativa por pastagens em áreas cársticas no Norte do Paraná, Brasil.

4 Metodologia

4.1 Área de Estudo

Este estudo abrangeu uma análise em 23 cavernas localizadas no norte do estado do Paraná, distribuídas nos municípios de Colombo, Sengés, Castro, Campo Largo, Rio Branco do Sul, Almirante Tamandaré, Itaperuçu, Cerro Azul, Adrianópolis e Doutor Ulysses. Essas cavernas estão inseridas em rochas metassedimentares pertencentes ao Grupo Carbonático Açungui, distribuídas em três faixas calcárias distintas.

As faixas calcárias apresentam as formações nomeadas Itaiacoca, Votuverava e Capiru, sendo adotadas conforme a proposição de Sessegolo et al. (2006). As rochas carbonáticas do Grupo Açungui estão organizadas em três faixas geográficas designadas como faixa Noroeste, faixa Central e faixa Sudeste (Passos 1986).

No contexto da pesquisa, destaca-se que a faixa Central abriga a formação Votuverava, ocupando uma área de 201 km²; na faixa Sudeste, encontra-se a formação Capiru, estendendo-se por 291 km²; e, por fim, na faixa Noroeste, temos a formação Itaiacoca, com uma área de 123 km² (Passos 1986).

A área de estudo exibe paisagens extensivamente modificadas devido à plantação de *Pinus* e atividades de mineração, e está localizada no Bioma Mata Atlântica. Este bioma é conhecido por abrigar um notável endemismo e diversidade de organismos, no entanto é também um dos biomas mais degradados em todo o mundo (Lima et al. 2020; Diniz et al. 2022).

4.2 Coleta de Dados

Para avaliar cavernas e áreas prioritárias para conservação, adaptamos o “Cave Conservation Priority Index (CCPi)” proposto por Souza-Silva e colaboradores (2015). Em todas cavernas amostradas, foi realizada uma análise dos impactos humanos e da relevância biológica de cada cavidade, através de coletas de invertebrados realizada em setores (10x3m) e quadrantes (1x1), além de coletas gerais entre os setores.

O CCPi avalia a prioridade de conservação de cavernas através do grau de vulnerabilidade das mesmas. A vulnerabilidade para cada caverna é obtida através da sobreposição da relevância biológica (BR), que representa a singularidade taxonômica, biodiversidade e potencial para interações e o grau de impacto humano (HI), que representa as ameaças dos impactos antrópicos (Souza-Silva et al. 2015).

4.3 Análise dos Dados

4.3.1 Relevância Biológica

A análise da relevância biológica foi determinada através da sobreposição de três variáveis: Riqueza de espécies troglóbias, riqueza total de espécies e a riqueza relativa de espécies.

Devido à importância de espécies troglóbias para a proteção de cavernas, estas foram avaliadas separadamente, criando quatro categorias a partir da caverna com maior número de troglóbios (7spp./4): Extremamente alta (≥7), alto (4-6spp.), médio (2-3spp) e baixo (≤1). Os seguintes pesos foram atribuídos a cada categoria: Extremamente alta (4), alto (3), médio (2) e baixo (1).

Para a riqueza total de espécies foi utilizado o maior valore de riqueza encontrado em uma caverna, que também foi divido por quatro: 97/4; assim, as cavidades foram divididas em categorias de extremamente alta (≥74spp.), alta (50-73spp.), média (26-49spp.) e baixa (≤25spp.). Pesos foram dados para cada categoria, a fim de se estabelecer o grau de relevância de cada caverna. Cada categoria recebeu um peso: Extremamente alta (8), alta (6), média (4) e baixa (2).

A riqueza relativa de espécies considerou o número de espécies em relação a área da caverna em que foram realizadas as coletas e a área das entradas próximas. Para isso foi utilizado o índice: Rtfr = [(Ttfr/ca)/Rcea], onde Rtfr= riqueza relativa de espécies, ca= área da caverna e cea=área da entrada da caverna (Ferreira 2004; Souza-Silva et al. 2011). Portanto, essa variável procura reduzir a contribuição excessiva das comunidades paraepígeas ao considerar a extensão da entrada da caverna na análise. Dessa forma, a maior riqueza relativa encontrada foi usada para criar quatro categorias (1,73/4): Extremamente alta (≥1,9 spp.), alto (1,3-1,8spp.), médio (0,6-1,2 spp.) e baixo (≤0,5 spp.). Cada categoria recebeu os seguintes pesos: Extremamente alta (4), alto (3), médio (2) e baixo (1). Neste caso, os intervalos de valores entre as categorias de riqueza relativa é de 0,43.

A riqueza total de espécies recebe o dobro do peso das demais riquezas, devido à importância de se preservar cavidades com maiores riquezas de invertebrados, afim de se manter um maior potencial de interação ecológica, sustentando ecossistemas mais resilientes e equilibrados (Ferreira 2004; Souza-Silva et al. 2011). Portanto, a relevância biológica foi considerada através da soma dos pesos da riqueza de troglóbios, riqueza total de espécies e da riqueza relativa de espécies. A relevância biológica de cada cavidade foi determinada através da caverna com a soma mais alta, e dividida em quatro categorias

(13/4): Extremamente alta (≥10), alta (9-7), média (6-4), e baixa (≤3). Cada categoria recebeu um peso: Extremamente alto (4), alto (3), médio (2) e baixo (1).

4.3.2 Grau de Impacto Humano

O grau de impacto foi considerado a partir de potenciais modificações que podem causar o empobrecimento, enriquecimento ou modificações dos microhabitats e recursos orgânicos das cavernas. O empobrecimento compreende a redução de recursos orgânicos e da diversidade biológica em função de atividades humanas na caverna. O enriquecimento é promovido por atividades humanas que aumentam a quantidade de recursos orgânicos e por fim as modificações são impactos que modificam a estrutura física da caverna sem causar enriquecimento ou empobrecimento trófico.

Cada impacto foi considerado a partir de modificações dentro e fora das cavernas, sendo divididos, no seu potencial de modificação, extensão espacial dentro da caverna e o período de permanência do impacto na cavidade, recebendo pesos 1, 2 ou 3. O potencial intenso se refere a modificações que causam grande perturbação da fauna e estrutura física da gruta (peso 2). O potencial tênue se refere a modificações causando pequenos distúrbios a fauna e estrutura física (peso 1). A extensão espacial curta compreende as modificações de amplitude espacial potencialmente baixa, afetando a estrutura física e a fauna localmente (peso 1), quando comparado com modificações de amplo espaço (peso 2) e por fim, a permanência se refere ao intervalo de tempo que o impacto irá permanecer no ambiente cavernícola, assim divididos em impactos de permanência ocasional (peso 1) e o impactos de permanência constante (peso 3).

As cavernas foram classificadas a partir da soma de seus impactos. O valor mais alto encontrado (55) serviu de base para categorizar o grau de impactos das cavidades: Extremamente alto (≥28), alto (20-27), médio (14-20) e baixo (≤13). Cada categoria recebeu os seguintes pesos: Extremamente alto (4), alto (3), médio (2) e baixo (1). O desmatamento e atividades agropecuárias receberam sempre peso 1, devido à dificuldade de se compreender o verdadeiro impacto dessas atividades no meio subterrâneo (Souza-Silva et al 2015).

4.3.3 Índice de Prioridade de Conservação de Cavernas (CCPi)

A prioridade de conservação em cavernas foi considerada a partir da soma dos pesos da relevância biológica e impactos humanos, cada uma dessas categorias recebeu os seguintes pesos: Extremamente alto (4), alto (3), médio (2) e baixo (1). A soma dos pesos

foi realizada e utilizada a caverna com maior peso (8) para se criar as categorias do CCPi: Extremamente alto (≥6), alto (4-5), médio (3) e baixo (≤2).

5 Resultados

Nas 23 cavernas investigadas 14 impactos distintos foram registrados (FIG. 3). Dentre eles, os mais frequentemente observados foram o pisoteio (78,2%), deposição de lixo (65,2%), pichação (65,2%), cultivo de pastagem (60,8%) e vandalismo em espeleotemas (60,8%) (FIG.3). O impacto humano foi extremamente alto para 4 cavernas (17.4%), alto para 2 (8.7%), médio para 7 (30.4%) e baixo para 10 (43.5%) (FIG.4).

Três cavernas (13%) exibiram uma riqueza extremamente alta de espécies troglóbias (Tg/bR), enquanto 11 (47,9%) apresentaram uma riqueza alta, 3 (13%) uma riqueza média e 6 (26,1%) uma riqueza baixa. No que diz respeito à riqueza total de espécies (TtfR), 2 cavernas (8,7%) foram categorizadas como extremamente alta, 11 (47,8%) como alta, 8 (34,8%) como média e 2 (8,7%) como baixa. Quanto à riqueza relativa de espécies, uma caverna (4,3%) foi considerada de alta relevância, enquanto 22 (95,7%) foram classificadas como baixa relevância.

A relevância biológica revelou-se extremamente alta para 8 cavernas, representando 34.8% do total. Para outras 11 cavernas (47.8%), a relevância biológica foi classificada como alta, enquanto em 4 cavernas (17.4%) essa relevância foi considerada de nível médio. Importante ressaltar que nenhuma caverna foi categorizada como possuindo baixa relevância, evidenciando uma tendência à relevância elevada nesta métrica específica para a região (FIG. 5).

A Tabela 1 apresenta a classificação de cada caverna nas categorias do Índice de Prioridade de Conservação de Cavernas (CCPi), bem como a sua categoria final de conservação de acordo com o índice. Dez cavernas (43.5%) foram classificadas como de extrema relevância, 10 (43.5%) de alta, 2 (8.7%) de média e 1 (4.3%) de baixa (FIG. 6).



Figura 2. Impactos observados nos entornos adjacentes às cavernas: A) Proximdade de centro urbano em relação às cavernas; B) atividades de mineração próximas das cavernas e C) desmatamento e plantação de *Pinus* sp..



Figura 3. Impactos observados nas cavernas e seus arredores. A, B e C: Desmatamento próximo as cavernas; D: Modificação da vegetação nativa nos arredores da gruta Bom Sucesso; E, F: Vandalismo em espeleotemas nas grutas Pinhalzinho e Varzeão; G, L, N: Pichações nas grutas Itaperussu e Pinheiro Seco; I: Construções de passarela para os turistas na Gruta Bacaetava; J: Lixo na Gruta Itaperussu; K: Salão detonado na Gruta Pinheiro Seco; M: Estrada próxima a Gruta Varzeão.

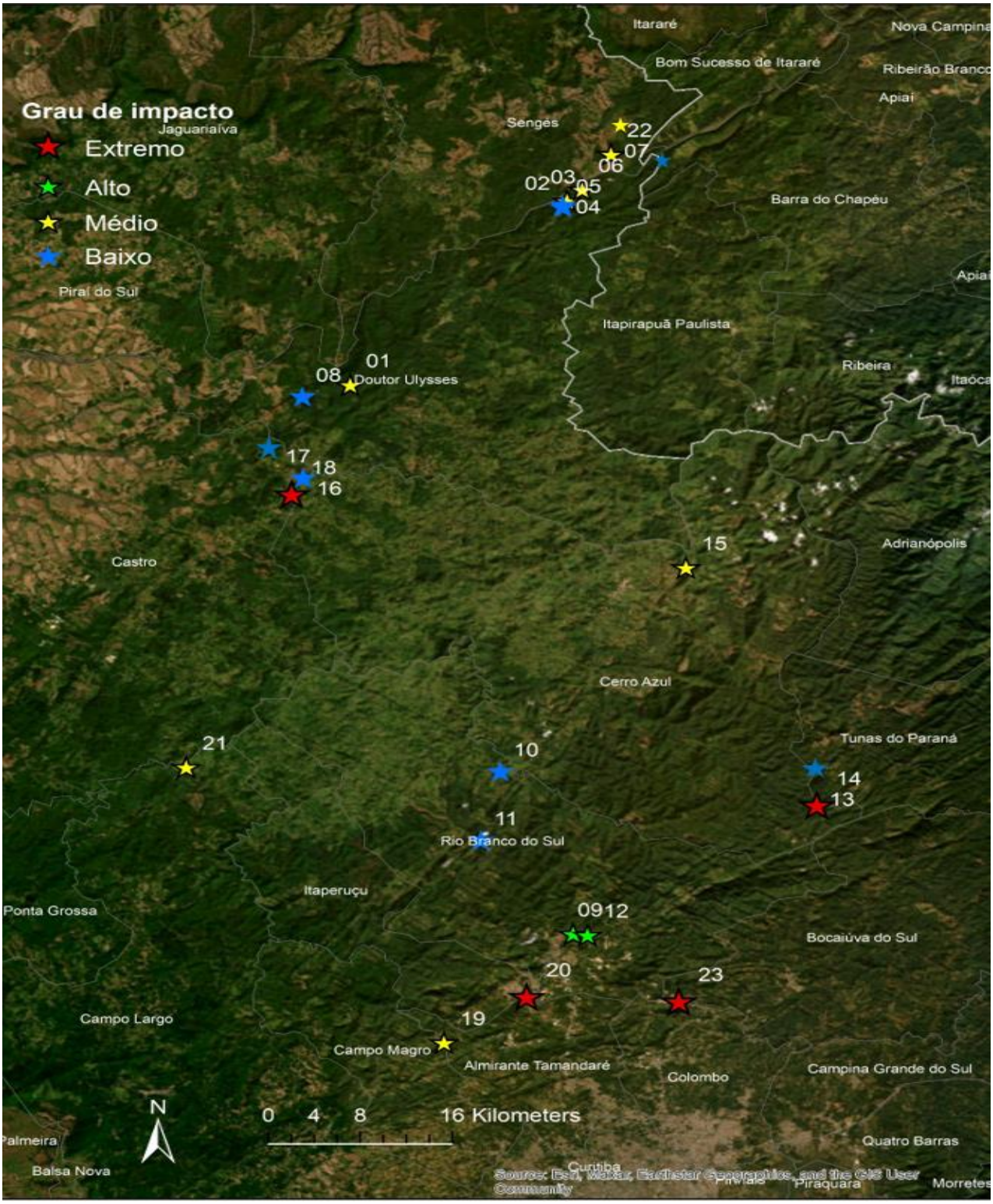


Figura 4. Grau de impacto por caverna. 1) Varzeão; 2) Arco de Pedra; 3) Casa de Pedra; 4) Ressurgência do Feital; 5) Dá a Volta; 6) Pocinho; 7) Pocinho 2; 8) Malfazido; 9) Toquinhas; 10) Piedade; 11) Bromados; 12) Lancinha; 13) Fadas; 14) Jesuítas; 15) Bom Sucesso; 16) Chiquinho; 17) Chiquinho 2; 18) Pinheiro Seco; 19) Ermida; 20) Itaperussu; 21) Pinheirinho; 22) Pinhalzinho; 23) Bacaetava.

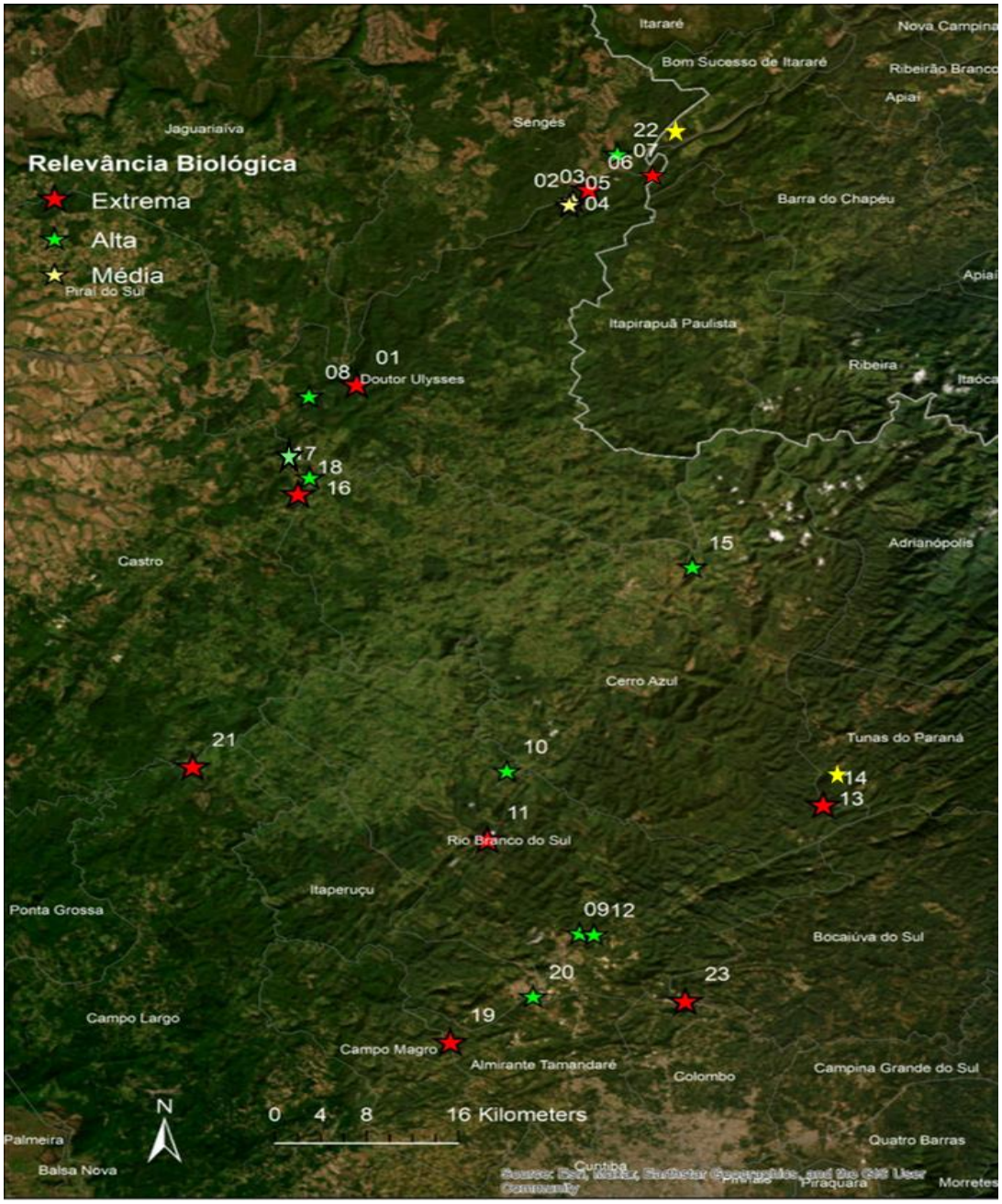


Figura 5. Relevância Biológica por caverna. 1) Varzeão; 2) Arco de Pedra; 3) Casa de Pedra; 4) Ressurgência do Feital; 5) Dá a Volta; 6) Pocinho; 7) Pocinho 2; 8) Malfazido; 9) Toquinhas; 10) Piedade; 11) Bromados; 12) Lancinha; 13) Fadas; 14) Jesuítas; 15) Bom Sucesso; 16) Chiquinho; 17) Chiquinho 2; 18) Pinheiro Seco; 19) Ermida; 20) Itaperussu; 21) Pinheirinho; 22) Pinhalzinho; 23) Bacaetava.

Tabela 1. Categorização das cavernas de acordo com o índice de prioridade de conservação de cavernas (CCPi)

Caverna [impactos]	Município	HI	HI	TgbR	TtfR	RtfR	CCPi
Varzeão [14,15,22,23,25]	Dr. Ulysses	18	A	7	97	0.0009	E
Arco de Pedra [6]	Dr. Ulysses	1	L	0	54	0.002	H
Casa de Pedra [15,23,26]	Dr. Ulysses	18	A	0	44	0.007	H
Ressurgência do Feital [6]	Dr. Ulysses	1	L	2	52	0.002	H
Da a Volta [6,7,14,15,22,26]	Dr. Ulysses	1	L	0	28	0.008	A
Pocinho [6,7,14,22,23,25]	Dr. Ulysses	16	A	5	61	0.04	E
Pocinho dois [23,27]	Dr. Ulysses	8	L	4	23	0.0039	L
Malfazido [7,14,23]	Dr. Ulysses	10	L	2	70	0.0049	H
Toquinhas [7,14,15,22,23]	Rio Branco do Sul	21	H	1	36	1.73	E
Piedade[15]	Rio Branco do Sul	3	L	4	35	0.004	H
Bromados [14,15,22]	Rio Branco do Sul	13	L	6	85	0.013	H
Lancinha[6,14,15,22,23]	Rio Branco do Sul	21	H	4	51	0.0023	E
Fadas[22,23]	Cerro Azul	10	L	1	18	0.01	A
Jesuitas[5,14,15,22,23,25]	Cerro Azul	28	E	5	71	0.0018	E
Bom Sucesso[6,7,14,15,22,26]	Cerro Azul	16	A	5	33	0.08	H
Chiquinho[6,7,22]	Castro	5	L	2	61	0.03	H
Chiquinho dois[6,7,22]	Castro	5	L	5	42	0.022	H
Pinheiro Seco[2,5,6,7,14,15,22,23,25,26]	Castro	55	E	7	59	0.0066	E
Ermida[6,14,15,18,23]	A. Tamandaré	16	A	4	68	0.05	E
Itaperussu[6,14,15,18,22,23,24]	Itaperuçu	35	E	5	45	0.02	E
Pinheirinho[5,6,15,22]	Campo Largo	17	A	5	52	0.1	E
Pinhalzinho[6,14,15,22,23,25]	Sengés	18	A	7	39	0.0008	H
Bacaetava[5,14,18,19,22,24,25]	Colombo	45	E	5	70	0.0002	E

Lista de impactos nas cavernas e entorno (números sobrescritos): [2]alterações por detonação, [5]construções, [6]desmatamento, [7]atividades agropastoril, [8]esgoto doméstico, [14]lixo, [15]pichação, [18]atividades de mineração nas proximidades, [19]rodovia próximas as cavernas, [22]pisoteio, [23]vandalismo em espeleotemas, [24]vibrações do tráfego rodoviário ou de explosões perto da caverna, [25]turismo, [26]atividades religiosas, [27]outros, proximidade de cidades. HI Impacto humano; TgbR riqueza troglomórfia/troglóbia; TtfR riqueza total de espécies; RtfR riqueza relativa de espécies; E extremamente alta; H alto; A média; L baixa.

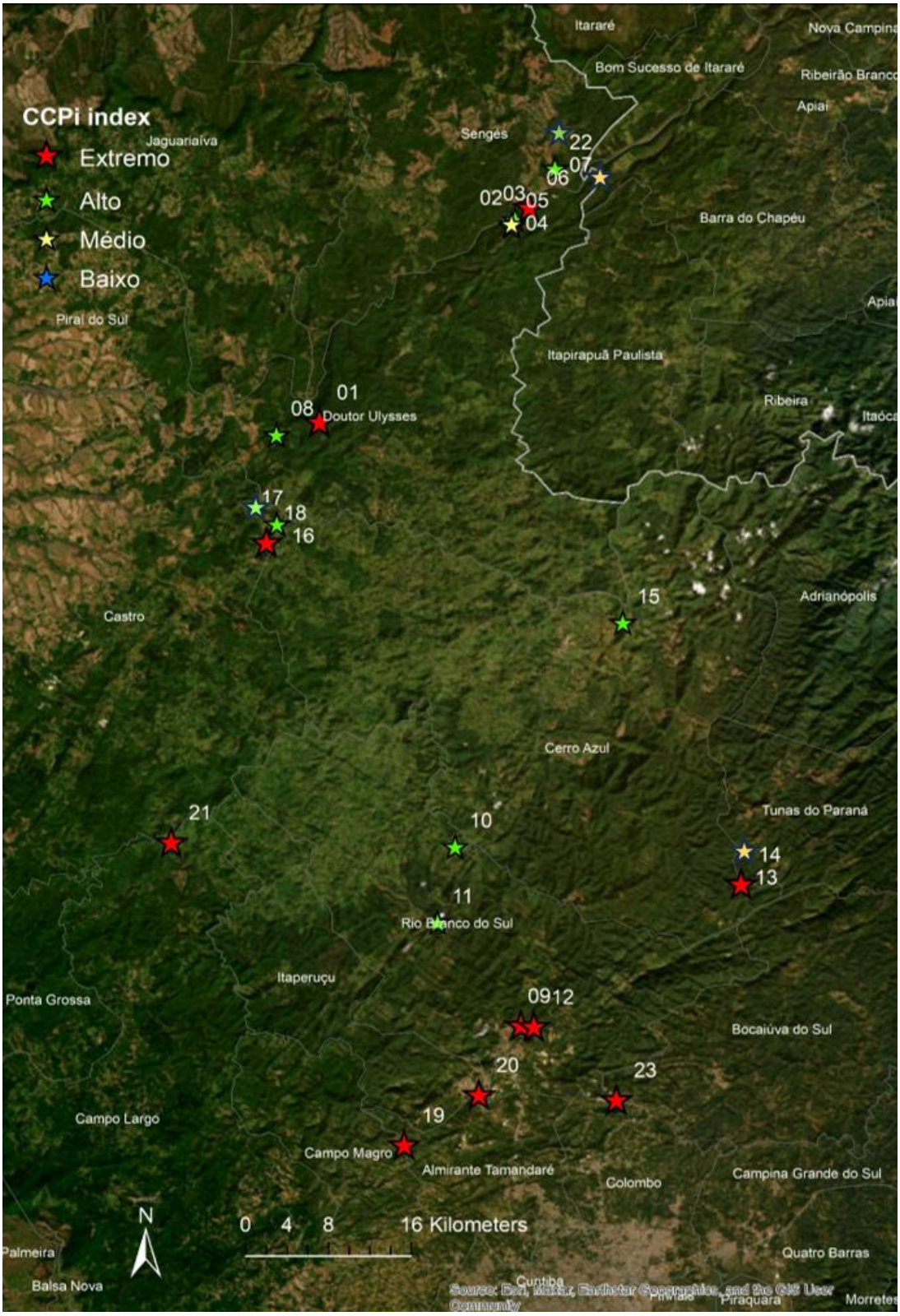


Figura 6. Índice de Prioridade de Conservação de Cavernas. 1) Varzeão; 2) Arco de Pedra; 3) Casa de Pedra; 4) Ressurgência do Feital; 5) Dá a Volta; 6) Pocinho; 7) Pocinho 2; 8) Malfazido; 9) Toquinhas; 10) Piedade; 11) Bromados; 12) Lancinha; 13) Fadas; 14) Jesuítas; 15) Bom Sucesso; 16) Chiquinho; 17) Chiquinho 2; 18) Pinheiro Seco; 19) Ermida; 20) Itaperussu; 21) Pinheirinho; 22) Pinhalzinho; 23) Bacaetava.

Das 23 cavernas estudadas, 20 (87%) apresentaram extrema ou alta relevância. Das 10 cavernas consideradas de extrema relevância, apenas duas estão localizadas dentro de unidades de conservação: a Gruta Jesuítas, situada no Parque Estadual de Campinhos, onde já existe um plano de manejo e medidas de conservação específicas para essa caverna e a Gruta Bacaetava, localizada no Parque Municipal Gruta do Bacaetava no município de Colombo.

A Gruta do Varzeão emerge como a caverna com a maior riqueza biológica do Paraná com 97 espécies registradas. Diante disso, medidas preventivas são necessárias, e sugerimos a implementação urgente de um plano de manejo, juntamente com a criação de uma área de reserva natural. Essas iniciativas visam preservar a cavidade que abriga a mais alta diversidade do estado. Além disso, a criação da área de reserva contribuirá para a redução dos impactos humanos sobre esse ambiente.

As outras cinco cavernas classificadas como de extrema relevância demandam urgentemente a implementação de medidas destinadas a preservar sua biodiversidade e reduzir os impactos humanos. Isso inclui a elaboração de planos de manejo abrangentes, o controle efetivo da visitação e a recuperação das áreas circundantes a essas cavidades. As medidas de conservação sugeridos para cada cavernas de extrema relevância se encontram listados na Tabela 2.

As 10 cavernas classificadas como de alta prioridade foram: Arco de Pedra, Casa de Pedra, Ressurgência do Feital, Malfazido, Piedade, Bromados, Bom Sucesso, Chiquinho, Chiquinho 2, Pinhalzinho. Duas cavernas foram classificadas com média prioridade: Dá a Volta e Fadas, enquanto apenas a caverna Pocinho 2 foi classificada como baixa prioridade.

As dez cavernas classificadas como de alta relevância apresentam diversas características que as elevaram a esta categoria. Dentre estas variáveis, a riqueza total de espécies desempenhou um papel crucial em quatro cavernas: Arco de Pedra, Ressurgência do Feital, Malfazido e Chiquinho. Estas cavernas receberam estas classificações, em função dos níveis extremamente alto e alto em relação à riqueza total de espécies.

As cavernas Piedade, Bromados, Bom Sucesso, Chiquinho dois e Pinhalzinho destacam-se pela presença de troglóbios, categorizando-as como de extremamente alto e alta relevância ao considerar a riqueza desses organismos adaptados ao ambiente subterrâneo.

Por fim, a gruta Casa de Pedra (FIG. 7) se insere nessa categoria de alta relevância devido à combinação de impactos humanos médios e uma riqueza total de espécies considerada média.

Tabela 2. Ações prioritárias sugeridas para as cavernas classificadas no CCPi como extremamente alto (E). PM = plano de manejo, ARN = criação de área de reserva natural; RA = restauração dos arredores; ECT = estrutura para controle do turismo; AEA = atividade de educação ambiental; APM = atualização do plano de manejo; RC = restauração da cavidade, CV = controle de visitação.

Caverna	Município	CCPI	Ações
Varzeão	Dr. Ulysses	E	PM, ARN, CV
Pocinho	Dr. Ulysses	E	PM, RA
Toquinhas	Rio Branco do Sul	E	PM, RA
Lancinha	Rio Branco do Sul	E	PM, ECT, AEA, CV
Jesuítas	Cerro Azul	E	APM, AEA, CV
Pinheiro Seco	Castro	E	PM, RA, RC, AEA
Ermida	Almirante Tamandaré	E	PM, RA
Itaperussu	Itaperuçu	E	PM, RA, CV
Pinheirinho	Campo Largo	E	PM, RA
Bacaetava	Colombo	E	APM

A categoria de média relevância abrangeu somente duas cavernas. A Gruta Dá a Volta, considerada a maior caverna do estado do Paraná, encontra-se em um fragmento de mata preservado, de difícil acesso, o que contribui significativamente para a minimização dos impactos humanos na cavidade. Devido à sua extensão superior a 2 km, estudos adicionais são necessários para uma compreensão da fauna presente, exigindo uma análise complementar para elucidar sua identidade faunística.

Já a Gruta Fadas, situada no Parque Estadual de Campinhos, beneficia-se de ações de conservação efetivas. Essas medidas bem-sucedidas reduzem a urgência de intervenções adicionais, destacando a importância das práticas conservacionistas implementadas no ambiente.

A única caverna classificada como de baixa relevância, Pocinhos dois, caracteriza-se pela baixa riqueza total de espécies e pela escassez de impactos humanos, justificando sua inclusão nessa categoria. Apesar disso, a descoberta de quatro espécies troglóbias nessa caverna, ressalta a importância de medidas de conservação, mesmo naquelas consideradas de menor relevância, visando a proteção desse ecossistema subterrâneo único.



Figura 7. Caverna Itaperussu (Extrema prioridade de conservação), Ressurgência do Feital (Alta prioridade), Jesuitas (Extrema prioridade) e parte fótica da Gruta Casa de Pedra (média prioridade) devido à combinação de impactos humanos riqueza total de espécies troglóbias e não troglóbias.

6 Discussão

6.1 Proteção de cavernas no Brasil

A legislação brasileira para a proteção de cavernas passou por mudanças significativas com a promulgação do Decreto Nº 6.640 em 7 de novembro de 2008. Esse decreto estabeleceu medidas robustas para a preservação de cavidades consideradas de máxima relevância, proibindo quaisquer impactos que pudessem comprometer sua integridade (Presidência da República, 2008). No entanto, as demais cavernas, classificadas como de alta, média e baixa relevância, ficaram sujeitas à possibilidade de destruição após a implementação desse novo decreto.

Apesar das preocupações associadas a essa flexibilização, é importante destacar que o decreto desencadeou um avanço significativo nas pesquisas espeleológicas no Brasil, como evidenciado por Ferreira e colaboradores (2023): antes da implementação do decreto, aproximadamente 6000 cavernas estavam registradas no país, atualmente, esse número ultrapassa 24000. Além disso, o registro de espécies troglóbias no Brasil aumentou de 75 em 2008 para 285 até o ano de 2023 (Ferreira et al. 2023).

Esses dados sugerem que o Decreto Nº 6.640 teve um impacto positivo ao estimular o interesse e o engajamento na pesquisa espeleológica, resultando em um aumento significativo no conhecimento sobre o patrimônio subterrâneo do Brasil.

Os critérios utilizados para classificar o grau de relevância dessas cavidades envolviam considerações essenciais, como a presença de troglóbios raros e interações ecológicas únicas. Esse enfoque proporcionava uma proteção fundamental para a fauna, aspecto evidenciado no estudo de Medellin e colaboradores (2017). Tais autores destacaram como muitas espécies que habitam cavernas desempenham serviços ecossistêmicos singulares, como exemplificado pelo papel de espécies de morcegos no controle de diversas pragas agrícolas.

No entanto, um novo Decreto, Nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022, foi promulgado com o objetivo de substituir a legislação anterior. Este novo decreto introduziu mudanças preocupantes ao permitir que empreendimentos impactem cavernas de maneira irreversível, mesmo aquelas consideradas de máxima relevância (Presidência da República, 2022). Mais alarmante ainda é a disposição que autoriza o órgão ambiental licenciador a aprovar a destruição total ou parcial de cavernas de extrema importância em nome de empreendimentos considerados de utilidade pública.

Essa mudança representa um retrocesso significativo nos esforços para preservar a rica biodiversidade subterrânea presente nas cavernas brasileiras. A flexibilização dessas

medidas de proteção compromete não apenas os ecossistemas cavernícolas, mas também coloca em risco a sobrevivência de espécies únicas e a manutenção das interações ecológicas que contribuem para a saúde do meio ambiente (Ferreira et al. 2022).

Atualmente, o Decreto Nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022, encontra-se suspenso devido a uma liminar, aguardando deliberação em votação que determinará a confirmação ou revogação das suas disposições. Essa medida cautelar representa um momento crucial para avaliar os impactos potenciais do decreto e considerar suas implicações na proteção das cavernas brasileiras.

6.2 Índices utilizados para a proteção de cavernas

Índices têm sido desenvolvidos como ferramentas auxiliares na preservação do patrimônio espeleológico, identificando áreas prioritárias para conservação. No estudo conduzido por Donato e colaboradores (2014), dados sobre a fauna de invertebrados cavernícolas, incluindo a riqueza de espécies e o endemismo, foram utilizados, juntamente com informações sobre os impactos ambientais, para propor medidas de conservação em áreas mais vulneráveis para cavernas presentes no estado do Sergipe. Este índice revelou eficiência ao diferenciar cavernas pela presença de espécies troglóbias. No entanto, ao categorizar a riqueza total, os grupos eram representados por 0, 1-5, 6-10, ≥11 espécies, o CCPi utilizado aqui se destaca por ser mais eficaz, uma vez que todas as cavernas apresentavam riqueza total superior a 11.

A abordagem do CCPi, ao considerar a riqueza total de espécies em uma métrica mais adaptável à diversidade, permitiu esse refinamento que proporciona uma avaliação mais precisa da biodiversidade presente, permitindo uma classificação mais sensível e diferenciada das cavernas com base na riqueza total de espécies. Assim, o CCPi emerge como uma ferramenta eficiente para avaliar a importância biológica e para orientar estratégias de conservação, destacando-se nas situações em que a riqueza total é um dos fatores cruciais para a tomada de decisões.

O índice proposto por Nitzu e colaboradores (2018) revelou-se eficaz na preservação de espécies troglóbias. No entanto, sua metodologia baseia-se na riqueza de espécies troglóbias em relação ao número de cavernas em que estão presentes. Essa abordagem pode apresentar limitações, como, por exemplo, a elevada taxa de endemismo observada em espécies troglóbias presentes em regiões tropicais, além da dificuldade inerente em realizar pesquisas abrangentes que gerem dados precisos sobre a distribuição dessas espécies em um prazo razoável (Rabelo et al., 2018).

Nesse contexto, o CCPi demonstrou uma aplicabilidade mais eficiente, especialmente considerando o número de cavernas (23) utilizado neste estudo. A abordagem do CCPi, se mostra particularmente útil em situações desafiadoras, como a dificuldade prática e temporal de estudar exaustivamente todas as cavernas em uma área tropical. Isso destaca a versatilidade e a aplicabilidade do CCPi como uma ferramenta prática e eficaz para avaliar e priorizar a conservação em contextos específicos de cavernas, especialmente em cenários nos quais a cobertura detalhada de todas as cavernas é uma tarefa complexa.

O índice proposto por Simões et al. (2014) apresenta semelhanças com o CCPi, mas difere na abordagem em relação à riqueza de espécies troglóbias. Neste índice, a riqueza de espécies troglóbias não é incluída no cálculo da riqueza biológica, sendo adicionada ao final da análise junto à relevância biológica e ao grau de impacto. Embora esse método seja mais sensível à riqueza de espécies troglóbias, uma grande disparidade nos valores das variáveis pode resultar em um menor número de cavernas consideradas extremamente vulneráveis. Portanto, a eficácia desse índice pode depender dos objetivos específicos do estudo.

A abordagem de adicionar a riqueza de espécies troglóbias no final da análise destaca a importância dessas espécies, mas ao mesmo tempo, a sensibilidade às diferenças nos valores das variáveis pode influenciar a identificação de cavernas com maior vulnerabilidade. Assim, a escolha entre o índice de Simões et al. (2014) e o CCPi dependerá dos objetivos e das prioridades do estudo em questão, considerando a sensibilidade desejada às espécies troglóbias e a forma como as diferentes variáveis são ponderadas na avaliação da vulnerabilidade das cavernas.

6.3 Vulnerabilidade da fauna cavernícola

A Mata Atlântica destaca-se como um dos biomas mais ricos em diversidade e endemismo de espécies em todo o mundo (Myers et al. 2000). Entretanto, as estimativas quanto à cobertura vegetal remanescente variam de 11% a 16%, indicando uma preocupante perda e fragmentação da vegetação (Ribeiro et al. 2009). No contexto do nosso estudo, o desmatamento emergiu como um dos impactos mais persistentes, afetando cerca de 60,8% das proximidades das cavernas investigadas.

A análise de áreas de cavernas prioritárias para a conservação revelou a identificação de 10 cavidades de extrema prioridade para a conservação. Esta abordagem é fundamental para orientar programas de preservação eficazes. A implementação de

métodos ágeis, como o CCPi, está em sintonia com pesquisas que destacam a importância do tempo como um fator crucial, especialmente considerando a urgência em evitar eventos de extinção em áreas de grande endemismo e biodiversidade, que sofrem com impactos como a Mata Atlântica (Rezende et al. 2018).

Souza-Silva e colaboradores (2015) aplicaram a metodologia do CCPi em 300 cavernas localizadas na Mata Atlântica, com apenas duas delas situadas no estado do Paraná. Este abrangente estudo identificou 14 cavernas como de extrema prioridade de conservação, representando 4.6% das cavidades investigadas. Em contraste, nosso estudo analisou 23 cavernas no estado do Paraná, das quais 10 foram classificadas como de extrema prioridade para conservação, ou seja, 43.5% das cavernas estudadas. Isso evidencia a vulnerabilidade da área e ressalta a necessidade urgente de implementar medidas de conservação.

Estudos têm demonstrado que a riqueza e a composição da fauna cavernícola não são independentes das paisagens circundantes. Assim, a degradação dessas áreas tem sido associada ao aumento da riqueza e diversidade de espécies dentro das cavernas, indicando o papel dessas cavidades como refúgios para a vida selvagem (Bush 2020; Fraga et al. 2023). Portanto, a preservação de cavernas e a restauração das áreas circundantes emergem como fatores cruciais na luta contra a perda da biodiversidade. Diante disso, sugerimos em nosso estudo a criação de áreas de preservação, especialmente na Gruta do Varzeão, que abriga uma elevada riqueza de espécies troglóbias e não troglóbias, levando em consideração os parâmetros específicos da região.

6.4 Estudo em cavernas e áreas prioritárias para conservação no estado do Paraná

De acordo com o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), o Paraná abriga um total de 360 cavernas cadastradas. Entre essas formações, destaca-se a Gruta da Lancinha, que tem sido visitada há aproximadamente 150 anos, conforme documentado por Sessegolo et al. (2006) e segundo Rehme (1993), o número diário de visitantes pode chegar a 50 pessoas. Além disso é a caverna mais intensamente estudada em relação à sua fauna subterrânea, que até o presente estudo continha 76 espécies de invertebrados, sendo duas delas troglóbias (Pinto-da-Rocha 1993).

Nossos resultados apontam a Gruta da Lancinha com pelos menos 4 espécies troglóbias, e um alto valor de impactos humanos, fatores importantes para categorizá-la como de extrema prioridade de conservação. Este dado se alinha com as conclusões de uma pesquisa recente sobre os efeitos do turismo desordenado na Gruta da Lancinha,

conduzida por Bock e colaboradores (2023). Tal estudo identificou 43 pontos de degradação na caverna, destacando ameaças como o acúmulo de lixo, construção de fogueiras, pichações, destruição de espeleotemas e pisoteamento da fauna. Importante ressaltar que a mera criação de uma área de conservação como ocorreu no caso da gruta da Lancinha, não se revela suficiente para impedir esses impactos, sendo essencial implementar uma estrutura eficiente de controle e monitoramento para garantir a preservação efetiva desse patrimônio natural.

Além disso, a Gruta da Lancinha, além de abrigar espécies restritas ao ambiente cavernícola, foi considerada de alta relevância quando se avaliou a riqueza total de espécies. Diante desse cenário, sugerimos a urgência na criação de um plano de manejo abrangente. Adicionalmente, recomendamos a implementação de estruturas na área que possam minimizar e controlar as atividades turísticas na caverna, assim como a implementação de atividades de educação ambiental vinculadas ao turismo. Essas medidas são essenciais não apenas para preservar a biodiversidade da gruta, mas também para garantir a sustentabilidade do turismo na região, equilibrando a conservação com a experiência turística.

Em relação aos estudos acerca da fauna cavernícola do Paraná, esses ganham relevância especialmente através das pesquisas conduzidas por Pinto-da-Rocha (1993, 1995), que realizou coletas de invertebrados em 12 cavernas distintas. Dos organismos identificados, apenas dois foram classificados como troglóbios, o Diplopoda *Crypturodesmus* sp., e o colêmbolo *Acherontides eleonorae*.

Nossas investigações, por sua vez, revelaram a presença de 27 espécies troglóbias, ampliando significativamente a compreensão da biodiversidade restrita aos ambientes subterrâneos. Esse acréscimo no número de espécies restritas a cavernas ressalta a importância e a necessidade de priorizar medidas de conservação desses ambientes. Além disso, alertamos para a necessidade de novas incursões em cavidades subterrâneas no Paraná, a fim de descobrir mais espécies troglóbias ainda desconhecidas, contribuindo assim para um panorama mais completo da riqueza biológica do estado.

Das cavernas estudadas, apenas duas estão dentro de unidades de conservação, sendo elas a Gruta Bacaetava e a Gruta Jesuítas. Assim, destacamos a vulnerabilidade das cavernas no estado do Paraná e sugerimos a implementações de planos de conservação mesmo para as cavernas dentro de áreas protegidas.

Em relação a gruta Jesuítas, no plano de manejo atual do parque, consta apenas uma espécie troglóbia. Neste contexto, ressaltamos a importância do monitoramento

biológico, uma vez que, a partir deste estudo, a Gruta Jesuítas já revela a presença de pelo menos cinco espécies restritas ao ambiente subterrâneo. Essa nova informação destaca a necessidade de atualizar e aprimorar o plano de manejo, levando em consideração a riqueza biológica recém-descoberta.

A Gruta do Bacaetava está situada no Parque Municipal Gruta do Bacaetava, onde já são implementadas ações de educação ambiental, incluindo visitas de escolas à caverna. Contudo, devido à extrema relevância da caverna, recomendamos medidas adicionais para complementar as iniciativas já existentes. No que diz respeito ao plano de manejo, sugerimos a atualização da lista de fauna encontrada na caverna, evidenciando a presença de cinco espécies troglóbias e uma riqueza significativa de espécies em toda a cavidade, quando comparada com as cavernas do estado do Paraná. Essa atualização no plano de manejo enfatizaria não apenas a importância da Gruta do Bacaetava, mas também a necessidade de preservação e monitoramento eficazes para conservar sua biodiversidade.

A Gruta Pinheiro Seco, classificada como de extrema relevância, destaca-se das demais, devido ao elevado valor obtido no índice de impacto humano (55) e à presença significativa de organismos troglóbios (7) em comparação com outras cavidades estudadas. Portanto, o CCPi ressalta a urgência de implementar medidas efetivas para a conservação dessa caverna. Nesse contexto, sugerimos a elaboração de um plano de manejo abrangente, que inclua a recuperação não apenas da área circundante, mas também da própria cavidade. Além disso, é crucial estabelecer regulamentações e controles para o turismo na gruta, uma vez que esta desempenha um papel importante na vida dos habitantes locais, influenciado também pelo aspecto religioso associado à visitação da caverna. Tais regulamentações podem vir a garantir a sustentabilidade do turismo, considerando os valores culturais e religiosos associados a essa importante atração local.

A Gruta do Varzeão destaca-se como a segunda maior caverna do estado do Paraná, e este estudo reforça sua classificação como uma caverna de extrema relevância, conforme avaliado pelo CCPi. Além disso, a Gruta do Varzeão revelou a maior riqueza total de espécies (97) e a maior diversidade de espécies troglóbias (7), o que torna essa cavidade com a maior diversidade de invertebrados do Paraná, considerando tanto organismos troglóbios como não troglóbios, já que anteriormente a gruta da Lancinha ocupava esse posto com 76 espécies registradas (Pinto-Da-Rocha 1995).

As outras 13 cavernas, classificadas como de alta, média e baixa relevância, embora não exijam a mesma urgência em termos de medidas de conservação, ainda dependem dessas ações para a preservação de seus ambientes. Dado que estão localizadas em

regiões próximas, torna-se crucial implementar medidas preventivas abrangentes para todas essas áreas cársticas. Isso inclui a criação de áreas de reserva, a formulação de planos de manejo, a recuperação das áreas circundantes, a realização de atividades de educação ambiental e a restauração ecológica desses ambientes.

7 Considerações Finais

Concluímos que, dentre as 23 cavernas estudadas, 10 delas emergem como de extrema importância para a conservação, demandando a implementação urgente de medidas para mitigar os impactos sobre esses ambientes subterrâneos. Além disso, a diversidade de espécies, tanto troglóbias quanto não troglóbias encontradas nesse estudo, revela o quanto a riqueza biológica das cavernas do Paraná ainda é subestimada.

O conhecimento de que muitas espécies cavernícolas habitam esses ambientes em baixas densidades enfatiza a importância de coletas repetidas para uma compreensão abrangente da identidade faunística dessas cavernas. Essa abordagem refinada é crucial para uma melhor classificação do índice de prioridade de conservação de cada caverna.

Destacamos, especialmente, a eficácia do método do (CCPi) para classificar as cavernas, incorporando métricas abrangentes como o impacto humano e a riqueza biológica. A aplicação ágil desse método oferece uma oportunidade valiosa para priorizar e desenvolver planos de conservação de maneira eficiente, visando a preservação imediata das cavidades mais vulneráveis. Essa abordagem integrada e estratégica revela-se fundamental para garantir a sustentabilidade desses ambientes subterrâneos e a proteção a longo prazo de sua biodiversidade no Paraná.

Agradecimentos

Agradecemos a Mater Natura e Margem Mineração apoio financeiro em atendimento ao Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica TCCE nº 01/2021/ICMBio.Programa de Pós-graduação em Ecologia Aplicada (PPGEco- -UFLA), ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV/ICMBio) e ao Intituto Água e Terra (IAT). Agradecemos ao grupo de estudos espeleológicos do Paraná (GEEP Açungui), em especial à Gisele Sessegolo, Darci Paulo Zakrzewski e Kléber Mise, pelo apoio na localização das cavernas. Agradecemos a Pedro Henrique Mendes, Gabriel Vaz, Felipe Carvajal, Paulo César Reis e Priscila Emanuela pelo auxílio na coleta dos invertebrados e análise dos impactos. Rafael Costa Cardoso pela confecção dos mapas.

Referências

ABDELGHANI, Z et al. Therapeutic applications and biological activities of bacterial bioactive extracts. Archives of Microbiology, v. 203, n. 8, p. 4755-4776, 2021.

ALEXANDER, A. The thermal impact of tourism on a Svalbard glacier cave. **Czech Polar Reports**, v. 11, n. 1, p. 154-160, 2021.

BISWAS, J. Kotumsar Cave biodiversity: a review of cavernicoles and their troglobiotic traits. **Biodiversity and conservation**, v. 19, n. 1, p. 275-289, 2010.

BÖCK, M.C; DA PAZ, O.L.S; DE PAULA, E.V. Visitação desordenada e impactos ambientais em ambiente cavernícola: um estudo sobre o uso público da Gruta da Lancinha–Rio Branco do Sul/PR. **Ateliê Geográfico**, v. 17, n. 1, p. 274-304, 2023.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Decreto n. 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. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 10 nov. 2008. Seção 1, p. 8. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2008/decreto-6640-7-novembro-2008-583389- publicacaooriginal-106227-pe.html. Acesso em: 08/dez/ 2023.

BRASIL. Decreto n. 10.935, de 12 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 jan. 2022. Seção 1 - Extra A, p. 1. Disponível em: www.in.gov.br/web/dou/-/ decreto-n-10.935-de-12-de-janeiro-de-2022-373591582. Acesso em: 08/dez/2023.

BUSH, Mark B. New and Repeating Tipping Points: The Interplay of Fire, Climate Change, and Deforestation in Neotropical Ecosystems1. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 105, n. 3, p. 393-404, 2020.

CALÒ, F; PARISE, M. Evaluating the human disturbance to karst environments in southern Italy. **Acta Carsologica**, v. 35, n. 2-3, 2006.

CHIARINI, V; DUCKECK, J; DE WAELE, J. A global perspective on sustainable show cave tourism. **Geoheritage**, v. 14, n. 3, p. 82, 2022.

CHRISTIANSEN, K. A. Morphological adaptations. In: WHITE, W. B.; CULVER, D. C. (ed.). Encyclopedia of caves. 2nd ed. Amsterdam: **Elsevier; Academic**. p. 517–528, 2012.

CULVER, D. C.; PIPAN et al. Vicariance, dispersal and scale in the aquatic subterranean fauna of karst regions. **Freshwater Biology**, v. 54, n. 4, p. 918-929, 2009.

DONATO, C.R; RIBEIRO, A.S; SOUTO, L.S. A conservation status index, as an auxiliary tool for the management of cave environments. **International Journal of Speleology**, v. 43, n. 3, p. 8, 2014.

DE FRAGA, R et al. Caves as wildlife refuges in degraded landscapes in the Brazilian Amazon. Scientific Reports, v. 13, n. 1, p. 6055, 2023.

DE LIMA, R.A.F et al. The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. **Nature communications**, v. 11, n. 1, p. 6347, 2020.

DINIZ, M.F et al. How 30 years of land-use changes have affected habitat suitability and connectivity for Atlantic Forest species. **Biological Conservation**, v. 274, p. 109737, 2022.

ELLIOTT, W. R. Conservation of the North American cave and karst biota. **Ecosystems of the World**, p. 665-690, 2000.

FERREIRA, R.L; HORTA, L. C. S. Natural and human impacts on invertebrate communities in Brazilian caves. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 61, p. 7-17, 2001.

FERREIRA, R. L. A medida da complexidade ecológica e suas aplicações na conservação e manejo de ecossistemas subterrâneos. **Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte**, 2004.

FERREIRA, R.L et al. Brazilian cave heritage under siege. **Science**, v. 375, n. 6586, p. 1238-1239, 2022.

FERREIRA, R.L; BERBERT-BORN, M; SOUZA-SILVA, M. The Água Clara Cave System in Northeastern Brazil: The Richest Hotspot of Subterranean Biodiversity in South America. **Diversity**, v. 15, n. 6, p. 761, 2023.

GILLIESON, David. Caves: Processes. **Development, Management**, p. 203-36, 1996.

HOWARTH, Francis G. Ecology of cave arthropods. **Annual review of entomology**, v. 28, n. 1, p. 365-389, 1983.

MAMMOLA, S et al. Climate change going deep: The effects of global climatic alterations on cave ecosystems. **The Anthropocene Review**, v. 6, n. 1-2, p. 98-116, 2019.

MEDELLIN, R. A.; WIEDERHOLT, R; LOPEZ-HOFFMAN, L. Conservation relevance of bat caves for biodiversity and ecosystem services. **Biological conservation**, v. 211, p. 45-50, 2017.

MYERS, N et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NITZU, E; NAE, A; POPA, I. The fauna of soil beetles (edaphic Coleoptera) as a sensitive indicator of evolution and conservation of ecosystems. A study on the altitudinal gradient in the Rodnei Mountains Biosphere Reserve (the Carpathians). **Advances in Arachnology and Developmental Biology, Vienna-Belgrade-Sofia Monogr**, v. 12, p. 405-417, 2008.

PASSOS, E. Levantamento de reconhecimento de grutas da região metropolitana de Curitiba. **Curitiba:Comec/Mineropar/UFPR**, p. 24, 1986.

PINTO-DA-ROCHA, R. Invertebrados cavernícolas da porção meridional da Província Espeleológica do Vale do Ribeira, sul do Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 10, p. 229-255, 1993.

PINTO-DA-ROCHA, R. Sinopse da fauna cavernícola do Brasil (1907-1994). **Papéis avulsos de Zoologia**, v. 39, p. 61-173, 1995.

RABELO, L.M; SOUZA-SILVA, M; FERREIRA, R.L. Priority caves for biodiversity conservation in a key karst area of Brazil: comparing the applicability of cave conservation indices. **Biodiversity and conservation**, v. 27, p. 2097-2129, 2018.

REHME, F. C. Gruta da Lancinha: impactos ambientais e uma proposta de unidade de conservação. Curitiba, Monografia (Especialização em Geografia Ambiental) -**Setor de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal do Paraná.** 1993.

REZENDE, C.L et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018.

RIBEIRO, M.C et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

SADOWAY, T et al. Cure from the cave: volcanic cave actinomycetes and their potential in drug discovery. **International Journal of Speleology**, v. 42, n. 1, p. 5, 2013.

SESSEGOLO, G. C.; SILVA DA ROCHA, L. F., LIMA, F. F. Conhecendo Cavernas: Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba,2006.

SIMÕES, M.H; SOUZA-SILVA, M; FERREIRA, R.L. Cave invertebrates in northwestern Minas Gerais state, Brazil: endemism, threats and conservation priorities. **Acta carsologica**, v. 43, n. 1, 2014.

SKET, B. Can we agree on an ecological classification of subterranean animals?. **Journal of Natural History**, v. 42, n. 21-22, p. 1549-1563, 2008.

SOUZA-SILVA, M; MARTINS, R.P; FERREIRA, R.L. Cave lithology determining the structure of the invertebrate communities in the Brazilian Atlantic Rain Forest. **Biodiversity and Conservation**, v. 20, p. 1713-1729, 2011.

SOUZA SILVA, M; MARTINS, R.P FERREIRA, R.L. Cave conservation priority index to adopt a rapid protection strategy: a case study in Brazilian Atlantic rain forest. **Environmental management**, v. 55, p. 279-295, 2015.

VAN BEYNEN, P; TOWNSEND, K. A disturbance index for karst environments. **Environmental Management**, v. 36, p. 101-116, 2005.

VAN BEYNEN, P; BRINKMANN, R et al. A sustain ability index for karst environments. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 74, n. 2, p. 221-234, 2012.

ZADA, Sahib et al. Cave microbes as a potential source of drugs development in the modern era. **Microbial ecology**, p. 1-14, 2021.