

VRB Esp

Revista Brasileira de ESPELEOLOGIA

Edição Especial, V.01 - Nº 13 de 2024
ISSN 2179.4952

EDIÇÃO ESPECIAL

2º Prêmio
Nacional
de Espeleologia



**Michel
Le Bret**



Equipe editorial

Júlio Ferreira da Costa Neto, Jocy Brandão Cruz, Julio César Rocha Costa,
Diego de Medeiros Bento, Thais Xavier Nunes e Claudia Simone da Luz Alves.



VRBEsp
Revista Brasileira de
ESPELEOLOGIA

Brasília-DF
2024



Expediente edição especial

Publicada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav www.icmbio.gov.br/cecav
Endereço: Parque Nacional de Brasília. Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia. CEP: 70635-800, Brasília/DF. Brasil.
Telefone: +55 (61) 2028-9792.

Editores

Júlio Ferreira da Costa Neto

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Jocy Brandão Cruz

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Comissão de apoio editorial

Claudia Simone da Luz Alves

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Thais Xavier Nunes

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

Diego de Medeiros Bento

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

Julio César Rocha Costa

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

Comissão Científica da edição especial

Dr. Allan Silas Calux

Scientific Director at Carstografica –Karst Applied Research Centre, Campinas, São Paulo, Brasil.

Me. Xavier Prous

Analista de Meio Ambiente na Gerência de Espeleologia da Mineradora Vale S.A.

Coordenação editorial

Javiera de la Fuente C.

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Projeto gráfico

Bruno Silva Bastos

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Diagramação

Júlia Mendes Araújo

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Foto da capa

Gruta Ermida, Almirante Tamandaré /PR / **Rodrigo Lopes Ferreira**

Catálogo na Fonte

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Revista Brasileira de Espeleologia. Edição Especial – 2º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret / Julio Ferreira da Costa Neto e Jocy Brandão Cruz (ed.) – Brasília: ICMBio, 2024.

ISSN 2179.4952 - Online

368 p. ; Il. Color.

1. Espeleologia. 2. Estudos Ambientais. 3. Geomorfologia cárstica. 4. Biologia subterrânea. I. Julio Ferreira da Costa Neto II. Jocy Brandão Cruz. III. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. VI. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav. V. Título.

CDU: 551.44

A reprodução total ou parcial desta obra é permitida, desde que citada a fonte.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia – Parque Nacional de Brasília
CEP: 70635-800 - Brasília/DF - Tel: 61 2028-9792
<http://www.icmbio.gov.br/CECAV>

VIESES NO CONHECIMENTO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE CAVERNAS DO BRASIL

BIASES IN THE KNOWLEDGE OF THE GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF CAVES IN BRAZIL

Rodrigo Antônio Castro-Souza

Universidade Federal de Mato Grosso Laboratório
de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade
E-mail: rodrigodesouzaac@gmail.com

Nicolas Silva Bosco

Universidade Federal de Mato Grosso Laboratório
de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade
E-mail: n.bosco.ambiente@gmail.com

Thadeu Sobral-Souza

Universidade Federal de Mato Grosso Laboratório
de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade
E-mail: thadeusobral@gmail.com

RESUMO

Muitas cavernas ainda não foram descobertas e/ou mapeadas no Brasil. Diversos fatores socioeconômicos e de acessibilidade podem ser responsáveis por enviesar o conhecimento da distribuição geográfica das cavernas brasileiras. Aqui, usando técnicas de modelagem bayesiana, nós predizemos que o conhecimento sobre a distribuição geográfica de cavernas do Brasil é fortemente enviesado para locais próximos de centros urbanos e das atividades de mineração, ou seja, conhece-se mais cavernas próximas a ambientes de mineração e/ou de locais mais acessíveis do que longe destes. Nossos modelos foram construídos associando os dados de ocorrência conhecidas de cavernas digitalmente

ABSTRACT

Many caves have yet to be discovered and/or mapped in Brazil. Various socio-economic and accessibility factors may be responsible for biasing the knowledge of Brazilian caves geographical distribution. In this study, using Bayesian modeling techniques, it was predicted that knowledge about the Brazilian caves geographic distribution is strongly biased towards locations close to urban centers and mining activities. More caves are known near mining environments and/or more accessible locations than far from them for instance. The models were built by associating the known occurrence data of digitally accessible caves in the Speleological Information National Register (Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE)

acessíveis no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), com diferentes variáveis de acessibilidade e infraestrutura. Nossas descobertas sugerem que as regiões com maior ocorrência de cavernas conhecidas se concentram principalmente dentro dos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pará e Piauí, enquanto alguns estados brasileiros, como Amazonas, Roraima, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná e Maranhão ainda são sub explorados, ou seja, apresentam grandes lacunas e alto potencial para descobertas de novas cavernas. Concluímos que a exploração econômica tem gerado um conhecimento enviesado acerca da distribuição de cavernas, o que pode estar ligado aos embates históricos entre nossa legislação de exploração vs. conservação, tornando-se imprescindível que novas políticas sobre a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro considerem toda a paisagem espeleológica, seus vieses (locais mais bem estudados), lacunas Racovittzanas (locais menos estudados ou possivelmente negligenciados), e os processos socio-econômicos que implicam nestes.

PALAVRAS-CHAVE: patrimônio espeleológico, déficit racovittzan, desconhecimento, espeleologia.

INTRODUÇÃO

As cavernas compreendem cavidades naturais associadas a diferentes tipos de rocha (CECAV, 2022a). Normalmente, esses ambientes estão associados a uma formação rochosa conhecida como carste/pseudocarste que propiciam a ocorrência de processos químicos, físicos e biológicos de dissolução das rochas que as originam (Auler & Pilo, 2011; Travassos, 2019; Parker *et al.*, 2022). Devido à complexidade do processo erosivo e a

with different accessibility and infrastructure variables. The findings suggest that the regions with the highest occurrence of known caves are mainly concentrated within the states of Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pará and Piauí. Meanwhile some Brazilian states, such as Amazonas, Roraima, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná and Maranhão are still under-explored. They have large gaps and high potential for the discovery of new caves. In conclusion, the economic exploitation has generated biased knowledge about the distribution of caves. This may be linked to the historical clashes between exploitation and conservation legislation, making it essential that new policies on the conservation of Brazil's speleological heritage consider the entire speleological landscape, its biases (better studied sites), Racovitzan shortfalls (less studied or possibly neglected sites), and the socio-economic processes that imply these.

KEYWORDS: speleological heritage, racovitzan deficit, lack of knowledge, speleology.

INTRODUCTION

*Caves are natural underground environments associated with different types of rock (CECAV, 2022a). Normally, these environments are associated with a rock formation known as karst/pseudokarst, which enables the occurrence of chemical, physical and biological processes of dissolution of the rocks that originate them (Auler & Pilo, 2011; Travassos, 2019; Parker *et al.*, 2022). The caves have been considered laboratories for evolutionary studies*

grande constância temporal das cavernas elas têm sido consideradas laboratórios para estudos evolutivos da biodiversidade (Poulson & White, 1969; Mammola, 2019), templos religiosos (Price & Travassos, 2016); fonte de registros e vestígios arqueológicos (Damm & Young, 2013; Barra, 2020), paleontológicos (Burney *et al.*, 2022), antropológicos (Détroit *et al.*, 2019), paleoambientais (Novello *et al.*, 2017; Cruz & Piló, 2019), fonte de serviços ecossistêmicos (Mammola *et al.*, 2019a), e também utilizadas como fonte de informações sobre a saúde humana (Riddle *et al.*, 2018; Yoshizawa *et al.*, 2018), bem como locais para a prática de turismo, esportes e recreação.

Estima-se que há um grande número de cavernas ainda desconhecidas (Auler & Pilo, 2011; Jansen *et al.*, 2012; CECAV, 2022a), sendo parte dessa problemática, recentemente intitulada de lacuna Racovitzana, em homenagem ao naturalista Emil Racoviță (Ficetola *et al.*, 2019). Ela se refere especificamente ao conhecimento desigual sobre a distribuição espacial de cavernas que, consequentemente, afeta também a conservação delas (Ficetola *et al.*, 2019; Mammola *et al.*, 2019a). Nesse contexto, a urbanização, a fragmentação da paisagem, a poluição e a extração de minerais têm se destacado como fatores intensificadores de tensões nas áreas com ocorrência de cavernas, o que podem gerar impactos irreversíveis sobre essas paisagens, os ecossistemas associados e os serviços ecossistêmicos locais (Ferreira *et al.*, 2018; Mammola *et al.*, 2019a; Ferreira *et al.*, 2022; Mammola *et al.*, 2022) principalmente em regiões de carste/pseudocarste, onde ambientes cavernícolas são ainda desconhecidos.

A legislação brasileira exige que sejam apresentados relatórios de impacto ambiental para o desenvolvimento de empreendimentos e/

*of biodiversity (Poulson & White, 1969; Mammola, 2019), religious temples (Price & Travassos, 2016); a source of archaeological records and remains (Damm & Young, 2013; Barra, 2020), paleontological (Burney *et al.*, 2022), anthropological (Détroit *et al.*, 2019), paleoenvironmental (Novello *et al.*, 2017; Cruz & Piló, 2019), source of ecosystem services (Mammola *et al.*, 2019a), all due to the complexity of the erosion process and the great temporal constancy of caves. In addition, they are also used as a source of information on human health (Riddle *et al.*, 2018; Yoshizawa *et al.*, 2018), as well as sites for tourism, sports and recreation.*

*It is estimated that there are a large number of caves that are still unknown (Auler & Pilo, 2011; Jansen *et al.*, 2012; CECAV, 2022a). Part of this problem has recently been called the Racovitzan shortfall, in honor of the naturalist Emil Racoviță (Ficetola *et al.*, 2019). It refers specifically to the uneven knowledge about the spatial cave distribution, which consequently also affects their conservation (Ficetola *et al.*, 2019; Mammola *et al.*, 2019a). In that context, urbanization, landscape fragmentation, pollution and mineral extraction have stood out as tensions intensifying factors in areas where caves occur. This can generate irreversible impacts on these landscapes, associated ecosystems and local ecosystem services (Ferreira *et al.*, 2018; Mammola *et al.*, 2019a; Ferreira *et al.*, 2022; Mammola *et al.*, 2022), especially in karst/pseudokarst regions, where cave environments are still unknown.*

Brazilian legislation requires the submission of environmental impact reports for the development of projects and/or activities that may have an impact on natural areas (BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022b). In places with a high potential for caves (karst/pseudokarst), or in regions where there are known caves, a speleological prospection activity is required for the licensing in order to map the presence or

ou atividades que possam causar impactos em áreas naturais (BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022b). Para o licenciamento em locais com um grande potencial de ocorrência de cavernas (carste/pseudocarste), ou em regiões onde se têm cavernas conhecidas, é necessária uma atividade de prospecção espeleológica com a finalidade de mapear a presença ou não de novas cavernas na região. Em caso positivo, são realizados estudos multidisciplinares (ex., biológicos, geológicos e arqueológicos) para identificação dos níveis de relevância das cavidades (baixo, médio, alto e máximo), delimitação de áreas de influência e medidas de compensação ambiental, seguindo a legislação vigente acerca do patrimônio espeleológico brasileiro (Cruz & Piló, 2019; CECAV, 2022b; Sion, 2022). Os estudos em ambientes cavernícolas têm alimentado um banco de dados online e acessível sobre as ocorrências conhecidas de cavernas em todo território nacional desde o ano de 2004, conforme exige a legislação brasileira (BRASIL, 2022c), no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE). Esse cadastro também engloba dados oriundos da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), literatura científica e levantamentos realizados pela equipe técnica do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) (CECAV 2022c).

Algumas regiões geográficas foram mais exploradas (amostradas) e, em função disso, possuem maior conhecimento sobre ocorrência de cavernas. Em outras palavras, isso resulta em um conhecimento denominado de enviesado ou tendencioso. As demandas ligadas ao desenvolvimento socioeconômico (ex., construção de hidrelétricas, estradas, ferrovias e atividades de mineração), e a maior acessibilidade dessas regiões (ex., proximi-

absence of new caves. If caves are found, multidisciplinary studies are carried out (e.g. biological, geological and archaeological) to identify the caves relevance levels (low, medium, high and maximum). The studies delimit areas of influence and environmental compensation measures, in accordance with current Brazilian speleological heritage legislation (Cruz & Piló, 2019; CECAV, 2022b; Sion, 2022). Studies on cave environments have been feeding an online and accessible database on known cave occurrences throughout the country since 2004 in the CANIE, as required by Brazilian legislation (BRASIL, 2022c). This register also includes data from the Brazilian Speleological Society (Sociedade Brasileira de Espeleologia SBE), scientific literature and surveys carried out by the National Center for Cave Research and Conservation (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas CECAV) technical team (CECAV 2022c).

Some geographical regions have been more explored (sampled) and there is more knowledge about the cave occurrence as a result. In other words, this results in what is known as biased knowledge. The demands linked to socio-economic development (e.g. construction of hydroelectric dams, roads, railroads and mining activities), and the greater accessibility of these regions (e.g. proximity to roads, rivers and urban centers) generate biases in the knowledge of the geographical cave distribution. In a similar way that also happens with biodiversity distribution data (Botts et al., 2011; Yang et al., 2014; Meyer et al., 2015; Oliveira et al., 2016; Daru et al., 2018; Zizka et al., 2020). Many of the oversampled regions are home to a high cave abundance considering that current legislation requires the registration of caves in CANIE, due to environmental licensing (Cruz & Piló, 2019; CECAV, 2022c). On the other hand, many caves may not yet have been disco-

dade de estradas, rios e centros urbanos) geram vieses no conhecimento da distribuição geográfica de cavernas, de forma similar ao que ocorre sobre os dados de distribuição da biodiversidade (Botts *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014; Meyer *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2016; Daru *et al.*, 2018; Zizka *et al.*, 2020). Considerando que a legislação atual exige o cadastramento das cavidades no CANIE, em virtude do licenciamento ambiental (Cruz & Piló, 2019; CECAV, 2022c), muitas das regiões super amostradas abrigam elevada abundância de cavernas. Por outro lado, inúmeras cavidades ainda podem não ter sido descobertas devido à baixa demanda socioeconômica e/ou as dificuldades de acessibilidade. Logo, compreender os fatores associados aos vieses no conhecimento acerca da distribuição geográfica de cavernas é de grande valia, pois ajudaria a evitar conclusões tendenciosas sobre a distribuição das cavernas, além de detectar locais super e sub amostrados para direcionar novas pesquisas espeleológicas e, assim, favorecer a conservação de ambientes subterrâneos.

Aqui, nós testamos se o conhecimento digital acessível sobre a distribuição geográfica das cavernas do Brasil é enviesado para múltiplos fatores de acessibilidade e infraestrutura. Nós hipotetizamos que: (i) existe maior conhecimento da ocorrência de cavernas em locais mais acessíveis, isto é, próximo a centros urbanos, estradas, rios navegáveis e ferrovias; e (ii) existe maior conhecimento da ocorrência de cavernas próximo a locais de atividades econômicas de infraestrutura, como minerações, hidrelétricas e linhas de transmissão. Para testar tais hipóteses, construímos um modelo bayesiano que associa os dados de ocorrência de cavernas disponíveis no Cadastro Nacional de Informações Espeleo-

vered due to low socioeconomic demand and/or accessibility difficulties. Therefore, understanding the factors associated with biases in the geographical cave distribution knowledge is of great value. This would help to avoid biased conclusions about the cave distribution, as well as detecting over-and under-sampled sites to direct new speleological research and thus favor the conservation of underground environments.

In this study, it was tested whether accessible digital knowledge about the geographic Brazilian caves distribution is biased towards multiple factors of accessibility and infrastructure. Two hypothesis were created: (i) there is greater knowledge of the occurrence of caves in more accessible locations, i.e. near urban centers, roads, navigable rivers and railroads; and (ii) there is greater knowledge of the occurrence of caves near locations of economic infrastructure activities, such as mining, hydroelectric plants and transmission lines. To test these hypotheses, a Bayesian model that associates the cave occurrence data available in the Speleological Information National Register (CANIE) with potential accessibility and infrastructure factors responsible for the formation of biases in cave discovery was built.

lógicas (CANIE) com potenciais fatores de acessibilidade e infraestrutura responsáveis pela formação de vieses na descoberta de cavernas.

METODOLOGIA

Compilação dos Dados de Cavernas e Área de Estudo

Para caracterizar o conhecimento atual da distribuição geográfica das cavernas no Brasil (nossa variável resposta), nós construímos um banco de dados baseado nos registros de cavidades do *Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas* (CANIE), totalizando 23.117 registros de cavernas conhecidas (CECAV, 2022c) (Figura 1a). Para representar nossa área de estudo (limite de ocorrência de locais com possibilidade de ocorrência de caverna), nós utilizamos o *Mapa de Áreas de Ocorrências de Cavernas no Brasil*, representando diferentes tipos de rochas potenciais onde pode haver cavidades subterrâneas naturais (CECAV, 2022d). Nesse sentido, filtramos somente as cavidades que estavam inseridas dentro das áreas de ocorrência de cavernas, totalizando assim 22.159 registros (Figura 1b).

Não levamos em consideração a potencialidade de ocorrência das cavernas, uma vez que o material mais abrangente e atualizado para acessar essas informações (*Mapa de Áreas de Ocorrências de Cavernas no Brasil*) apresenta uma resolução espacial grosseira para os padrões atuais (Amani *et al.*, 2020), estando na escala de: 1:7.000.000. No entanto, ficaríamos satisfeitos em ajustar nossa abordagem em estudos futuros, especialmente considerando que o ICMBio/Cecav tem atualizado sua base de dados periodicamente.

METHODOLOGY

Cave and Study Area Data Compilation

A database based on the cave records in the Speleological Information National Register (Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE), totaling 23,117 known cave records (CECAV, 2022c) (Figure 1a) was built to characterize the current knowledge of the geographical cave distribution in Brazil (the response variable). The Map of Cave Occurrence Areas in Brazil was used to represent the study area (limit of occurrence of sites with the possibility of cave occurrence). It represents different types of potential rocks where there may be natural underground caves (CECAV, 2022d). In that regard, only the caves that were within the areas of cave occurrence were filtered out, thus totaling 22,159 records (Figure 1b).

*The potential cave occurrence was not taken into account, since the most comprehensive and up-to-date material for accessing this information (Map of Cave Occurrence Areas in Brazil) has a coarse spatial resolution by today's standards (Amani *et al.*, 2020), being at 1:7.000.000 scale. However, the approach would be happily adjusted in future studies, especially considering that ICMBio/CECAV has been periodically updating its database.*

Fatores de Acessibilidade e Infraestrutura

Para representar os fatores de acessibilidade com potencial relação com o viés no conhecimento da distribuição geográfica de cavernas no Brasil (1ª hipótese), nós utilizamos as informações de: (i) distância de centros urbanos (km); (ii) distância de estradas (rodovias federais, estaduais e outras estradas) (km); (iii) distância de ferrovias (km); (iv) e distância de rios navegáveis (km) (hidrovias, rios de médio porte e lagos). Todos os fatores estavam inicialmente disponíveis no formato de camadas 'shapefile' (EMBRAPA, 2022; Map Biomas, 2022a; Map Biomas, 2022b; Natural Earth, 2022, respectivamente) (Figura 1c) que foram base para a construção de um arquivo 'raster' que continham nos 'grids' os valores de distância euclidiana em metros.

No caso dos fatores de infraestrutura potencialmente relacionados ao viés geográfico da distribuição de cavernas brasileiras (2ª hipótese), nós utilizamos os dados da plataforma Map Biomas, também em formato 'shapefile' *a priori*, sendo estes: (v) minas de produtos metálicos (Ferro, Cobre, Alumínio, Ouro entre outros); (vi) minas de produtos energéticos (carvão mineral, Urânio, gás Natural e petróleo); (vii) minas de outros produtos (Calcário, Fósforo, Grafita, Silício entre outros); (viii) usinas hidrelétricas; (ix) pequenas centrais hidrelétricas (PCHs); (x) linhas de transmissão (Map Biomas, 2022c, Map Biomas, 2022d, Map Biomas, 2022e, Map Biomas, 2022f, Map Biomas, 2022g, Map Biomas, 2022h, respectivamente) (Figura 1c).

Vale destacar que as informações disponíveis no MapBiomas representam um compilado de informações de diferentes órgãos, como IBGE,

Accessibility and Infrastructure Factors

Information on: (i) distance from urban centers (km); (ii) distance from roads (federal highways, state highways and other roads) (km); (iii) distance from railroads (km); (iv) and distance from navigable rivers (km) (waterways, medium-sized rivers and lakes) was used to represent the accessibility factors with a potential relationship to bias in the knowledge of the geographic cave distribution in Brazil (1st hypothesis). All the factors were initially available in shapefile format (EMBRAPA, 2022; Map Biomas, 2022a; Map Biomas, 2022b; Natural Earth, 2022, respectively) (Figure 1c), which were the basis for the construction of a raster file containing the Euclidean distance values in meters in the grids.

Data from the Map Biomas platform was used regarding the infrastructure factors potentially related to the geographical bias of the Brazilian cave distribution (2nd hypothesis). This data was also in 'shapefile' format, being: (v) metallic products mines (Iron, Copper, Aluminum, Gold, among others); (vi) energy products mines (Coal, Uranium, Natural Gas and Oil); (vii) mines of other products (Limestone, Phosphorus, Graphite, Silicon, among others); (viii) hydroelectric plants; (ix) small hydroelectric plants (SHPs); (x) transmission lines (Map Biomas, 2022c, Map Biomas, 2022d, Map Biomas, 2022e, Map Biomas, 2022f, Map Biomas, 2022g, Map Biomas, 2022h, respectively) (Figure 1c).

It is worth noting that the information available on MapBiomas represents a compilation of information from different organizations, such as IBGE, ANTT, EPE, ONS, MME, ANAC, interview data, bibliographic searches and reliable internet sources. In addition, the information has been updated from 1985 to August 2021. More details can be

ANTT, EPE, ONS, MME, ANAC, dados de entrevistas, buscas bibliográficas e fontes confiáveis da internet. Além disso, as informações foram atualizadas de 1985 até agosto de 2021. Mais detalhes podem ser obtidos no *Glossário das Camadas de Infraestrutura do MapBiomias* (disponível em: <<https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura>>).

Análise de Dados

Nós utilizamos a análise de estrutura bayesiana proposta por Zizka *et al.* (2020) que comparam a distribuição estatística de distância observada em um conjunto de dados (dados de ocorrência de cavernas) com uma distribuição esperada simulada por amostragens aleatórias (Zizka *et al.*, 2020) (Figura 1d). Primeiramente, avaliamos o peso posterior (a força do viés) gerado pela presença de cada fator selecionado dentro da nossa área de estudo (Figura 1e). Seguidamente, avaliamos a relação da taxa de amostragem (*n* de cavernas conhecidas por 'grid') em função da distância (km) para cada fator de viés dentro das áreas de ocorrência de cavernas, de acordo com o modelo bayesiano construído (Figura 1f). Além disso, realizamos projeções espaciais dos efeitos combinados entre os fatores de vieses (acessibilidade e infraestrutura) e as taxas de amostragem estimadas para os registros de ocorrência de cavernas (Figura 1g), medindo o efeito a partir do fator de maior viés, combinado em ordem decrescente com os demais (Figura S1).

Para construção dos modelos e mapas, utilizamos as áreas de ocorrência de caverna como limite de corte para todos os fatores, conforme descrito anteriormente, na resolução 'raster' de ~5 x 5 km (0.05°). Resoluções mais finas foram desconsideradas em função do tempo

found in the MapBiomias Infrastructure Layers Glossary (available at: <<https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura>>).

Data Analysis

*The Bayesian structure analysis proposed by Zizka et al. (2020) was used in this study. This analysis compares the statistical distribution of distance observed in a data set (cave occurrence data) with an expected distribution simulated by random sampling (Zizka et al., 2020) (Figure 1d). First, the posterior weight (the bias strength) generated by the presence of each selected factor within study area was evaluated (Figure 1e). Next, the relationship between the sampling rate (*n* of known caves per grid) as a function of distance (km) for each bias factor within the cave occurrence areas was evaluated, according to the Bayesian model constructed (Figure 1f). In addition, spatial projections of the combined effects between the bias factors (accessibility and infrastructure) and the estimated sampling rates for cave occurrence records were carried out (Figure 1g), measuring the effect from the factor with the greatest bias, combined in descending order with the others (Figure S1).*

The areas of cave occurrence were used as the cut-off point for all the factors, as described above, at a raster resolution of ~5 x 5 km (0.05°) to build the models and maps. Finer resolutions were disregarded due to the extremely high computing time and memory requirements (Zizka et al., 2020). The shapefiles and cave occurrence data were

de computação e os requisitos de memória serem extremamente elevados (Zizka *et al.*, 2020). Os 'shapefiles' e os dados de ocorrências de cavernas foram convertidos para o sistema de coordenadas geográficas com datum WGS84 antes das filtragens e análises. Todas as análises foram realizadas em ambiente R (R Development Core Team, 2022). Os modelos bayesianos de vieses de distribuição das cavernas foram construídos usando o pacote 'sambias' (Zizka *et al.*, 2020). Os mapas foram feitos através dos softwares QGIS 3.4 (Free, 2022) e Inkscape (Inkscape Team, 2022).

converted to the WGS84 geographic coordinate system before filtering and analysis. All analyses were carried out in the R environment (R Development Core Team, 2022). Bayesian models of cave distribution biases were built using the 'sambias' package (Zizka et al., 2020). The maps were made using QGIS 3.4 (Free, 2022) and Inkscape (Inkscape Team, 2022) software.

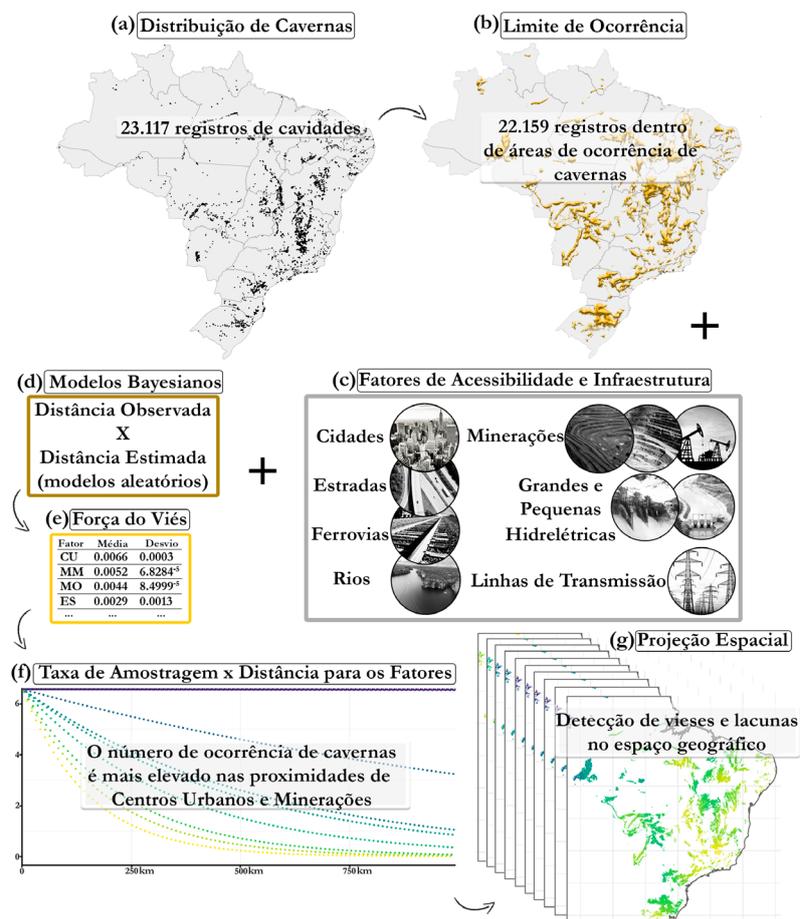


Figura 1 – Esboço resumido das etapas metodológicas e analíticas para testar a distribuição do conhecimento digital acessível de cavernas do Brasil em função de diferentes fatores de vieses de acessibilidade e infraestrutura. O primeiro passo consistiu em compilar os dados de registros de cavidades brasileiras presentes no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) (a). Em seguida, filtramos somente os registros presentes dentro das Áreas de Ocorrência de Cavernas (b). A terceira etapa consistiu em associar os locais com ocorrência de cavernas (b), aos fatores de infraestrutura e acessibilidade (c) para construção dos modelos bayesianos baseados em distância (d). Em seguida medimos a força do viés de cada fator analisado (e), a taxa de amostragem (nº de cavernas) em relação a distância (km) para os fatores (f), e projetamos o efeito dos vieses de ocorrência de cavernas combinados no espaço geográfico (g).

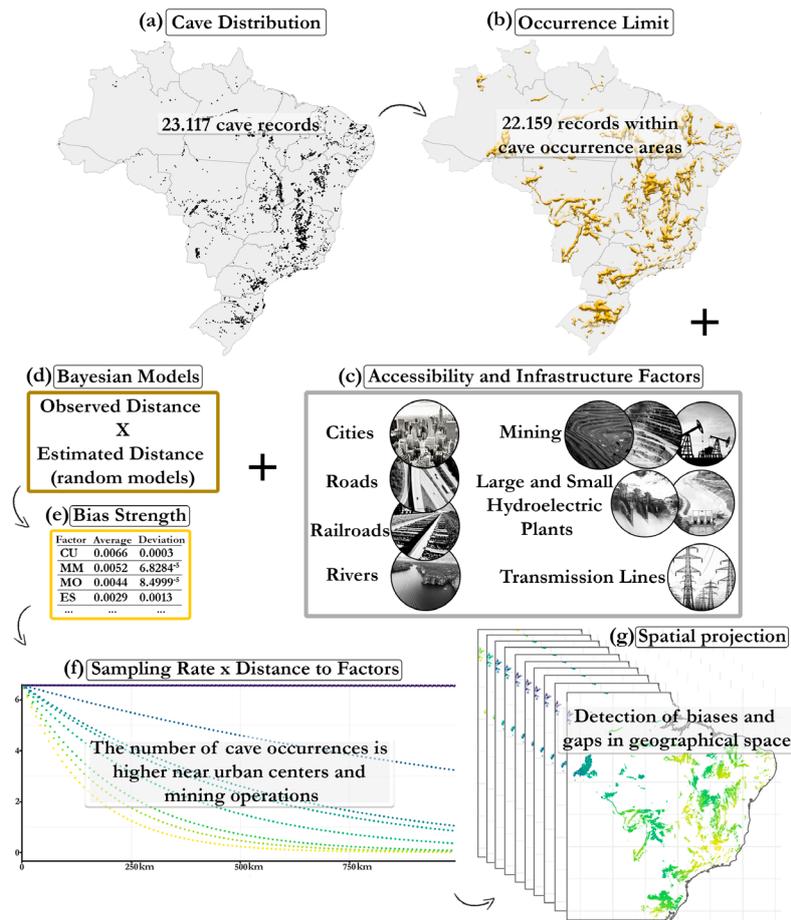


Figure 1 – Summary outline of the methodological and analytical steps to test the distribution of accessible digital knowledge of Brazilian caves as a function of different accessibility and infrastructure bias factors. The first step consisted of compiling the data on Brazilian cave records in the CANIE (a). Next, only the records present within the Cave Occurrence Areas were filtered (b). The third stage consisted of associating the cave occurrence sites (b) with the infrastructure and accessibility factors (c) in order to build Bayesian distance-based models (d). Then the bias strength of each factor analyzed was measured (e), the sampling rate (number of caves) in relation to distance (km) for the factors (f), and projected the effect of the combined cave occurrence biases in geographical space (g).

RESULTADOS

Nossos modelos mostraram um elevado peso posterior para o fator de acessibilidade representado pela distância de centros urbanos (CU) e para os fatores de infraestrutura da presença de minas de produtos metálicos (MM) e minas de outros produtos (MO), o que indica um forte efeito de viés dessas variáveis na distribuição das cavernas conhecidas no Brasil. Um peso posterior moderado foi observado para o fator de acessibilidade de distância de estradas (ES), indicando um viés moderado para a distribuição

RESULTS

Models showed a high posterior weight for the accessibility factor represented by distance from urban centers (UC) and for the infrastructure factors of the presence of metal product mines (MM) and other product mines (OM), indicating a strong bias effect of these variables on the distribution of known caves in Brazil. A moderate posterior weight was observed for the accessibility factor of distance from roads (RD), indicating a moderate bias for the distribution of caves. However, there were many outliers which reduced the strength of

de cavernas. Contudo, houve muitos valores 'outliers' que diminuíram a força de viés dessa variável (Figura 2a). Já os fatores de acessibilidade e infraestrutura presença de ferrovias (FE), linhas de transmissão (LT) e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) exibiram um peso posterior reduzido, ou seja, um efeito de viés fraco sobre a distribuição de cavernas. A presença de rios navegáveis (RN), usinas hidrelétricas (UH) e minas de produtos energéticos (ME) não foram variáveis relevantes sobre a distribuição conhecidas de cavernas brasileiras (Figura 2a).

A taxa de amostragem (nº ocorrência de cavernas por 'grid') se mostrou enviesada para locais próximos de centros urbanos (CU), de minas de produtos metálicos (MM) e de minas de outros produtos (MO) (Figura 2b). Um viés moderado foi evidente para proximidade de estradas (ES), ferrovias (FE) e linhas de transmissão (LT). Já a proximidade de pequenas centrais hidrelétricas (PCH) exibiu um viés fraco. A proximidade de rios navegáveis (RN), usinas hidrelétricas (UH) e minas de produtos energéticos (ME) não apresentaram efeito relevante sob o número de ocorrência de cavidades (Figura 2b).

A análise da projeção espacial entre os três fatores de maior viés (centros urbanos + minas de produtos metálicos + minas de outros produtos) e o efeito sob o número de ocorrência de cavernas mostrou regiões super amostradas (enviesadas) e sub amostradas (lacunas Racovitzanas) para o Brasil (Figura 3). Existe um viés espacial acentuado de distribuição de cavernas principalmente para as regiões do Quadrilátero Ferrífero, Lagoa Santa, parte mais ao sul do grupo Bambuí, e também para formação Vazante, todas inseridas no estado do Minas Gerais (Figura 3). Algumas áreas menores e com

this variable's bias (Figure 2a). On the other hand, the accessibility and infrastructure factors like presence of railroads (RR), transmission lines (TL) and small hydroelectric plants (SHP) exhibited a reduced posterior weight, i.e. a weak bias effect on the distribution of caves. The presence of navigable rivers (NR), hydroelectric power plants (HPP) and energy product mines (EM) were not relevant variables on the known distribution of Brazilian caves (Figure 2a).

The sampling rate (nº of cave occurrences per grid) proved to be biased for sites close to urban centers (UC), metal product mines (MM) and other product mines (OM) (Figure 2b). A moderate bias was evident for proximity to roads (RD), railroads (RR) and transmission lines (TL). Proximity to small hydroelectric plants (SHP) exhibited a weak bias. The proximity of navigable rivers (NR), hydroelectric power plants (HPP) and energy product mines (EM) had no relevant effect on the number of caves (Figure 2b).

The analysis of the spatial projection between the three factors with the greatest bias (urban centers + metal product mines + other product mines) and the effect on the number of cave occurrences showed over-sampled (biased) and under-sampled (Racovitzan shortfalls) regions for Brazil (Figure 3). There is a marked spatial bias in the distribution of caves, mainly in the regions of the Iron Quadrangle, Lagoa Santa, the southernmost part of the Bambuí group, and also in the Vazante formation, all within the state of Minas Gerais (Figure 3). Some smaller areas with a large bias are also evident near the borders between Minas Gerais and the states of São Paulo and Rio de Janeiro. The states of São Paulo, Rio de Janeiro, Sergipe and the Federal District exhibited a moderate distribution bias in practically all of their cave occurrence areas. Finally, the

grande viés também são evidentes próximas às divisas entre Minas Gerais e os estados de São Paulo e do Rio de Janeiro. Os estados de São Paulo, Distrito Federal, Rio de Janeiro e Sergipe exibiram um viés moderado de distribuição em praticamente todas as suas áreas de ocorrência de cavernas. Por fim, os estados do Rio Grande do Sul, Goiás, Pará, Bahia e Piauí exibiram algumas regiões com um acentuado viés, contudo também apresentam áreas subamostradas. Já os demais estados brasileiros apresentaram algumas poucas regiões com vieses variando de moderado a fraco. Dentre as regiões subamostradas (com lacunas de distribuição de cavernas) se destacaram: Amazonas, Roraima, parte norte e sul do Pará, e parte central de Tocantins (região Norte do Brasil); sudeste de Mato Grosso, parte norte do Mato Grosso do Sul, e leste de Goiás (região Centro-Oeste do Brasil); Maranhão, leste e norte do Piauí, e leste da Bahia (região Nordeste do Brasil).

states of Rio Grande do Sul, Goiás, Pará, Bahia and Piauí showed some regions with a pronounced bias, although they also have under-sampled areas. The other Brazilian states had a few regions with moderate to weak biases. Among the under-sampled regions (with shortfalls in cave distribution), the following stand out: Amazonas, Roraima, the northern and southern parts of Pará, and the central part of Tocantins (northern Brazil); the southeast of Mato Grosso, the northern part of Mato Grosso do Sul, and the east of Goiás (central-west Brazil); Maranhão, the east and north of Piauí, and the east of Bahia (northeast Brazil).

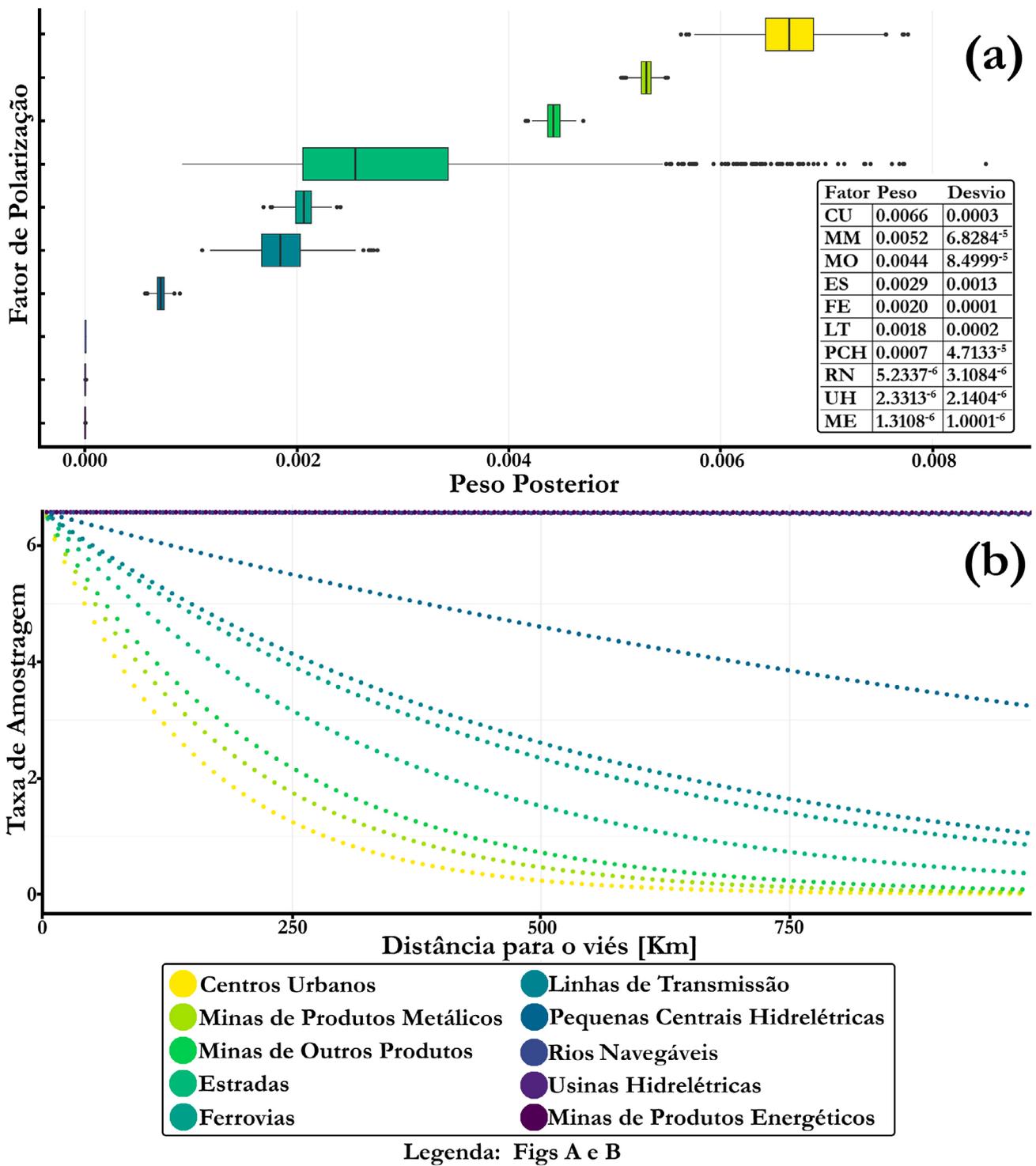


Figura 2 – Resultados dos modelos bayesianos de distância testando a força do viés de diferentes fatores de acessibilidade e infraestrutura sob a ocorrência de cavernas (a) e a relação da taxa de amostragem (nº de ocorrência de cavernas por *grid*) em função da distância para cada fator de viés testado no presente estudo (b). CU: centros urbanos; MM: minas de produtos metálicos; MO: minas de outros produtos; ES: estradas; FE: ferrovias; LT: linhas de transmissão; PCH: pequenas centrais hidrelétricas; RN: rios navegáveis; UH: usinas hidrelétricas; ME: minas de produtos energéticos.

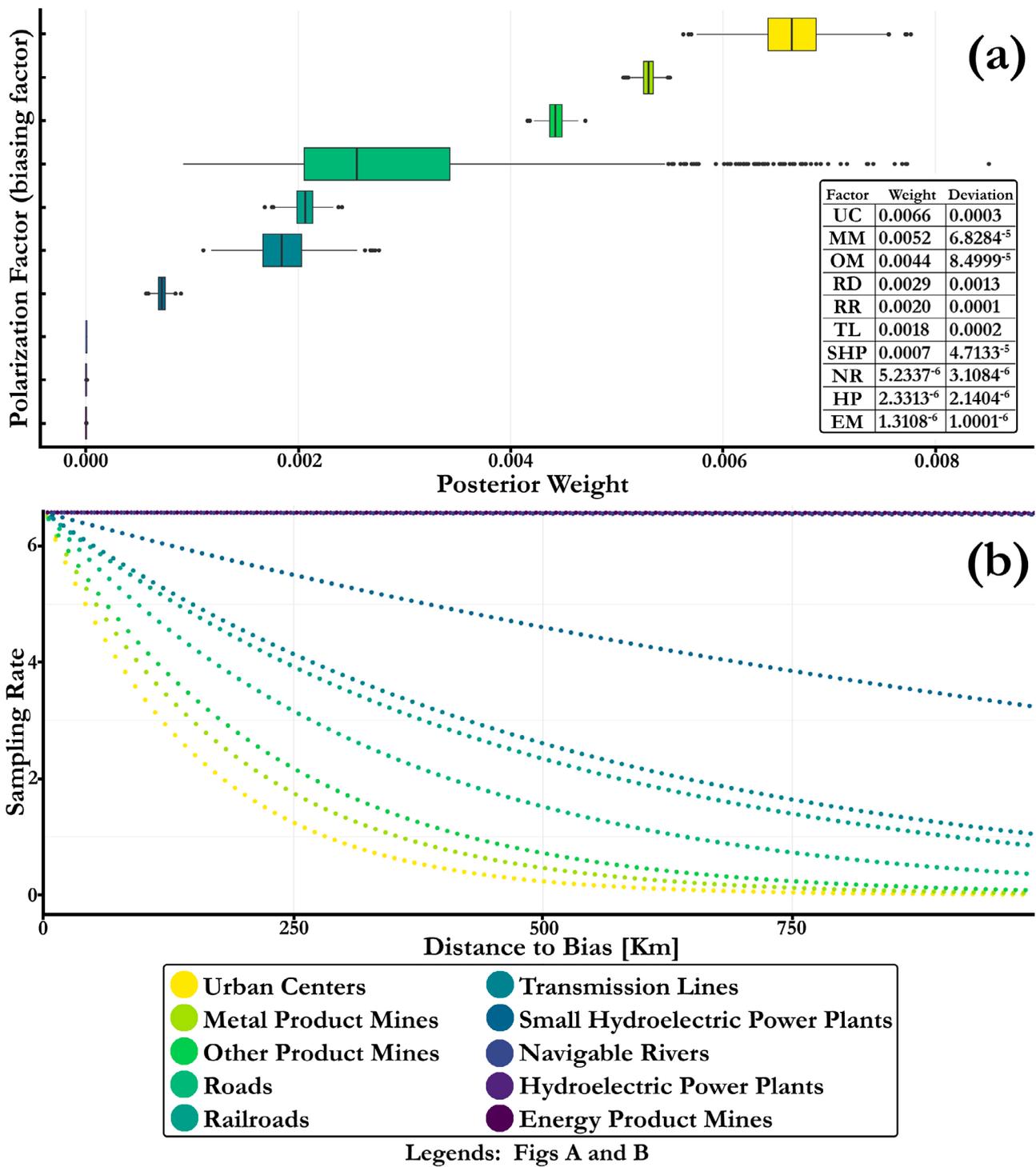


Figure 2 – Results of Bayesian distance models testing the bias strength of different accessibility and infrastructure factors on the cave occurrence (a) and the relationship of the sampling rate (number of caves per grid) as a function of distance for each bias factor tested in this study (b). UC: urban centers; MM: metal product mines; OM: other product mines; RD: roads; RR: railroads; TL: transmission lines; SHP: small hydroelectric plants; NR: navigable rivers; HP: hydroelectric plants; EM: energy product mines.

MAPA DE VIESES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAVERNAS DO BRASIL

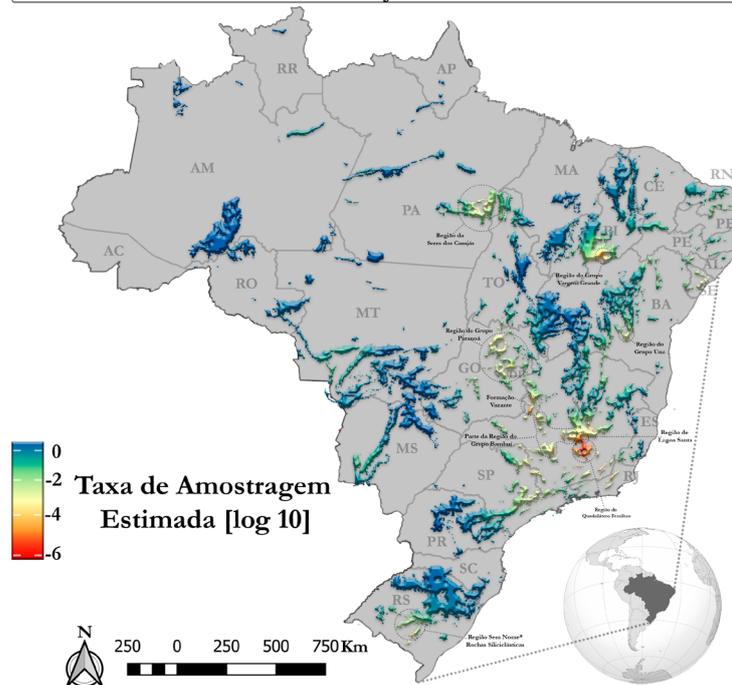


Figura 3 – Projeção espacial do viés de distribuição de cavernas do Brasil em função dos fatores de maior efeito (Centros Urbanos, Minas de Produtos Metálicos e Minas de Outros Produtos) dentro das Áreas de Ocorrência de Caverna. As cores mostram a projeção das taxas de amostragem transformadas em log10 conforme os modelos construídos. Regiões destacadas em vermelho indicam superamostragens (vieses) e as em azul, subamostragens (lacunas Racovitzanas).

BRAZIL'S CAVE BIAS DISTRIBUTION MAP

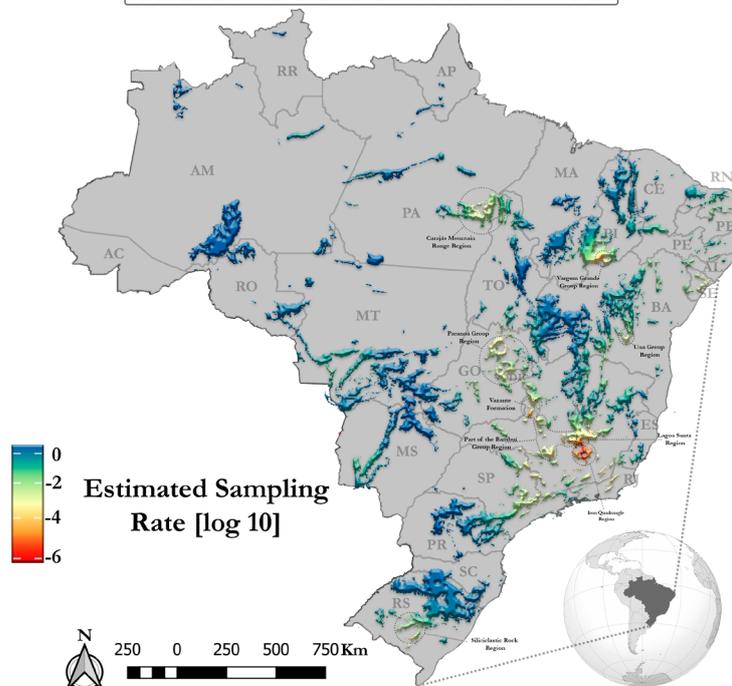


Figure 3 – Spatial projection of the Brazilian caves bias distribution as a function of the factors with the greatest effect (Urban Centers, Metal Product Mines and Other Product Mines) within the Cave Occurrence Areas. The colors show the sampling rates projection transformed into log10 according to the models constructed. Regions highlighted in red indicate oversampling (bias) and those in blue, undersampling (Racovitzan shortfalls).

DISCUSSÃO

Nossos modelos comprovaram nossas duas hipóteses de que fatores socioeconômicos e de acessibilidade são responsáveis por enviesar o conhecimento de distribuição geográfica de cavernas do Brasil. Este estudo é o primeiro a evidenciar que o conhecimento da distribuição geográfica de cavernas é enviesado para locais próximos a centros urbanos (fator de acessibilidade) e pela presença de mineração de produtos metálicos e mineração de outros produtos (fatores de infraestrutura). As regiões espacialmente mais enviesadas (super amostradas) se concentram principalmente dentro dos estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pará e Piauí, enquanto alguns estados como Amazônia, Roraima, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná e Maranhão ainda são extremamente sub explorados, ou seja, apresentam lacunas de amostragem de cavernas (lacunas Racovittzanas).

As Raízes dos Vieses de Distribuição Geográfica de Cavernas do Brasil

O forte viés para a super amostragem de cavernas, aqui representado pela distância de centros urbanos, pode ser explicado por questões logísticas, de expansão urbana e histórico de desenvolvimento dos empreendimentos. A proximidade de centros urbanos oferece uma logística mais fácil de exploração, como a presença de uma rede de estradas e vias de acesso que foi um fator moderado de viés. A expansão urbana atual deve estar em conformidade com o licenciamento ambiental brasileiro (BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022b), o que demanda o conhecimento e cadastramento das cavi-

DISCUSSION

The two hypotheses that socioeconomic and accessibility factors are responsible for biasing the knowledge of the geographical cave distribution in Brazil were proven by the models. This study is the first to show that knowledge of the geographical cave distribution is biased towards locations close to urban centers (accessibility factor) and by the presence of mining of metallic and other products (infrastructure factors). The most spatially biased regions (over-sampled) are concentrated mainly within the states of Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pará and Piauí, while some states such as Amazônia, Roraima, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná and Maranhão are still extremely under-explored. This means, they have cave sampling gaps (Racovittzan shortfalls).

The Roots of Brazilian Cave Geographical Distribution Biases

The strong bias towards caves oversampling is represented in this work by the distance from urban centers. It can be explained by logistical issues, urban sprawl and the enterprises development history. Proximity to urban centers offers easier exploration logistics, such as the presence of a network of roads and access routes, which was a moderate bias factor. Current urban expansion must comply with Brazilian environmental licensing (BRASIL, 2022a; BRASIL, 2022b), which requires knowledge and registration of nearby underground caves. Historically, the main developments that have contributed over time to knowledge of the

dades subterrâneas nas proximidades. Historicamente, os principais empreendimentos que contribuíram ao longo do tempo para o conhecimento da distribuição de cavidades podem ter sido estabelecidos nas proximidades dos centros urbanos, uma relação que não foi explorada neste estudo.

Nesse sentido, locais não urbanizados podem representar áreas remotas e de difícil acesso, o que exigiria um maior tempo e gasto financeiro de exploração (Nelson *et al.*, 2019) para detecção de cavernas, e consequentemente um maior custo econômico e de esforço humano nas atividades de prospecção espeleológicas. Em especial, tal exploração é extremamente importante e tem sido realizada principalmente pelos grupos de espeleologia brasileiros, que em muitos casos podem não ter financiamento para esse tipo de estudo. No entanto, esse cenário tem se revertido lentamente ao longo dos últimos anos, com a abertura de editais visando apoio para prospecção espeleológica (ex., <https://www.cavernas.org.br/ampliando_rotas-edital_sbe_01_2023/>).

As minerações de produtos metálicos e mineração de outros produtos representam os fatores de infraestrutura que possivelmente estão mais ligados à descoberta de cavidades no Brasil, pois tais atividades dependem exclusivamente das principais paisagens onde os habitats cavernícolas estão inseridos (ex. rochas carbonáticas e ferríferas) (Jansen *et al.*, 2012). Isso explica nosso forte viés para esses fatores, e também prova que a descoberta de cavernas se dá principalmente em função de pressões econômicas que demandam licenciamento ambiental (Cruz & Piló, 2019), mas não em um investimento direto na espeleologia em todo território brasileiro (Escobar, 2021).

distribution of cavities may have been established near urban centers, a relationship that was not explored in this study.

*This way, non-urbanized sites can represent remote and difficult-to-access areas, which would require greater time and financial outlay for exploration (Nelson *et al.*, 2019) to detect caves, and consequently a greater economic cost and human effort in speleological prospecting activities. In particular, such exploration is extremely important and has been carried out mainly by Brazilian caving groups, which in many cases may not have funding for this type of study. However, this scenario has slowly been reversed over the last few years, with the opening of calls for proposals aimed at supporting speleological prospecting (e.g. <https://www.cavernas.org.br/ampliando_rotas-edital_sbe_01_2023/>).*

*The mining of metallic and other products represent the infrastructure factors that are possibly most linked to the discovery of caves in Brazil, as these activities depend exclusively on the main landscapes where cave habitats are located (e.g. carbonate and ferriferous rocks) (Jansen *et al.*, 2012). This explains the strong bias towards these factors, and proves that cave discovery is mainly due to economic pressures that require environmental licensing (Cruz & Piló, 2019), but not direct investment in speleology throughout Brazil (Escobar, 2021).*

The Racovitzan shortfall (under-sampling) in distribution in Brazil's North and Midwest regions could easily be explained by the fact that these areas are remote, less urbanized and difficult to access (IBGE, 2022). However, it is possible that the registration of many caves was not carried out in the past, since speleological studies evolved mainly after Federal Decree No. 6640/2008 and Normative Instruction No. 2/2009/MMA, due to the greater obligation and scope of environmental

As lacunas Racovitzanas (sub amostragem) de distribuição nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, poderiam ser facilmente explicadas devido tais áreas serem remotas, menos urbanizadas e de difícil acesso (IBGE, 2022). No entanto, é possível que o cadastramento de muitas cavidades não tenha sido realizado no passado, uma vez que os estudos espeleológicos evoluíram principalmente após o Decreto Federal nº 6640/2008, juntamente com a Instrução Normativa nº 2/2009/MMA, devido à maior obrigatoriedade e abrangência do licenciamento ambiental em território brasileiro. Além disso, essas lacunas podem refletir áreas que tem tido um menor controle nos processos de licenciamento ambientais, baixa fiscalização, ou até mesmo a ausência da prática de licenciamentos espeleológicos em áreas com cavidades.

Como demonstrado aqui, a maioria das cavernas conhecidas no Brasil se encontram próximas aos centros urbanos e/ou atividades de mineração (exceto minerações ligadas à Carvão Mineral, Urânio, Gás natural e Petróleo) e, por isso, esses ambientes e ecossistemas estão expostos há uma série de impactos ambientais desafiadores, tais como: alteração e perda dos habitats de superfície (Trajano, 2000; Souza-Silva *et al.*, 2015; Mammola *et al.*, 2022), super exploração ou o despejo de reservatórios nos sistemas de água subterrânea das cavidades (Sanchez & Lobo, 2018), contaminação solo e/ou das águas subterrâneas por poluentes (Reboleira *et al.*, 2013; Souza-Silva *et al.*, 2015; Sugai *et al.* 2015; Sanchez & Lobo 2018), turismo (Moldovan *et al.*, 2013; Mammola *et al.*, 2022) e introdução de espécies não nativas e patógenos (Howarth *et al.*, 2007; Wynne *et al.*, 2014; Mammola *et al.*, 2022). Além disso, à medida que as lavras de minerações ou centros

licensing in Brazilian territory. In addition, these gaps may reflect areas that have had less control in environmental licensing processes, low inspection, or even the absence of speleological licensing in areas with caves.

*As demonstrated here, the majority of known caves in Brazil are located close to urban centers and/or mining activities (except for mines related to coal, uranium, natural gas and oil). As a result, these environments and ecosystems are exposed to a series of challenging environmental impacts, such as: alteration and loss of surface habitats (Trajano, 2000; Souza-Silva *et al.*, 2015; Mammola *et al.*, 2022), overexploitation or the dumping of reservoirs into the caves' groundwater systems (Sanchez & Lobo, 2018), soil and/or groundwater contamination by pollutants (Reboleira *et al.*, 2013; Souza-Silva *et al.*, 2015; Sugai *et al.* 2015; Sanchez & Lobo 2018), tourism (Moldovan *et al.*, 2013; Mammola *et al.*, 2022) and the introduction of non-native species and pathogens (Howarth *et al.*, 2007; Wynne *et al.*, 2014; Mammola *et al.*, 2022). In addition, as mining operations or urban centers expand, there is a risk of suppression of these low, medium and highly relevant caves. Therefore, discussing how the geographical bias of cave knowledge can be related to more effective conservation strategies and the mitigation of environmental impacts is extremely relevant for the maintenance of cave environments and their ecosystem services (water safety, for example) in Brazil.*

*With the available evidence, the presence of numerous regions that are extremely under-explored (gaps) or even neglected were highlighted, which represents the Racovitzan deficit (Ficetola *et al.*, 2019) within the space of cave occurrence areas in Brazilian territory. Such sites are possibly less studied and distant from stressors, such as the presence of urban centers and mining, or, on the*

urbanos venham a se expandir, há o risco de supressão dessas cavidades de categoria baixa, média e alta relevância. Logo, discutir como o viés geográfico do conhecimento de cavernas pode estar relacionado com estratégias de conservação mais efetivas, e mitigação de impactos ambientais, é extremamente relevante para a manutenção dos ambientes cavernícolas, e seus serviços ecossistêmicos (segurança hídrica, por exemplo) no Brasil.

Com as evidências disponíveis, nós destacamos a presença de inúmeras regiões extremamente sub exploradas (lacunas) ou até mesmo negligenciadas, o que representa o déficit Racovitzan (Ficetola *et al.*, 2019) dentro do espaço das áreas de ocorrência de cavernas em território brasileiro. Tais locais são possivelmente menos estudados e distantes de fatores estressores, como a presença de centros urbanos e minerações, ou, por outro lado, estão sendo extremamente negligenciados, o que abre espaço para iniciativas que visem subsidiar a proteção e fiscalização do patrimônio espeleológico nessas áreas. Desta forma, essas regiões são prioritárias para a conservação da biodiversidade, da geologia e dos serviços ecossistêmicos correlatos. Além disso, muitas destas áreas podem já estar ameaçadas pela expansão geográfica das atividades de mineração que vêm se expandindo para regiões de difícil acesso nos últimos anos (Ferreira *et al.*, 2014; Sugai *et al.*, 2015).

other hand, are being extremely neglected, which opens up space for initiatives aimed at subsidizing the protection and monitoring of speleological heritage in these areas. As such, these regions are a priority for the conservation of biodiversity, geology and related ecosystem services. In addition, many of these areas may already be threatened by the geographical expansion of mining activities, which have been expanding into difficult to access regions in recent years (Ferreira et al., 2014; Sugai et al., 2015).

Perspectivas Futuras

Destacamos que mapear e gerir os dados de distribuição de cavernas brasileiras pode representar um dos dados primários para sua conservação (Wynne *et al.*, 2021). Nesse sentido, a plataforma do CANIE é um ótimo exemplo prático de como o conhecimento sobre a distribuição geográfica de cavernas pode ser integrado e disponibilizado para a sociedade (CECAV 2022c). O CANIE tem contribuído principalmente com o acréscimo (descoberta) de cavidades ao longo dos anos, mas também contém informações extremamente relevantes sobre o número de cavernas que sofreram supressão total ou alteração parcial não mitigável (~400), o que também pode auxiliar na compreensão dos vieses e lacunas ao longo do tempo. No entanto, acreditamos que tal plataforma ainda carece de certas atualizações e da total incorporação desse tipo de dado (destruição de cavidades) de maneira mais abrangente pelos órgãos ambientais, tendo em vista que as cavernas são um bem da União, como previsto pelo Art. 20 da Constituição de 1988.

Embora não tenhamos considerado as informações sobre a potencialidade de ocorrência de cavernas em diferentes litologias para a construção dos nossos modelos (CECAV, 2022a), mas sim como limite. Acreditamos fortemente que uma das soluções para mitigar os vieses de conhecimento discutidos aqui pode estar na tentativa de estabelecer uma nova predição robusta da possível quantidade de cavernas que podem ser encontradas em diferentes litologias em uma escala de estudo refinada (ex., grids de 0.5km x 0.5km ou menor). Se existem áreas com litologias que já foram bem prospectadas (ex.,

Future perspectives

It should be noted that mapping and managing the distribution data of Brazilian caves can represent one of the primary data points for their conservation (Wynne et al., 2021). In this regard, the CANIE platform is a great practical example of how knowledge about the geographical cave distribution can be integrated and made available to society (CECAV 2022c). CANIE has mainly contributed to the addition (discovery) of caves over the years, but it also contains extremely relevant information on the number of caves that have suffered total suppression or unmitigated partial alteration (~400), which can also help to understand biases and gaps over time. However, we believe that this platform still needs certain updates and the full incorporation of this type of data (destruction of caves) in a more comprehensive manner by environmental agencies, given that caves are a federal asset, as provided for in Article 20 of the 1988 Constitution.

Although the information on the potential cave occurrence in different lithologies was not considered for the construction of the models presented here (CECAV, 2022a), it was considered as a limit. We strongly believe that one of the solutions to mitigate the knowledge biases discussed here may lie in trying to establish a new robust prediction of the possible amount of caves that can be found in different lithologies at a refined study scale (e.g. grids of 0.5km x 0.5km or smaller). If there are areas with lithologies that have already been well prospected (e.g. limestone or canga outcrops), we could calibrate predictive mathematical models using these reference areas and apply them in the future to similar areas that have not been explored.

afloramentos de calcário ou de canga), poderíamos calibrar modelos matemáticos preditivos usando essas áreas de referência e aplicá-los em áreas similares que não foram exploradas no futuro.

Aqui, concluímos que a exploração econômica tem gerado um conhecimento enviesado acerca da distribuição de cavernas, o que pode estar ligado aos embates históricos entre nossa legislação de exploração vs. conservação (Sion, 2022). E tendo em vista a ausência de políticas conservacionistas para a proteção desses ambientes em larga escala (Mammola *et al.*, 2020), atualmente torna-se imprescindível que novas políticas sobre a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro considerem toda a paisagem espeleológica, seus vieses (locais mais bem estudados), lacunas Racovitzanas (locais menos estudados ou possivelmente negligenciados), e os processos socioeconômicos que implicam nestes, conforme aqui apresentados.

AGRADECIMENTOS

Somos gratos à equipe do Laboratório de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade (MacrEco) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) pelas valiosas discussões. RACS e NB agradecem principalmente a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de doutorado concedidas. TSS agradece a FAPEMAT (projeto FAPEMAT-PRO.000274/2023). Agradecemos à IABS/CECAV (edital 01/2023 - TCCE Vale 01/2022) pelo financiamento concedido e às plataformas que disponibilizaram os dados digitalmente acessíveis que permitiram a realização deste estudo: ICMBio/Cecav, MapBiomas, EMBRAPA e Natural Earth. RACS agradece, em particular, a Alex-

*Therefore, it is concluded that economic exploitation has generated biased knowledge about the cave distribution, which may be linked to the historical clashes between exploitation and conservation legislation (Sion, 2022). Furthermore, given the lack of conservation policies for the protection of these environments on a large scale (Mammola *et al.*, 2020), it is currently essential that new policies on the conservation of Brazil's speleological heritage consider the entire speleological landscape, its biases (better studied sites), Racovitzan shortfalls (less studied or possibly neglected sites), and the socio-economic processes that imply these.*

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank the Laboratory of Macroecology and Biodiversity Conservation's team (Laboratório de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade MacrEco) at the Federal University of Mato Grosso (Universidade Federal de Mato Grosso UFMT) for their valuable discussions. RACS and NB would especially like to thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES) for the doctoral scholarships granted. TSS thanks FAPEMAT (FAPEMAT-PRO.000274/2023 project). We would like to thank the IABS/CECAV (edital 01/2023 - TCCE Vale 01/2022) for the granted funding and the platforms that provided the digitally accessible data that

sandro Pereira, Denizar Alvarenga, Edvard Magalhães, Lucas Rabelo, Marcos Paulo, Marconi Souza-Silva, Marden Linares, Rodrigo Ferreira, Tiago Vilaça, Vanessa Martins, pelas discussões filosóficas acerca do mundo das cavernas. Em particular, a Maria Peñaflor por todo incentivo, bem como pelas valiosas sugestões e debates desde as primeiras versões deste estudo. Agradecemos profundamente aos quatro revisores que fizeram sugestões na primeira versão deste estudo, assim como a todas as pessoas que participaram das discussões sobre a conservação do patrimônio espeleológico no 37º Congresso Brasileiro de Espeleologia, possibilitando uma melhoria substancial em nossa discussão. Por fim, agradecemos as preciosas discussões do grupo de trabalho sobre “Lacunas de Biodiversidade”, patrocinado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) em Ecologia, Evolução e Conservação da Biodiversidade (CNPq proc. 465610/2014-5 e FAPEG proc. 201810267000023).

enabled this study to be carried out: ICMBio/Cecav, MapBiomas, EMBRAPA and Natural Earth. RACS would particularly like to thank Alexandro Pereira, Denizar Alvarenga, Edvard Magalhães, Lucas Rabelo, Marcos Paulo, Marconi Souza-Silva, Marden Linares, Rodrigo Ferreira, Tiago Vilaça and Vanessa Martins for their philosophical discussions about the cave world. In particular, Maria Peñaflor for all her encouragement, as well as her valuable suggestions and discussions from the very first versions of this study. We are deeply grateful to the four reviewers who made suggestions on the first version of this study, as well as to all the people who took part in the discussions on the conservation of speleological heritage at the 37th Brazilian Speleology Congress, making it possible to substantially improve our discussion. Finally, we express our gratitude for the valuable discussions of the working group on “Biodiversity Shortfalls” sponsored by the National Institutes for Science and Technology (INCT) in Ecology, Evolution, and Biodiversity Conservation (CNPq proc. 465610/2014-5 and FAPEG proc. 201810267000023).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

AMANI, M.; GHORBANIAN, A.; AHMADI, S. A.; KAKOOEI, M.; MOGHIMI, A.; MIRMAZLOUMI, S. M.; *et al.* Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 13, p. 5326-5350, 2020.

BARRA, C. Controversial cave discoveries suggest humans reached Americas much earlier than thought. *Nature*, v. 583, n. 7818, p. 670-671, 2020.

BOTTS, E. A.; ERASMUS, B. F.; ALEXANDER, G. J. Geographic sampling bias in the South African Frog Atlas Project: implications for conservation planning. *Biodiversity and Conservation*, v. 20, n.1, p. 119-139, 2011.

BRASIL. *Lei nº 6938 de 1981*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%206.938%2C%20DE%2031%20DE%20AGOSTO%20DE%201981&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional,aplica%C3%A7%C3%A3o%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAs>. Acessado em: 11 nov. 2022a.

BRASIL. *Resolução CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986*. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>>. Acessado em: 11 nov. 2022b.

BRASIL. *Resolução CONAMA Nº 347/2004, de 10 de setembro de 2004*. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Legislacao/Res_CONAMA_347_2004.pdf>. Acessado em: 11 nov. 2022c.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm> Acessado em: 11 ago. 2023d.

BRASIL. *Decreto nº 6.640, de 07 de novembro de 2008*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6640.htm> Acessado em: 11 ago. 2023e.

BRASIL. *Instrução Normativa nº 2, de 20 de agosto de 2009*. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0002-200809.PDF>>. Acessado em: 11 de ago. 2023f.

BURNEY, D. A.; HUME, J. P.; RANDALANA, R.; ANDRIANAIVOARIVELO, R. A.; GRIFFITHS, O.; MIDDLETON, G. J.; *et al.* Rock art from andriamamelô cave in the beanka protected area of western Madagascar. *The Journal of Island and Coastal Archaeology*, v. 17, n. 2, p. 171-194, 2022.

CECAV. *Potencialidade de Ocorrência de Cavernas*. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/potencialidade-de-ocorrencia-de-cavernas.html>>. Acessado em: 24 nov. 2022a.

CECAV. *Orientações Básicas a Realização de Estudos Espeleológicos*. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/orientacoes-e-procedimentos/termo-de-referencia.html>>. Acessado em: 26 nov. 2022b.

CECAV. *Cadastro Nacional De Informações Espeleológicas – CANIE*. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>>. Acessado em: 10 nov. 2022c.

CECAV. *Áreas de Ocorrência de Cavernas do Brasil*. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html#:~:text=%C3%81reas%20de%20Ocorr%C3%Ancia%20de%20Cavernas%20do%20Brasil&text=Em%201986%2C%20as%20prov%C3%ADncias%20Rio,KARMANN%20e%20S%C3%81NCHES%2C%201986>>. Acessado em: 10 nov. 2022d.

CRUZ, J.; PILÓ, L. *Espeleologia e Licenciamento Ambiental*. Brasília: Editora IABS, 2019. 262p.

DAMM, S.; YOUNG, A. Caving In: An Archaeology of Historical Cave Exploration and Exploitation. *Nebraska Anthropologist*, v. 185, p. 74-183, 2013.

DARU, B. H.; PARK, D. S.; PRIMACK, R. B.; WILLIS, C. G.; BARRINGTON, D. S.; WHITFELD, T. J.; Whitfeld, T. J. S.; *et al.* Widespread sampling biases in herbaria revealed from largescale digitization, *New Phytologist*, v. 217, n. 2, p. 939-955, 2018.

DÉTROIT, F.; MIJARES, A. S.; CORNY, J.; DAVER, G.; ZANOLLI, C.; DIZON, E.; *et al.* A new species of Homo from the Late Pleistocene of the Philippines, *Nature*, v. 568, n. 7751, p. 181-186, 2019.

EMBRAPA. *Áreas Urbanas no Brasil em 2015*. Disponível em: <http://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Aareas_urbanas_br_15>. Acessado em: 21 nov. 2022.

ESCOBAR, H. *Cavernas do Brasil: um tesouro subterrâneo a ser descoberto, mas já ameaçado*. *Jornal da USP*. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/ciencias/cavernas-do-brasil-um-tesouro-subterraneo-a-ser-descoberto-mas-ja-ameacado/>>. Acessado em: 01 dez. 2021.

FERREIRA, R. L.; BERNARD, E.; DA CRUZ JÚNIOR, F. W.; PILÓ, L. B.; CALUX, A.; SOUZA-SILVA, M.; *et al.* Brazilian cave heritage under siege. *Science*, v. 375 n. 6586, p. 1238-1239, 2022.

FERREIRA, J.; ARAGÃO, L.E.O.C.; BARLOW, J.; BARRETO, P.; BERENQUER, E.; BUSTAMANTE, M.; *et al.* 2014. Brazil's environmental leadership at risk. *Science*, v. 346, p. 706-707, 2014.

FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, M. P. A.; & SOUZA-SILVA, M. Subterranean Biodiversity in Ferruginous Landscapes. In: MOLDOVAN, O. T.; KOVÁČ, L.; HALSE, S. *Cave Ecology*. Springer, Cham, 2018. cap. 21, p. 435-447.

FICETOLA, G. F.; CANEDOLI, C.; STOCH, F. The Racovitza impediment and the hidden biodiversity of unexplored environments. *Conservation Biology*, v. 33, n. 1, p. 214-216, 2019.

FREE QA (2022) *Open Source Geographic Information System*. Disponível em: <<https://www.qgis.org/en/site/>>. Acessado em: 01 jul. 2022.

HOWARTH, F. G.; JAMES, S. A.; MCDOWELL, W.; PRESTON, D. J.; IMADA, C. T. Identification of roots in lava tube caves using molecular techniques: implications for conservation of cave arthropod faunas. *Journal of Insect Conservation*, v. 11, n. 3, p. 251-261, 2007.

IBGE. *Áreas Urbanizadas do Brasil 2019*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/areas_urbanizadas/#/home>. Acessado em 02 dez. 2022.

INKSCAPE TEAM. *Inkscape: A vector drawing tool*. Disponível em: <<https://www.inkscape.org>>. Acessado em: 12 fev. 2022.

JANSEN, D.C.; CAVALCANTI, L. F.; LAMBLÉM, H. S. Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil, na escala 1: 2.500. 000. *Revista Brasileira de Espeleologia*, v. 2, n. 1, p. 42-57, 2012

MAMMOLA, S. Finding answers in the dark: caves as models in ecology fifty years after Poulson and White. *Ecography*, v. 42, n. 7, p. 1331-1351, 2019.

MAMMOLA, S.; CARDOSO, P.; CULVER, D. C.; DEHARVENG, L.; FERREIRA, R. L.; FIŠER, C. *et al.* Scientists' warning on the conservation of subterranean ecosystems. *BioScience*, v. 69, n. 8, p. 641-650, 2019a.

MAMMOLA, S.; AMORIM, I. R.; BICHUETTE, M. E.; BORGES, P. A.; CHEEPHAM, N.; COOPER, S. J.; *et al.* Fundamental research questions in subterranean biology. *Biological Reviews*, v. 95, n. 6, p. 1855-1872, 2020.

MAMMOLA, S.; MEIERHOFER, M. B.; BORGES, P. A.; COLADO, R.; CULVER, D. C.; DEHARVENG, L.; *et al.* Towards evidence based conservation of subterranean ecosystems. *Biological Reviews*, v. 97, n. 4, p. 1476-1510, 2022.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Trechos Rodoviários Gerais*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022a.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Ferrovário*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022b.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Mina de Produto Metálico*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022c.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Mina de Produto Energético*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022d.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Mina de Outros Produtos*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022e.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Usina Hidrelétrica*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022f.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Pequena Central Hidrelétrica*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022g.

MAP BIOMAS. MAPBIOMAS (Brasil), v.7.0., Dados de Infraestrutura, *Linha de Transmissão*. Disponível em: <https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR>. Acessado em: 21 nov. 2022h.

MEYER, C.; KREFT, H.; GURALNICK, R.; JETZ, W. Global priorities for an effective information basis of biodiversity distributions. *Nature communications*, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2015.

MOLDOVAN, O. T.; RACOVITZA, G.; RAJKA, G. The impact of tourism in Romanian show caves: the example of the beetle populations in the Ursilor Cave of Chiscau (Transylvania, Romania). *Subterranean biology*, v. 1, p. 73-78, 2003.

NATURAL EARTH. *Rivers + lake centerlines*. Disponível em: <<https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-physical-vectors/10m-rivers-lake-centerlines/>>. Acessado em: 07 nov. 2022.

NELSON, A.; WEISS, D. J.; VAN ETTEN, J.; CATTANEO, A.; MCMENOMY, T. S.; KOO, J. A suite of global accessibility indicators. *Scientific data*, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2019.

NOVELLO, V. F.; CRUZ, F. W.; VUILLE, M.; STRÍKIS, N. M.; EDWARDS, R. L.; CHENG, H.; *et al.* A high-resolution history of the South American Monsoon from Last Glacial Maximum to the Holocene. *Scientific reports*, v. 7, n. 1, p. 1-8, 2017.

OLIVEIRA, U.; PAGLIA, A. P.; BRESCOVIT, A. D.; DE CARVALHO, C. J.; SILVA, D. P.; REZENDE, D. T.; *et al.* The strong influence of collection bias on biodiversity knowledge shortfalls of Brazilian terrestrial biodiversity. *Diversity and Distributions*, v. 22, n. 12, p. 1232-1244, 2016.

PARKER, C. W.; SENKO, J. M.; AULER, A. S.; SASOWSKY, I. D.; SCHULZ, F.; WOYKE, T.; BARTON, H. A. Enhanced terrestrial Fe (II) mobilization identified through a novel mechanism of microbially driven cave formation in Fe (III)-rich rocks. *Scientific reports*, v. 12, n. 1, p. 1-14, 2022.

PILÓ, L. B.; AULER, A. Introdução à Espeleologia. In: CECAV. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Brasília: CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2011. Cap. 1, p. 7-23.

PRICE, L.; TRAVASSOS, L. E. P. Uso religioso de cavernas no Sudeste Asiático e China: a paisagem cárstica sob outra perspectiva. *Ateliê Geográfico*, v. 10, n. 3, p. 129-154, 2016.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2022) R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R foundation for statistical computing. Disponível em: <<https://www.Rproject.org/>>. Acessado em 2 nov. 2022.

REBOLEIRA, A. S. P.; ABRANTES, N.; OROMÍ, P.; GONÇALVES, F. Acute toxicity of copper sulfate and potassium dichromate on stygobiont *Proasellus*: general aspects of groundwater ecotoxicology and future perspectives. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 224, n. 5, p. 1-9, 2013.

RIDDLE, M. R.; ASPIRAS, A. C.; GAUDENZ, K.; PEUß, R.; SUNG, J. Y.; MARTINEAU, B.; et.al. Insulin resistance in cavefish as an adaptation to a nutrient-limited environment. *Nature*, v. 555, n. 7698, 647-651.

SANCHEZ, L.; LOBO, H. *Guidebook of good environmental practices for the quarrying of limestone in Karst Areas*. Campinas: Brazilian Speleological Society. 2018. 263p.

SION, A. O. A Proteção Espeleológica no Brasil e a Nova Regulamentação da Exploração de Cavernas. In: Sánchez-Bravo, Á. *Semper sapiens: libro homenaje al profesor Dr. Felipe Rotondo Tornarúa*. Editorial Alma Mater: España, 2022. cap. 2, p. 39-57.

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, n. 2, p. 279-295, 2015.

SUGAI, L. S. M.; OCHOA-QUINTERO, J. M.; COSTA-PEREIRA, R.; ROQUE, F. O. Beyond aboveground. *Biodiversity and Conservation*, v. 24, n. 8, p. 2109-2112, 2015.

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

TRAJANO, E. Cave Faunas in the Atlantic Tropical Rain Forest: Composition, Ecology, and Conservation. *Biotropica*, v. 32, n. 4b, p. 882-893, 2000.

TRAVASSOS, L. E. P. Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Editora IABS: Brasília, 2019. 246p.

WYNNE, J.J.; HOWARTH, F.G.; MAMMOLA, S.; FERREIRA, R.L.; CARDOSO, P.; LORENZO, T.D.; et al. A conservation roadmap for the subterranean biome. *Conservation Letters*, v. 14, n. 5, p. 1-6, 2021.

WYNNE, J. J.; BERNARD, E. C.; HOWARTH, F. G.; SOMMER, S.; SOTO-ADAMES, F. N.; TAITI, S.; *et al.* Disturbance relicts in a rapidly changing world: the Rapa Nui (Easter Island) factor. *BioScience*, v. 64, n. 8, p. 711-718, 2014.

YANG, W.; MA, K.; KREFT, H. Environmental and socio economic factors shaping the geography of floristic collections in China. *Global Ecology and Biogeography*, v. 23, n. 11, p. 1284-1292, 2014.

YOSHIZAWA, M.; SETTLE, A.; HERMOSURA, M. C.; TUTTLE, L. J.; CETRARO, N.; PASSOW, C. N.; MCGAUGH, S. E. The evolution of a series of behavioral traits is associated with autism-risk genes in cavefish. *BMC evolutionary biology*, v. 18, n. 1, p. 1-16., 2018.

ZIZKA, A.; RYDÉN, O.; EDLER, D.; KLEIN, J.; ARONSSON, H.; PERRIGO, A.; *et al.* Exploring the impact of political regimes on biodiversity. *V-Dem Working Papers*, v. 98, p. 1-13, 2020.

ZIZKA, A.; ANTONELLI, A.; SILVESTRO, D. *Sampbias*, a method for quantifying geographic sampling biases in species distribution data. *Ecography*, v. 44, n. 1, p. 25-32, 2021.

MATERIAL SUPLEMENTAR – PROJEÇÃO ESPACIAL DOS FATORES COMBINADOS

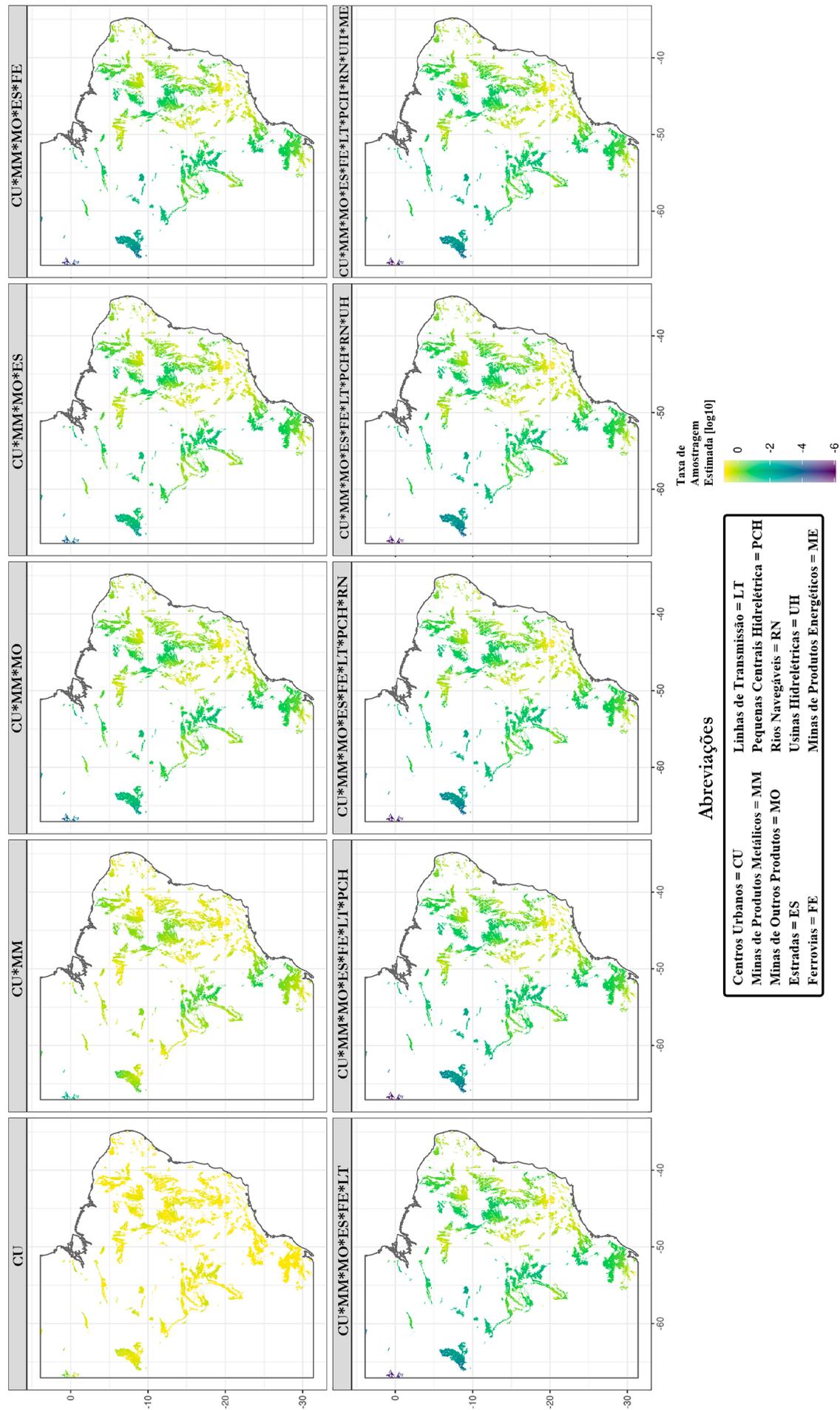


Figura S1 – Projeção espacial das diferentes combinações de fatores de acessibilidade e infraestrutura sob a taxa de amostragem de cavernas (nº de ocorrência de cavernas por 'grid') dentro das áreas de ocorrência de cavernas do Brasil. As combinações entre os fatores com maior efeito de viés estão alinhadas em ordem decrescente da esquerda para direita.

SUPPLEMENTARY MATERIAL - SPATIAL PROJECTION OF COMBINED FACTORS

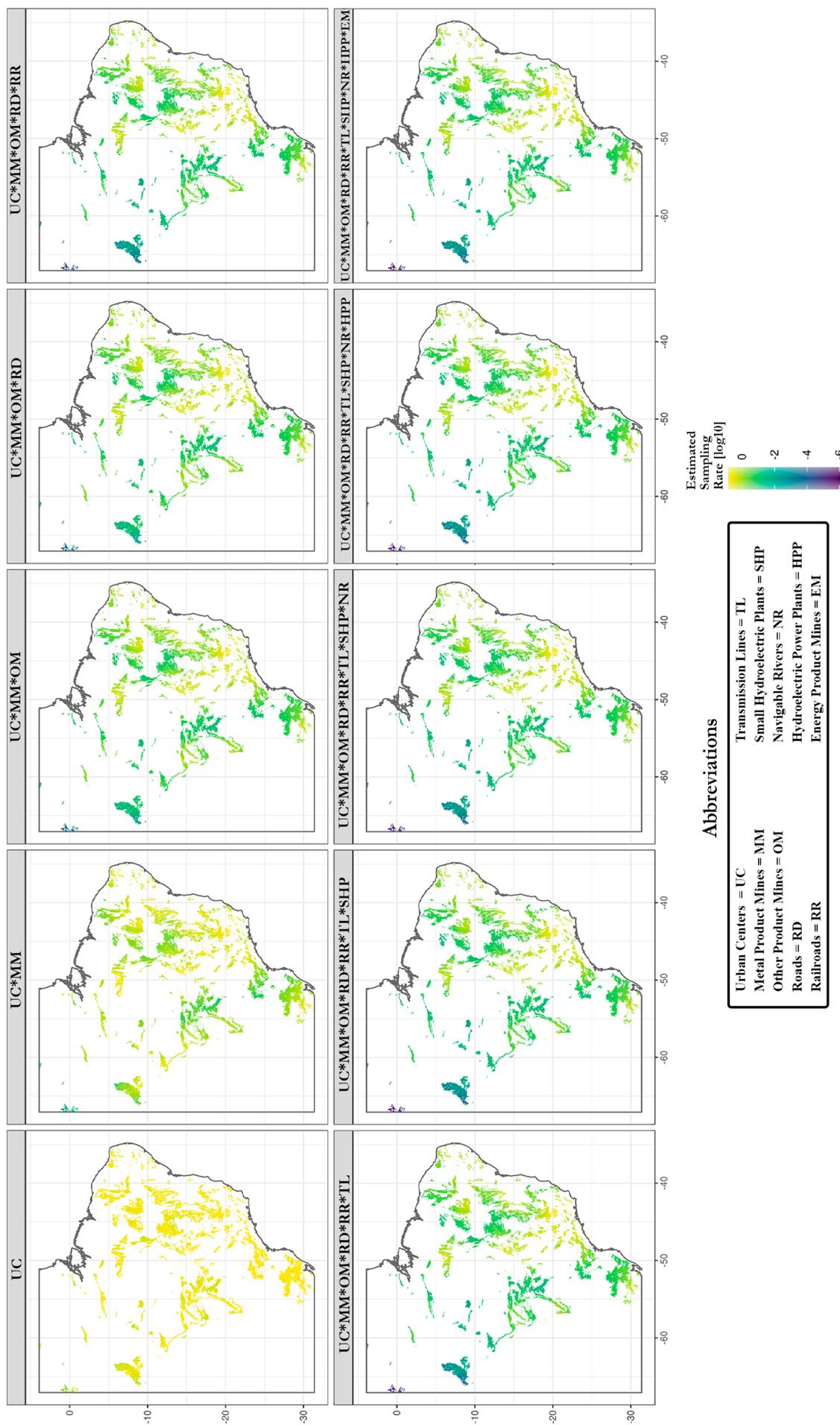


Figure S1 – Spatial projection of different combinations of accessibility and infrastructure factors on the sampling rate of caves (number of caves per grid) within Brazil's cave occurrence areas. The combinations of factors with the greatest bias effect are aligned in descending order from left to right.

MATERIAL SUPLEMENTAR/SUPPLEMENTARY MATERIAL - R CÓDIGO/CODE

```
#-----#
#####VIESES NO CONHECIMENTO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE CAVERNA DO BRASIL#####
#####BIASES IN THE KNOWLEDGE OF THE GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF CAVES IN BRAZIL#####
#-----carregando pacotes/loading packages-----#
require(devtools)
install_github(repo = "azizka/sampbias", force = TRUE)
library(sampbias)
library(maptools)
library(rgdal)
library(raster)
library(tidyverse)
library(readxl)
library(xlsx)
library(openxlsx)
library(data.table)
setwd(choose.dir())
#Nota: os mapas do CANIE e de Área de Ocorrência de Cavernas do Brasil precisam ser convertidos para
a projeção WGS 84 #antes do início das análises, tais conversões podem ser realizadas em ambiente SIG
(ex., ArcGis ou QGIS) ou até mesmo em #ambiente R ou Python. Aqui, fornecemos um breve exemplo desta
conversão em R/Note: The CANIE and Cave Occurrence #Area maps of Brazil need to be converted to the WGS
84 projection before the start of the analyses. Such conversions can be #performed in a GIS environment (e.g.,
ArcGIS or QGIS) or even in R or Python. Here, we provide a brief example of this #conversion in R:
sirgas_01 <- readOGR("registros_cavernas_sg.shp")
sirgas_02 <- readOGR("areas_cavernas_sg.shp")
wgs84_01 <- spTransform(sirgas_01, CRS("+proj=longlat +datum=WGS84"))
wgs84_02 <- spTransform(sirgas_02, CRS("+proj=longlat +datum=WGS84"))
writeOGR(wgs84_01, layer = "registros_cavernas_wgs.shp", driver = "ESRI Shapefile")
writeOGR(wgs84_02, layer = "areas_cavernas_wgs.shp", driver = "ESRI Shapefile")
#-----abrindo dados do CANIE/open CANIE data-----#
occ <- read_excel("registros_cavernas.xlsx", sheet = 1) %>% dplyr::select(species = Caverna, decimalLongitude =
Longitude, decimalLatitude = Latitude)
glimpse(occ)
test.points <- occ %>% dplyr::select(decimalLongitude, decimalLatitude, species) %>% as.data.frame()
coordinates(test.points) <- ~decimalLongitude+decimalLatitude
#-----abrindo as áreas de ocorrência de cavernas (nosso limite)/opening the cave occurrence areas (our limit)----#
land <- readOGR("areas_cavernas_wgs.shp")
plot(land)
```

```

#--filtrando registros de ocorrência de cavernas dentro do limite/ filtering cave occurrence records within the
boundary--#
sp <- SpatialPoints(test.points, proj4string=CRS(proj4string(land)))
spsel <- sp[land]
over(sp, land)
occ_land <- occ %>% dplyr::select(decimalLongitude,decimalLatitude,species) %>%
cbind(over(sp, land))
glimpse(occ_land)
occ_in_land <- occ_land %>% filter(!is.na(OBJECTID))
occ_ocean <- occ_land %>% filter(OBJECTID %in% NA) %>% as_tibble()
occ_cave_clean <-dplyr::select(occ_in_land, -(OBJECTID,Rocha_Pred,Shape_Leng,Shape_Area))
#-----salvando ocorrências filtradas/saving filtered occurrences-----#
occ_cave_clean %>% write.table("occ_cave_clean.txt",
                             append = FALSE, sep = "\t", dec = ".",
                             row.names = FALSE, col.names = TRUE, quote = FALSE, fileEncoding = "UTF-8")
#-----abrindo as ocorrências filtradas-----#
occ <- fread(file = "occ_cave_clean.txt", h = T, encoding = 'UTF-8', quote = "'") %>% dplyr::select(species,
decimalLongitude,decimalLatitude)
#---abrindo a área onde os modelos serão construídos/ opening the background area where the models will
be constructed---#
areas_cavernas <- readOGR("areas_cavernas_wgs.shp")
#-----abrindo os fatores de acessibilidade e infraestrutura/ opening the factors of accessibility and
infrastructure-----#
#http://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode%3Aareas_urbanas_br_15 #centros urbanos/urban centers
#https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-physical-vectors/10m-rivers-lake-centerlines/ #rios
navegaveis/navigable rivers
#https://mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura?cama_set_language=pt-BR #demais fatores/other factors
areas_urbanas <- readOGR("areas_urbanas_br_15.shp")#1
mina_metal <- readOGR("MinaMetálicos.shp") #2
mina_energeticos <- readOGR("MinaEnergéticos.shp")#3
mina_outros <- readOGR("MinaOutrosProdutos.shp")#4
rodovias <- readOGR("rod_trecho_rodoviario_l.shp")#5
ferrovias <- readOGR("ferrovias.shp")#6
linhas_transmissao <- readOGR("LT_EXISTENTE.shp")#7
usina <- readOGR("Usinas_Hidrelétricas_UHE.shp")#8
usina_pequena <- readOGR("Pequenas_Centraais_Hidrelétricas_PCH.shp")#9
rios <- readOGR("ne_10m_rivers_lake_centerlines.shp")#10
data = list(urban = areas_urbanas, mina_m = mina_metal, mina_e = mina_energeticos,mina_o = mina_outros,
           estra = rodovias, ferrov = ferrovias, h_usina = usina, pch = usina_pequena,lin_trans = linhas_transmissao,

```

```

rivers = rios)
#-----função para construção dos modelos/ function for model
construction-----#
#link: https://github.com/azizka/sampbias/blob/master/R/calculate\_bias.R
#link do artigo/link to the article: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ecog.05102
teste <- calculate_bias(
  x = occ, # dados de distribuição das cavernas/cave distribution data
  gaz = data, # fatores de 1 até 10/ factors 1 to 10
  res = 0.05, #0.05= 5km de resolução/ resolution of 5km
  restrict_sample = areas_cavernas, # área de estudo (limite)/ study area(limit)
  terrestrial = TRUE)
#-----projetar o peso dos fatores de viés e a distância/ project the weight of bias factors and
distance-----#
summary(teste)
table_results_v1 <- summary(teste) %>% as.data.frame() #salvar resultados/save results
write.csv(table_results_v1, file = "table_results_v1")
plot(teste) #plotar resultados/plot results
#-----projetar os mapas combinados dos fatores de viés/projecting the combined maps of bias
factors-----#
proj <- project_bias(teste)
map_bias(proj, type = "log_sampling_rate") #salvar todos os mapas/save all maps
map_plot = map_bias(proj, type = "log_sampling_rate")
#-----salvando as projeções separadamente/ saving the projections
separately-----#
r_urban <- proj[[1]]
raster::writeRaster(x = urban,
  filename = "1_r_urban",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)
r_urban_mina_m <- proj[[2]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m,
  filename = "2_r_urban_mina_m",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

```

```

r_urban_mina_m_mina_o <- proj[[3]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o,
  filename = "3_r_urban_mina_m_mina_o",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra <- proj[[4]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra,
  filename = "4_r_urban_mina_m_mina_o_estra",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov <- proj[[5]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov,
  filename = "5_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t <- proj[[6]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t,
  filename = "6_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch <- proj[[7]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch,
  filename = "7_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

```

```

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers <- proj[[8]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers,
  filename = "8_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr <- proj[[9]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr,
  filename = "9_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr_mina_e <- proj[[10]]
raster::writeRaster(x = r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr_mina_e,
  filename = "10_r_urban_mina_m_mina_o_estra_ferrov_lin_t_pch_rivers_hddr_mina_e",
  bylayer = TRUE,
  options = c("COMPRESS=DEFLATE"),
  format = "GTiff",
  progress = "text",
  overwrite = TRUE)

#-----FIM/END-----#

```