

SPATIAL PRIORITIZATION FOR THE CONSERVATION OF BRAZILIAN KARST AREAS

SPATIAL PRIORITIZATION FOR THE CONSERVATION OF BRAZILIAN KARST AREAS

Geovana Oliveira da Silva

Federal University of Mato Grosso, Cuiabá campus
E-mail: gioverapb045@outlook.com

Rodrigo Antônio Castro Souza

Federal University of Lavras
Federal University of Mato Grosso
E-mail: rodrigodesouzaac@gmail.com

Afonso Kempner

Federal University of Mato Grosso, Cuiabá campus
E-mail: afonso.hk@gmail.com

Thairik Mateus Silva Marques

Federal University of Mato Grosso, Cuiabá campus
E-mail: thairiksilvamarques@gmail.com

Neucir Szinwelski

State University of Western Paraná (Unioeste)
E-mail: neucirufv@gmail.com

Thadeu Sobral-Souza

Federal University of Mato Grosso, Cuiabá campus
E-mail: thadeusobral@gmail.com

RESUMO

As áreas cársticas brasileiras são regiões de alto valor biológico, geológico e humano que exercem provisão de serviços ecossistêmicos, como os aquíferos e os minerais. Apesar da existência de leis ambientais, as áreas cársticas ainda são pouco estudadas e pouco protegidas no Brasil. Este trabalho propõe uma priorização espacial para conservação destas áreas com base em indi-

ABSTRACT

Brazilian karst areas are regions of high biological, geological, and human value that provide ecosystem services, such as aquifers and minerals. Despite the existence of environmental laws, karst areas are still poorly studied and poorly protected in Brazil. This study proposes a spatial prioritization for the conservation of these areas based on indicators of anthropogenic impact, the network of conserva-

cadores de impacto antrópico, da rede de unidades de conservação e da cobertura de vegetação natural. Os resultados demonstram que grande parte das regiões cársticas brasileiras estão sob forte impacto antrópico, com baixa cobertura de vegetação natural e pouco protegidas pela legislação. Destacamos a necessidade de inclusão de “manchas” cársticas em políticas públicas, principalmente na criação unidades de conservação, além de reforçar que o uso sustentável dos recursos nessas regiões, mesmo que altamente exploradas, é a única solução viável para garantir a continuidade de atividades econômicas, a existência de ecossistemas saudáveis e a manutenção dos serviços ecossistêmicos.

PALAVRAS-CHAVE: patrimônio espeleológico, espeleologia, impacto antrópico, priorização espacial, conservação.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento socioeconômico alavancou a qualidade de vida humana em algumas regiões do planeta (Roe & Elliott, 2019). No entanto, o crescimento econômico desenfreado, aliado ao uso insustentável dos recursos naturais e à degradação ambiental têm ultrapassado os limites ecológicos do planeta e causado diversos cenários catastróficos ao redor do mundo, principalmente nas regiões subdesenvolvidas (Zalasiewicz *et al.*, 2024). Essa crise antropogênica tem colocado a vida na Terra em perigo (Jaureguiberry *et al.*, 2022), devido a sexta extinção em massa, reconhecida por apresentar taxas de extinção estimadas até 1.000 vezes maiores do que as naturais (Dirzo *et al.*, 2014; Ceballos *et al.*, 2015; Roe & Elliott, 2019). Esse processo ameaça todos os ecossistemas naturais, incluindo as regiões ainda pouco exploradas pelo ser humano, como os fundos oceânicos, áreas de

tion units, and natural vegetation cover. The results show that most Brazilian karst regions are under strong anthropogenic impact, with low natural vegetation cover and little protection by legislation. The need to include karst “spots” in public policies, especially in the creation of conservation units was highlighted. In addition, it is reinforced that the sustainable use of resources in these regions, even if highly exploited, is the only viable solution to ensure the continuity of economic activities, the existence of healthy ecosystems, and the maintenance of ecosystem services.

KEYWORDS: *speleological heritage, speleology, anthropic impact, spatial prioritization, conservation.*

INTRODUCTION

*Socioeconomic development has improved the quality of human life in some regions of the planet (Roe & Elliott, 2019). However, unbridled economic growth, coupled with the unsustainable use of natural resources and environmental degradation, has exceeded the planet’s ecological limits and caused several catastrophic scenarios around the world, especially in underdeveloped regions (Zalasiewicz *et al.*, 2024). This anthropogenic crisis has endangered life on Earth (Jaureguiberry *et al.*, 2022) due to the sixth mass extinction, recognized for having extinction rates estimated to be up to 1,000 times higher than natural rates (Dirzo *et al.*, 2014; Ceballos *et al.*, 2015; Roe & Elliott, 2019). This process threatens all natural ecosystems, including regions still largely unexplored by humans, such as the ocean floor, high-altitude areas, and natural underground environments. In addition, this threat also compromises*

grande altitude e ambientes naturais subterrâneos. Além disso, tal ameaça compromete também a provisão dos serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar humano (Roe & Elliott, 2019).

A quantificação dos efeitos da pressão antrópica sobre os ambientes naturais é fundamental e urgente. Uma das formas de representá-los é por meio da pegada humana (*human footprint*, em inglês). O *human footprint* (HFP) é um índice global da pressão antrópica sobre as áreas terrestres do planeta que é atualizado anualmente (i.e., 1993 - 2022) e combina diferentes ameaças antrópicas, incluindo ambientes construídos, densidade populacional humana, incidência luminosa noturna, terras de cultivo, pastagens, estradas, ferrovias e vias navegáveis (Sanderson *et al.*, 2002; Venter *et al.*, 2016; Mu *et al.*, 2022). O HFP indica que, globalmente, 64,6 milhões de km² possuem alto grau de antropização (Pimm *et al.*, 2018) e que cerca de dois milhões de km² de ambientes naturais foram impactados nos últimos anos. Por outro lado, apenas 17,9 milhões de km² do planeta estão priorizados como áreas protegidas. Além da pequena proporção de áreas protegidas, que são disformes espacialmente (Oliveira *et al.*, 2017), a distribuição espacial é diretamente influenciada pelo grau de priorização da área, por questões históricas, políticas e sociais (Sobral-Souza *et al.*, 2018).

No Brasil, as áreas protegidas, conhecidas como Unidades de Conservação (UCs), são áreas naturais protegidas por lei que podem variar no grau de exploração de seus recursos naturais ou ser protegida integralmente, a depender da sua categoria. As UCs são fundamentais para a conservação da biodiversidade e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos indispensáveis para o bem-estar humano (Sodhi & Ehrlich, 2010) frente ao Antropoceno. Porém, a rede de UCs brasileiras não conseguem abranger e proteger toda a biodiversidade,

the provision of ecosystem services essential to human well-being (Roe & Elliott, 2019).

Quantifying the effects of anthropogenic pressure on natural environments is essential and urgent. One way to represent these effects is through the human footprint. The human footprint (HFP) is a global index of anthropogenic pressure on the planet's land areas that is updated annually (i.e., 1993 - 2022) and combines different anthropogenic threats, including built environments, human population density, nighttime light incidence, cropland, pasture, roads, railways, and waterways (Sanderson et al., 2002; Venter et al., 2016; Mu et al., 2022). The HFP indicates that, globally, 64.6 million km² have a high degree of anthropization (Pimm et al., 2018) and that about two million km² of natural environments have been impacted in recent years. On the other hand, only 17.9 million km² of the planet are prioritized as protected areas. In addition to the small proportion of protected areas, which are spatially uneven (Oliveira et al., 2017), spatial distribution is directly influenced by the prioritization degree of the area, due to historical, political, and social issues (Sobral-Souza et al., 2018).

In Brazil, protected areas, known as Conservation Units (UCs), are natural areas protected by law that may vary in the degree of exploitation of their natural resources or be fully protected, depending on their category. UCs are fundamental for the conservation of biodiversity and for the maintenance of ecosystem services that are indispensable for human well-being (Sodhi & Ehrlich, 2010) in the face of the Anthropocene. However, the Brazilian network of CUs is unable to cover and protect all biodiversity, especially endangered species (Gutierrez & Duivenvoorden, 2010; Oliveira et al., 2017). Historically, the first Brazilian CUs were located near impacted regions with high population density in coastal areas. Population migration to the west—based on

em especial as espécies ameaçadas (Gutierrez & Duivenvoorden, 2010; Oliveira *et al.*, 2017). Historicamente, as primeiras UCs brasileiras estavam localizadas próximas às regiões impactadas e com alta densidade populacional, nas zonas litorâneas. A migração populacional para o oeste – baseada na política de marcha ao oeste – aumentou o impacto no Brasil central e ressaltou a necessidade de instaurar UCs nas regiões interioranas. Nessa conformidade histórica, as UCs brasileiras não são espacialmente uniformes e os poucos remanescentes naturais que se tornaram legalmente protegidos, em forma de UC, são pequenos e desconectados entre si (Dean, 1996), exceto na Amazônia brasileira (Soares-Filho *et al.*, 2023).

As mudanças da dinâmica do uso e cobertura da terra devido a exploração humana tem causado impactos negativos na biodiversidade, na atmosfera e nos aquíferos (Carvalho *et al.*, 2010; Konzen *et al.*, 2024). Na paisagem, as atividades econômicas mudam a estrutura espacial e a quantidade de vegetação nativa, transformando os ecossistemas naturais em mosaicos de fragmentos rodeados por matrizes de plantio ou solos desprovidos de vegetação, como é o caso de zonas de mineração (Wilson *et al.*, 2016). Nos últimos 38 anos, estima-se que o Brasil perdeu 33% da sua área nativa, sendo a maior perda localizada em propriedades particulares para criação de cultivo e pastagens (Belandi, 2022; Sinimbú, 2024; MapBiomias, 2024). Além das atividades agropecuárias, no Brasil, a mineração também é uma das atividades causadoras de perda da biodiversidade por perda de habitat, além de ser uma atividade conflituosa em relação a interesses políticos e terras indígenas (Sonter *et al.*, 2017; Prasniewski *et al.*, 2024). Visto a perda acelerada de sistemas naturais por consequência do aumento da exploração de recursos naturais pelas demandas po-

the westward march policy—increased the impact on central Brazil and highlighted the need to establish conservation units in inland regions. In line with this historical pattern, Brazilian conservation areas are not spatially uniform, and the few remaining natural areas that have become legally protected as conservation areas are small and disconnected from each other (Dean, 1996), except in the Brazilian Amazon (Soares-Filho et al., 2023).

Changes in land use and land cover dynamics due to human exploitation have had negative impacts on biodiversity, the atmosphere, and aquifers (Carvalho et al., 2010; Konzen et al., 2024). Economic activities change the spatial structure and amount of native vegetation in the landscape, transforming natural ecosystems into mosaics of fragments surrounded by crop matrices or vegetation-devoid soils, as is the case in mining areas (Wilson et al., 2016). Over the last 38 years, it is estimated that Brazil has lost 33% of its native area, with the greatest loss occurring on private properties for crop cultivation and pasture (Belandi, 2022; Sinimbú, 2024; MapBiomias, 2024). In addition to agricultural activities, mining in Brazil is also one of the activities causing biodiversity loss due to habitat loss, as well as being a conflictual activity in relation to political interests and indigenous lands (Sonter et al., 2017; Prasniewski et al., 2024). Given the accelerated loss of natural systems as a result of increased exploitation of natural resources due to population demands, methods for quantifying natural remnants are essential for actions aimed at spatial prioritization for biodiversity conservation and maintenance of ecosystem services. As a result, natural areas that are not yet protected and are under strong human pressure become a key factor in the allocation of financial resources and public policy discussions.

Karst areas are home to ecosystems with high biological, geological and human value, including

pulacionais, torna-se imprescindível métodos de quantificação de remanescentes naturais para ações que visem a priorização espacial para conservação da biodiversidade e manutenção dos serviços ecossistêmicos. Com isso, áreas naturais ainda não protegidas e que estão sob forte pressão humana se tornam uma peça chave para alocação de recursos financeiros e discussões de políticas públicas.

As áreas cársticas são regiões que abrigam ecossistemas com alto valor biológico, geológico e também humano, incluindo aspectos culturais, arqueológicos e recursos naturais como água potável (Ford & Williams, 2007; Stankovic, 2023; IUCN, 2024). Regiões cársticas possuem ambientes subterrâneos vulneráveis a qualquer alteração ao seu entorno (Cerkvenik, 2016; Qi et al., 2019; Ribeiro & Zorn, 2021). Conservar essas áreas garante não só a proteção desses ambientes como também os ecossistemas superficiais associados, além de cumprir com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, voltados as metas 6 e 15 (Água Limpa e Saneamento e Vida na Terra, respectivamente) da agenda de 2030 das Nações Unidas (UNDP, 2018; IUCN, 2024).

Nesse sentido, considerando que (i) as atividades antrópicas geram impactos na biodiversidade, que (ii) no Brasil, as atividades relacionadas a mineração geram um conhecimento espacial desigual em relação aos ambientes subterrâneos e, que (iii) são necessárias diferentes estratégias para a conservação das áreas cársticas, sua biodiversidade e seus serviços ecossistêmicos correlatos, este trabalho objetiva: associar a distribuição geográfica conhecida das áreas cársticas brasileiras à intensidade dos impactos antrópicos (HFP), a rede de Unidades de Conservação nacional e a proporção de vegetação nativa, para, a partir disso, construir um mapa de priorização espacial de conservação das áreas cársticas brasileiras.

cultural and archaeological aspects and natural resources such as drinking water (Ford & Williams, 2007; Stankovic, 2023; IUCN, 2024). Karst regions have underground environments that are vulnerable to any alteration to their surroundings (Cerkvenik, 2016; Qi et al., 2019; Ribeiro & Zorn, 2021). Conserving these areas guarantees not only the protection of these environments, but also the associated surface ecosystems, as well as complying with the Sustainable Development Goals, aimed at targets 6 and 15 (Clean Water and Sanitation and Life on Land, respectively) of the United Nations' 2030 agenda (UNDP, 2018; IUCN, 2024).

In this sense, considering that: (i) anthropogenic activities generate impacts on biodiversity. That (ii) in Brazil, mining-related activities generate unequal spatial knowledge in relation to underground environments; that (iii) different strategies are needed for the conservation of karst areas, their biodiversity and their related ecosystem services. This work aims to associate the known geographical distribution of Brazilian karst areas with the intensity of anthropogenic impacts (HFP), the network of national Conservation Units and the proportion of native vegetation, in order to build a spatial prioritization map for the conservation of Brazilian karst areas. On this map, karst areas will be prioritized into eight categories, ranging from areas with a high proportion of native vegetation, a low degree of anthropization and a low percentage of protected areas, to karst areas that could be used for mining - areas that currently have a high anthropogenic impact, with a low proportion of natural vegetation and a low percentage of protected areas. Based on the proposed prioritization, the conservation or land use strategies that should be used for each of the categories will be discussed, aiming at striking a balance between providing ecosystem services and maintaining socio-economic development (Figure 1).

Neste mapa, as áreas cársticas serão priorizadas em oito categorias indo desde áreas com elevada proporção de vegetação nativa, com baixo grau de antropização e baixa porcentagem de UCs, até áreas cársticas que podem ser utilizadas para mineração - áreas que atualmente possuem alto impacto antrópico, com baixa proporção de vegetação natural e com baixa porcentagem de áreas protegidas. A partir da priorização proposta, iremos discutir as estratégias de conservação, ou do uso do solo, que devem ser usadas para cada uma das categorias, visando o equilíbrio entre a provisão dos serviços ecossistêmicos e a manutenção do desenvolvimento socioeconômico (Figura 1).

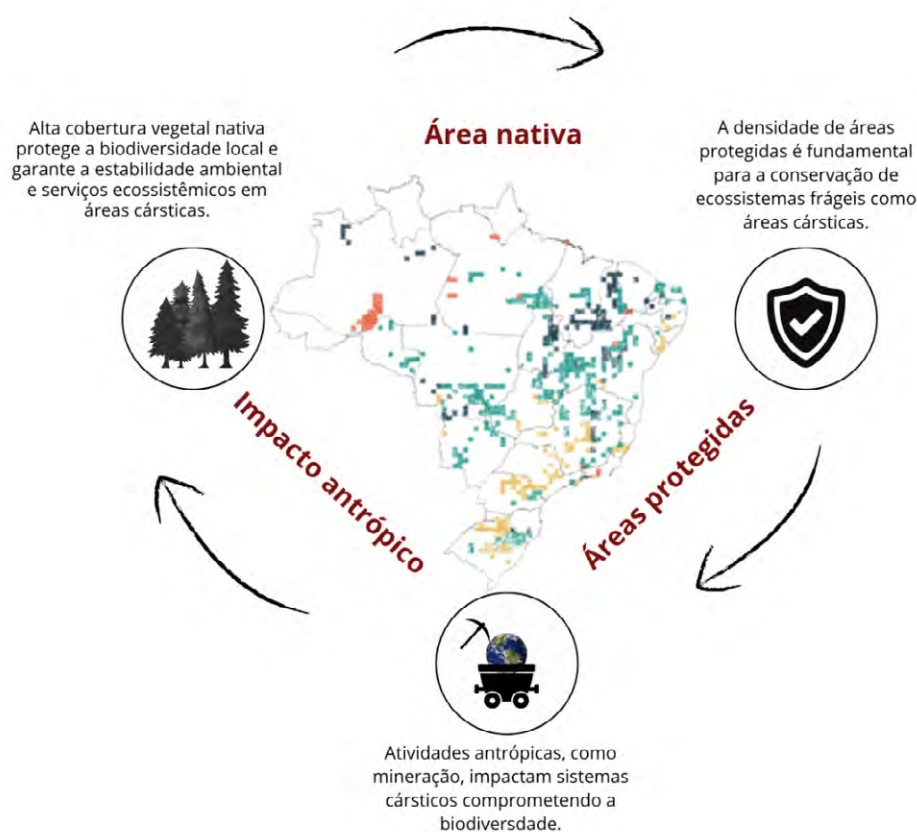


Figura 1- Esquematisação para criação da priorização espacial para manchas cársticas brasileiras.

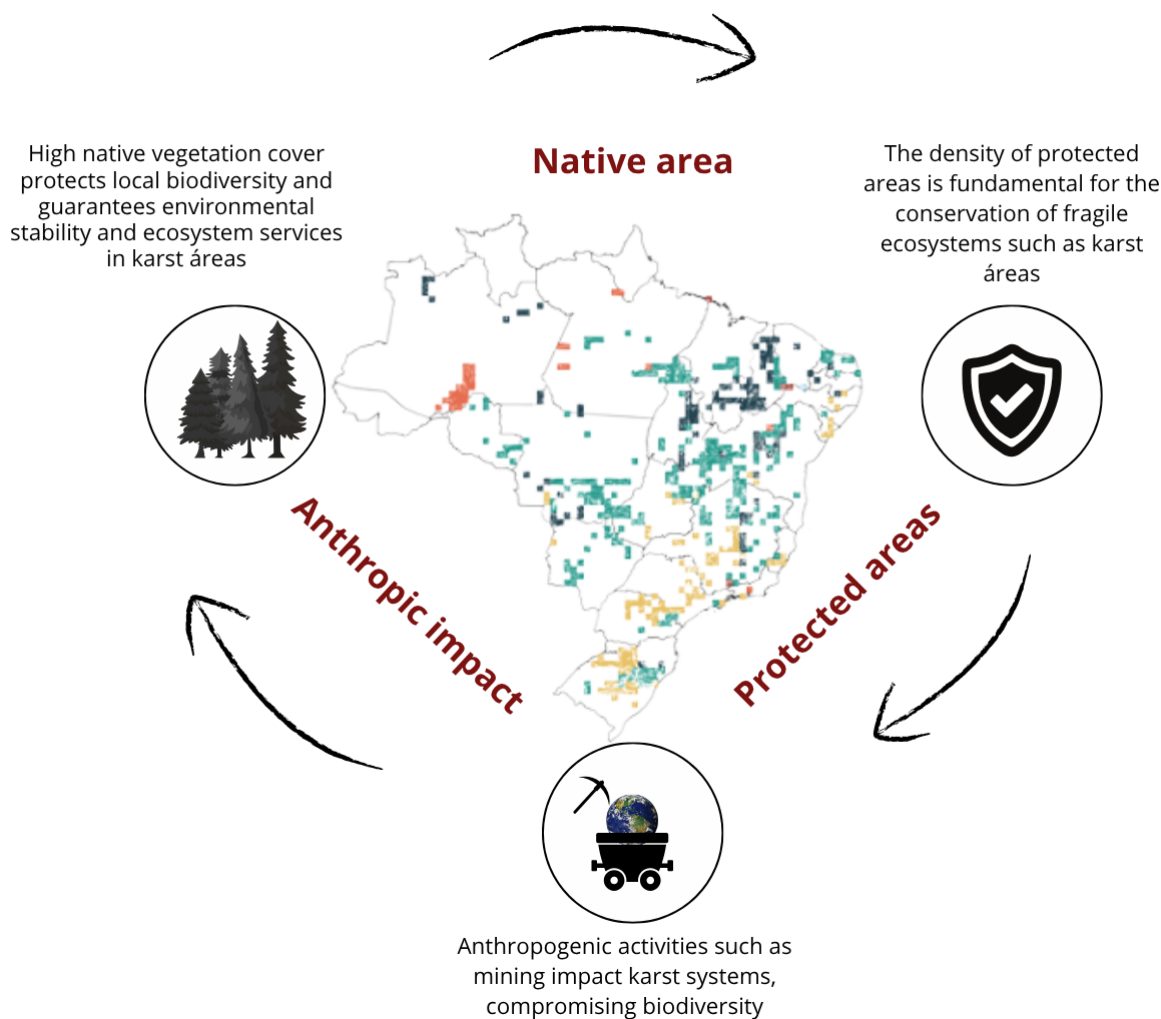


Figure 1- Schematic for creating the spatial prioritization for Brazilian karst areas.

METODOLOGIA

Preditores Antropogênicos e de Conservação das áreas cársticas

Para construir o mapa de priorização espacial para conservação das áreas cársticas brasileiras tomamos por base o mapa brasileiro de potencialidade de ocorrência de cavernas proposto pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - ICMBIO/CECAV (ICMBioa, 2024). A partir deste, cada mancha cárstica (i.e., fragmento cárstico isolado) foi separada em ambiente GIS (Qgis versão 3.28.3) para que fosse criado o ín-

METHODOLOGY

Anthropogenic and conservation predictors of karst areas

To build the spatial prioritization map for the conservation of Brazilian karst areas, the Brazilian map of potential cave occurrences proposed by the National Cave Research and Conservation Centre - ICMBIO/CECAV was used (ICMBioa, 2024). Based on this, each karst spot (i.e. isolated karst fragment) was separated in a GIS environment (Qgis version 3.28.3) so that the prioritization index could be created for each of these areas separately. As predictor

dice de priorização para cada uma dessas áreas separadamente. Como variáveis preditoras para a priorização utilizamos (i) o índice de pegada humana (*human footprint*), (ii) a proporção de vegetação natural na área cárstica e (iii) a proporção da área cárstica que é protegida por UCs.

O índice de pegada antrópica - *human footprint* (HFP) - sumariza o grau de antropização de uma determinada área combinando oito variáveis de pressão humana: construções humanas, densidade populacional, luzes noturnas, agricultura, pastagem, estradas, ferrovias e vias navegáveis. Os mapas de HFP possuem 1 km² de resolução espacial (Venter *et al.*, 2016; Mu *et al.*, 2022, disponível em: <https://figshare.com/articles/figure/An_annual_global_terrestrial_Human_Footprint_dataset_from_2000_to_2018/16571064>), e estão atualizadas anualmente entre o período de 1993 até 2022. Como as áreas cársticas possuem área maior que 1 km², nós realizamos a estatística espacial *zonal* como forma de obter o valor médio de HFP para cada área cárstica do território brasileiro para o ano de 2022. Os valores de HFP variam de 0 a 50. Valores próximos a 0 demonstram áreas com baixo nível de antropização, enquanto valores próximos a 50 demonstram áreas extremamente impactadas.

A proporção de vegetação natural de cada mancha cárstica foi obtida a partir dos mapas de cobertura e uso de solo disponíveis na plataforma MapBiomas (Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>), com resolução de 1 km² e correspondente a configuração do uso e cobertura solo do ano de 2022. Como esse mapa categoriza o uso da terra em quatro níveis e os divide em categorias desde área nativa até a plantações, selecionamos os níveis que correspondem a todos remanescentes naturais de vegetação do Brasil, incluindo desde forma-

variables for prioritization (i) the human footprint index, (ii) the proportion of natural vegetation in the karst area and (iii) the proportion of the karst area that is protected by UCs was used.

The anthropic footprint index—human footprint (HFP)—summarizes the anthropization degree of a given area by combining eight variables of human pressure: human constructions, population density, night lights, agriculture, pasture, roads, railways, and waterways. HFP maps have a spatial resolution of 1 km² (Venter et al., 2016; Mu et al., 2022, available at: <https://figshare.com/articles/figure/An_annual_global_terrestrial_Human_Footprint_dataset_from_2000_to_2018/16571064>), and are updated annually between 1993 and 2022. As the karst areas are larger than 1 km², zonal spatial statistics was performed in order to obtain the average HFP value for each karst area in Brazil for the year 2022. HFP values range from 0 to 50. Values close to 0 show areas with a low level of anthropization, while values close to 50 show extremely impacted areas.

The proportion of natural vegetation in each karst area was obtained from the land cover and land use maps available on the MapBiomas platform (<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>), with a resolution of 1 km² and corresponding to the land use and land cover configuration for the year 2022. As this map categorizes land use into four levels and divides them into categories from native area to plantations, the levels that correspond to all of Brazil's natural remnants of vegetation was selected, including everything from forest formations to rocky outcrops. Next, the map of Brazil's natural vegetation remnants was cut out for karst areas only. Subsequently, for each karst area, the percentage of native vegetation was calculated by dividing the total number of cells with natural remnants by the total number of cells that each karst area has. The

ções florestais até afloramentos rochosos. Em seguida, cortamos o mapa de remanescentes de vegetação natural do Brasil somente para as áreas cársticas. Posteriormente, para cada área cárstica, calculamos a porcentagem de vegetação nativa dividindo o número total de células com remanescente natural pelo número total de células que cada área cárstica possui. Os valores de proporção de vegetação nativa variam de 0 a 1 onde, valores próximos a 1 indicam áreas cársticas com elevada cobertura de vegetação natural enquanto valores próximos a 0 indicam manchas cársticas com alta antropização - baixa cobertura de vegetação natural.

A proporção de área protegidas em cada áreas cárstica foi baseada no mapa das unidades de conservação do Brasil disponíveis pelo Ministério do Meio Ambiente (disponível em <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/mapa-com-todas-as-unidades-de-conservacao-federais-disponivel-em-varios-formatos>). Inicialmente, selecionamos as áreas conservadas com intersecção com cada área cárstica, considerando todas as categorias de UC (de proteção integral e uso sustentável). Em seguida, calculamos a proporção de área protegida dentro da área cárstica (AP) ($AP = \text{total de área protegida na área cárstica} / \text{área total da área cárstica}$) obtendo assim valores entre 0 e 1. Valores próximos a 1 indicam que a maior parte da área cárstica é protegida por UCs, enquanto valores próximos a 0 indicam baixa sobreposição entre UC e área cárstica avaliada.

Limiares de Priorização das Áreas Cársticas

Para construir o mapa de priorização espacial para a conservação das áreas cársticas brasilei-

native vegetation proportion values range from 0 to 1, where values close to 1 indicate karst areas with high natural vegetation cover, while values close to 0 indicate karst patches with high anthropization - low natural vegetation cover.

The proportion of protected areas in each karst area was based on Brazil's conservation units map available from the Ministry of the Environment (available at <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/mapa-com-todas-as-unidades-de-conservacao-federais-disponivel-em-varios-formatos>). Initially, the conserved areas that intersected with each karst area was selected, taking into account all categories of CU (full protection and sustainable use). Then the proportion of protected area within the karst area was calculated ($PA = \text{total protected area in the karst area} / \text{total area of the karst area}$), thus obtaining values between 0 and 1. Values close to 1 indicate that most of the karst area is protected by CUs, while values close to 0 indicate low overlap between the UC and the evaluated karst area.

Prioritization Thresholds for Karst Areas

To construct the spatial prioritization map for the conservation of Brazilian karst areas, each predic-

ras, transformamos cada preditor em um raster com resolução de 0.5 graus (~50 km x 50 km). Em seguida, nós aplicamos limites de cortes para classificá-las. Para o impacto antrópico, consideramos o limite de 0.3, com base na classe “pressão muito alta” criada por Venter *et al.* (2016). Para a proporção de área considerada como altamente protegida escolhemos o limiar de 0.5, maior que o acordo estabelecido pelos países de proteger pelo menos 30% do seu território (UNEP, 2020). Aqui, consideramos o mesmo limite para cada célula procurando garantir o funcionamento do ecossistema e conectividade, porém, com mais rigor. O limiar de 0.75 de cobertura de vegetação natural se baseia em um consenso dado a partir de thresholds calculados por Chen *et al.* (2019) para porção de vegetação necessária para impedir processos de erosão de solo, e Locke & Winter (2024) para manter qualidade da água.

A partir dos limiares estabelecidos classificamos cada preditor em: pegada antrópica nas áreas cársticas (alta – acima de 50% e baixa – abaixo de 50%); proporção de conservação nas áreas cársticas (alta – acima de 50%, e baixo - abaixo de 50%); proporção de vegetação natural nas áreas cársticas (alta – acima de 75% e baixa – abaixo de 75%). Em seguida, os três preditores foram sobrepostos para criar categorias de prioridade de conservação (Tabela 1).

tor was transformed into a raster with a 0.5 degrees resolution (~50 km x 50 km). Then cut-off limits were applied to classify them. For anthropogenic impact, a threshold of 0.3 was considered, based on the “very high pressure” class created by Venter et al. (2016). For the proportion of area considered highly protected, a threshold of 0.5 was chosen, which is higher than the agreement established by countries to protect at least 30% of their territory (UNEP, 2020). Here, the same limit for each cell was considered, seeking to ensure ecosystem functioning and connectivity, but with greater rigor. The threshold of 0.75 for natural vegetation cover is based on a consensus derived from thresholds calculated by Chen et al. (2019) for the amount of vegetation needed to prevent soil erosion processes, and Locke & Winter (2024) for maintaining water quality.

Based on the established thresholds, each predictor was classified as follows: anthropic footprint in karst areas (high – above 30% and low – below 30%); proportion of conservation in karst areas (high – above 50%, and low – below 50%); proportion of natural vegetation in karst areas (high – above 75% and low – below 75%). Next, the three predictors were superimposed to create conservation priority categories (Table 1).

Tabela 1- Categorias de priorização para conservação das áreas cársticas brasileiras.

Categoria	Significado
1	Baixa pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida.
2	Alta pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida.
3	Alta pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida.
4	Baixa pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida.
5	Alta pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida.
6	Alta pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida.
7	Baixa pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida.
8	Baixa pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida.

Table 1- Prioritization categories for the conservation of Brazilian karst areas.

Category	Meaning
1	<i>Low human footprint, high proportion of natural vegetation and low proportion of protected area.</i>
2	<i>High human footprint, high proportion of natural vegetation and low proportion of protected area.</i>
3	<i>High human footprint, high proportion of natural vegetation and high proportion of protected area.</i>
4	<i>Low human footprint, low proportion of natural vegetation and low proportion of protected area.</i>
5	<i>High human footprint, low proportion of natural vegetation and low proportion of protected area.</i>
6	<i>High human footprint, low proportion of natural vegetation and high proportion of protected area.</i>
7	<i>Low human footprint, high proportion of natural vegetation and high proportion of protected area.</i>
8	<i>Low human footprint, low proportion of natural vegetation and high proportion of protected area.</i>

RESULTADOS

O modelo de priorização espacial para conservação das áreas cársticas brasileiras gerou áreas prioritárias para sete - das oito - categorias (Tabela 2) (Figura 2). A categoria (1) - áreas com baixa pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida - apresentou regiões cársticas principalmente no Nordeste e Norte do Brasil, mas com algumas áreas isoladas em diferentes Estados, incluindo Amazonas, Pará, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Já a categoria (2) - Alta pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida, domina as áreas cársticas no Piauí, mas também aparece na Bahia, Minas Gerais e na divisa de Pernambuco e Paraíba. A categoria (3) - Alta pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida - não apresentou região cárstica correspondente. A categoria (4) - baixa pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida - abrange as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil, distribuída nos estados de Rondônia, Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Paraná. A categoria (5) - Alta pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida - foi a mais abundante e apresentou regiões principalmente no Sul, Sudeste, Centro Oeste e Nordeste, distribuída nos estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Pará e Tocantins. A

RESULTS

The spatial prioritization model for the conservation of Brazilian karst areas generated priority areas for seven - of the eight - categories (Table 2) (Figure 2). Category (1) - areas with a low human footprint, a high proportion of natural vegetation and a low proportion of protected area - showed karst regions mainly in the northeast and north of Brazil, but with some isolated areas in different states, including Amazonas, Pará, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina and Rio Grande do Sul. Category (2) - High human footprint, high proportion of natural vegetation and low proportion of protected area, dominates the karst areas in Piauí, but also appears in Bahia, Minas Gerais and on the border between Pernambuco and Paraíba. Category (3) - High human footprint, high proportion of natural vegetation and high proportion of protected area - had no corresponding karst region. Category (4) - low human footprint, low proportion of natural vegetation and low proportion of protected area - covers the North, Northeast, Center-west, Southeast and South regions of Brazil, distributed in the states of Rondônia, Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Bahia, Minas Gerais, São Paulo and Paraná. Category (5) - High human footprint, low proportion of natural vegetation and low proportion of protected area - was the most abundant and featured regions mainly in the South, Southeast, Midwest and Northeast, distributed in the states of Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Pará and Tocantins. Category (6) - High human footprint, low proportion of natural vegetation and high proportion of protected area

categoria (6) - Alta pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida - apresenta localidades no Piauí, Ceará, Pernambuco e Minas Gerais. A categoria (7) - Baixa pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida - está presente principalmente na região Norte, distribuída nos estados do Pará, Amazonas, Rondônia e Amapá, Rio de Janeiro e Bahia. A categoria (8) - Baixa pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida - possui pouca representatividade nas áreas cársticas, aparecendo na divisa do Pará com Maranhão.

- has locations in Piauí, Ceará, Pernambuco and Minas Gerais. Category (7) - Low human footprint, high proportion of natural vegetation and high proportion of protected area - is mainly present in the North, distributed in the states of Pará, Amazonas, Rondônia and Amapá, Rio de Janeiro and Bahia. Category (8) - Low anthropogenic footprint, low proportion of natural vegetation and high proportion of protected area - has little representation in karst areas, appearing on the border between Pará and Maranhão.

Tabela 2- Distribuição das oito categorias de priorização espacial para regiões cársticas brasileiras.

Categoria	Regiões de ocorrência
1	Amazonas, Pará, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.
2	Piauí, Bahia, Minas Gerais, Pernambuco e Paraíba.
3	Sem correspondência
4	Rondônia, Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Paraná.
5	Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Pará e Tocantins.
6	Piauí, Ceará, Pernambuco e Minas Gerais.
7	Pará, Amazonas, Rondônia, Amapá, Rio de Janeiro e Bahia.
8	Pará e Maranhão.

Table 2- Distribution of the eight spatial prioritization categories for Brazilian karst regions.

Category	Regions of occurrence
1	Amazonas, Pará, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina and Rio Grande do Sul.
2	Piauí, Bahia, Minas Gerais, Pernambuco and Paraíba.
3	No correspondence
4	Rondônia, Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Bahia, Minas Gerais, São Paulo and Paraná.
5	Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Pará and Tocantins.
6	Piauí, Ceará, Pernambuco and Minas Gerais.
7	Pará, Amazonas, Rondônia, Amapá, Rio de Janeiro and Bahia.
8	Pará and Maranhão.

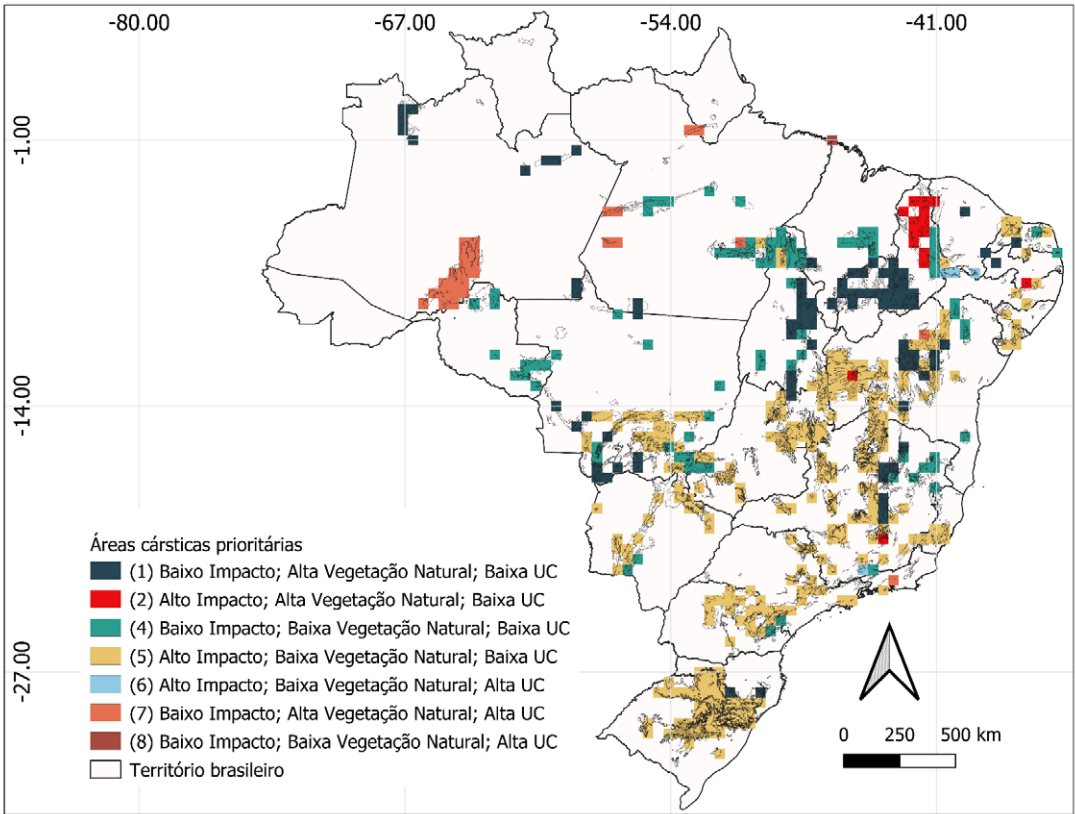


Figura 2- Mapa de priorização espacial para áreas cársticas brasileiras.

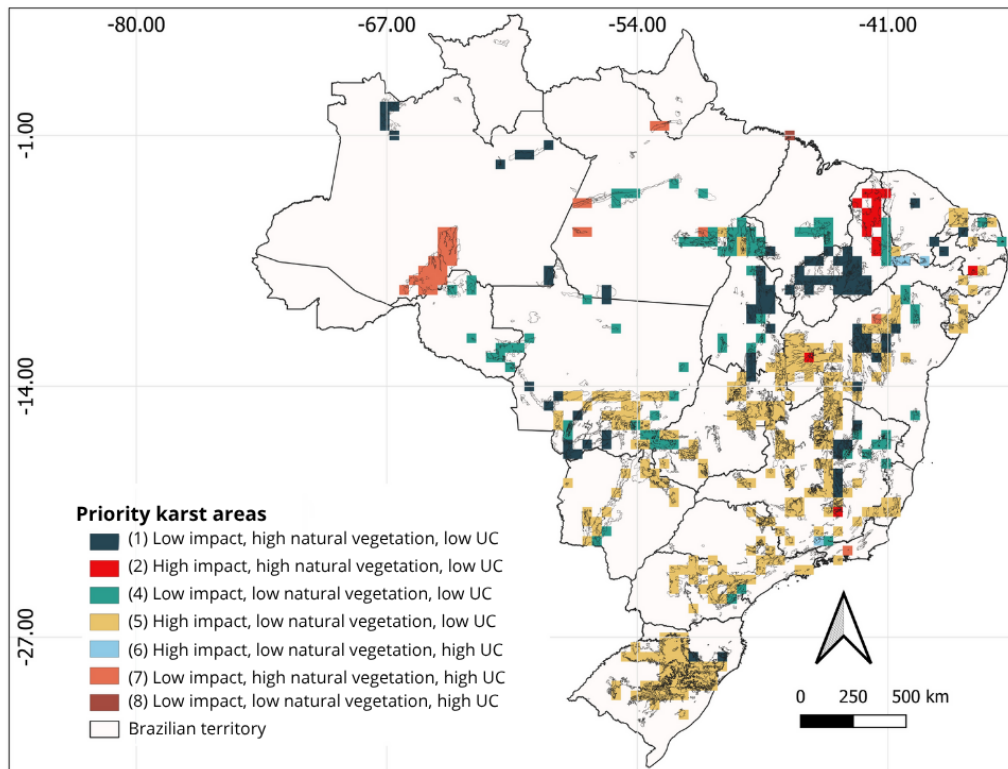


Figure 2- Spatial prioritization map for Brazilian karst areas.

DISCUSSÃO

A abordagem de priorização de áreas cársticas para conservação, em macroescala, proporciona entender como está configurada espacialmente a relação entre impacto, preservação e proteção das áreas cársticas brasileiras. Os resultados demonstram que, com base nos limites aqui utilizados, o Brasil possui a maioria das manchas cársticas com alto índice de impacto antrópico, com baixa porcentagem de remanescentes de vegetação natural e poucas regiões protegidas, indicado pela categoria 5. Poucas são as áreas que possuem áreas cársticas com baixo impacto, com alta porcentagem de vegetação natural e protegida, indicado pela categoria 7. Tais resultados indicam claramente o alto grau de impacto antrópico sobre áreas cársticas brasileiras e destacam a necessidade de discutir e instaurar novas medidas estratégicas de conservação, como forma de salvaguardar os seus serviços ecossistêmicos, garan-

DISCUSSION

The macro-scale approach to prioritizing karst areas for conservation provides an understanding of how the relationship between impact, preservation and protection of Brazilian karst areas is spatially configured. The results show that, based on the limits used here, most of Brazil's karst areas have a high level of anthropogenic impact, with a low percentage of remnants of natural vegetation and few protected areas, as indicated by category 5. Few karst areas have low impact, with a high percentage of natural and protected vegetation, indicated by category 7. These results clearly indicate the high degree of anthropogenic impact on Brazilian karst areas and highlight the need to discuss and implement new strategic conservation measures, as a way of safeguarding their ecosystem services, guaranteeing water security (one of the goals of the 2030 agenda and the United Nations for the sustainable development of the planet) and the quality

tir a segurança hídrica (uma das metas da agenda 2030 e das nações unidas para o desenvolvimento sustentável do planeta) e a qualidade de vida humana. Abaixo discutimos as principais estratégias de conservação que podem ser adotadas para cada uma das categorias aqui propostas.

O Status de Conservação das Áreas Cársticas do Brasil

Os resultados indicam a existência de poucas manchas cársticas, espacialmente isoladas, como o caso da categoria 1, que indica áreas com baixo impacto antrópico, alta porcentagem de remanescente naturais e baixa proporção de UCs cobrindo seu território (Figura 2, verde escuro). Essas manchas estão majoritariamente localizadas na região norte do Brasil, no bioma Amazônico, além disso algumas estão localizadas nas zonas de transição entre Amazônia e Caatinga, e Amazônia e Cerrado. Politicamente essas manchas devem ser priorizadas para a criação de novas UCs e/ou aumentar a extensão territorial daquelas que já existem. Como ainda possuem elevada porcentagem de vegetação nativa e baixo impacto antrópico, essas áreas promovem serviços ecossistêmicos que, tanto em escala local, quanto em escala regional, são responsáveis por manter a qualidade de vida humana. Ressaltamos ainda que priorizar toda a mancha cárstica como estratégia de conservação, inclusive para instauração de novas UCs, auxilia a manter a biodiversidade intacta e salvaguardar as possíveis cavidades subterrâneas ainda desconhecidas, e o provimento de seus serviços ecossistêmicos. Outra estratégia de priorização para conservação das áreas cársticas é o processo de restauração. Quanto a categoria 2, que mostra regiões altamente impactadas, com pouca área protegida, mas com alta proporção de vegetação natural,

of human life. Below the main conservation strategies that can be adopted for each of the categories proposed here is discuss.

The Conservation Status of Brazil's Karst Areas

The results indicate the existence of few karstic spots, spatially isolated, as in the case of category 1, which indicates areas with low anthropic impact, a high percentage of natural remnants, and a low proportion of conservation units covering their territory (Figure 2, dark green). These patches are mainly located in northern Brazil, in the Amazon biome, and some are located in the transition zones between the Amazon and Caatinga, and the Amazon and Cerrado. Politically, these patches should be prioritized for the creation of new conservation units and/or to increase the territorial extension of existing ones. As they still have a high percentage of native vegetation and low anthropic impact, these areas promote ecosystem services that are responsible for maintaining human quality of life, both locally and regionally. The prioritizing of the entire karst area as a conservation strategy is also emphasized, including for the establishment of new conservation units, which helps to keep biodiversity intact and safeguard possible unknown underground caves and the provision of their ecosystem services. Another prioritization strategy for the conservation of karst areas is the restoration process. As for category 2, which shows highly impacted regions with little protected area but a high proportion of natural vegetation, very present in the state of Piauí, the sustainable use of the region's resources is recommend (Figure 2 - red). Spatial prioritization divided the state into

muito presente no estado do Piauí, indicamos o uso sustentável dos recursos da região (Figura 2 - vermelho). A priorização espacial dividiu o estado em duas categorias principais, o norte com a (4) e o sul com a (1). O Piauí possui vasta quantidade de solo cárstico, com destaque para o Alto Vale do Rio Piauí, inserido no Parque Nacional Serra da Capivara, que possui valor arqueológico, paleontológico e indicadores paleoambientais (La Salvia & Simões, 1997). Contudo, a região tem enfrentado mudanças na cobertura do solo e aumento do crescimento populacional, resultando principalmente na perda de vegetação e formação de solos impermeáveis (Lima *et al.*, 2021; Peret, 2021). Tais fatores podem ser problemáticos tanto para as áreas que não estão protegidas, no norte, quanto para o sul do estado com terras protegidas, mas que podem se tornar apenas um fragmento isolado afetado pela poluição.

A categoria 4, indica áreas com baixo impacto antrópico, com pouca porcentagem de UC e com pouca vegetação nativa (Figura 2, verde claro). Essas áreas, são normalmente dominadas por atividades de produção de commodities agrícolas. Dessa forma, a restauração da vegetação natural, de forma ativa ou passiva, é a estratégia primordial para que as manchas cársticas se mantenham preservadas para o provimento de serviços ecossistêmicos. É claro que a estratégia de restauração dessas áreas deve priorizar também medidas sustentáveis tanto para restaurar as áreas impactadas quanto para manter as atividades de produção das commodities. As medidas de restauração devem priorizar novas estratégias sustentáveis de produção de commodities principalmente voltadas para a segurança hídrica da agricultura, uma das principais ameaças atuais da produção das commodities agrícolas (Li *et al.*, 2023). Assim sendo, restaurar essas manchas cársticas, e manter

two main categories, the north with four (4) and the south with one (1). Piauí has a vast amount of karstic soil, especially in the Upper Piauí River Valley, located in the Serra da Capivara National Park, which has archaeological and paleontological value and paleoenvironmental indicators (La Salvia & Simões, 1997). However, the region has faced changes in land cover and increased population growth, resulting mainly in vegetation loss and the formation of impermeable soils (Lima et al., 2021; Peret, 2021). These factors can be problematic for unprotected areas in the north and for the south of the state with protected lands, which may become isolated fragments affected by pollution.

Category 4 indicates areas with low anthropic impact, with a low percentage of conservation units and little native vegetation (Figure 2, light green). These areas are usually dominated by agricultural commodity production activities. Therefore, the restoration of natural vegetation, either actively or passively, is the primary strategy for preserving karst areas to provide ecosystem services. Of course, the restoration strategy for these areas must also prioritize sustainable measures to restore impacted areas and maintain commodity production. Restoration measures should prioritize new sustainable commodity production strategies focused primarily on water security in agriculture, one of the main current threats to agricultural commodity production (Li et al., 2023). Therefore, restoring these karstic areas and maintaining their protection will help both to protect biodiversity and yet unknown underground caves, and to maintain natural resources that will aid agricultural production, thereby maintaining the region's socioeconomic development in a sustainable manner.

Most of the karstic areas located in the Cerrado, Atlantic Forest, Pampa, and Caatinga biomes are classified as category 5, indicating a high level of

a sua proteção, irá auxiliar tanto na proteção da biodiversidade e de cavidades subterrâneas ainda desconhecidas, quanto na manutenção de recursos naturais que irão auxiliar a produção agrícola, mantendo o desenvolvimento socioeconômico da região de forma sustentável.

Grande parte das manchas cársticas localizadas nos biomas Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Caatinga estão classificadas na categoria 5, indicando um elevado nível de impacto antrópico, baixa cobertura de vegetação natural e pouco território protegido (Figura 2, amarelo). Esse padrão reflete a atual situação de regiões em que o desenvolvimento de atividades econômicas de exploração tem carga política e histórica, ou seja, ao longo da história do país foram afetadas pela devastação da vegetação somado pela falta de leis ambientais mais rigorosas (Ribeiro *et al.*, 2021; Marques, 2022; Capoane & Fushimi, 2024; Costa *et al.*, 2024). Nossa recomendação é a criação de estratégias que visam o desenvolvimento sustentável garantindo a continuidade das atividades e também a manutenção dos recursos naturais que essas áreas ainda oferecem. O desenvolvimento sustentável além de sinalizar uma bandeira verde apresentada para empreendimentos e países que têm exigências em ações “verdes”, também permite o contínuo crescimento econômico sem impactar a qualidade de vida, devido ao colapso de ecossistemas impactados (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; UN, 2023).

O sul do estado do Ceará foi o local que apresentou a categoria 6 de maneira representativa, indicando, um elevado nível de impacto antrópico, baixa cobertura de vegetação natural e alta proporção de terra protegida (Figura 2, azul claro). Nesse local, há uma área de proteção ambiental, a APA da Chapada do Araripe, próxima a fragmentos de vegetação, cercado por terras ocupadas

anthropic impact, low natural vegetation cover, and little protected territory (Figure 2, yellow). This pattern reflects the current situation in regions where the development of economic exploitation activities has political and historical significance, i.e., throughout the country's history, they have been affected by the devastation of vegetation coupled with the lack of stricter environmental laws (Ribeiro et al., 2021; Marques, 2022; Capoane & Fushimi, 2024; Costa et al., 2024). It is recommended to create strategies aimed at sustainable development, ensuring the continuity of activities and the maintenance of the natural resources that these areas still offer. Sustainable development not only signals a green flag for enterprises and countries that have requirements for “green” actions, but also allows for continued economic growth without affecting quality of life due to the collapse of impacted ecosystems (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; UN, 2023).

The southern part of Ceará state was the location that presented category 6 in a representative manner, indicating a high level of anthropic impact, low natural vegetation cover, and a high proportion of protected land (Figure 2, light blue). In this location, there is an environmental protection area, the Chapada do Araripe APA, close to fragments of vegetation, surrounded by agricultural and livestock activities land (MapBiomas, 2022). This scenario is representative of what Brazil currently looks like, with a protected area surrounded by land used for economic production. Caution is suggested in this location, and potential regions like it, in addition to legislation aimed at stricter enforcement in order to avoid impacts such as pollution of the APA. Areas of the Amazon biome are classified in category 7, which indicates that they are protected and, consequently, have little anthropic impact and high native area coverage (Figure 2, crimson

pela atividade agropecuária (MapBiomas, 2022). Esse cenário representa bem o que o Brasil transpõe atualmente, uma área de proteção circundada por terras direcionadas à produção econômica. Sugerimos nesse local, e potenciais regiões como essa, cautela e uma legislação voltada para fiscalização mais rigorosa a fim de evitar impactos como poluição da APA. Áreas do bioma amazônico estão classificadas na categoria 7, o que indica que estão protegidas, e consequentemente possuem pouco impacto antrópico e alta cobertura de área nativa (Figura 2, vermelho carmesim). A Amazônia possui maior visibilidade por parte da comunidade internacional, recebendo fundos de organizações voltadas para conservação, diferente de outros biomas como o Cerrado, por exemplo. Apesar da visibilidade, a Amazônia sofre com problemas de desmatamento (WWF, 2022). Para essa categoria priorizamos novamente ações de fiscalização ambiental. A mesma recomendação é dada para as áreas classificadas na categoria 8 (Figura 2, vermelho cornalina), cuja qual apresenta boa parte do carste protegido e completamente isolada no norte do país.

Conservação x Áreas Cársticas

No Brasil, o Decreto 99.556/1990 foi o primeiro que de fato trouxe indiretamente o carste em pauta a fim de garantir a integridade física e ecológica das cavidades naturais subterrâneas (Brasil, 1990), a partir de então outras leis, juntamente com a criação do CECAV, garantiram maior especificidade em como as cavernas que estão inseridas no carste devem ser protegidas. Atualmente, a proteção do carste está indiretamente atrelada com o grau de relevância da caverna inserida no mesmo, que é medida através de parâmetros ligados a estudos biológicos, geológicos, culturais, entre outros (Brasil, 2009; Brasil, 2022). Entretanto, a depender do

red). The Amazon has greater visibility from the international community, receiving funds from conservation-oriented organizations, unlike other biomes such as the Cerrado, for example. Despite its visibility, the Amazon suffers from deforestation problems (WWF, 2022). For this category, environmental enforcement actions are again a priority. The same recommendation is given for areas classified in category 8 (Figure 2, carnelian red), which presents a large part of the protected karst and is completely isolated in the north of the country.

Conservation x Karst Areas

In Brazil, Decree 99.556/1990 was the first to indirectly bring karst onto the agenda in order to ensure the physical and ecological integrity of natural underground caves (Brazil, 1990). Since then, other laws, together with the creation of CECAV, have ensured greater specificity in how caves that are part of karst should be protected. Currently, the protection of karst is indirectly linked to the degree of relevance of the cave within it, which is measured through parameters related to biological, geological, and cultural studies, among others (Brazil, 2009; Brazil, 2022). Nevertheless, depending on the classified degree of the caves, whether high, medium, or low, the

grau classificado das cavernas, seja alto, médio e baixo, a legislação permite que a caverna possa sofrer impactos ambientais irreversíveis, isso significa que apenas as o carste com cavidades com grau de relevância máximo não podem sofrer alterações irreversíveis de fato (Brasil, 2008; Donato *et al.*, 2018). Porém, existe uma brecha no conhecimento espeleológico de distribuição das cavernas, que é mais forte próximo de zonas de mineração e centros urbanos, e também depende da fiscalização efetiva para que as cavernas sejam cadastradas e protegidas. Por conta disso, nós reforçamos que estudos de priorização de conservação das áreas cársticas, e não somente das cavidades subterrâneas, são mais eficientes para conservação da biodiversidade, da vegetação nativa, e dos serviços ecossistêmicos correlatos. Essa conservação, e manutenção dos serviços ecossistêmicos das áreas cársticas, irá trazer valor aos produtos e auxiliará tanto na melhoria das atividades econômicas quanto na qualidade de vida humana.

Recentemente a discussão de estratégias de uso sustentável de áreas cársticas tem vindo à tona, principalmente como forma de mitigar o impacto antrópico nesses ambientes (Pamardhi-Utomo, 2020). Contudo, poucas abordagens indicam como e para que as áreas cársticas devem ser priorizadas (Fattorini *et al.*, 2022; Oliveira & Ferreira 2024). No Brasil, foram criados índices de priorização de cavernas por Simões *et al.* (2014), Souza-Silva *et al.* (2015) e Nitzu *et al.* (2018) considerando principalmente a biodiversidade registrada em cavidades subterrâneas, sendo estes comparados por Rabelo *et al.* (2018). Tais índices de priorização são essenciais para instaurar a criação de UCs, porém eles consideram apenas a localização da caverna e seu entorno, sem expandir para toda mancha cárstica que pode abrigar cavernas ainda desconhecidas. Além disso,

legislation allows the cave to suffer irreversible environmental impacts, which means that only karst with caves with the highest degree of relevance cannot suffer irreversible changes (Brazil, 2008; Donato et al., 2018). However, there is a gap in speleological knowledge of cave distribution, which is stronger near mining areas and urban centers, and depends on effective enforcement for caves to be registered and protected. Due to this fact, it is emphasized that studies prioritizing the conservation of karst areas, and not just underground caves, are more efficient for the conservation of biodiversity, native vegetation, and related ecosystem services. This conservation and maintenance of ecosystem services in karst areas will add value to products and help improve both economic activities and human quality of life.

Recently, the discussion of strategies for the sustainable use of karst areas has come to the fore, mainly as a way to mitigate anthropogenic impact on these environments (Pamardhi-Utomo, 2020). However, few approaches indicate how and why karst areas should be prioritized (Fattorini et al., 2022; Oliveira & Ferreira 2024). In Brazil, cave prioritization indices were created by Simões et al. (2014), Souza-Silva et al. (2015), and Nitzu et al. (2018), mainly considering the biodiversity recorded in underground caves, which were compared by Rabelo et al. (2018). Such prioritization indices are essential for establishing the creation of conservation units, but they only consider the location of the cave and its surroundings, without expanding to the entire karst area that may harbor yet unknown caves. Furthermore, to prioritize a cave, Souza et al. (2021) showed that it is necessary to combine different ecological metrics, rather than just one index that refers only to endemic subterranean species. In this sense, the prioritization of karst areas, considering all the coverage that these environments encompass, opens up a new approach to prioritization that can even be combined

para priorizar uma caverna, Souza *et al.* (2021) mostraram que é preciso combinar diferentes métricas ecológicas, ao invés de apenas um índice que remete a apenas espécies subterrâneas endêmicas. Nesse sentido, a priorização das áreas cársticas, considerando toda cobertura que esses ambientes abrangem, abre uma nova abordagem de priorização que pode inclusive ser combinada com as estratégias baseadas em cavidades subterrâneas já conhecidas, a fim de estabelecer soluções mais efetivas, complementares e inovadoras para a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro em larga escala espacial.

No Brasil, a criação de Unidades de Conservação segue as instruções do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) (BRASIL, 2000). Cerca de 49% das UC's estão no domínio amazônico, enquanto os domínios do Cerrado e Mata Atlântica só possuem 10% de seu território protegido (Vieira *et al.*, 2019; Lamounier *et al.*, 2024). A maior parte das regiões cársticas estão na região central e nordeste do país. Criar UCs é importante para garantir a conservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. Porém, a determinação de como e onde a UC vai ser criada é decisão política e o apelo econômico normalmente pesa mais do que atributos ecológicos. Theulen & Sessegholo (2001) discutem sobre a eficiência das UCs e demonstram que a eficiência será maior com a inclusão também a diversidade espeleológica, ao invés de lidar com esses ecossistemas de forma separada, já que o mundo subterrâneo é dependente da superfície (Mammola & Leroy, 2018).

No Brasil, a proteção do patrimônio espeleológico é dada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) e pelo Plano de Ação Nacional para Conservação do Patrimônio Espeleológico Brasileiro (PAN) (ICMBiob, 2024). Desde o surgimento destes órgãos específicos

with strategies based on already known caves, in order to establish more effective, complementary, and innovative solutions for the protection of Brazilian speleological heritage on a large spatial scale.

In Brazil, the creation of Conservation Units follows the instructions of the National System of Nature Conservation Units (SNUC) (BRAZIL, 2000). About 49% of UCs are in the Amazon region, while only 10% of the Cerrado and Atlantic Forest regions are protected (Vieira et al., 2019; Lamounier et al., 2024). Most karst regions are located in the central and northeastern parts of the country. Creating conservation units is important to ensure the conservation of biodiversity and ecosystem services. However, determining how and where a conservation unit will be created is a political decision, and economic appeal usually outweighs ecological attributes. Theulen & Sessegholo (2001) discuss the efficiency of conservation units and demonstrate that efficiency will be greater if speleological diversity is also included, rather than dealing with these ecosystems separately, since the underground world is dependent on the surface (Mammola & Leroy, 2018).

In Brazil, the protection of speleological heritage is provided by the National Center for Cave Research and Conservation (CECAV) and the National Action Plan for the Conservation of Brazilian Speleological Heritage (PAN) (ICMBiob, 2024). Since the emergence of these specific protection agencies, data on the Brazilian speleological situation has been made available, allowing for transparent monitoring of the status of underground environments. CECAV, for example, provides specialized literature, maps with the distribution and classification of karst soil in Brazil, and data on the distribution of already cataloged caves. In addition, there has been a push to reallocate financial resources to projects in these ecosystems, such as the Speleological Project Management System – Pró-Espeleo, as well as calls for

de proteção, tem havido a disponibilização de dados a respeito da situação espeleológica brasileira, permitindo o acompanhamento transparente do status dos ambientes subterrâneos. O CECAV por exemplo disponibiliza literatura especializada, mapas com a distribuição e classificação do solo cárstico no Brasil e dados de distribuição de cavernas já catalogadas. Além disso, há o fomento de realocação de recursos financeiros para projetos nesses ecossistemas, como o Sistema de Gestão de Projetos Espeleológicos – Pró-Espeleo, bem como chamadas de termos de compensação espeleológica ao longo dos últimos anos. Contudo, mesmo com esses esforços, dados oriundos de consultorias, e de levantamentos espeleológicos atrelados à outorga de mineração, não são publicamente disponíveis, ou quando são, têm difícil acesso e não estão integrados em uma única fonte. Dessa forma, a disponibilização gratuita de dados espeleológicos de forma aberta e de fácil acesso são prioritárias para que medidas de priorização de conservação da biodiversidade, e da manutenção de serviços ecossistêmicos, sejam produzidas e revistas ao longo do tempo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de priorização espacial é uma ferramenta precisa e rápida para ações de conservação em políticas públicas tanto para fins de preservação quanto para exploração, combinando o custo e a efetividade em táticas de preservação de habitats. Neste trabalho, propomos a distribuição de prioridades e a inclusão das manchas cársticas nas decisões políticas e ambientais do Brasil. A preservação dessas áreas gera segurança hídrica - um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável proposto pela Unesco, na Agenda 2030 - tanto para a produção de commodities e desenvolvimento econômico quanto para o bem-estar humano.

speleological compensation terms over the last few years. However, even with these efforts, data from consultancies and speleological surveys linked to mining concessions are not publicly available, or when they are, they are difficult to access and are not integrated into a single source. Therefore, the free availability of speleological data in an open and easily accessible form is a priority so that measures to prioritize biodiversity conservation and the maintenance of ecosystem services can be produced and reviewed over time.

FINAL REMARKS

The use of spatial prioritization is an accurate and rapid tool for conservation actions in public policies, both for preservation and exploitation purposes, combining cost and effectiveness in habitat preservation tactics. In this work, priority distribution and the inclusion of karst areas in Brazil's political and environmental decisions are recommended. The preservation of these areas generates water security—one of the Sustainable Development Goals proposed by UNESCO in its 2030 Agenda—both for commodity production and economic development and for human well-being.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Cecav e IABS pelo suporte financeiro através da bolsa de mestrado – TCCE 1/2022 N° 031/2024 (TCCE ICMBio/Vale III: compensação espeleológica). Aos membros do Laboratório de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade (MacrEco) da Universidade de Mato Grosso pela contribuição intelectual a este trabalho.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Cecav and IABS for their financial support through the master's scholarship – TCCE 1/2022 No. 031/2024 (TCCE ICMBio/Vale III: speleological compensation). To the members of the Laboratory of Macroecology and Biodiversity Conservation (MacrEco) at the University of Mato Grosso for their intellectual contribution to this work.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

BELANDI, C. *Between 2000 and 2020, agricultural area grew 230 thousand km², natural vegetation reduced 513 thousand km² in Brazil*. IBGE. 2022. disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/en/agencia-news/2184-news-agency/news/35174-between-2000-and-2020-agricultural-area-grew-230-thousand-km-natural-vegetation-reduced-513-thousand-km-in-brazil>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRASIL. Decreto no 99.556, de 1 de outubro de 1990. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, p. 18836. 2 out. 1990.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, p. 1. 19 jul. 2000.

BRASIL. Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, p. 8. 10 nov. 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 02, de 20 de agosto de 2009. Institui a metodologia de classificação do grau de relevância de cavidades naturais subterrâneas. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, n. 160, p. 68-69, 21 ago. 2009.

BRASIL. Decreto nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 12 de janeiro de 2022.

CAPOANE, V.; FUSHIMI, M. Devastation of the cerrado of mato grosso do sul and the advance of arenization in the pardo river watershed. *Discover Environment*, v.2, n. 1, p.111, 2024.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R. D.; CERRI, C. E. P. (2010). Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 277-290, 2010.

CEBALLOS, G.; EHRlich, P. R.; BARNOSKY, A. D.; GARCÍA, A.; PRINGLE, R. M.; PALMER, T. M. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science advances*, v. 1, n. 5, 2015.

CERKVENIK, R. Impacts of visitors on cave's physical environment. *Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas*. v. 9, n. 1, 2016.

CHEN, J.; XIAO, H.; LI, Z.; LIU, C.; WANG, D.; WANG, L.; TANG, C. (2019). Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China. *Ecological Engineering*, v. 132, p. 109-114, 2019.

COSTA, D. P.; LENTINI, C. A.; CUNHA LIMA, A. T.; DUVERGER, S. G.; VASCONCELOS, R. N.; HERRMANN, S. M.; FERREIRA-FERREIRA, J.; OLIVEIRA, M.; DA SILVA BARBOSA, L.; CORDEIRO, C. L.; SANTOS, N. A. All Deforestation Matters: Deforestation Alert System for the Caatinga Biome in South America's Tropical Dry Forest. *Sustainability*, v. 16, n. 20, p. 9006, 2024.

DEAN, W. *A Ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira*. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. 484p.

DIRZO, R.; YOUNG, H. S.; GALETTI, M.; CEBALLOS, G.; ISAAC, N. J.; COLLEN, B. Defaunation in the Anthropocene. *Science*, v. 345, n. 6195, p. 401-406, 2014.

DONATO, C. R.; Oliveira, A. G.; MACEDO, H. S.; DONATO, R. R.; SILVA, M. R. *Protegendo as cavernas do Brasil*. Brasília: ICMBio, 2018.

ELLIS, E. C.; RAMANKUTTY, N. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 6, n. 8, p. 439-447, 2008.

FATTORINI, S.; FIASCA, B.; DI LORENZO, T.; DI CICCIO, M.; GALASSI, D. M. A new protocol for assessing the conservation priority of groundwater dependent ecosystems. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 30, n. 8, p. 1483-1504, 2020.

FORD D. C.; WILLIAMS P. W. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester: 2007. 562p.

GUTIÉRREZ, J. A.; DUIVENVOORDEN. J. F. Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Revista mexicana de biodiversidad*, v. 81, n. 3, p. 875-882, 2010.

ICMBioa. *Áreas de ocorrência de cavernas no Brasil*. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/publicacoes/Area%20de%20Ocorrencia%20de%20Cavernas>. Acesso em: 27 nov. 2024.

ICMBiob. *Plano de ação nacional para conservação do patrimônio espeleológico brasileiro*. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/pan/pan-cavernas-do-brasil>. Acesso em: 11 dez. 2024.

IUCN. *IUCN WCPA Caves and Karst Working Group*. 2024. Disponível em: <https://iucn.org/our-union/commissions/group/iucn-wcpa-geoheritage-specialist-group/iucn-wcpa-caves-and-karst>. Acesso em: 12 dez. 2024.

JAUREGUIBERRY, P.; TITEUX, N.; WIEMERS, M.; BOWLER, D. E.; COSCIEME, L.; GOLDEN, A.S.; GUERRA, C. A.; JACOB, U.; TAKAHASHI, Y.; SETTELE, J.; DÍAZ, S. The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science advances*, v. 8, n. 45, 2022.

KONZEN, I. S. GAMBOA, A.; GAIDA, W.; ROSA, G. M.; FLACH, K. A.; BONES, U. A.; BREUNIG, F. N.; MENDONÇA, A. M.; MAHNKE, M. R.; MACIEL, D. H. Impact of anthropogenic activities and land use on water quality: an analysis in microbasins in Rio Grande Do Sul, Brazil. *Hygeia*, v. 20, 2024.

LAMOUNIER, W. L.; DOS SANTOS, J. S.; RODRIGUES, E. L.; DRUMOND, M. A. Defining priority areas for conservation based on multispecies functional connectivity. *Biological Conservation*, v. 290, 2024.

LA SALVIA, E. S.; SIMÕES, P. R. G. A área cárstica do Alto Vale do Rio Piauí, São Raymundo Nonato e Coronel José Dias/pi: uma visão preliminar. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia. 24., 1997, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto: SEB, 1997, Campinas: SBE, p.109-112, 2017.

LI, X.; ZHANG, Y.; MA, N.; ZHANG, X.; TIAN, J.; ZHANG, L.; MCVICAR, T. R.; WANG, E.; XU, J. Increased grain crop production intensifies the water crisis in Northern China. *Earth's Future*, v. 11, n. 9, 2023.

LIMA, S. M. S. A.; LOPES, W. G. R.; FAÇANHA, A. C. Alterações na cobertura do solo em Teresina, Piauí, Brasil. *Sociedade e Natureza*, v. 33, p. e58922, 2021.

LOCKE, K. A.; WINTER, K. Estimating thresholds of natural vegetation for the protection of water quality in south African catchments. *Science of The Total Environment*, p.173924, 2024.

MAMMOLA, S.; LEROY, B. Applying species distribution models to caves and other subterranean habitats. *Ecography*, v. 41, n. 7, p. 1194-1208, 2018.

MAPBIOMAS. *MapBiomas launches unprecedented platform that for the first time assesses degradation in all Brazilian biomes*. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/en/2024/07/05/ate-25-da-vegetacao-nativa-do-brasil-pode-estar-degradada/>. Acesso em: 10 dez. 2024.

MARQUES, L. Brazil, 200 years of devastation: What will remain of the country after 2022? *Estudos Avançados*, v. 36, p. 169-184, 2022.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.

MU, H.; LI, X.; WEN, Y.; HUANG, J.; DU, P.; SU, W.; MIAO, S.; GENG, M. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data*, v. 9, n. 1, p.176, 2022.

NITZU, E.; VLAICU, M.; GIURGINCA, A.; MELEG, I. N.; POPA, I.; NAE, A.; BABA, Ș. Assessing preservation priorities of caves and karst areas using the frequency of endemic cave-dwelling species. *International Journal of Speleology*, v. 47, n. 1, p. 43-52, 2018.

OLIVEIRA, U.; SOARES-FILHO, B. S.; PAGLIA, A. P.; BRESCOVIT, A. D.; DE CARVALHO, C. J.; SILVA, D. P.; REZENDE, D. T.; LEITE, F. S. F.; BATISTA, J. A. N.; BARBOSA, J. P. P. P.; STEHMANN, J. R. Biodiversity conservation gaps in the Brazilian protected areas. *Scientific reports*, v. 7, n. 1, p. 9141, 2017.

OLIVEIRA, M. P.; FERREIRA, R. L. Extending beyond individual caves: a graph theory approach broadening conservation priorities in Amazon iron ore caves. *PeerJ*, v. 12, p. e16877, 2024.

PAMARDHI-UTOMO, R. A strategy for the sustainable development of the karst area in Wonogiri. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 447, n. 1. IOP Publishing, 2020.

PERET, E. *IBGE releases Changes in Land Use and Cover by state between 2000 and 2018*. IBGE. 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/en/agencia-news/2184-news-agency/news/30325-ibge-releases-changes-in-land-use-and-cover-by-state-between-2000-and-2018>. Acesso em: 21 dez. 2024.

PRASNIEWSKI, V. M.; GONZALEZ-DAZA, W.; ALVARENGA, G. D. V.; SANTOS-SILVA, L.; TEIXIDO, A. L.; IZZO, T. J. Economic, environmental and social threats of a mining exploration proposal on indigenous lands of Brazil. *Acta Amazonica*, v. 54, n. 2, 2024.

PIMM, S. L.; JENKINS, C. N.; LI, B. V. How to protect half of Earth to ensure it protects sufficient biodiversity. *Science advances*, v. 4, n. 8, 2018.

QI, X.; ZHANG, C.; WANG, K. Comparing remote sensing methods for monitoring karst rocky desertification at sub-pixel scales in a highly heterogeneous karst region. *Scientific reports*, v. 9, n. 1, p. 13368, 2019.

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

RIBEIRO, D.; ZORN, M. Sustainability and Slovenian karst landscapes: Evaluation of a low karst plain. *Sustainability*, v. 13, n. 4, p. 1655, 2021.

RIBEIRO, S.; MOREIRA, L. F.; OVERBECK, G. E.; MALTCHIK, L. Protected Areas of the Pampa biome presented land use incompatible with conservation purposes. *Journal of Land Use Science*, v. 16, n. 3, p. 260-272, 2021.

ROE, D. S. N.; ELLIOTT, J. *Biodiversity loss is a development issue: a rapid review of evidence*. London: IIED Issue Paper. IIED, 2019.

SANDERSON, E. W.; JAITEH, M.; LEVY, M. A.; REDFORD, K. H.; WANNEBO, A. V.; WOOLMER, G. The human footprint and the last of the wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. *BioScience*, v. 52, n. 10, p. 891-904, 2002.

SIMÕES, M. H.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Cave invertebrates in Northwestern Minas Gerais state, Brazil: endemism, threats and conservation priorities. *Acta Carsologica*, v. 43, p. 159–174, 2014.

SINIMBÚ, F. *Brazil has lost 33% of its natural areas 1985–2023*. Agência Brasil. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/en/geral/noticia/2024-08/brazil-has-lost-33-its-natural-areas-1985-2023>. Acesso em: 12 dez. 2024.

SOARES-FILHO, B. S.; OLIVEIRA, U.; FERREIRA, M. N.; MARQUES, F. F. C.; DE OLIVEIRA, A. R.; SILVA, F. R.; BÖRNER, J. Contribution of the Amazon protected areas program to forest conservation. *Biological Conservation*, v. 279, p. 109928, 2023.

SODHI, N. S.; EHRLICH, P. R. *Conservation biology for all*. Oxford: Oxford university press, 2010.

SONTER, L. J.; HERRERA, D.; BARRETT, D. J.; GALFORD, G. L.; MORAN, C. J.; SOARES-FILHO, B. S. Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature communications*, v. 8, n. 1, p. 1013, 2017.

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. *Environ Manage*, v. 55, p. 279–295, 2015.

SOUZA, M. F. V. R.; ALVARENGA, D. A.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Do different relevance attributes indicate the same conservation priorities? A case study in caves of southeastern Brazil. *International Journal of Speleology*, v. 50, n. 3, p. 223-238, 2021.

STANKOVIĆ, M. V. Biodiversity in Karst Landscapes: Introduction to the Special Issue. *Diversity*, v. 15, n. 3, p. 408, 2023.

UN. *Sustainable Development Goals: 15 Life and Land*. 2023. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/biodiversity/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SOBRAL-SOUZA, T.; VANCINE, M. H.; RIBEIRO, M. C.; LIMA-RIBEIRO, M. S.; Efficiency of protected areas in Amazon and Atlantic Forest conservation: A spatio-temporal view. *Acta Oecologica*, v. 87, p. 1-7, 2018.

THEULEN, V.; SESSEGOLO, G. C. Estratégias para conservação das cavernas brasileiras. *SPELEO BRAZIL*, v. 2001, p. 268-271, 2001.

UNDP. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. 2018. Disponível em: <https://www.undp.org/ukraine/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development>. Acesso em: 15 dez. 2024.

UNEP. *Leaders' pledge for nature: United to reverse biodiversity loss by 2030 for sustainable development*. 2020. Disponível em: www.leaderspledgefornature.org. Acesso em: 26 nov. 2024.

VENTER, O.; SANDERSON, E. W.; MAGRACH, A.; ALLAN, J. R.; BEHER, J.; JONES, K. R.; POSSINGHAM, H. P.; LAURANCE, W. F.; WOOD, P.; FEKETE, B. M.; LEVY, M. A. Global terrestrial Human Footprint maps for 1993 and 2009. *Scientific data*, v. 3, n. 1, p. 1-10, 2016.

VIEIRA, R. R.; PRESSEY, R. L.; LOYOLA, R. The residual nature of protected areas in Brazil. *Biological Conservation*, v. 233, p. 152-161, 2019.

WILSON, M. C.; CHEN, X. Y.; CORLETT, R. T.; DIDHAM, R. K.; DING, P.; HOLT, R. D.; HOLYOAK, M.; HU, G.;

HUGHES, A. C.; JIANG, L.; LAURANCE, W. F. Habitat fragmentation and biodiversity conservation: key findings and future challenges. *Landscape Ecology*, v. 31, p.219-227, 2016.

WWF. *Deforestation in the Amazon remains at high levels, with a rate of 11,568 km² in 2022*. 2022. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?84261/Deforestation-in-the-Amazon-remains-at-high-levels-with-a-rate-of-11568-km2-in-2022>. Acesso em: 20 dez. 2024.

ZALASIEWICZ, J.; ADENEY THOMAS, J.; WATERS, C. N.; TURNER, S.; HEAD, M. J. The meaning of the Anthropocene: why it matters even without a formal geological definition. *Nature*, v. 632, n. 8027, p. 980-984, 2024.