UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE BIOLOGIA
DEPARTAMENTO DE BOTÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BOTÂNICA

Para além das cavernas: revelando e ampliando o conhecimento sobre os musgos (Bryophyta) de ecossistemas cavernícolas

Camila de Oliveira Castro
ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO EDUARDO A. S. CÂMARA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Botânica da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Botânica

Brasília-DF

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as escolhas que me trouxeram até aqui e a todos os passos que compuseram o meu caminho ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Mônica Gonçalves de Oliveira , Marco Antônio de Paula Castro, Adilson Jorge Clemente e Claudia Suzana da Costa Andrade que tornaram o tão sonhado mestrado algo possível e por acreditarem em mim em torná-lo possível.

Aos meus amigos da botânica e da vida; Lázaro Henrique Soares de Moraes Conceição, João Victor Vendramini Gomes e Nayara Alves Santos, por me acolherem e se tornarem minha família em Brasília.

Aos meus orientadores Paulo Eduardo Aguiar Saraiva Câmara, Micheline Carvalho Silva e Cássia Beatriz Rodrigues Munhoz por serem minhas inspirações e por muitas vezes enxergarem potencial em mim, potencial esse que muitas vezes duvidei possuir.

Aos professores da Botânica (UnB), ao professor Denilson Fernandes Peralta por todos os conhecimentos compartilhados e por todo auxílio prestado ao longo dessa jornada e às técnicas do herbário UB, especialmente à Val por toda ajuda, paciência e convivência ao longo desses anos.

Agradeço à CAPES por todo apoio financeiro prestado.

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO 6

2-MATERIAIS E MÉTODOS 8

2.1- ÁREA DE ESTUDO 8

2.2- AMOSTRAGEM DE ESPÉCIES E COLETA DE DADOS 9

2.3-ANÁLISE DOS DADOS 11

3- RESULTADOS 11

3.1- COMPOSIÇÃO E DIVERSIDADE DE ESPÉCIES DE MUSGOS 11

3.2 – FATORES FÍSICO-QUÍMICOS DO SOLO 12

4-DISCUSSÃO 13

5- CONCLUSÃO 16

6-BIBLIOGRAFIA 19

7-TABELAS E FIGURAS 27

Resumo

Os musgos (Bryophyta) ocupam uma ampla variedade de habitats, dominando diversos ecossistemas, incluindo os ambientes cavernícolas. No entanto, o conhecimento acerca da brioflora em cavernas de litologia ferrífera no Brasil, ainda permanecem negligenciados, carecendo de informações sobre a distribuição do grupo nas cavidades e em seu entorno. Objetivamos I) investigar quais espécies de musgos (Bryophyta) ocorrem em seis cavidades ferríferas nas localidades do Parque Nacional da Serra do Gandarela (PARNA-SG) e Chapada de Canga no Quadrilátero Ferrífero (QFe), II) Verificar se há um compartilhamento de espécies entre as cavernas analisadas III) Verificar se as cavernas apresentam diferenças quanto a riqueza e diversidade de espécies de musgos IV) Examinar os padrões de similaridade e diferenciação na distribuição das espécies em diferentes substratos nas seis cavidades V) Investigar se há diferenças nos fatores físico-químicos do solo das cavidades que possam influenciar a dinâmica das espécies de musgos associadas a essas áreas. Os conjuntos de cavernas analisadas para as regiões PARNA-SG e Chapada de Canga se diferenciam quanto a diversidade, riqueza e composição de espécies e em relação a distribuição das mesmas quanto aos diferentes substratos disponíveis em cada área, bem como as características físico-químicas do solo, onde o conjunto PARNA-SG apresentou maior riqueza e diversidade de espécies do que o conjunto da Chapada de Canga. O total de espécies encontradas representa 7% do total de espécies existentes no país, incluindo registros novos para Minas Gerais. Quando comparadas entre si, as cavernas de cada região apresentaram um agrupamento semelhante para os índices de riqueza (q=0) e diversidade (q=1 e q=2), onde as cavernas de seus respectivos locais permaneceram próximas, com a caverna G6 apresentando maior riqueza de espécies e juntamente com a G5 apresentou maior diversidade em relação às demais. As cavernas com menores índices de diversidade e riqueza pertencem ao conjunto da Chapada de Canga, área que sofre grandes impactos ambientais.

Palavras-chave: Quadrilátero Ferrífero, cavernas, briófitas, Musgos, Minas Gerais.

Abstract

Mosses (Bryophyta) occupy a wide variety of habitats, dominating different ecosystems, including cave environments. However, knowledge about bryoflora in iron lithology caves in Brazil still remains neglected, lacking information about the distribution of the group in the caves and their surroundings. We aim to: I) investigate which species of mosses (Bryophyta) occur in six iron cavities in the Serra do Gandarela National Park (PARNA-SG) and Chapada de Canga in QFe, II) Verify whether there is a sharing of species between the analyzed caves III) Check whether the caves present differences in terms of richness and diversity of mosses species IV) Examine the patterns of similarity and differentiation in the distribution of species on different substrates in the six caves V) Investigate whether there are differences in the physical-chemical factors of the soil in the cavities that may influence the dynamics of the moss species associated with these areas.The total species found represents 6.9% of the total species existing in the country, including new records for Minas Gerais. The sets of caves analyzed for the PARNA-SG and Chapada de Canga regions differ in terms of diversity, richness and composition of species and in relation to their distribution in terms of the different substrates available in each area, as well as the physicochemical characteristics of the soil, where the PARNA-SG group presented greater species richness and diversity than the Chapada de Canga group. When compared to each other, the caves in each region presented a similar grouping for the richness (q=0) and diversity (q=1 and q=2) indices, where the caves in their respective locations remained close, with cave G6 presenting greater species richness and together with G5 presented greater diversity compared to the others. The caves with the lowest levels of diversity and richness belong to the Chapada de Canga group, an area that suffers major environmental impacts.

Keywords: Iron Quadrangle, caves, bryophytes, Mosses, Minas Gerais.

1 - INTRODUÇÃO

Cavernas são cavidades naturais subterrâneas caracterizadas por luminosidade limitada e condições climáticas (umidade e temperatura) mais estáveis em relação ao meio externo (Medina et al. 2023).Os processos geológicos que formam essas cavidades em diferentes litologias resultam de interações químicas e biológicas, tornando esses ambientes hotspots de biodiversidade (Moore, 1964; Cedrés-Perdomo et al. 2024; White & Culver, 2019).

No Brasil, são documentadas mais de 23.000 cavernas, sendo que 13% são de rochas ferríferas. A maior parte das cavernas de rochas ferríferas estão inseridas em geossistemas ferruginosos formados por rochas de itabirito e cangas, que são fissuras endurecidas que recobrem as encostas montanhosas de solos ácidos e pobres. No país, as principais áreas com grandes formações ferríferas são a Serra dos Carajás, no Pará, e o Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais (Piló et al. 2015; Schaefer et al. 2015), sendo esse o estado com maior número de cavernas registradas no país (11,029 cavernas).

Quadrilátero Ferrífero (QFe), localiza-se ao centro-sul de Minas Gerais e é classificado como uma área prioritária de grande importância para a conservação biológica (MMA, 2018). A área apresenta transição entre Cerrado e Mata Atlântica, com tipos vegetacionais campestres até florestais (Schaefer et al. 2015). A região apresenta elevada riqueza e endemicidade, tanto de plantas com flores (Jacobi and Carmo, 2008; Jacobi et al., 2007) quanto para briófitas (Peñaloza-Bojacá et al. 2018). Os domínios fitogeográficos do Cerrado e da Mata Atlântica são os maiores detentores de cavernas no país, com 10.891 cavidades e 4.711, respectivamente (ICMBio, 2023).

As cavernas são reconhecidas com zonas ecotonais , pois possuem zonas limítrofes à entrada da caverna que transitam entre o ambientes epígeo e hipógeo, apresentando elementos tanto do ambiente adjacente quanto exclusivos do ambiente cavernícola (Moseley 2010). Esta condição possibilita a ocorrência de organismos fotossintéticos altamente adaptados e tolerantes à essa variabilidade do meio (Souza-Silva et al. 2021; Prous et al. 2004; Jacobi et al. 2015), além de propiciar relações ecológicas entre as espécies podendo originar composições ricas e singulares dentre as comunidades vegetais.

Os musgos (Bryophyta) ocupam ampla variedade de habitats e dominam diversos ecossistemas, incluindo desde os mais extremos como os ambientes Antárticos que possuem altas temperaturas e gradientes luminosos (Câmara et al. 2020). Em cavernas, os musgos se

destacam por serem predominantes dentre as composições brioflorísticas, sendo mais tolerantes a alta umidade e baixa luminosidade desses ambientes do que às hepáticas por exemplo (Cong et al. 2023; Mulec & Kubešova 2010; Thai & Horng 2023).

A diversidade de briófitas, associadas à diversidade de plantas vasculares, podem ser indicadoras do estado de conservação de cavernas (Ren et al., 2021). Por exemplo, o declínio da comunidade de plantas lenhosas em áreas com perturbações antrópicas pode levar a perda de habitat e influenciar na distribuição de briófitas epífitas (Alvarenga et al., 2010) . As cavernas também são refúgios de espécies de distribuição restrita para algumas briófitas, onde variáveis bióticas e microclimáticas determinam a riqueza, abundância e composição de espécies do grupo (Cedrés-Perdomo et al., 2024). A diversidade e distribuição das briófitas em ambiente cavernícola vem sendo avaliada em diversas regiões com cavernas cársticas e vulcânicas na Europa (Mulec & Kubešova 2010; Puglisi et al. 2019; Puglisi & Sciandrello 2023), Malásia (Thai & Horng 2023) e China (Li et al. 2020; Ren et al. 2021). No entanto, o conhecimento acerca da brioflora em cavernas de litologia ferrífera e estudos que compreendem as características desse ambiente e de seu entorno, especialmente no Brasil, ainda são negligenciados.

A legislação brasileira determina que caverna é toda cavidade natural subterrânea penetrável pelo homem, incluindo seu entorno, conteúdo mineral, hídrico, fauna e flora ali encontrados, considerando tanto a cavidade quanto o conjunto de seus elementos bióticos, abióticos, socioeconômicos e histórico-culturais como um patrimônio espeleológico brasileiro (IBAMA, 1990) artigo 10º da Portaria 887 editada em 1990. Apesar de serem sistemas naturais protegidos, apenas 33,15% das cavernas registradas estão abrigadas em alguma Unidade de Conservação de uso sustentável ou de proteção integral (ICMBio, 2023). Enquanto isso, as paisagens ferríferas sofrem com os impactos da mineração, exploração de recursos hídricos, agricultura, urbanização e desmatamento que já comprometeram cerca de 50% da extensão da Canga do QFe (Auler et al. 2022; Levett et al. 2016; Spier et al. 2006). Segundo Gomes et al. (2019), a expansão da mineração entre os anos de 1984 até 2015 impactou negativamente áreas de proteção de 36 cavidades do QFe. Nesta áreas altamente antropizadas, especificamente de cavernas no estado de Minas Gerais, a documentação da

flora de briófitas registra apenas uma coleta para o ano de 1967 (*SpeciesLink* 2024 https://specieslink.net, Flora e Funga do Brasil 2024 http://floradobrasil.jbrj.gov.br, Jabot 2024 http://rb.jbrj.gov.br), ressaltando a ausência de estudos específicos sobre esse grupo na região.

Tendo em vista a lacuna de conhecimento sobre a brioflora cavernícola, especialmente de litologia ferruginosa, e o destaque do grupo Bryophyta nesses ambientes, esse estudo tem como objetivo: I) Identificar quais espécies de musgos (Bryophyta) ocorrem em seis cavernas ferríferas, sendo três no PARNA-SG e três na Chapada de Canga (QFe), II) Verificar se há um compartilhamento de espécies entre as cavernas analisadas III) Verificar se as cavernas apresentam diferenças quanto a riqueza e diversidade de espécies de musgos IV) Examinar os padrões de similaridade e diferenciação na distribuição das espécies em diferentes substratos nas seis cavidades V) Investigar se há diferenças nos fatores físico-químicos do solo das cavidades que possam influenciar a dinâmica das espécies de musgos associadas a essas áreas.

2-MATERIAl E MÉTODOS

2.1 - ÁREA DE ESTUDO

As quatro serras de solos ferruginosos que configuram a forma de um "quadrilátero" em Minas Gerais constituem o Quadrilátero Ferrífero (QFe) (Piló et al. 2015). A região abriga muitos complexos cavernícolas com características pedológicas do tipo neossolo, latossolo e cambissolos (Schaefer et al. 2015). O clima da região é úmido subtropical com estação seca de abril a setembro e chuvosa de outubro a março de clima úmido subtropical (Alvares et al. 2013). Quanto à vegetação, a mesma apresenta tipos diversos por ser uma região composições diversas por ser uma região de ecótono entre Mata Atlântica e Cerrado, com formações de capões e afloramentos rochosos associados a entradas de cavidades ferríferas, que são cavidades menores quando comparadas às de outros tipos de litologias (Jacobi et al. 2007).

No centro do QFe em Minas Gerais, localiza-se o Parque Nacional da Serra do Gandarela (PARNA-SG), área de grande importância por abrigar parte da biodiversidade

restante da canga e por abastecer o aquífero do QFe (ICMBio, 2024). Localizado a mais de 1660 m de elevação, o PARNA-SG abrange parte dos municípios de Rio Acima, Caeté , Itabirito , Mariana , Nova Lima, Ouro Preto , Raposos e Santa Bárbara e ocupa uma área de 312,7 km^2 (MMA, 2014). Chapada de Canga é uma região ao leste do QFe, no município de Mariana a cerca de 800 m de altitude.

Apesar da integridade das cavidades serem resguardadas pela legislação brasileira, o conjunto de cavernas dessa região e suas áreas ao entorno estão mais expostas e suscetíveis aos impactos da mineração e aos demais danos de origem antrópica por não se inserirem em unidade de conservação que atue na fiscalização, manutenção e manejo da fauna e flora ali presentes.

As cavernas estão registradas na base de dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) (ICMBio, 2024). Três cavernas estão situadas na Chapada de Canga no município de Mariana (CCB30, CCB49_50, CCA54) e estão representadas neste trabalho por C1, C2 e C3, respectivamente. Apesar da caverna CCB49_50 apresentar duas aberturas vinculadas e ser registrada como duas cavernas separadamente (49 e 50), aqui as consideramos como uma única caverna devido às suas aberturas serem pequenas e muito próximas. As outras três cavernas amostradas no PARNA-SG no município de Rio Acima são registradas como SG-16, SG-51 e GAND-0006, e estão representadas respectivamente por G4, G5 e G6 (Fig.1). As informações sobre a espeleometria de cada uma delas estão na tabela 1 . A distância mínima entre as cavidades em cada área variou de 270 m a 2,66 km.

A área da abertura das cavidades e ao seu redor é ocupada por formações florestais de capão de mata enquanto a vegetação sob influência da área das cavernas é composta por cerrado rupestre e campo rupestre ferruginoso, com exceção a C1 (CCB30) que apresentou uma floresta mais aberta e mais impactada com presença de espécies introduzidas como *Eucalyptus* spp.

2.2 - AMOSTRAGEM DE ESPÉCIES E COLETA DE DADOS

O ambiente cavernícola é definido em três grandes zonas limitadas de acordo com a intensidade luminosa e de suas condições ambientais (Travassos, 2015; Tobin et al. 2013). A zona que se estende desde a entrada da cavidade até às proximidades da entrada da mesma no

ambiente externo, cuja iluminação é mais intensa para sustentar fitofisionomias e condições climáticas variáveis, é denominada como zona eufótica. A zona crepuscular (ou disfótica) se estende desde a entrada da cavidade até o onde se inicia a zona escura (interior da cavidade), com iluminação menos intensa e condições climáticas que transitam entre a zona profunda, onde há ausência total de iluminação natural (zona afótica) e zona eufótica. A zona afótica apresenta características climáticas estáveis e ausência de iluminação natural (Fig.2).

As coletas foram sistematizadas em pontos a cada cinco metros dentro de uma parcela de 10 x 10 m devido ao tamanho reduzido da abertura das cavidades. Cada parcela foi disposta no entorno da área de abertura da cavidade, englobando zona eufótica (considerando somente a área da parcela externa a entrada da cavidade) e disfótica do ambiente (considerando a área de entrada da cavidade até seu interior que ainda recebe iluminação natural e que antecede a zona afótica). Em cada ponto, no raio de 1 m as espécies de musgos foram amostradas sobre os diferentes substratos: rocha, tronco vivo, tronco morto e solo, totalizando dez pontos como unidades amostrais em cada caverna, sendo nove na zona eufótica, e um ponto para todas as amostras coletadas na abertura da cavidade e em seu interior (zona disfótica). A coleta e armazenamento dos espécimes seguiu o proposto por Frahm (2003). Foram realizadas duas expedições, a primeira em estação seca no mês de agosto do ano de 2022, e uma no auge da estação chuvosa no mês de março do ano de 2023

As amostras foram depositadas no herbário UB (Thiers, 2025), da Universidade de Brasília e as espécies foram identificadas utilizando a Flora e Funga do Brasil (2024) e bibliografias especializadas disponíveis. O registro de ocorrência das espécies para o estado de Minas Gerais foi checado na plataforma Flora e Funga do Brasil (2024).

Amostras de solo foram coletadas nas zonas eufótica e disfótica a uma profundidade de 0–20 cm. O percentual de matéria orgânica foi determinado pelo método de Walkley-Black (% de C orgânico × 1,724). O pH do solo foi medido em solução de $CaCl_2$ 0,01 mol L^{-1} (pH $CaCl_2$). Os cátions Al^{3+}, Ca^{2+} e Mg^{2+} foram extraídos com solução de KCl 1 mol L^{-1}. O fósforo e o K^+ foram extraídos com solução de Mehlich-1 (0,0125 mol L^{-1} H_2SO_4 + 0,05 mol L^{-1} HCl). As análises químicas e físicas do solo foram realizadas no Laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal de Lavras.

2.3-ANÁLISE DOS DADOS

A riqueza e diversidade das espécies de musgos coletados na estação seca e chuvosa foram estimadas utilizando as curvas de rarefação e extrapolação dos números de Hill (Chao & Chiu, 2016) com os dados de incidência de espécies nas dez unidades amostrais para cada uma das cavernas. A análise foi feita no pacote “iNEXT” (Hsieh
et al. 2016). Os índices de similaridade entre as seis comunidades representadas por cada caverna foram avaliados por meio do índice de similaridade múltipla de Chao-Jaccard and Chao-Sørensen (Chao et al. 2005; Chao et al. 2006), utilizando o pacote “SpadeR” (Chao et al. 2016) através de uma matriz de frequência absoluta das espécies ocorrentes em cada caverna.

Para examinar os padrões de similaridade e diferenciação na distribuição das espécies nas seis comunidades em diferentes substratos foi empregada a análise Non-Metric Multidimensional Scaling (NMDS), com dados de frequência das espécies para cada tipo de substrato (Corticícola, epixicola, rupícola e terrícola ocorrente em cada uma das cavernas, utilizando a metodologia proposta por Kruskal (1964), por meio da linguagem R (versão 4.2.3) do pacote "Vegan" (Oksanen et al. 2022).

Para identificar padrões de variação das características edáficas entre os locais amostrados., utilizamos a análise de componentes principais (PCA) utilizando a linguagem R e com os pacotes “factoextra" (Kassambara & Mundt, 2020) e “devtools” (Wickham & Bryan 2023). Todas as análises foram realizadas no R (versão 4.2.3; R Core Team 2023).

3 - RESULTADOS

3.1 - COMPOSIÇÃO E DIVERSIDADE DE ESPÉCIES DE MUSGOS

Das 286 amostras analisadas, foram encontradas 19 famílias , 34 gêneros e 62 espécies de musgos, onde 10 delas são endêmicas do Brasil (Tab.2) e 7 são consideradas novas ocorrências para o estado de Minas Gerais; *Philonotis elongata* (Dumort.) H.A.Crum & Steere, *Aerolindigia capillacea* (Hornsch.) M. Menzel, *Syrrhopodon africanus* (Mitt.) Paris, *Leucoloma triforme* (Mitt.) A.Jaeger, *Campylopus flexuosus* (Hedw.) Brid., *Groutiella chimborazensis* (Spruce ex Mitt.) Florsch e *Jirivanaea galipensis* (Müll. Hal.) U.B. Deshmukh & Rathor.

Leucobryaceae, Sematophyllaceae e Calymperaceae foram as famílias mais frequentes (maior número de registros por caverna), respectivamente. Já as espécies com maior frequência nas amostras das seis comunidades foram respectivamente: *Syrrhopodon prolifer* Schwägr, *Brittonodoxa subpinnata* (Brid.) W.R. Buck, P.E.A.S.Câmara & Carv.-Silva, *Campylopus arctocarpus* (Hornsch.) Mitt., *Leucobryum albicans* (Schwägr.) Lindb. e *Campylopus savannarum* (Müll.Hal.) Mitt., sendo que *S. prolifer* e *B. subpinnata* foram registradas para as seis cavernas.

Do total de espécies encontradas, 53,2% ocorreram exclusivamente no PARNA-SG e 17,8% na Chapada de Canga, sendo que 29% das espécies são compartilhadas por ambas regiões (Fig. 3). Quanto ao número de espécies ocorrentes nas zonas eufótica e disfótica, ambas regiões apresentaram maior número de espécies para a zona eufótica em detrimento da disfótica e as duas localidades apresentaram espécies que ocorreram em ambas zonas (Fig. 4).

O conjunto de cavernas do PARNA-SG destaca-se por apresentar maiores índices de diversidade e riqueza comparado ao conjunto da Chapada de Canga (Fig. 5). Em relação às cavernas as mesmas apresentam um padrão de agrupamento semelhante, onde as cavernas de cada região permaneceram próximas para cada índice apresentado.

A similaridade entre as cavernas das duas áreas analisadas na estação seca e chuvosa apresentaram valor de 0,79 para o índice de Chao-Sørensen. As cavernas do conjunto Canga são similares entre si e o mesmo ocorre para as cavernas do PARNA-SG, no entanto a caverna C1 apresentou alta similaridade com a caverna G5 da chapada de Canga (Tab. 3).

A NMDS também demonstrou que os dois conjuntos de cavernas se diferem quanto à composição de espécies (Fig.6), onde as cavernas de cada região se agrupam quanto aos substratos (solo, tronco vivo, tronco morto e rocha).

3.2 – FATORES FÍSICO-QUÍMICOS DO SOLO

Os solos das cavidades (incluindo zona eufótica e disfótica) de ambas áreas estudadas apresentaram de forma geral, característica ácida, com pH por volta de 4.0 e texturas intermediárias, variando entre solo argiloso e arenoso e com maiores quantidades de matéria orgânica nas zonas eufóticas (Tab. 4). O gráfico da PCA (Fig. 7) apresentado pelos eixos Dim1 e Dim2, explicam 67,2% da variação total dos dados, demonstrando visivelmente a diferenciação nas características físico-químicas dos solos entre as cavernas analisadas, principalmente em relação às áreas amostras (PARNA-SG e Canga). Já o eixo Dim2, que explica 15,5% da variação, parece capturar as diferenças mais sutis entre as zonas disfótica e eufótica dentro de cada caverna, principalmente em relação às variáveis H2O, Argila, e Silte. As contribuições de cada um dos fatores físico-químicos do solo dos eixos da PCA estão na tabela 5.

4-DISCUSSÃO

As cavernas analisadas na região do PARNA-SG apresentaram maior riqueza de espécies de musgos e considerando as duas áreas estudadas registramos 7% das espécies de musgos ocorrentes no Brasil, algumas delas endêmicas; *Daltonia splachnoides* (Sm.) Hook. & Taylor, *Lepidopilidium nitens* (Hornsch.) Broth., *Leucoloma triforme* (Mitt.) A.Jaeger, *Schlotheimia merkelii* Hornsch., *Microcalpe subsimplex* (Hedw.) W.R. Buck, *Aptychopsis subpungifolia* (Broth.) Broth., *Campylopus thwaitesii* (Mitt.) A. Jaeger, *Campylopus gastroalaris* (Müll. Hal.) Paris, *Campylopus julicaulis* Broth e *Sphagnum aequalipunctatum* H.A.Crum (Flora e Funga do Brasil, 2024; Gonçalves et al. 2024).

O número de espécies compartilhadas entre as cavernas foi baixo (29%), com poucas espécies compartilhadas entre elas nas duas estações climáticas sendo elas: *Brittonodoxa subpinnata* (Brid.) W.R. Buck, P.E.A.S.Câmara & Carv.-Silva, *Isopterygium tenerifolium* Mitt., *Vitalia galipensis* (Müll. Hal.) P.E.A.S.Câmara, Carv.-Silva & W.R. Buck, *Microcalpe subsimplex* (Hedw.) W.R. Buck, *Syrrhopodon prolifer* Schwägr. e *Sematophyllum beyrichii* (Hornsch.) Broth.

Leucobryaceae foi a família mais representativa com 15 espécies, sendo que registramos *Campylopus flexuosus* (Hedw.) Brid., cuja distribuição é exclusiva para Mata Atlântica e até então era registrada para florestas no litoral nordeste e sudeste do Brasil (Gonçalves et al. 2024). Essa espécie ocorreu apenas para uma caverna da Chapada de Canga (C1) e para as três do PARNA-SG (G4, G5 e G6) para todos os substratos (corticícola,

epíxila, rupícola e terrícola). O Brasil é Considerado o segundo centro de diversidade neotropical deste gênero (Frahm, 1991), das 9 espécies endêmicas do país, três destas foram registradas para as cavernas analisadas.

Farias et al. (2017) considera a espécie *Syrrhopodon africanus* (Mitt.) Paris (=*S. graminicola* Williams; (Reese, 1995), aqui apresentada também como uma nova ocorrência para o estado, uma espécie rara, além de seu trabalho abordar a influência de fatores ambientais como altitude e temperatura na distribuição de espécies da família Calymperaceae, como por exemplo *S.prolifer*, sendo essa espécie uma das mais frequentes encontradas nas cavernas analisadas. *Syrrhopodon africanus* foi encontrada nas cavernas de ambas as regiões de Rio Acima e Mariana (PARNA-SG e Chapada de Canga), com exceção da caverna G6. Até então mesma apresentava ocorrência confirmada apenas para as regiões Norte (Amazonas), Nordeste (Pernambuco) e Sudeste (Espírito Santo, São Paulo), nos domínios fitogeográficos da Amazônia e Mata Atlântica em floresta ciliar ou Galeria, floresta estacional semidecidual e ombrófila (Flora e Funga do Brasil, 2024).

Jirivanaea galipensis (Müll. Hal.) U.B. Deshmukh & Rathor. também foi encontrada nas seis cavernas analisadas e a ocorrência confirmada desta espécie incluía o norte (Pará, Rondônia, Roraima), nordeste (Bahia e Pernambuco), centro-oeste (Goiás e Mato Grosso), sudeste (Espírito Santo, Rio de Janeiro e São Paulo) e sul (Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina), nos domínios Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica.

Philonotis elongata (Dumort.) H.A.Crum & Steere tinha sua distribuição confirmada para a região sudeste no Brasil, no entanto somente para Rio de Janeiro e São Paulo e não para o estado de Minas Gerais, além das regiões Norte (Amazonas), Nordeste (Bahia, Ceará, Paraíba), Centro-Oeste (Mato Grosso) e Sul (Paraná), para os domínios Mata Atlântica, Amazônia e Cerrado em Mata de Galeria, Floresta Ombrófila (Flora e Funga do Brasil, 2024). A espécie foi encontrada apenas em duas das seis cavernas estudadas (C1 e C2) na Chapada de Canga.

Aerolindigia capillacea (Hornsch.) M. Menzel possuía uma distribuição restrita às regiões Sudeste (Rio de Janeiro e São Paulo) e Sul (Rio Grande do Sul e Santa Catarina), e até então não havia sido registrada para o estado de Minas Gerais, a mesma é restrita à Mata Atlântica, sendo encontrada em floresta ombrófila mista (Flora e Funga do Brasil, 2024). A espécie foi registrada apenas em uma caverna das cavernas analisadas, a G6 no PARNA-SG.

Leucoloma triforme (Mitt.) A.Jaeger também apresentada aqui como ocorrência nova para Minas Gerais tinha ocorrência confirmada para o Sudeste (São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo) e para o Sul (Paraná) do país, em Floresta Ombrófila Densa no domínio Mata Atlântica e é considerada uma espécie endêmica do Brasil (Flora e Funga do Brasil, 2024), sendo encontrada apenas em duas cavernas do PARNA-SG (G5 e G6). *Groutiella chimborasensis* também teve sua ocorrência registrada para PARNA-SG, no entanto, apenas para a caverna G5. Sua ocorrência é confirmada para o Pará no norte do país e Nordeste na Bahia e Pernambuco em Floresta Amazônica (Flora e Funga do Brasil, 2024).

Em relação a riqueza (q=0) de cada uma das cavernas, a G6 se destacou em relação às demais, o que é esperado pois esse índice é mais sensível ao número de espécies e essa caverna foi a que apresentou maior número de espécies registradas, enquanto C1 foi a caverna com menor riqueza de espécies, mesmo com o aumento no número de amostras. Quanto aos índices de diversidade de Shannon (q=1) e Simpson (q=2), a caverna G6 também exibiu maior diversidade, seguida da G5, C2 e C1 foram as cavernas que apresentaram menor diversidade. Também é possível notar que as cavernas apresentaram um agrupamento semelhante para os índices de riqueza (q=0) e diversidade (q=1 e q=2), onde as cavernas de seus respectivos locais permaneceram próximas. Menores índices observados para a caverna C1 pode estar atrelado ao fato da área vegetacional dessa caverna ter se apresentado mais impactada em relação às demais, com espécies introduzidas.

A similaridade das composições de espécies de musgos em diferentes substratos (NMDS), demonstrou que há uma separação dos grupos das duas áreas em decorrência dos substratos e uma semelhança entre as cavernas de cada região, resultado também apresentado pela similaridade do índice de Chao-Sørensen. Além disso, o conjunto do PARNA-SG aparenta ter maior variabilidade de espécies em comparação a Chapada de Canga.

Kozlova et al. (2019) afirma por meio de seus resultados obtidos em uma região cárstica na europa que a proximidade espacial das cavernas não indica uma similaridade nos componentes das comunidade de briófitas, algas e cianobactérias, e sim a semelhança morfológica das zonas de entrada das cavidades.

Em relação às cavidades ferríferas aqui estudadas, a proximidade entre elas de fato não parece ser uma influência sobre a composição e similaridade da comunidade de musgos encontrados, já que algumas cavernas como a C1 da Chapada de Canga se mostrou mais

similar a G5 do PARNA-SG (Tab. 3), do que às cavernas C2 e C3 que são mais próxima geograficamente.

No entanto, morfologia das zonas de entrada dos dois conjuntos de cavidades se diferem em seus componentes relacionados à espeleometria (Tab. 1), e não parecem explicar a similaridade das composições de espécies de musgos.

Embora a zona eufótica tenha apresentado maior número de espécies em ambas as áreas estudadas, o conjunto de cavernas da Chapada de Canga, especialmente a C2, registrou um maior número de espécies na zona disfótica em comparação com o conjunto PARNA-SG. Esse fato pode estar relacionado à influência da morfologia (espeleometria) das cavidades e do relevo no qual estão inseridas, afetando atributos abióticos (umidade, temperatura, luminosidade e solo) e bióticos como cobertura arbórea, o que favorece o estabelecimento das espécies na zona disfótica, podendo indicar que para as cavidades ferríferas aqui analisadas, a morfologia das zonas de entrada não explica a similaridade das comunidades mas pode explicar a distribuição das espécies de musgos nas zonas cavernícolas.

Levando em consideração os resultados apresentados na NMDS, índice de Chao-Sørensen em adição a maior diversidade e riqueza do conjunto PARNA-SG e ao padrão de agrupamento das cavernas de seus respectivos locais para os números de Hill, o principal fator que parecem influenciar na maior ou menor similaridade entre as cavernas bem como na diversidade e riqueza de espécies, é grau de conservação de cada mesma já que por estar inserido em uma Unidade de Conservação o conjunto PARNA-SG sofre menor influência dos impactos antrópicos sobre a composição, diversidade e riqueza de musgos.

A PCA das características físico-química do solo também demonstrou seguir o mesmo padrão de diversidade e similaridade encontrados para as espécies, onde a combinação dos dois eixos permite visualizar tanto as diferenças regionais amplas (conjunto de cavernas do PARNA-SG e conjunto da Chapada de Canga), quanto as as variações locais no solo em relação às duas zonas onde as espécies são encontradas o que também pode explicar a diferença da distribuição das espécies nas zonas eufótica e disfótica terem se apresentando tão diferentes nas duas áreas.

5 -CONCLUSÃO

Os musgos encontrados neste estudo correspondem a 7% do total de espécies ocorrentes no Brasil, incluindo 5% das espécies endêmicas do país, evidenciando a relevância dessas

cavernas para a conservação da biodiversidade. Além disso, sete espécies foram registradas pela primeira vez no estado de Minas Gerais, contribuindo significativamente para a Flora e Funga do Brasil. A análise das cavernas das regiões do PARNA-SG e da Chapada de Canga revelou que há um baixo percentual de espécies compartilhadas entre ambas, com apenas seis espécies presentes em todas as cavidades, o que reforça a singularidade florística dessas áreas.

Os resultados também indicaram que as cavernas do PARNA-SG apresentaram maior riqueza e diversidade de espécies do que as da Chapada de Canga, sugerindo uma influência das condições ambientais e do nível de proteção da área. Dentro de cada região, as cavernas formam agrupamentos distintos para os índices de riqueza (q=0) e diversidade (q=1 e q=2), destacando-se a caverna G6 com a maior riqueza de espécies, seguida pela G5, que também apresentou elevada diversidade. Em contraste, as cavernas C1 e C2, situadas na Chapada de Canga registraram os menores índices de diversidade e riqueza, o que pode estar associado aos impactos ambientais

A composição de espécies difere conforme os substratos disponíveis em cada área, mas cavernas dentro de uma mesma região apresentaram padrões de similaridade. Diferenças físico-químicas do solo entre o PARNA-SG e a Chapada de Canga podem estar associadas à variação regional na composição de musgos, enquanto fatores locais específicos também parecem influenciar a distribuição das espécies nas zonas cavernícolas.

Além disso, cavernas podem atuar como refúgios para algumas espécies de musgos como *Aerolindigia capillacea* e *Groutiella chimborazensis*, que foram registradas apenas em uma das cavernas analisadas, e para musgos de distribuição restrita .

Os padrões observados indicam que a inserção das cavernas do PARNA-SG em uma Unidade de Conservação pode estar contribuindo para a preservação de sua diversidade florística, diferentemente das cavernas da Chapada de Canga, que sofrem maiores impactos antrópicos. A presença de Philonotis elongata exclusivamente nas cavernas com baixos índices de diversidade e riqueza (C1 e C2) sugere que espécies específicas podem ser mais vulneráveis a distúrbios ambientais.

Os musgos se mostram importantes bioindicadores de condições ambientais em ecossistemas cavernícolas, e os dados deste estudo podem contribuir para a compreensão da

biodiversidade subterrânea, bem como para estratégias de conservação e manejo das cavernas ferríferas brasileiras, considerando a singularidade de cada habitat.

6-BIBLIOGRAFIA

Alvarenga, L.D.P., Pôrto, K.C., & De Oliveira, J.R. do P.M. (2010). Habitat loss effects on spatial distribution of non-vascular epiphytes in a Brazilian Atlantic forest. *Biodiversity and Conservation* 19: 619–635.

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalvez, J.L.D.M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift Vol. 22 No. 6 (2013), p. 711 - 728. https://doi.or/10.1127/0941-2948/2013/0507

Araújo, R.W.D. (2021). GEOENVIRONMENTAL MODELING OF THE SERRA DO GANDARELA NATIONAL PARK (MG): SOIL, RELIEF AND VEGETATION INTERACTIONS (MODELAGEM GEOAMBIENTAL DO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA (MG): INTERAÇÕES SOLO, RELEVO E VEGETAÇÃO). Available at https://locus.ufv.br//handle/123456789/29496 [Accessed 20 October 2023].

Auler, A.S., Barton, H.A., Zambelli, B., Senko, J., Parker, C.W., Sasowsky, I.D., Souza, T.A.R., Pujoni, D., Peñaranda, J., & Davis, R. (2022). Silica and iron mobilization, cave development and landscape evolution in iron formations in Brazil. *Geomorphology* 398: 108068. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108068

Câmara, P.E.A.S., Valente, D.V., & Sancho, L.G. (2020). Changes in the moss (Bryophyta) flora in the vicinity of the Spanish Juan Carlos I Station (Livingston island, Antarctica) over three decades. *Polar Biology* 43: 1745–1752. https://doi.org/10.1007/s00300-020-02740-0

Carmo, F.F. do, & Kamino, L.H.Y. (2017). Chapada de Canga: a introduction (Chapada de Canga: uma introdução) in *Chapada de canga: natural and cultural heritage of relevant interest for conservation (Chapada de canga: patrimônio natural e cultural de relevante interesse para a conservação)*. 3i Editora Ltda.Belo Horizonte, MG. pp. 11-24.

Carste ciência ambiental, 2007. Mapa topográfico das cavernas SG-16.

Carste ciência ambiental, 2007. Mapa topográfico das cavernas SG-51.

Carste ciência ambiental, 2013. Mapa topográfico das cavernas GAND-006.

Cedrés-Perdomo, R.D., Polaíno-Martín, C., & Gabriel, R. (2024) Seeking a Hideout: Caves as Refuges for Various Functional Groups of Bryophytes from Terceira Island (Azores, Portugal). *Diversity* 58: 3–24. https://doi.org/ 10.3390/d16010058

Chao, A., Chazdon, R.L., Colwell, R.K., & Shen, T. (2005). A new statistical approach for assessing similarity of species composition with incidence and abundance data. *Ecology Letters* 8: 148–159.

Chao, A., Chazdon, R.L., Colwell, R.K., & Shen, T. (2006). Abundance‐Based Similarity Indices and Their Estimation When There Are Unseen Species in Samples. *Biometrics* 62: 361–371.

Chao, A., & Chiu, C. (2016). Species Richness: Estimation and Comparison. In: Balakrishnan, N., Colton, T., Everitt, B., Piegorsch, W., Ruggeri, F., & Teugels, J.L. (eds.). *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. pp. 1–26. Wiley.

Chao, A., K. H. Ma, T. C. Hsieh, & Chun-Huo Chiu. (2016). User's Guide for Online Program SpadeR (Species-richness Prediction And Diversity Estimation in R) National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, v. 88. doi: 10.13140/RG.2.2.20744.62722

Cong, M., Zhu, T., Li, Y., Yang, W., & Wei, Y. (2023). Ancient Ecological Disaster Site Is Now a Refuge: Bryophyte Diversity in Volcanic Lava Caves of Jingpo Lake World Geopark. *Diversity* 15: 842.

Costa, D.P., & Peralta, D.F. (2015). Bryophytes diversity in Brazil. *Rodriguésia*, 66(4), 1063–1071. https://doi.or/10.1590/2175-7860201566409

Costa, D.P. da, Porto, K.C., Luizi-Ponzo, A.F., Peralta, D.F., Passos, C.J.B., Câmara, P.E.A.S., Ikiu-Borges, A.L., & Churchill, S.P. (2022). (Eds.). *Guia de Musgos do Brasil Volume 1*. [Kindle version].The New York Botanical Garden Press.

Durán, A.P., Rauch, J., & Gaston, K.J. (2013). Global spatial coincidence between protected areas and metal mining activities. *Biological Conservation* 160: 272–278. 10.1016/j.biocon.2013.02.003

Farias, R.S., Pereira Silva, M.P., Maciel-Silva, A.S., & Pôrto, K.C. (2017). Influence of environmental factors on the distribution of Calymperes and Syrrhopodon (Calymperaceae, Bryophyta) in the Atlantic Forest of Northeastern Brazil. *Flora* 234: 158–164.https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.07.011

Flora e Funga do Brasil. (2024). *Jardim Botânico do Rio de Janeiro.* Available at

https://reflora.jbrj.gov.br/reflora/. [Accessed 10 November 2024]

Frahm, J-P. (1991). Dicranaceae: Campylopodioideae, Paraleucobryoideae. *Flora Neotropica, monograph* 54 (1991): 1–237. Available at http://www.jstor.org/stable/4393822. [Accessed 28 November 2024]

Frahm, J.-P. (2003). Manual of Tropical Bryology. *Tropical Bryology* 23: 1–200.

Gomes, M., Ferreira, R.L., & Ruchkys, Ú.D.A. (2019). Landscape evolution in ferruginous geosystems of the Iron Quadrangle, Brazil: a speleological approach in a biodiversity hotspot. *SN Applied Sciences* 9. https://doi.org/10.1007/s42452-019-1139-3

Gonçalves, M.T.A., Lima, J.S.D., Canestraro, B.K., Castro, C.D.O., Gissi, D.S., Oliveira, D.S., et al. (2024). The bryophytes of the Private Natural Heritage Reserve Parque das Neblinas, State of São Paulo, Brazil: IV Workshop on Bryophytes of Brazil (As briófitas da Reserva Particular do Patrimônio Natural Parque das Neblinas, Estado de São Paulo, Brasil: IV Workshop de Briófitas do Brasil). *Hoehnea* 51: e512024. https://doi.org/10.1590/2236-8906e512024

Hsieh, T.C., Ma, K.H., & Chao, A. (2016). iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (H ill numbers) (G. McInerny, Ed.). *Methods in Ecology and Evolution* 7: 1451–1456.

IBAMA,Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, (1990). *Portaria 887, de 15 de junho de 1990*. 1990. Available at https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=94232 [Accessed 20 October 2023].

ICMBio, INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO. (2024).Avaiable at https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie [Acessed 19 November 2024].

ICMBio, INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO. (2024). Avaiable at https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/mata-atlantica/lista-de-ucs/parna-da-serra-do-gandarela/informacoes-sobre-visitacao-parna-da-serra-do-gandarela [Acessed 19 November 2024].

ICMBio, INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO. (2023). Anuário estatístico do patrimônio espeleológico brasileiro 2022. Available at https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/anuario-estatistico-do-patrimonio-espeleologico-brasileiro/anuario-estatistico-do-patrimonio-espeleolog

ico-brasileiro [Accessed 20 October 2023]

ICMBio, INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO. (2022). ÁREA DE INFLUÊNCIA SOBRE O PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO: Orientações básicas à realização de estudos espeleológicos Reedição 2022. Available at https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/orientacoes-e-procedimentos/areadeinfluenciado [Accessed 20 October 2023]

IPA, I. de P.A. (2023). Briologia. *Infraestrutura do Meio Ambiente de São Paulo*. Available at https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutodebotanica/briologia. [Accessed 20 October 2023]

Jabot. (2024). Available at https://jabot.jbrj.gov.br/v3/consulta.php [Accessed 10 November 2024].

Jacobi, C.M., Carmo, F.F. do, Carmo, F.F. do, & Campos, I.C. de. (2015). Iron geosystems: priority areas for conservation in Brazil In Mining in ecologically sensitive landscapes in *Mining in ecologically sensitive landscape.* cap 4. pp. 55-78 Mark Tibbett.

Jacobi, C.M., & Carmo, F.F. do. (2008). The Contribution of Ironstone Outcrops to Plant Diversity in the Iron Quadrangle, a threatened Brazilian Landscape. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 37(4), pp. 324-326. https://doi.org/10.1579/0044-

Jacobi, C.M., Do Carmo, F.F., Vincent, R.C., & Stehmann, J.R. (2007). Plant communities on ironstone outcrops: a diverse and endangered Brazilian ecosystem. *Biodiversity and Conservation* 16: 2185–2200. DOI 10.1007/s10531-007-9156-8. Available at https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-007-9156-8.

Kassambara, A. & Mundt, F. (2020). Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. *CRAN: Contributed Packages*.

Kozlova, E.V., Mazina, S.E., & Pešić, V. (2019). Biodiversity of Phototrophs in Illuminated Entrance Zones of Seven Caves in Montenegro. *Ecologica Montenegrina* 20: 24–39. https://doi.or/10.37828/em.2019.20.3

Levett, A., Gagen, E., Shuster, J., Rintoul, L., Tobin, M., Vongsvivut, J., Bambery, K., Vasconcelos, P., & Southam, G. (2016). Evidence of biogeochemical processes in iron duricrust formation. *Journal of South American Earth Sciences* 71: 131–142. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.06.016

Li, C., Zhang, Z., Wang, Z., & Wu, Q. (2020). Bryophyte diversity, life-forms, floristics and vertical distribution in a degraded karst sinkhole in Guizhou, China. *Brazilian Journal*

of Botany 43: 303–313. https://doi.org/10.1007/s40415-020-00607-6

Madeira, J.A., Martins, F.D., Ribeiro, K.T., & Carvalho, A.S. (2015). FERRUGINOUS ECOSSYSTEMS AND PROTECTED AREAS (GEOSSISTEMAS FERRUGINOSOS E ÁREAS PROTEGIDAS) in *Ferruginous Geosystems of Brazil: priority areas for the conservation of geological and biological diversity, cultural heritage and environmental services (Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais).* 3i Editora Ltda, Belo Horizonte, MG. pp.539.

MMA, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2018). Áreas prioritárias para conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira ou Áreas Prioritárias para a Biodiversidade. *PORTARIA Nº 463, DE 18 DE DEZEMBRO DE 2018.* Available at https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/conservacao-1/areas-prioritarias/2a-atualizacao-das-areas-prioritarias-para-conservacao-da-biodiversidade-2018 [Acessed 16 November 2024]

MMA, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2014). Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. Available at https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/mata-atlantica/lista-de-ucs/parna-da-serra-do-gandarela [Acessed 19 November 2024].

Medina, M.J., Antić, D., Borges, P.A.V., Borko, Š., Fišer, C., Lauritzen, S.-E., et al. (2023). Temperature variation in caves and its significance for subterranean ecosystems. *Scientific Reports*, 13. https://doi.org/10.1038/s41598-023-48014-7

Moore GW. (1964). Cave temperature. *National Speleological Society News*. 22: 57–60.

Moseley, M. (2010). British Cave Research Association. *Are all caves ecotones?*. ***Cave and Karst Science,*** v. 43, n. 2, p. 51-64.

Mulec, J., & Kubešova, S. (2010). Diversity of bryophytes in show caves in Slovenia and relation to light intensities. *Acta Carsologica 39*(3). https://doi.org/10.3986/ac.v39i3.86

Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P. ,Mcglinn, D., Minchin, P.R., O'hara , R.B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs E. & Wagner, H. (2022). Vegan: Community Ecology Package, version 2.5-7.

Peñaloza-Bojacá, G.F., De Oliveira, B.A., Araújo, C.A.T., Fantecelle, L.B., Dos Santos, N.D., & Maciel-Silva, A.S. (2018). Bryophytes on Brazilian ironstone outcrops: Diversity, environmental filtering, and conservation implications. *Flora* 238: 162–174. https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.06.012

Piló, L.B., Coelho, A., & Reino, J.C.R. (2015). GEOSPELEOLOGY IN IRON ROCKS: CURRENT SCENARIO AND CONSERVATION (GEOESPELEOLOGIA EM ROCHAS FERRÍFERAS: CENÁRIO ATUAL E CONSERVAÇÃO) in *Ferruginous Geosystems of Brazil: priority areas for the conservation of geological and biological diversity, cultural heritage and environmental services*. (*Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais)*. 3i Editora Ltda, Belo Horizonte, MG. pp. 125-144.

Prous, X., Ferreira, R.L., & Martins, R.P. (2004). Ecotone delimitation: Epigean-hypogean transition in cave ecosystems. *Austral Ecology* 29: 374–382. https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2004.01373.x

Puglisi, M., Privitera, M., Minissale, P., & Costa, R. (2019). Diversity and ecology of the bryophytes in the cave environment: a study on the volcanic and karstic caves of Sicily. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 153: pp 134–146.https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1478903

Puglisi, M., & Sciandrello, S. (2023). Bryophyte Diversity and Distribution Patterns along Elevation Gradients of the Mount Etna (Sicily), the Highest Active Volcano in Europea. *Plants* v. 12, n. 14, pp. 2655-2023. .https://doi.org/10.3390/plants12142655

Reese, W.D. (1987). Calymperes (Musci: Calymperaceae): World Ranges, Implications for Patterns of Historical Dispersion and Speciation, and Comments on Phylogeny. *Brittonia*, 39(2), 225. https://doi.or/10.2307/2807380

Ren, H., Wang, F., Ye, W., Zhang, Q., Han, T., Huang, Y., Chu, G., Hui, D., & Guo, Q. (2021). Bryophyte diversity is related to vascular plant diversity and microhabitat under disturbance in karst caves. *Ecological Indicators* 120: 106947.

https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106947

Schaefer, C.E., Cândido, H.G., Corrêa, G.R., Pereira, A., Nunes, J.A., Souza, O.F., Marins, A., Filho, E.F., & Ker, J.C. (2015). Soils developed on Canga ferruginosa in Brazil: a critical review and ecological role of termite mounds (Solos desenvolvidos sobre Canga ferruginosa no Brasil: uma revisão crítica e papel ecológico de termiteiros) in *Ferruginous Geosystems of Brazil: priority areas for the conservation of geological and biological diversity, cultural heritage and environmental services (Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais*). 3i Editora Ltda. Belo Horizonte, MG. pp.77-102.

Simon, K.S. (2019). Cave ecosystems. pp. 223–226. In: White, W.B., & Culver, D. *Encyclopedia of Caves*Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814124-3.00025-X

Souza-Silva, M., Cerqueira, R.F.V., Pellegrini, T.G., & Ferreira, R.L. (2021). Habitat selection of cave-restricted fauna in a new hotspot of subterranean biodiversity in Neotropics. *Biodiversity and Conservation* 30: 4223–4250. https://doi.org/10.1007/s10531-021-02302-8

Souza, F.C.R. de. 2017. Geospeleology in Chapada de Canga, East of the Iron Quadrangle, MG (Geoespeleologia na Chapada de Canga, Leste do Quadrilátero Ferrífero, MG) in *Chapada de canga: natural and cultural heritage of relevant conservation interest (Chapada de canga: patrimônio natural e cultural de relevante interesse para a conservação.* 3i Editora Ltda. Belo Horizonte, MG. pp. 62-85.

SpiciesLink. (2024). Available at https://specieslink.net/search/ [Accessed 10 November 2024].

Spier, C.A., Vasconcelos, P.M., & Oliviera, S.M.B. 2006. 40Ar/39Ar geochronological constraints on the evolution of lateritic iron deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Chemical Geology* 234: 79–104. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.04.006

Thai, Y.K., & Horng, C.Y. (2023). An updated account on the bryophyte diversity of Batu Caves, Selangor, Malaysia, with two new records for Peninsular Malaysia. *Malayan Nature Journal* 75: 45–59.

Thiers, B. (2025) Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff. New York Botanical Gardens Virtual Herbarium. Available from:

http://sweetgum.nybg.org/science/ih/ (Acessado em 31 Janeiro 2024).

Tobin, B., Hutchins, B., & Schwartz, B. 2013. Spatial and temporal changes in invertebrate assemblage structure from the entrance to deep-cave zone of a temperate marble cave. *International Journal of Speleology* 42: 203–214.http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.42.3.4

Travassos, L.E.P. 2015. Concise and Illustrated Glossary of Kartic and Speleological Terms (*GLOSSÁRIO CONCISO E ILUSTRADO DE TERMOS CÁRSTICOS E ESPELEOLÓGICOS*). PUC, Minas, p.65.

Wickham, H., and Bryan, J. 2023. "*R package”*. O'Reilly Media, Inc.

White, W.B., & Culver, D.C. 2019. Cave, Definition of. pp. 255–259. In: White, W.B., & Culver, D. *Encyclopedia of Caves* Elsevier.

7-TABELAS E FIGURAS

Tabela 1- Informações de espeleometria das cavidades

	C1	C2	C3	G4	G5	G6
Localização	20°09'56"S 43°23'27"W	20°09'48"S 43°24'21"W	20°09'57"S 43°24'21"W	20°05'40"S 43°40'51"W	20°05'50"S 43°40'43"W	20°06'47"S 43°39'54"W
Elevação (m)	892	881	877	1610	1614	1593
Projeção horizontal (m)	27,46	21,07/17,70	42,46	68,4	55,6	16,9
Altura (m)	0,71	0,58/1,32	0,4	0,4	1,2	1,75
Largura (m)	7,59	5,38/4,4	7,59	2	2	6
Área (m^2)	671,71	653/761,07	1634,93	157	179	53,7
Desnível (m)	29,4	0,97/0,99	0,91	5,8	4,8	1,3

Tabela 2 - Espécies encontradas nas seis cavernas do Parque Nacional da Serra do Gandarela (G4, G5, G6) e Chapada de Canga (C1,C2, C3) nas estações seca e chuvosa, com as respectivas frequências de cada espécie em números, nos substratos corticícola (cor) epíxila (epi) rupícola(rup) e terrícola (ter), * Representa as espécies de nova ocorrência, as espécies endêmicas estão destacadas com End, espaços vazios estão representados por (.).

	C1	C2	C3	G4	G5	G6	Substrato	Endêmica
Bartramiaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Philonotis elongata (Dumort.) H.A.Crum & Steere *	5	2	.	.	.	.	rup ter	.
Brachytheciaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Aerolindigia capillacea (Hornsch.) M. Menzel *	.	.	.	.	.	2	epi	.
Meteoridium remotifolium (Müll.Hal.) Manuel	.	.	.	.	.	2	cor epi	.
Bryaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Bryum atenense Williams	.	1	1	.	.	.	rup ter	.
Bryum billarderi Schwaegr.	.	8	.	4	6	.	cor epi rup ter	.
Bryum capillare Hedw.	.	1	2	1	.	.	cor rup ter	.
Calymperaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Octoblepharum albidum Hedw.	.	7	3	.	.	.	cor epi rup	.
Syrrhopodon africanus (Mitt.) Paris *	4	4	2	2	2	.	cor epi	.
Syrrhopodon gardneri (Hook.) Schwägr.	.	.	.	1	1	.	cor epi	.
Syrrhopodon ligulatus Mont.	.	.	1	.	.	.	cor	.
Syrrhopodon prolifer Schwägr.	5	3	6	18	11	15	cor epi rup ter	
Syrrhopodon tortilis Hampe	2	.	.	1	.	2	cor rup	.
Daltoniaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Daltonia marginata Griff.	.	.	.	.	.	1	epi	.
Daltonia splachnoides (Sm.) Hook. & Taylor	.	.	.	1	.	1	cor epi	End

Dicranaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Leucoloma serrulatum Brid.	.	.	.	.	1	.	rup	.
Leucoloma triforme (Mitt.) A.Jaeger *	.	.	.	.	1	2	cor epi ter	End
Entodontaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Erythrodontium longisetum (Hook.) Paris	.	.	.	.	.	4	cor epi	.
Fissidentaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Fissidens lagenarius Mitt.	.	.	.	.	.	2	cor	.
Fissidens serratus Müll. Hal	1	.	.	.	.	.	ter	.
Hypnaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Chryso-hypnum diminutivum (Hampe) W.R.Buck	.	.	.	.	.	1	rup	.
Rhacopilopsis trinitensis (Müll.Hal.) E.Britton & Dixon	1	15	.	.	.	.	cor epi rup ter	.
Leucobryaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Leucobryum albicans (Schwägr.) Lindb.	7	8	.	2	17	9	cor epi rup ter	.
Leucobryum giganteum Müll. Hal.	.	.	.	.	.	1	ter	.
Campylopus arctocarpus (Hornsch.) Mitt.	.	.	.	27	5	9	cor epi rup ter	.
Campylopus filifolius (Hornsch.) Mitt	1	1	.	.	.	.	rup	
Campylopus flexuosus (Hedw.) Brid.*	1	.	.	1	6	3	cor epi rup ter	.
Campylopus gardneri (Müll.Hal.) Mitt.	.	.	.	.	.	1	rup	.
Campylopus gastro-alaris (Müll. Hal.) Paris	.	.	.	.	.	1	rup	End
Campylopus julaceus A.Jaeger	.	.	.	3	.	.	cor rup	.
Campylopus julicaulis Broth.	.	1	.	.	.	.	rup	End
Campylopus lamellinervis (Müll.Hal.) Mitt.	.	2	1	10	8	1	cor epi rup ter	.
Campylopus occultus Mitt.	.	.	.	1	.	.	cor	.

Campylopus pilifer Brid.	.	.	.	1	.	.	rup	.
Campylopus pyriformis (Schultz) Brid..	1	.	.	3	1	.	cor epi rup	.
Campylopus savannarum (Müll.Hal.) Mitt.	.	20	12	.	2	4	cor epi rup ter	.
Campylopus thwaitessii (Mitt.) A. Jaeger	.	.	.	1	6	.	cor epi	End
Meteoriaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Meteorium deppei (Hornsch.) Mitt.	.	.	.	.	.	1	epi	.
Orthotrichaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Groutiella chimborazensis (Spruce ex Mitt.) Florsch.*	.	.	.	.	2	.	cor epi	.
Macrocoma orthotrichoides (Raddi) Wijk & Margad.	.	.	.	.	.	1	epi	.
Macromitrium punctatum (Hook. & Grev.) Brid.	.	.	.	.	.	2	epi ter	.
Schlotheimia appressifolia Mitt.	.	.	.	1	.	.	epi	.
Schlotheimia merkelii Hornschmerkelii	.	1	2	.	5	1	cor epi ter	End
Schlotheimia tecta Hook.f. & Wilson	.	.	.	5	7	9	cor epi	.
Pilotrichaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Lepidopilidium nitens (Hornsch.) Broth.	.	1	.	.	1	6	cor epi rup ter	End
Lepidopilum subsubulatum Geh. & Hampe	.	.	.	.	.	2	cor	.
Thamniopsis incurva (Hornsch.) W.R. Buck	.	.	.	.	2	.	rup	.
Pylaisiadelphaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Isopterygium tenerifolium Mitt.	1	4	1	1	3	1	cor epi rup ter	.
Isopterygium tenerum (Sw.) Mitt.	8	5	5	1	4	.	cor epi rup ter	.
*Microcalpe subsimplex (*Hedw.) W.R. Buck	3	3	13	3	1	2	cor epi rup ter	End

Wijkia flagellifera (Broth.) H.A.Crum	.	.	.	1	1	.	cor	.
Racopilaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Racopilum tomentosum (Hedw.) Brid.	.	.	.	.	.	1	epi	.
Rhizogoniaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Pyrrhobryum spiniforme (Hedw.) Mitt.	.	.	.	.	5	15	cor epi rup ter	.
Sematophyllaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Aptychopsis estrellae (Hornsch.) Ångström	.	.	.	1	.	.	epi	.
Aptychopsis pungifolia (Hampe) Broth.	.	.	7	.	.	.	cor epi rup	.
Aptychopsis subpungifolia (Broth.) Broth.	.	.	.	.	2	4	cor epi	End
Brittonodoxa subpinnata (Brid.) W.R. Buck, P.E.A.S.Câmara & Carv.-Silva	6	14	11	2	11	2	cor epi rup ter	.
Donnellia commutata (Müll.Hal.) W.R.Buck	2	.	.	.	.	.	epi rup	.
Jirivanaea galipensis (Müll. Hal.) U.B. Deshmukh & Rathor,*	4	1	1	1	5	1	cor epi rup	.
Sematophyllum beyrichii (Hornsch.) Broth.	5	2	4	3	7	9	cor epi rup ter	.
Sematophyllum swartzii (Schwägr.) W.H.Welch & H.A.Crum	.	.	.	.	1	1	epi	.
Sphagnaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Sphagnum aequalipunctatum H.A.Crum	.	.	.	.	.	3	rup ter	End
Thuidiaceae	.	.	.	.	.	.	.	.
Thuidium tomentosum Schimp.	3	.	.	.	.	.	rup	.

Tabela 3. Índices de Similaridade de Sorensen (qualitativo, variando de 0 a 1) para as espécies de musgos ocorrentes nas seis cavernas da Serra da Gandarela e Chapada de Canga, amostradas nas duas estações seca e na chuva.

	C1	**C2**	**C3**	**G4**	**G5**	**G6**
C1	1.000	0.540	0.584	0.303	0.785	0.490
C2	.	1.000	0.727	0.168	0.525	0.283
C3	.	.	1.000	0.259	0.438	0.333
G4	.	.	.	1.000	0.540	0.593
G5	.	.	.	.	1.000	0.792
G6	.	.	.	.	.	1.000

Tabela 4. Contribuições dos fatores físico-químicos das zonas eufótica e disfótica de cada uma das cavidades nos eixos Dim.1 e Dim.2 da PCA, areia grossa e grossa estão representados respectivamente por CS e CF, pH= pH em água, P= fósforo, K= potássio, Ca^{2+}= íon cálcio, Mg^{2+}= magnésio, H_2O= água, Al^{3+}= íon alumínio, H+Al= acidez do solo, SB= soma das bases trocáveis, t= capacidade de troca catiônica efetiva, T= Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0, V= índice de saturação por bases, m= índice de saturação por alumínio, MO= matéria orgânica, P-rem = Fósforo Remanescente, Cu= cobre, Mn= manganês, Fe= ferro, Zn= zinco.

	Dim.1	**Dim.2**
CS	1.79408301	11.98195599
CF	0.09463614	19.40844113
Silte	1.07133201	2.24301914
Argila	1.04295642	11.61804055
pH	3.54449712	1.84123619

H_2O	1.86862525	7.08463563
P	7.41139586	1.17931621
K	6.71279931	1.37666322
Ca^{2+}	6.74038839	0.46810244
Mg^{2+}	7.65382901	0.91724925
Al^{3+}	6.72839186	1.75910671
H+Al	5.18021371	8.23134906
SB	7.84559905	0.90861177
t	7.43374112	0.89863386
T	5.39396714	7.67396319
V	5.78286640	4.57625779
m	0.52656809	8.39273262
MO	7.85196088	0.01364756
P.Rem	2.85471117	5.93866041
Cu	0.95365750	0.44854832
Mn	4.13991928	0.13020502
Fe	0.03944089	2.46302194
Zn	7.33442038	0.44660199

Tabela 5- Dados das análises físico-químicos do solo das zonas eufótica (E) e disfótica (D) de cada uma das cavidades, areia grossa e areia fina estão representadas respectivamente por CS e CF, pH= pH em água, P= fósforo, K= potássio, Ca^{2+}= íon cálcio, Mg^{2+}= magnésio, H_2O= água, Al^{3+}= íon alumínio, H+Al= acidez do solo, SB= soma das bases trocáveis, t= capacidade de troca catiônica efetiva, T= Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0, V= índice de saturação por bases, m= índice de saturação por alumínio, MO= matéria orgânica, P-rem = Fósforo Remanescente, Cu= cobre, Mn= manganês, Fe= ferro, Zn= zinco, V=

Índice de Saturacão por Bases.

	C1 E	C1 D	C2 E	C2 D	C3 E	C3 D	G4 E	G4 D	G5 E	G5 D	G6 E	G6 D
CS (kg/kg)	0.454	0.495	0.296	0.334	0.239	0.403	0.356	0.317	0.225	0.263	0.396	0.175
CF (kg/kg)	0.065	0.084	0.131	0.102	0.099	0.103	0.059	0.071	0.075	0.178	0.087	0.039
Silte (kg/kg^1)	0.115	0.103	0.311	0.19	0.325	0.341	0.272	0.34	0.291	0.357	0.076	0.331
Argila (kg/kg^1)	0.366	0.317	0.261	0.375	0.337	0.153	0.312	0.273	0.409	0.202	0.441	0.455
pH H2O	4.25	4.6	4.0	4.46	4.02	4.3	4.24	4.31	4.41	4.38	3.92	4.85
P (mg/dm^3)	4.5	0.6	4.8	0.7	2.6	0.7	5.7	3.1	7.3	0.0	16.1	1.2
K (mg/dm^3)	62.0	19.0	58.0	23.0	75.0	33.0	81.0	16.0	82.0	5.0	100.0	26.0
Ca^{2+}(cmolc/dm^3)	0.1	0.01	0.14	0.18	0.13	0.02	0.15	0.08	0.21	0.05	0.42	0.06
Mg^{2+}(cmolc/dm^3)	0.12	0.04	0.1	0.06	0.16	0.07	0.14	0.05	0.23	0.02	0.3	0.06
Al^{3+}(cmolc/dm^3)	2.55	0.86	2.86	1.08	2.09	1.44	3.36	1.63	3.0	0.73	4.44	3.61
H+Al(cmolc/dm^3)	17.1	12.2	21.4	18.1	19.4	13.7	26.9	17.2	30.2	11.4	28.9	32.8
SB(cmolc/dm^3)	0.38	0.1	0.39	0.3	0.48	0.17	0.5	0.17	0.65	0.08	0.98	0.19
t (cmolc/dm^3)	2.93	0.96	3.25	1.38	2.57	1.61	3.86	1.8	3.65	0.81	5.42	3.8
T (cmolc/dm^3)	17.48	12.3	21.79	18.4	19.88	13.87	27.4	17.37	30.85	11.48	29.88	32.99
V (%)	2.2	0.8	1.8	1.6	2.4	1.2	1.8	1.0	2.1	0.7	3.3	0.6
m (%)	87.0	8.6	88.0	78.3	81.3	89.4	87.0	90.6	82.2	90.1	81.9	95.0
MO (dag/kg)	9.67	2.39	10.24	3.88	8.9	3.27	17.38	3.59	29.82	2.88	37.42	12.01
P-Rem (mg/L)	15.6	14.2	19.9	5.5	22.9	21.6	21.4	5.3	28.9	12.3	25.4	2.6
Cu (mg/dm^3)	0.18	0.23	0.38	0.28	0.82	0.66	0.3	1.32	0.27	0.36	0.13	0.14

Mn (mg/dm^3)	4.2	2.9	4.9	2.0	4.6	2.3	4.8	9.7	5.3	2.2	12.4	5.0
Fe (mg/dm^3)	161.1	140.0	278.8	693.3	484.0	207.2	459.2	596.9	278.8	397.3	331.4	261.2
Zn (mg/dm^3)	1.4	0.44	1.97	0.9	2.31	1.16	3.27	0.85	5.91	0.95	10.77	1.36

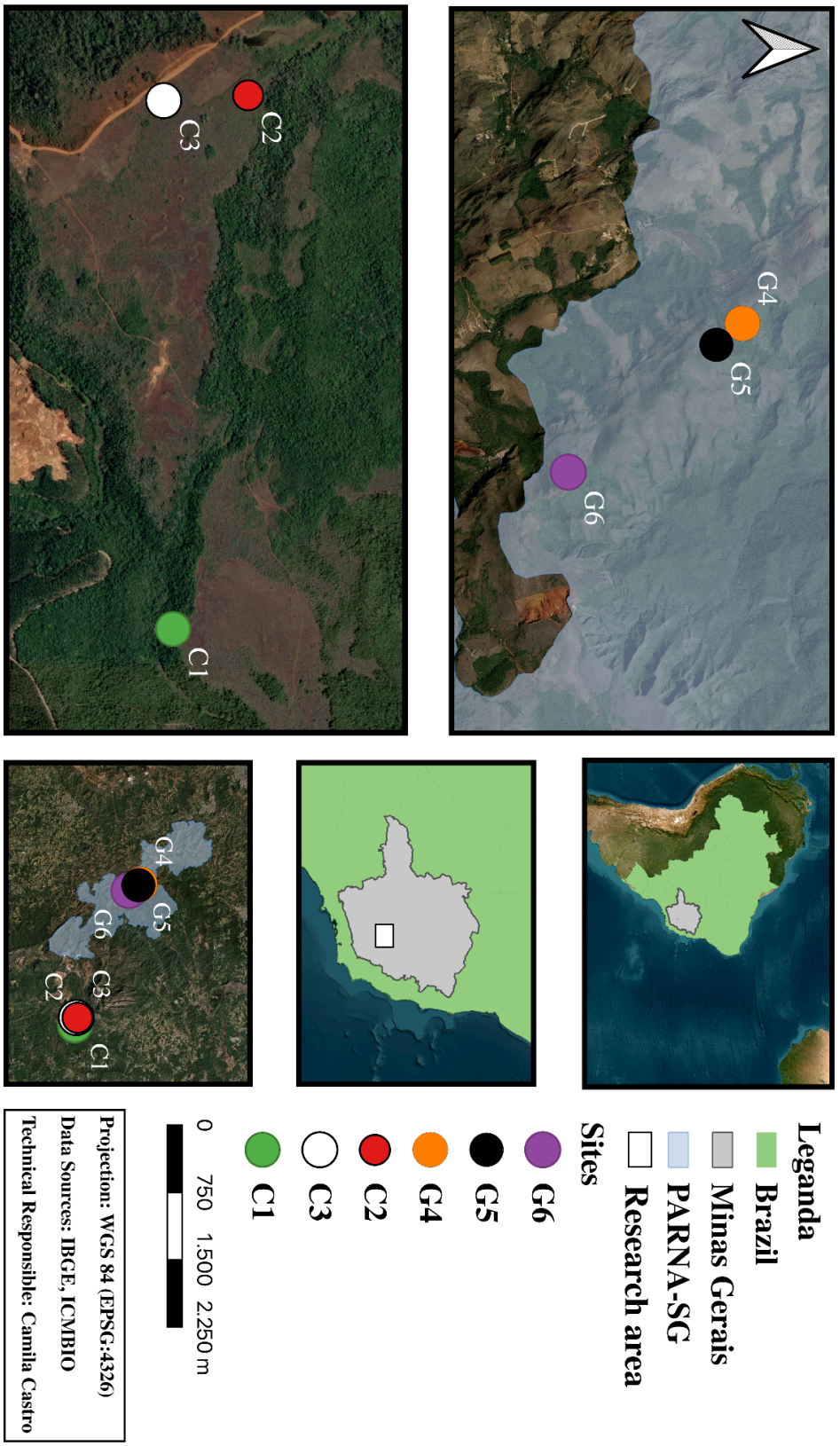

Figura 1- Mapa das localizações das cavidades dos municípios de Rio Acima e Mariana.

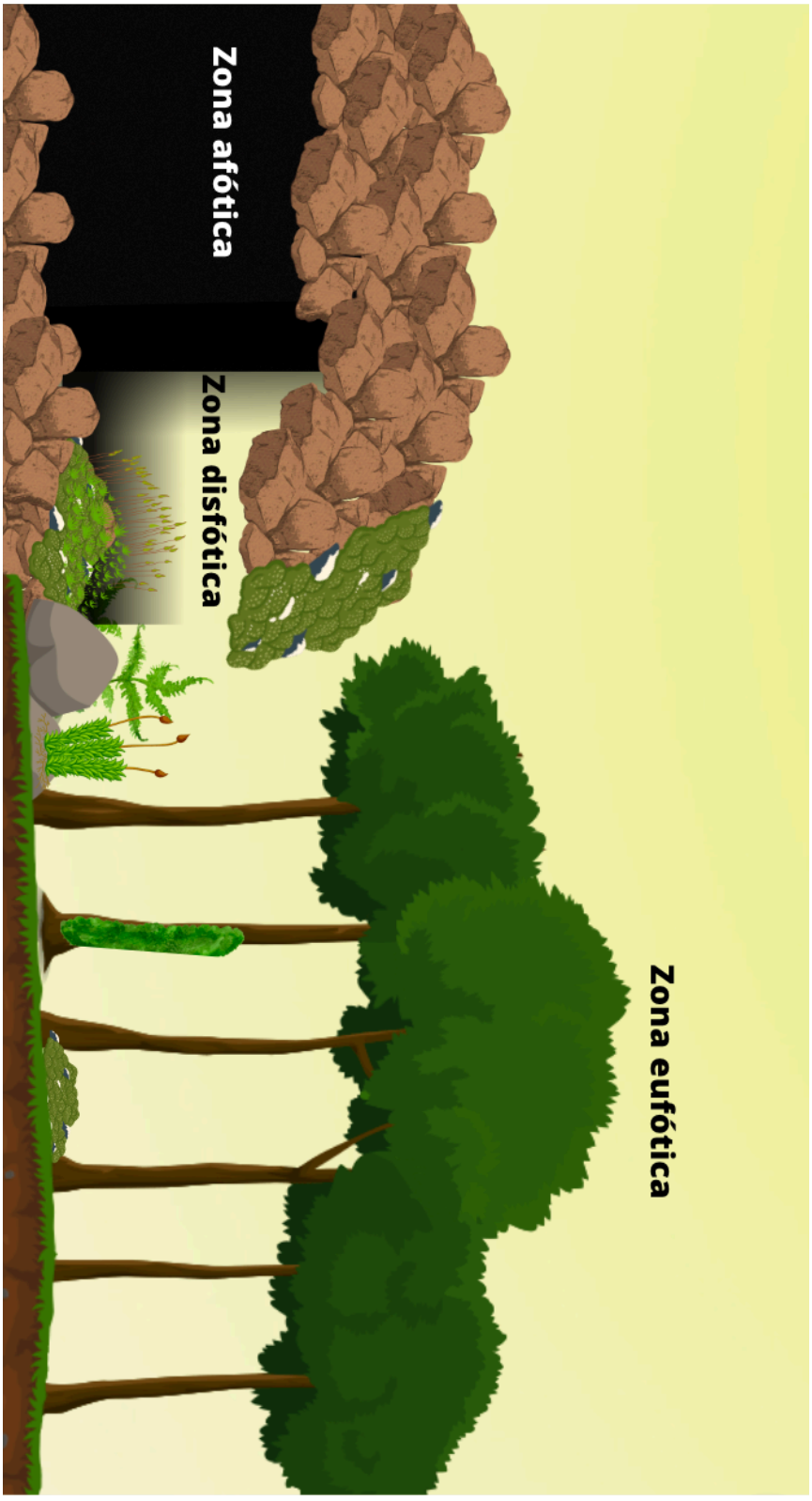

Figura 2 - Esquema ilustrativo das zonas disfótica e eufótica consideradas para a amostragem das espécies.

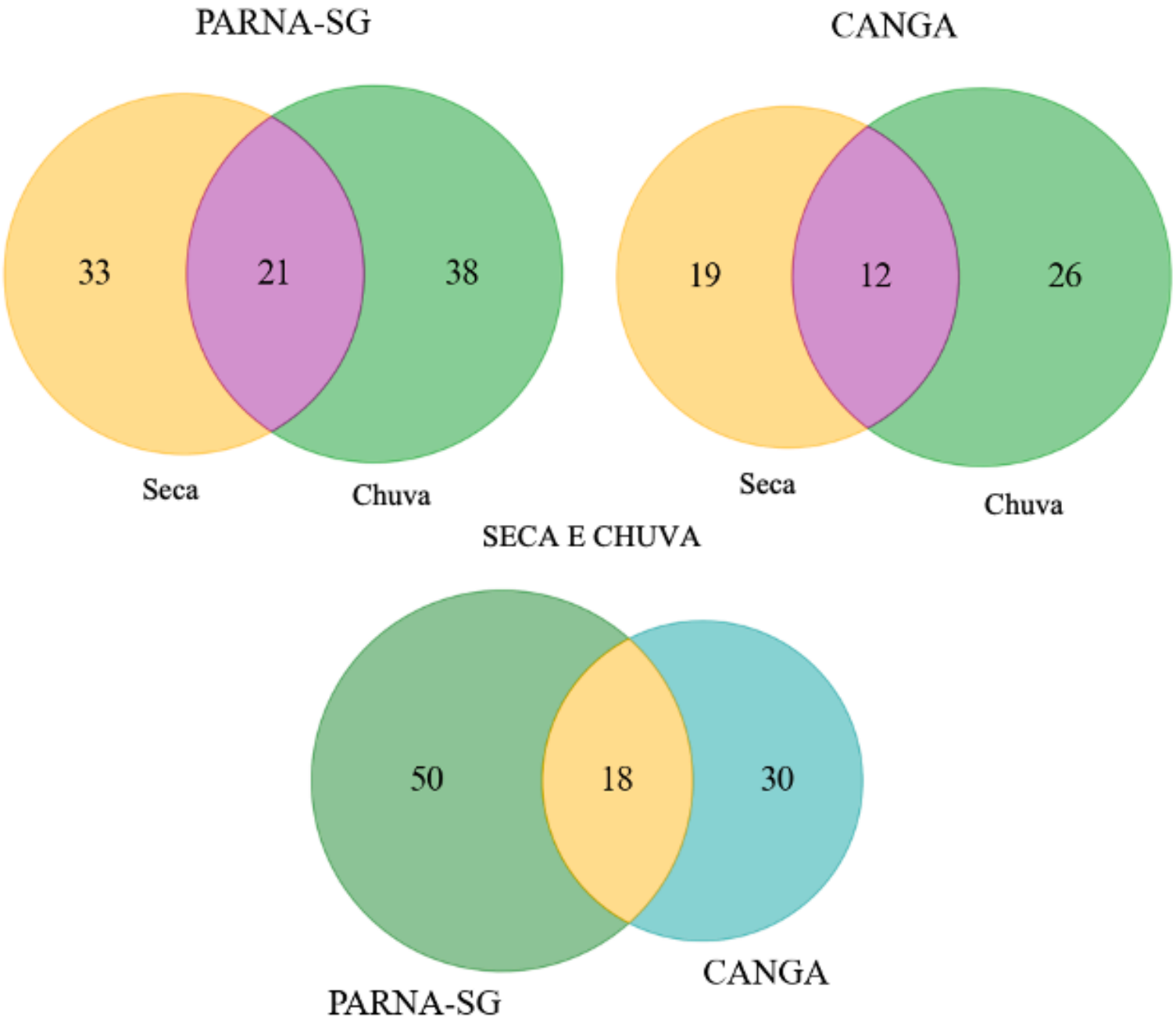

Figura 3 - Diagrama de Venn representando a porcentagem do total de espécies

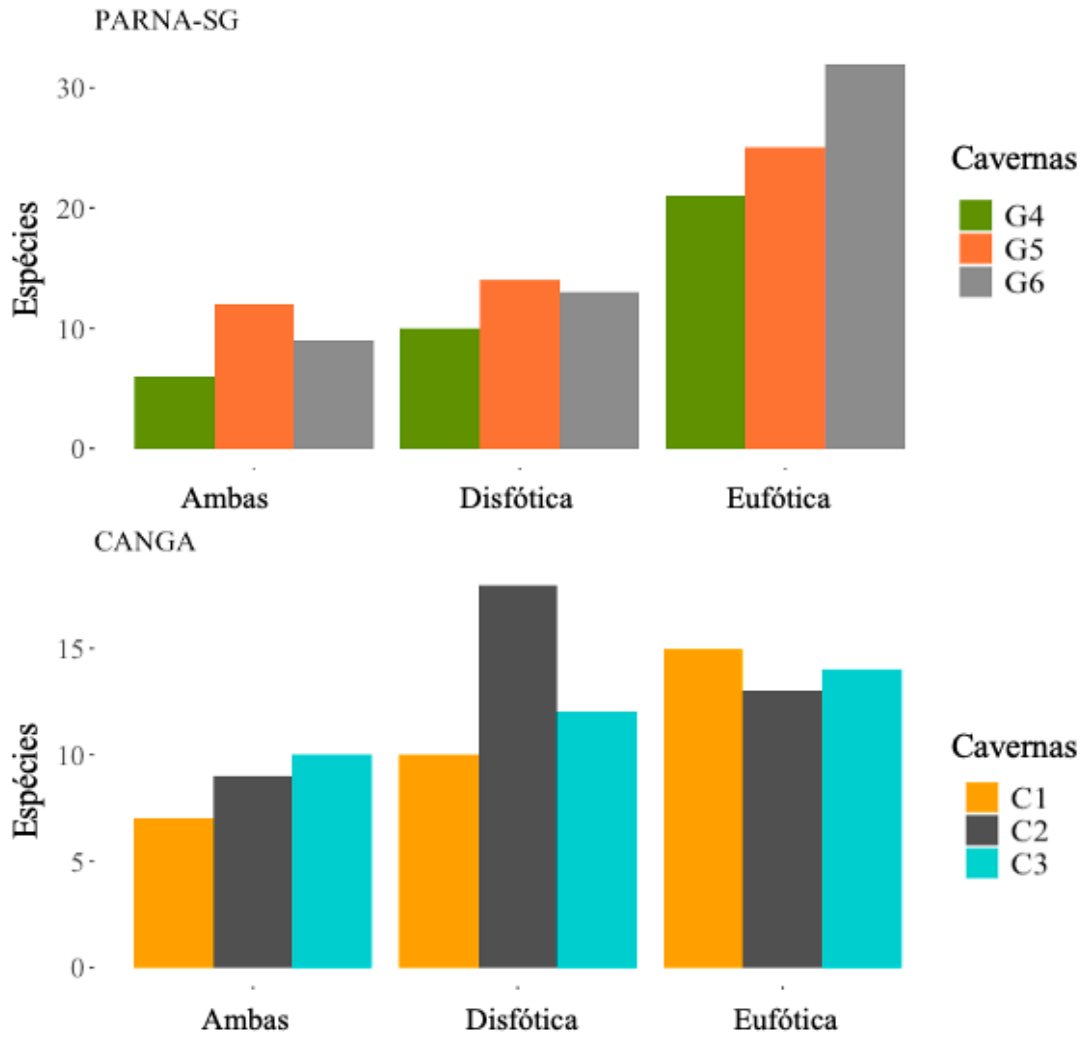

Figura 4 - Número de espécies por zonas nas seis cavidades.encontradas nos dois conjuntos de cavernas (PARNA-SG e Chapada de Canga).

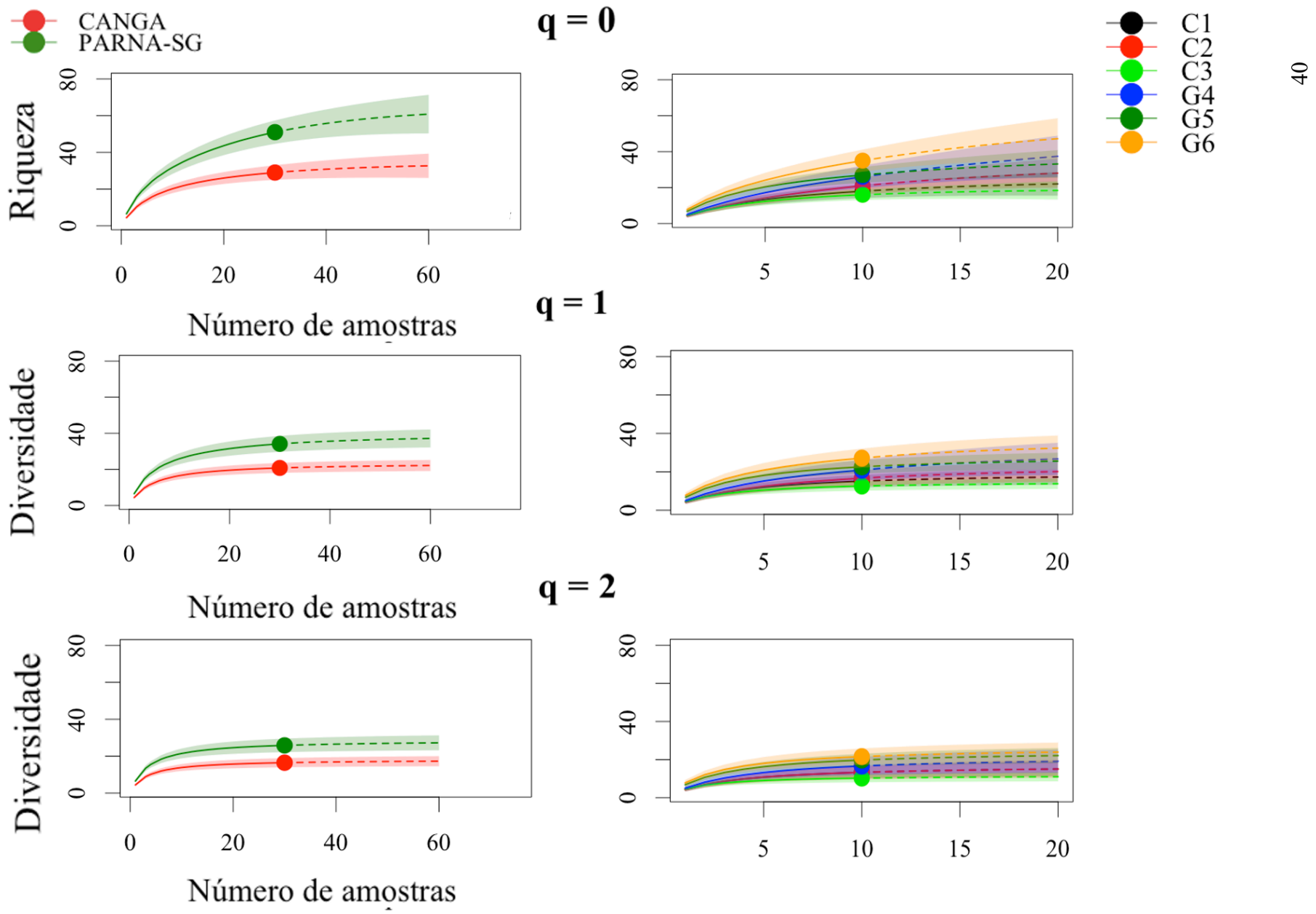
CANGA
PARNA-SG
q = 0
C1
C2
C3
G4
G5
G6
Riqueza
Diversidade
Diversidade
Número de amostras
Número de amostras
Número de amostras
0
40
80
0
20
40
60
5
10
15
20

Figura 5 - Curvas de rarefação em linhas sólidas e extrapolação em linhas tracejadas com intervalos de confiança de 95% (área sombreada) para números de Hill (q=0, q=1, q=2), para as espécies encontradas na Chapada de Canga (verde) e no Parque Nacional do Gandarela (Vermelho) e nas seis cavidades (C1,C2,C3,G4,G5 e G6).

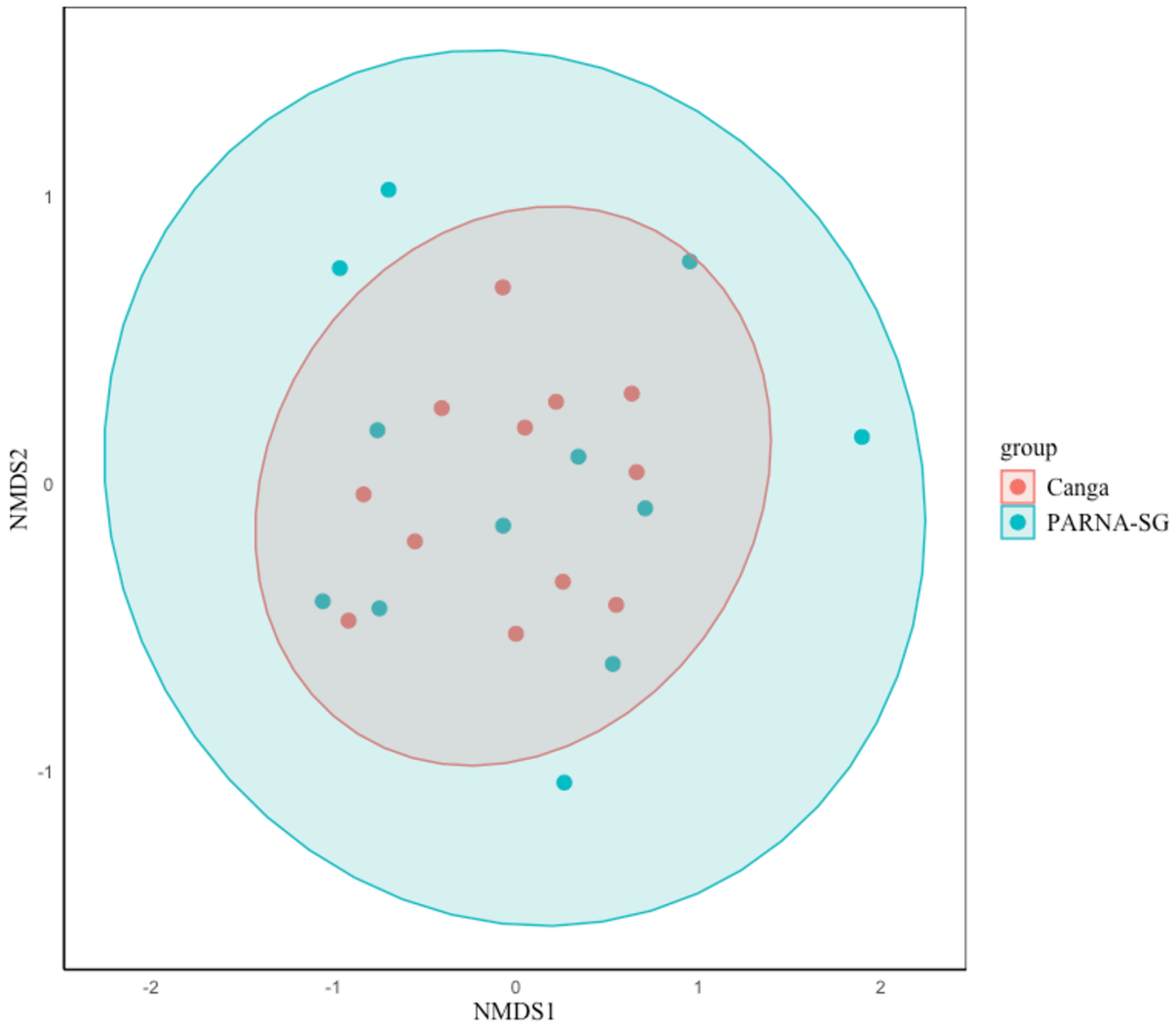

Figura 6-NMDS da composição de espécies em diferentes substratos nas regiões PARNA-SG e CANGA com elipses de grupo.. Stress 0.1498771.

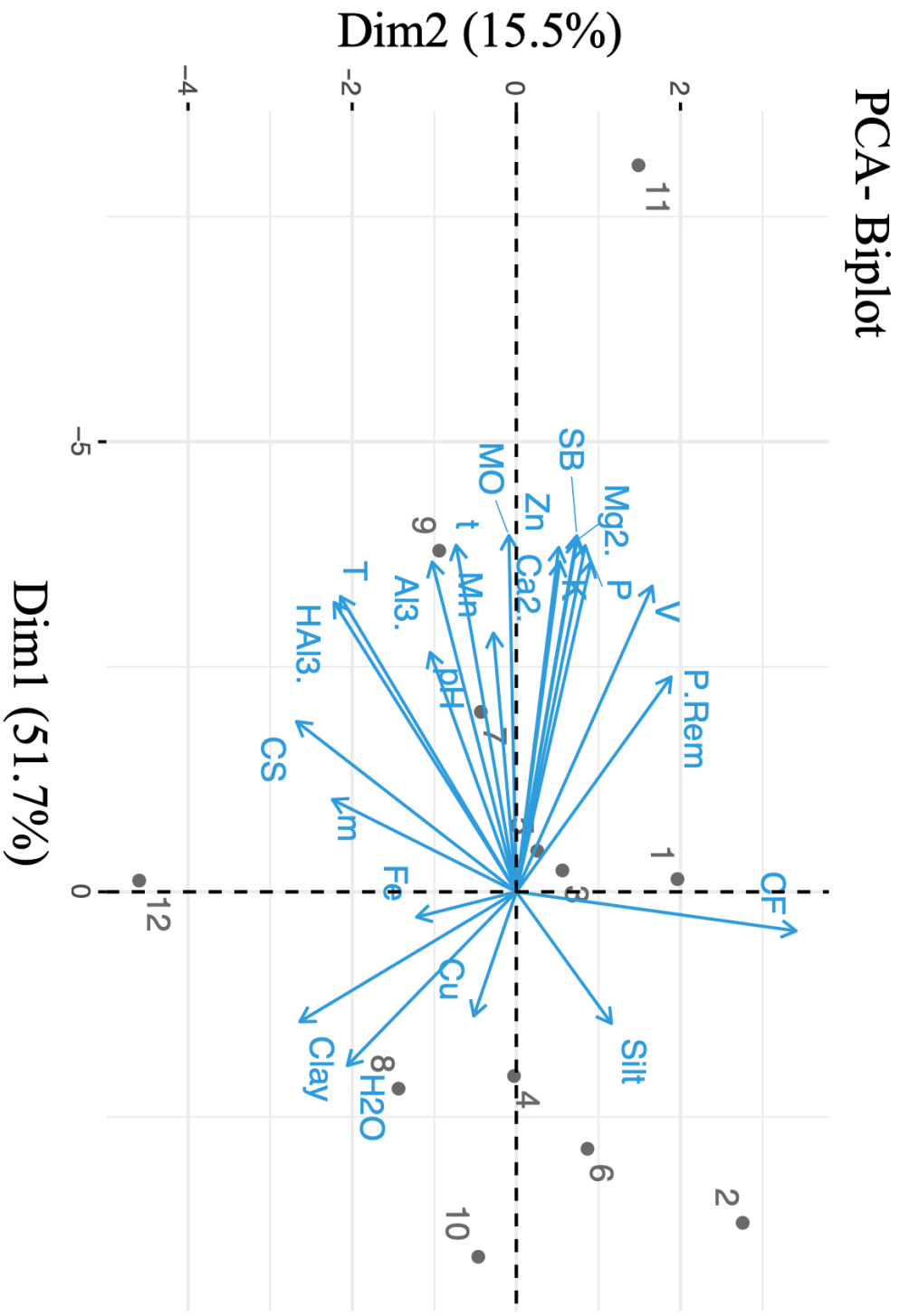

Figura 7-PCA dos fatores físico-químicos do solo explicada por 67,2% das zonas eufótica e disfótica representada pelo pontos de 1 a 12 das respectivas cavernas C1 =1 e 2, C2 =3 e 4,

C3 =5 e 6, G4=7 e 8, G5=9 e 10, G=11 e 12 . P-rem = Fósforo Remanescente, MO=Mat. Orgânica, CS= Areia grossa, CF= Areia fina, Clay= Argila, Silt= Silte.