ReGeo ISSN: 2177-3246

ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DO MUNICÍPIO DE MORRO DO CHAPÉU-BA: ANÁLISE MULTICRITÉRIO EM AMBIENTE SIG

ECOLOGICAL-ECONOMIC ZONING OF THE MUNICIPALITY OF MORRO DO CHAPÉU, BAHIA, BRAZIL: A GIS-BASED MULTI-CRITERIA ANALYSIS

ZONIFICACIÓN ECOLÓGICO-ECONÓMICA DEL MUNICIPIO DE MORRO DO CHAPÉU, BAHÍA, BRASIL: ANÁLISIS MULTICRITERIO EN ENTORNO SIG

https://doi.org/10.56238/revgeov17n10-061

Data de submissão: 12/09/2026 **Data de publicação:** 12/10/2026

Alíbia Deysi Guedes da Silva
Mestra em Geografia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: alibiadeysi.prof@gmail.com

Ramon Alves de Santana
Graduação em Geografia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: ramonalves.geo@gmail.com

Rodrigo Nogueira de Vasconcelos
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: rnv@uefs.br

Taimy Cantillo Pérez
Doutora em Botânica
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: tcperez@uefs.br

Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: wrocha@uefs.br

RESUMO
Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver o mapa de zoneamento ecológico-econômico do município de Morro do Chapéu/BA, por meio da análise multicritério com abordagem espacial. Para isso, foram construídos mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo, a partir da aplicação do Processo de Hierarquia Analítica para avaliar o grau de importância relativa de um conjunto de 6 dados espaciais de temáticas ambientais, como declividade, precipitação, geologia, geomorfologia, solos e uso e cobertura da terra, além da fragilidade socioeconômica, por meio do índice de vulnerabilidade social com variáveis de população residente por setor censitário e renda, desenvolvidos e espacializados na ferramenta QGIS. O zoneamento foi agrupado em 4 classes: áreas de conservação, de regulação, de transição e de gestão crítica. Os resultados destacam o predomínio de baixa vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos (57,4%), porém, o município apresenta maior parte

de fragilidade social moderada (43,52%). No mapa de zoneamento ecológico-econômico prevaleceram as zonas de transição (45,88%), as quais são caracterizadas por apresentarem moderada instabilidade ambiental e certo grau de fragilidade socioeconômica, assim, a gestão deve prever o regulamento das atividades turísticas, requerendo conscientização ecológica. O produto gerado pode ser usado para a gestão dos projetos de geoparques e integrado ao planejamento político do município de apoio ao desenvolvimento social.

Palavras-chave: AHP. Análise Espacial. Vulnerabilidade Ambiental. Zoneamento. Índice de Vulnerabilidade Social.

ABSTRACT

This research aims to develop the ecological-economic zoning map of the municipality of Morro do Chapéu, Bahia, Brazil, through a spatially explicit multi-criteria analysis. Maps of natural vulnerability to soil loss were built by applying the Analytic Hierarchy Process to assess the relative importance of a set of six environmental spatial datasets slope, rainfall, geology, geomorphology, soils and land use and land cover together with a socioeconomic fragility map derived from a social vulnerability index combining resident population per census tract and income, all processed in QGIS. The zoning was grouped into four classes: conservation, regulation, transition and critical management areas. The results show a predominance of low environmental vulnerability to erosion processes (57.4%), whereas most of the municipality presents moderate social fragility (43.52%). Transition zones prevailed in the ecological-economic zoning map (45.88%); they combine moderate environmental instability with some degree of socioeconomic fragility, so that management must regulate tourism activities and foster ecological awareness. The resulting product can support the management of geopark projects and be integrated into municipal planning in support of social development.

Keywords: AHP. Spatial Analysis. Environmental Vulnerability. Zoning. Social Vulnerability Index.

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar el mapa de zonificación ecológico-económica del municipio de Morro do Chapéu, Bahía, Brasil, mediante un análisis multicriterio con enfoque espacial. Se construyeron mapas de vulnerabilidad natural a la pérdida de suelo, aplicando el Proceso Analítico Jerárquico para evaluar la importancia relativa de seis variables ambientales pendiente, precipitación, geología, geomorfología, suelos y uso y cobertura de la tierra además de la fragilidad socioeconómica, obtenida mediante un índice de vulnerabilidad social basado en población residente por sector censal e ingreso, procesados en QGIS. La zonificación se agrupó en cuatro clases: conservación, regulación, transición y gestión crítica. Los resultados destacan el predominio de baja vulnerabilidad ambiental a los procesos erosivos (57,4%), mientras que la mayor parte del municipio presenta fragilidad social moderada (43,52%). En el mapa de zonificación predominaron las zonas de transición (45,88%), caracterizadas por inestabilidad ambiental moderada y cierto grado de fragilidad socioeconómica, por lo que la gestión debe prever la regulación de las actividades turísticas y la concienciación ecológica. El producto generado puede utilizarse en la gestión de proyectos de geoparques y en la planificación municipal de apoyo al desarrollo social.

Palabras clave: AHP. Análisis Espacial. Vulnerabilidad Ambiental. Zonificación. Índice de Vulnerabilidad Social.

1 INTRODUÇÃO

Discutir sobre a forma de ocupação socioespacial é direcionar e orientar o ordenamento territorial adequado. A preocupação está nos limites de exploração dos recursos naturais, intensificado pelo desenvolvimento do processo produtivo e atividades econômicas de caráter neoextrativista (Svampa, 2019). O Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) é um instrumento técnico e político que subsidia o planejamento do território, a partir da identificação do grau de vulnerabilidade dos ambientes socioambientais (Becker; Egler, 1996).

O ZEE está previsto na Política Nacional do Meio Ambiente, Lei Federal n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981 (Brasil, 1981), com suas diretrizes regulamentadas pelo Decreto n.º 4.297, de 10 de julho de 2002 (Brasil, 2002). Sua função consiste em dividir o território em componentes menores considerando o conjunto de características sociais, econômicas e ambientais. O agrupamento das partes propicia dados analíticos de áreas sensíveis à exploração, com o intuito de orientar estratégias de manejo sustentável da terra, conservação ambiental e tomada de decisões relacionadas aos recursos naturais.

A pertinência desse instrumento é reforçada pelo quadro global de degradação dos solos: estima-se que a mudança de uso da terra ocorrida entre 2001 e 2012 tenha elevado a erosão hídrica global em cerca de 2,5%, com os maiores acréscimos concentrados justamente em países do Sul global submetidos a expansão agrícola recente (Borrelli et al., 2017). Nesse contexto, a espacialização prévia da vulnerabilidade natural deixa de ser um exercício descritivo e passa a operar como instrumento preventivo de alocação de usos.

Do ponto de vista metodológico, o acoplamento entre análise multicritério e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) consolidou-se como abordagem dominante para problemas de aptidão e zoneamento territorial, com centenas de aplicações revisadas por Malczewski (2006). O Processo de Hierarquia Analítica (AHP), formalizado por Saaty (1977, 1990), é o método de ponderação mais empregado nessa literatura, por permitir decompor um problema complexo em comparações par a par e verificar a coerência dos julgamentos emitidos.

O município de Morro do Chapéu, pertencente à unidade federativa brasileira da Bahia, está localizado na Chapada Diamantina, onde apresenta ampla geodiversidade e uma paisagem de beleza natural particular. Sua área é base para projetos de geoparques, cujo pressuposto essencial é promover a conservação ambiental e a valorização histórico-cultural, como a proposta realizada pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM (Rocha; Pedreira, 2013). Assim, o município foi selecionado para esta pesquisa na tentativa de aprofundar as investigações de análise espacial no que tange às condições de vulnerabilidade ambiental integrada aos aspectos socioeconômicos.

A lacuna que motiva este trabalho é específica. A avaliação quantitativa de geossítios e de áreas de geodiversidade em candidaturas a geoparque tem se concentrado no valor científico, educativo e turístico dos sítios individuais (Brilha, 2016), enquanto a base territorial que os sustenta o gradiente de vulnerabilidade dos solos e a fragilidade social das comunidades que ali vivem raramente é modelada de forma integrada e espacialmente explícita. Para o território do projeto de Geoparque de Morro do Chapéu, com 24 geossítios catalogados, não há, até onde alcançou o levantamento realizado, um produto cartográfico que cruze essas duas dimensões na escala municipal.

Os procedimentos metodológicos adotados se referem ao desenvolvimento do mapa de zoneamento, a partir da integração de vulnerabilidade ambiental e social. Foi agregada a técnica de análise de multicritérios hierarquizados, conhecida como AHP, para atribuir pesos de importância às camadas de informações representativas (Saaty, 1990). Para tal, utilizaram-se ferramentas cartográficas do conjunto de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o desenvolvimento das etapas de processamento e integração dos dados geográficos, uma vez que permitem a análise espacial com fim no planejamento terrestre.

Dessa forma, esta pesquisa tem o objetivo geral de desenvolver o mapa de zoneamento ecológico-econômico do município de Morro do Chapéu/BA, por meio da análise multicritério com abordagem espacial, a fim de orientar a gestão dos projetos de geoparque.

Para alcançá-lo, definiram-se cinco objetivos específicos: (i) hierarquizar, por meio do AHP, seis critérios ambientais e suas respectivas classes quanto à contribuição para a perda de solo; (ii) espacializar a vulnerabilidade natural à perda de solo do município por álgebra de mapas; (iii) construir um índice de vulnerabilidade social a partir da pressão demográfica e da resiliência econômica por setor censitário; (iv) integrar as dimensões física e social em um mapa de zoneamento ecológico-econômico com quatro classes de gestão; e (v) interpretar o padrão espacial resultante à luz das exigências de conservação e de uso público do projeto de geoparque.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 VISÃO GERAL

Esta pesquisa adaptou as metodologias de Becker e Egler (1996) e Crepani et al. (2001) para desenvolver o zoneamento ecológico-econômico de Morro do Chapéu, sob a perspectiva de integrar as relações entre natureza e sociedade. Desse modo, criaram-se mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo, considerando aspectos físico-naturais do ambiente, e de fragilidade socioeconômica, que conta com elementos econômicos e demográficos. O cruzamento desses parâmetros estabelece a síntese da potencialidade ou vulnerabilidade do local (Becker; Egler, 1996).

As variáveis físicas foram ranqueadas por meio do Processo de Hierarquia Analítica (AHP), uma técnica de análise multicritério que permite a estruturação de problemas complexos em níveis hierárquicos. Ele segue três etapas: fundamentar uma hierarquia entre os dados, analisar a prioridade e verificar a consistência. O método fundamenta-se na comparação paritária entre os critérios (geologia, geomorfologia, solos, uso e cobertura da terra, declividade, precipitação), utilizando a escala fundamental de Saaty, que varia de 1 (importância igual) a 9 (importância extrema), como demonstrado na Tabela 1. Essa abordagem permite quantificar a importância relativa de cada plano de informação, garantindo que variáveis críticas para a conservação do Geoparque, como a declividade e a geomorfologia, recebam pesos condizentes com sua relevância no planejamento territorial (Saaty, 1990).

Tabela 1 - Escala fundamental de importância relativa utilizada nas comparações par a par do método AHP.

Importância	Definição	Explicação
1	Igualmente importante	As atividades são igualmente importantes
3	Moderadamente importante	Uma atividade é levemente mais importante que a outra
5	Importante	Uma atividade é mais importante que a outra
7	Muito importante	A atividade sobrepõe fortemente a outra
9	Extremamente importante	A atividade é completamente superior em importância em relação à outra
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários	Valores de transição

Fonte: Saaty (1990).

Após a validação da matriz, os coeficientes resultantes são aplicados na álgebra de mapas no ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). O resultado consiste na geração de modelos espaciais que sintetizam a fragilidade natural e o potencial social, permitindo a delimitação das unidades de zoneamento ecológico-econômico de maneira sistematizada e replicável.

Segundo Pimenta et al. (2019), o AHP é amplamente utilizado em diversos tipos de temáticas de estudo, indo desde planejamento urbano, infraestrutura e energia, como também análise de riscos de inundações e movimentos de massa, até agricultura, saúde e turismo. Trabalhos como o de Silva Junior et al. (2016), Silva Junior (2015) e Spínola e Victoria (2012) demonstram a aplicação do método para proposta de zoneamento.

Inicialmente, realizou-se um inventário de dados cartográficos, contemplando variáveis ambientais, tais como geologia/litologia, declividade, solo, geomorfologia, precipitação e uso e cobertura da terra, e variáveis de potencial socioeconômico, em que as fontes, escalas e descrição estão na Tabela 2. Os mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo e de potencial social foram integrados, por meio da álgebra de mapas, para criar o Zoneamento Ecológico-Econômico. A síntese do resultado consiste na divisão do espaço em unidades produtivas de expansão ou consolidação e unidades críticas

de recuperação ou conservação (Becker; Egler, 1996).

Tabela 2 - Descrição, escala/resolução espacial e fonte das variáveis ambientais e socioeconômicas utilizadas na modelagem.

Variáveis	Descrição	Escala/resolução	Fonte
Ambientais			
Litologia	Distribuição espacial dos tipos de rocha	1:250.000	IBGE
Solos	Distribuição espacial dos tipos de solos	1:500.000	IBGE
Declividade	Inclinação do terreno, dada em porcentagem	30 m	SRTM/NASA
Geomorfologia	Distribuição espacial dos tipos de estrutura e seus processos	1:250.000	IBGE
Uso e cobertura da terra	Tipos de coberturas na superfície	30 m	MapBiomas
Pluviosidade	Distribuição espacial e temporal da precipitação estimada por satélite	5 km	CHIRPS
Socioeconômicas			
População	População total residente	Setor censitário	IBGE/Censo
Renda	Rendimento médio mensal do responsável	Setor censitário	IBGE/Censo

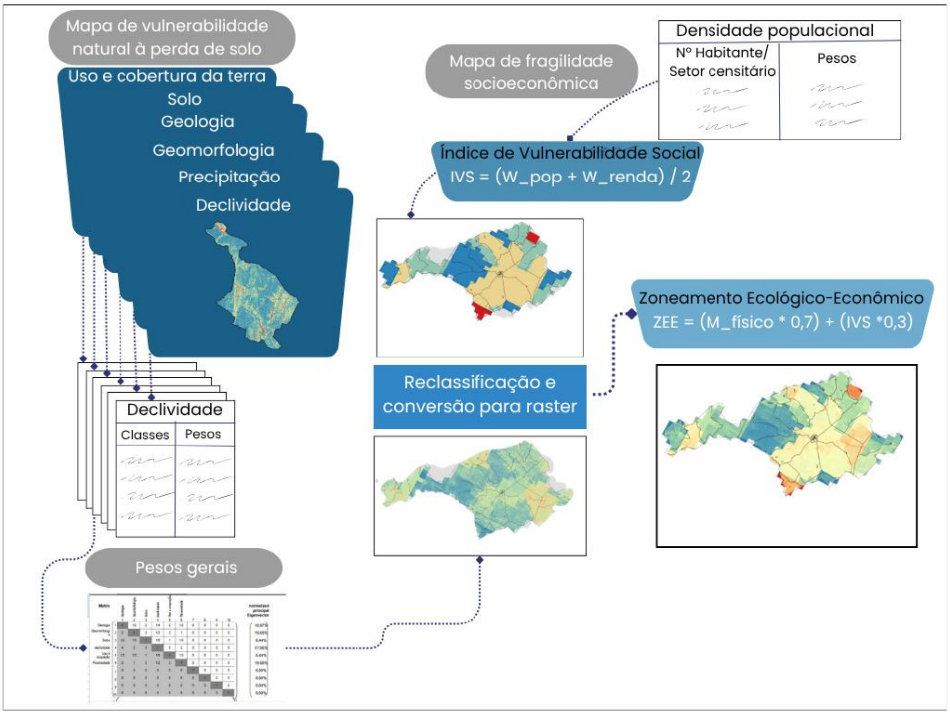
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

As camadas de informações espaciais gerais e suas subclasses passaram pelo processo de hierarquização de pesos relativos, comparadas par a par. Para isso, utilizou-se a tabela modelo desenvolvida por Goepel (2013). Ademais, a confiabilidade dos pesos e dos resultados foi verificada por meio da Razão de Consistência (RC), em que, como regra geral, devem-se obter valores abaixo de 0,1 para atingir a consistência (Saaty, 1990). Todos os procedimentos metodológicos adotados estão apresentados, sequencialmente, na Figura 1.

A comparação par a par entre os seis critérios ambientais resultou nos seguintes pesos globais: declividade (37,1%), pluviosidade (19,6%), geomorfologia (19,6%), geologia (10,9%), solos (6,4%) e uso e cobertura da terra (6,4%). Registra-se que a matriz de comparação entre critérios e a respectiva Razão de Consistência não foram tabuladas neste texto apenas as matrizes intraclasse (Tabelas 3 a 8) o foram o que limita a auditoria independente da ponderação global (ver seção 4.1).

No processo de construção e tratamento do banco de dados, foi utilizado o programa de código aberto QGIS (versão 3.38.2 - Grenoble); as camadas de informações foram reprojetadas para a projeção SIRGAS 2000 UTM Zona 24 Sul, os dados vetoriais foram convertidos em matrizes (processo de rasterização) e padronizados para a resolução de pixel de 30 m.

Figura 1 - Fluxograma das etapas metodológicas, do inventário cartográfico à síntese do zoneamento ecológico-econômico.



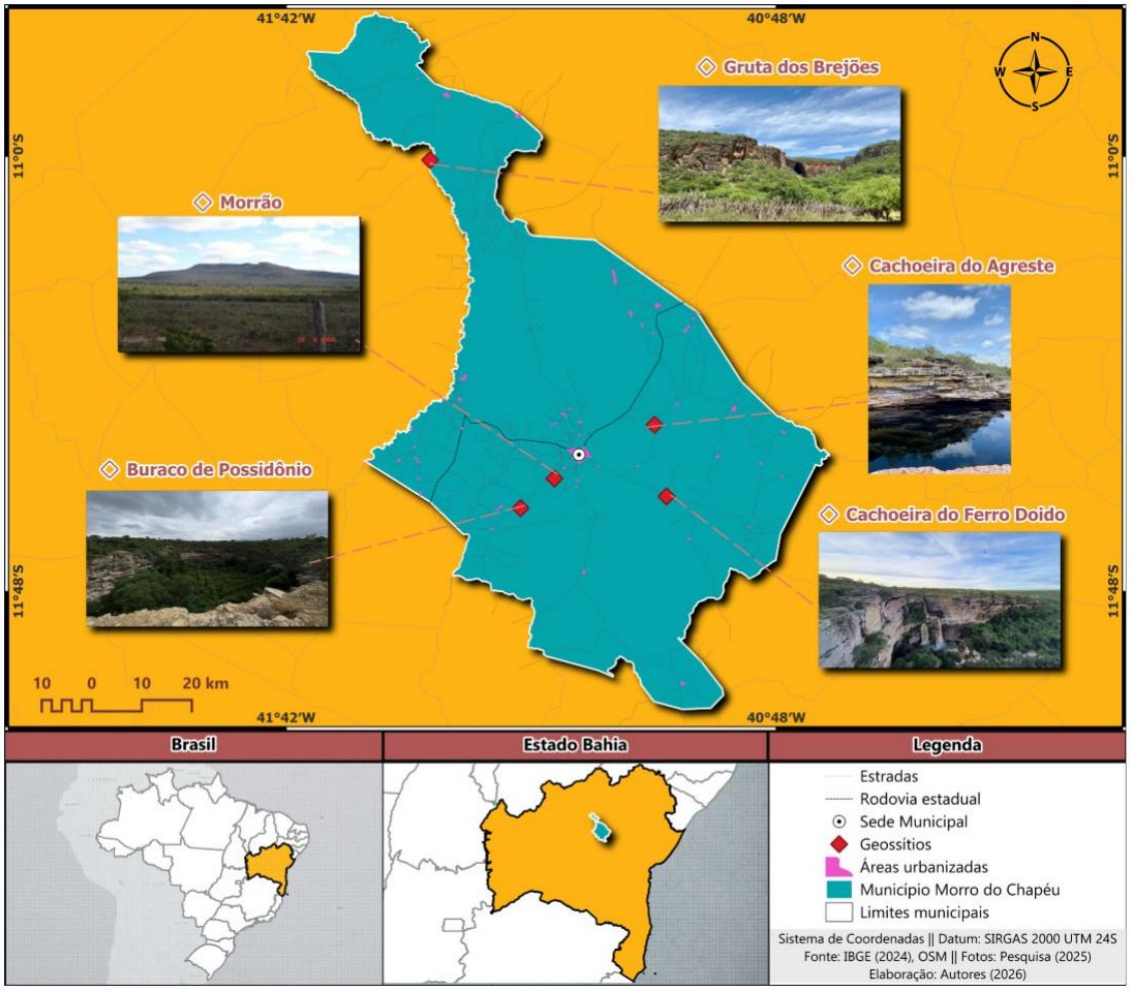
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

2.2 ÁREA DE ESTUDO

O município de Morro do Chapéu está situado no centro do estado da Bahia, área setentrional da Chapada Diamantina, na região Nordeste do Brasil (Figura 2). Sua extensão territorial possui 5.745 km², com uma população de 33.594 habitantes, cuja densidade demográfica é de 5,85 hab/km² (IBGE, 2025). As paisagens naturais são diversas, um reflexo das variações topográficas e da variabilidade espacial da precipitação. A cota altimétrica varia de 428 m até 1.278 m no planalto central. Embora pertença à delimitação do semiárido (BSh - classificação de Köppen-Geiger; Alvares et al., 2013), o município apresenta outros tipos climáticos, tais como tropical subúmido (Aw'), tropical de altitude com verão quente (Cwa) e tropical de altitude com verão brando (Cwb), com precipitações médias anuais que variam de 500 mm a 1.100 mm, de oeste a leste (Mello, 1973).

O local é marcado por ampla diversidade geológica, geodiversidade e relações identitárias (Silva et al., 2020). Atualmente, em virtude da sua beleza cênica, possui diversos geomorfossítios, a exemplo das cachoeiras do Ferro Doido e do Agreste, da Gruta dos Brejões, da dolina Buraco do Possidônio e do Morrão, visualizados na Figura 2. São importantes formações naturais que constituem relevância do ponto de vista natural, da geoconservação, e social e histórica.

Figura 2 - Localização geográfica do município de Morro do Chapéu, Bahia, e registros fotográficos de geomorfossítios representativos.

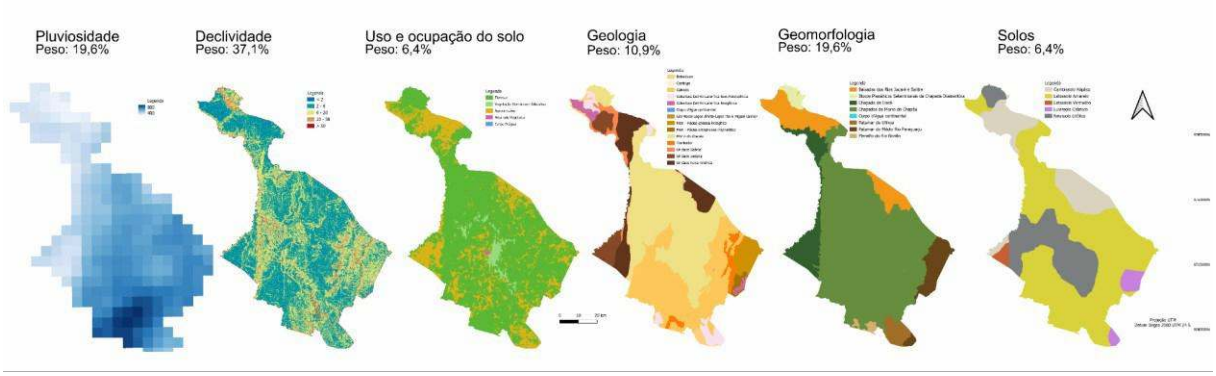


Fonte: Elaborada pelos próprios autores, sobre base cartográfica do IBGE.

2.3 ELABORAÇÃO DO MAPA DE VULNERABILIDADE NATURAL À PERDA DE SOLO

A análise multicritério, quanto à comparação, ordenou os critérios ambientais em declividade (37,1%), pluviosidade (19,6%), geomorfologia (19,6%), geologia (10,9%), solos (6,4%) e uso e cobertura da terra (6,4%). A Figura 3 mostra as camadas espaciais utilizadas e os pesos finais. No ambiente SIG, as classes de cada tema foram substituídas pelos valores atribuídos.

Figura 3 - Camadas cartográficas dos seis temas ambientais utilizados na modelagem: da esquerda para a direita, pluviosidade, declividade, uso e cobertura da terra, litologia, geomorfologia e solos, com os respectivos pesos.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

2.3.1 Declividade

Metodologicamente, a camada de declividade foi derivada do modelo digital de elevação (MDE) da missão SRTM/NASA (Farr et al., 2007), por meio da função de declividade do programa SIG. Este critério é importante para identificar áreas onde prevalecem processos morfogenéticos. Quanto maior o grau de inclinação, maior a velocidade da água e sua capacidade de transporte das partículas dos solos e rochas. Em contrapartida, em áreas com desníveis topográficos amenos, os solos e a cobertura vegetal conseguem se estruturar, aumentando a estabilidade (Araújo Filho et al., 2022; Resende et al., 2014).

Deste modo, consideraram-se declives acima de 20% com vulnerabilidade alta e acima de 50% muito alta, enquanto os relevos planos abaixo de 2% possuem maior estabilidade (Tabela 3). Respectivamente, foi observada menor proporção de inclinação acima de 50% (54,35 km², 1,05%), seguida do intervalo 20-50% (310,69 km², 6,02%) e das áreas abaixo de 2% (654,05 km², 12,67%). As maiores representatividades correspondem à classe de baixa vulnerabilidade 2-6% (2.298,67 km², 44,53%) e média vulnerabilidade 6-20% (1.844,57 km², 35,73%).

Tabela 3 - Matriz de comparação par a par, matriz normalizada e pesos do critério declividade do terreno (IC = 0,0175; RC = 0,016).

Declividade %	< 2	2 - 6	6 - 20	20 - 50	> 50				
< 2	1	1/2	1/3	1/5	1/7				
2 - 6	2	1	1/2	1/3	1/5				
6 - 20	3	2	1	1/2	1/3				
20 - 50	5	3	2	1	1/2				
> 50	7	5	3	2	1				
Xw	18	11,5	6,83	4,03	2,18				
Declividade %						Total	w	λ max	Vulnerabilidade
< 2	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,26	0,05		Muito baixa
2 - 6	0,11	0,09	0,07	0,08	0,09	0,44	0,09		baixa
6 - 20	0,17	0,17	0,15	0,12	0,15	0,76	0,15		Média
20 - 50	0,28	0,26	0,29	0,25	0,23	1,31	0,26		alta
> 50	0,39	0,43	0,44	0,50	0,46	2,21	0,44		Muito alta
total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	5,07	
IC = 0,0175 RC = 0,016									

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, com o modelo de Goepel (2013).

2.3.2 Pedologia

No quesito erodibilidade, os solos são agentes passivos que sofrem influência de fatores externos, como a ação da chuva e dos usos antrópicos. A estrutura, a permeabilidade e a profundidade caracterizam os solos quanto à sua susceptibilidade à erosão natural e induzida. Crepani et al. (2001), então, classificam a vulnerabilidade dos solos com base no grau de desenvolvimento ou maturidade.

Um solo desenvolvido, geralmente, ocorre em ambientes onde prevalecem processos pedogenéticos, considerado com alta estabilidade, a exemplo dos latossolos. Já os solos incipientes caracterizam regiões com processos morfogenéticos, que modificam o relevo por meio da erosão, como os litólicos, orgânicos e aluviais, entre outros. As paisagens naturais apontadas como intermediárias são solos do tipo luvissolo, com horizonte B textural e profundidade de rasa a moderada.

Os tipos de solos encontrados e sua representatividade na área de estudo são: latossolo (3.511,09 km², 60,44%), luvissolo (371,24 km², 6,39%), cambissolo (674,39 km², 11,61%) e neossolo (1.250,93 km², 21,53%). Na perspectiva do autor, eles foram ranqueados conforme a sua maturidade de formação, apresentados na Tabela 4. Os cambissolos e os neossolos são considerados jovens; no entanto, o primeiro apresenta um certo nível de desenvolvimento, com horizonte B incipiente, e os neossolos possuem alta vulnerabilidade por serem rasos, sem horizontes definidos (Araújo Filho et al., 2022; Resende et al., 2014).

Tabela 4 - Matriz de comparação par a par, matriz normalizada e pesos do critério tipos de solos (IC = 0,018; RC = 0,020).

Solos	Latossolo	Luvissolo	Cambissolo	Neossolo				
Latossolo	1	1/3	1/5	1/8				
Luvissolo	3	1	1/2	1/5				
Cambissolo	5	2	1	1/3				
Neossolo	8	5	2	1				
Xw	17	8,33	4,70	1,66				
Solos					Total	w	λ max	Vulnerabilidade
Latossolo	0,059	0,040	0,043	0,075	0,217	0,054		Muito baixa
Luvissolo	0,176	0,120	0,106	0,120	0,523	0,131		Baixa
Cambissolo	0,294	0,240	0,213	0,201	0,948	0,237		Moderada
Neossolo	0,471	0,600	0,638	0,604	2,313	0,578		Alta
total	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00	4,05	
IC = 0,018	**RC = 0,020**							

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, com o modelo de Goepel (2013).

2.3.3 Geologia

Neste estudo, o componente geológico considerado foi a litologia, que compreende principalmente o tipo de rocha e a característica de composição mineral. Os materiais das rochas e sua composição mineralógica refletem a resistência da área aos processos de intemperismo e erosão (Crepani et al., 2001). A predominância de quartzo, silicato de elevada estabilidade química, por exemplo, torna a rocha mais resistente ao intemperismo, ao passo que feldspatos e silicatos ferromagnesianos são alterados com maior facilidade (Goldich, 1938).

Além disso, o grau de coesão da rocha também é considerado na metodologia de Crepani et al. (2001), fundamentado no conceito da ecodinâmica de Tricart (1977), em que a baixa coesão proporciona processos erosivos, modificadores do relevo (morfogênese) e, consequentemente, maior vulnerabilidade; já onde há alta coesão prevalecem processos intempéricos e a formação de solos (pedogênese), ou seja, menor vulnerabilidade.

Morro do Chapéu é formado por três grandes unidades: Formação Tombador, Formação Caboclo e Formação Morro do Chapéu, sendo esta a mais presente, além das rochas carbonáticas do Grupo Una (Formação Salitre), na porção oeste. No município, foi encontrada uma litologia composta, principalmente, por rochas sedimentares, como quartzitos e arenitos, datados do Proterozoico. Diante disso, a atribuição de relevância resultou na hierarquização das rochas conforme mostra a Tabela 5.

O quartzo-arenito foi classificado com menor vulnerabilidade, devido à concentração de mineral com estabilidade elevada e boa granulometria. O conglomerado e o arenito estão na sequência da hierarquia, visto que a matriz cimentada confere resistência moderada. O calcário, associado às unidades carbonáticas do Grupo Una, recebeu vulnerabilidade moderada, uma vez que sua alteração se dá predominantemente por dissolução química, com desenvolvimento de feições cársticas, como a Gruta dos Brejões. As litologias de partículas finas, como os siltitos e os lamitos, foram consideradas

como as mais vulneráveis, em virtude de apresentarem baixo grau de coesão, elevada porosidade e maior interação com a água, o que facilita os processos de intemperismo químico e a ação erosiva. A cobertura detrítica recebeu maior grau de vulnerabilidade por tratar-se de material inconsolidado.

Tabela 5 - Matriz de comparação par a par, matriz normalizada e pesos do critério litológico (IC = 0,064; RC = 0,048).

Litologia	quartzo-arenito	conglo-merado	arenito	Calcário	siltito	lamito	Cobertura dentritcas				
Quartzo-arenito	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/8				
Conglomerado	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/7				
Arenito	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/6				
Calcário	4	3	2	1	1/2	1/3	1/5				
Siltito	5	4	3	2	1	1/2	1/4				
Lamito	6	5	4	3	2	1	1/3				
Cobertura dentriticas	8	7	6	5	4	3	1				
Xw	29	22,5	16,8	12,1	8,58	6,25	4,26				
Litologia								Total	w	λ max	Vulnerabilidade
Quartzo-arenito	0,034	0,022	0,020	0,021	0,023	0,027	0,029	0,176	0,025		Muito baixa
Conglomerado	0,069	0,044	0,030	0,028	0,029	0,032	0,034	0,266	0,038		Baixa
Arenito	0,103	0,089	0,059	0,041	0,039	0,040	0,039	0,410	0,059		Baixa moderada
Calcário	0,138	0,133	0,119	0,083	0,058	0,053	0,047	0,631	0,090		Moderada
Siltito	0,172	0,178	0,178	0,166	0,117	0,080	0,059	0,950	0,136		Alta
Lamito	0,207	0,222	0,238	0,248	0,233	0,160	0,078	1,386	0,198		Muito alta
Cobertura dentriticas	0,276	0,311	0,356	0,414	0,51	0,608	0,714	3,190	0,454		Extrema
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,009	1	7,38	
IC = 0,064	**RC =0,048**										

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, com o modelo de Goepel (2013).

2.3.4 Geomorfologia

As unidades de paisagem foram definidas a partir de informações morfométricas, as quais influenciam de maneira marcante os processos ecodinâmicos. Segundo a metodologia de Crepani et al. (2001), variáveis como a amplitude de relevo, a declividade e o grau de dissecação permitem quantificar a energia potencial disponível para o escoamento superficial (runoff), que é um dos responsáveis pela dissecação do relevo.

Em Morro do Chapéu, a compartimentação do relevo revela compartimentos com distintos potenciais, abrangendo desde superfícies de topo estáveis até áreas com dinâmica fluvial. Em nível de representatividade, a área de estudo contempla as unidades: Planalto do Rio Bonito (43,90 km², 0,76%), Patamar do Médio Rio Paraguaçu (330,04 km², 5,75%), Patamar de Utinga (151,84 km², 2,64%), Chapadas de Morro do Chapéu (3.982,75 km², 69,33%), Chapada de Irecê (508,40 km², 8,85%), Blocos Planálticos Setentrionais da Chapada Diamantina (91,61 km², 1,59%) e Baixadas dos Rios Jacaré e Salitre (635,29 km², 11,06%).

Diante disso, a atribuição de relevância resultou na hierarquização das formas, em que as

superfícies de aplainamento foram classificadas com menor vulnerabilidade devido à baixa energia potencial disponível, enquanto as baixadas e patamares dissecados, por apresentarem maior amplitude e grau de dissecação, foram associados a uma maior fragilidade ambiental (Tabela 6).

Tabela 6 - Matriz de comparação par a par, matriz normalizada e pesos do critério geomorfologia (IC = 0,058; RC = 0,041).

Geomorfologia	PRB	PU	CMC	CI	PMRP	BPS	BRJS	CA				
PRB	1	1	1/2	1/2	1/4	1/4	1/7	1				
PU	1	1	1/2	1/2	1/4	1/4	1/7	1				
CMC	2	2	1	1	1/2	1/2	1/5	2				
CI	2	2	1	1	1/2	1/2	1/5	2				
PMRP	4	4	2	2	1	1	1/3	4				
BPS	4	4	2	2	1	1	1/3	4				
BRJS	7	7	5	5	3	3	1	7				
CA	1	1	1/2	1/2	1/4	1/4	1/7	1				
Xw	22	22,0	12,5	12,5	6,75	6,75	3,11	22				
Geomorfologia									Total	w	λ max	Vulnerabilidade
PRB	0,045	0,045	0,040	0,040	0,037	0,037	0,046	0,045	0,335	0,042		Muito baixa
PU	0,045	0,045	0,040	0,040	0,037	0,037	0,046	0,045	0,335	0,042		Muito baixa
CMC	0,091	0,091	0,080	0,080	0,074	0,074	0,064	0,091	0,645	0,081		Baixa
CI	0,091	0,091	0,080	0,080	0,074	0,074	0,064	0,091	0,645	0,081		Baixa
PMRP	0,182	0,182	0,160	0,160	0,148	0,148	0,107	0,182	1,251	0,156		Moderada
BPS	0,182	0,182	0,160	0,160	0,148	0,148	0,107	0,182	1,251	0,156		Moderada
BRJS	0,318	0,318	0,400	0,400	0,444	0,444	0,322	0,318	2,964	0,400		Alta
CA	0,045	0,045	0,040	0,040	0,037	0,037	0,046	0,045	0,335	0,042		Muito baixa
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1	8,000	1	8,41	

IC = 0,058 RC =0,041

PRB = Planalto do Rio Bonito; PU = Patamar de Utinga; CMC = Chapadas de Morro do Chapéu; CI = Chapada de Irecê; PMRP = Patamar do Médio Rio Paraguaçu; BPS = Blocos Planálticos Setentrionais; BRJS = Baixadas dos Rios Jacaré e Salitre; CA = Corpo d'água continental.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, com o modelo de Goepel (2013).

2.3.5 Uso e cobertura da terra

O critério de uso e cobertura da terra considerou os tipos de cobertura natural e antrópica na superfície, em que é possível observar os graus de conservação e artificialização. As coberturas naturais, como a vegetação, permitem o controle da ação erosiva no solo, uma vez que o protegem do escoamento superficial e favorecem a infiltração. Assim, uma área de alta densidade vegetativa é enquadrada com muita estabilidade; não obstante, ambientes com pouca vegetação ou atividades humanas expõem o solo, aumentando a vulnerabilidade. Ou seja, essas informações são essenciais para compreender os impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente (Accioly et al., 2017).

Conforme a classificação do MapBiomas (coleção 10), no bioma Caatinga as Formações Florestais são constituídas por estruturas arbóreas de porte elevado, tais como as florestas ombrófilas, deciduais, semideciduais, savana florestada e savana-estépica florestada. Nas Formações Savânicas

predomina vegetação de estrato arbustivo, mais ou menos desenvolvido, com dossel semicontínuo, como a savana-estépica arborizada e a savana arborizada. As Formações Campestres apresentam estratos herbáceos, de cobertura horizontal dispersa, a exemplo da savana-estépica parque e da savana-estépica gramíneo-lenhosa (MapBiomas, 2026).

Por outro lado, as coberturas de usos antrópicos, como agricultura, pecuária, infraestrutura urbana e mosaico de usos, foram consideradas com baixa estabilidade, em virtude da exposição do solo, que acarreta compactação, exposição direta à chuva, aumento do escoamento e maior erosão (Crepani et al., 2001). Os pesos finais podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Matriz de comparação par a par, matriz normalizada e pesos do critério uso e cobertura da terra (IC = 0,04; RC = 0,04).

Usos e coberturas	Floresta	Veg. Herbácea e Arbustiva	Agrope-cuária	Área não vegetada
Floresta	1	1/3	1/7	1/9
Vegetação Herbácea e Arbustiva	3	1	1/3	1/5
Agropecuária	7	3	1	1/3
Área não Vegetada	9	5	3	1
Xw	20	9,33	4,48	1,64

Usos e coberturas					Total	w	λ max	Vulnerabilidade
Floresta	0,05	0,04	0,03	0,06	0,18	0,05		Muito baixa
Vegetação Herbácea e Arbustiva	0,15	0,11	0,07	0,12	0,45	0,11		Baixa
Agropecuária	0,35	0,32	0,22	0,20	1,09	0,27		Alta
Área não Vegetada	0,45	0,53	0,67	0,61	2,26	0,57		Muito Alta
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00	4,12	
IC = 0,04	**RC = 0,04**							

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, com o modelo de Goepel (2013).

2.3.6 Pluviosidade

A erosividade é o principal processo resultante da interação entre a precipitação e a capacidade do solo (Araújo Filho et al., 2022). O impacto das gotas e a intensidade da chuva causam a chamada erosão hídrica, na qual o solo é agente passivo. Desse modo, considerou-se a intensidade pluviométrica anual para a análise de vulnerabilidade, isto é, quanto maior o volume de chuva, maior a fragilidade do ambiente (Tabela 8).

Os dados de precipitação correspondem à média pixel a pixel entre 1981 e 2024 do banco de dados CHIRPS (daily) (Funk et al., 2015). A variabilidade espacial da precipitação está entre 426 mm e 800 mm anuais.

Tabela 8 - Matriz de comparação par a par, matriz normalizada e pesos do critério pluviosidade (IC = 0,04; RC = 0,044).

Precipitação	400 - 500	500 - 600	600 - 700	700 - 800				
400 - 500	1	1/3	1/5	1/7				
500 - 600	3	1	1/3	1/5				
600 - 700	5	3	1	1/3				
700 - 800	7	5	3	1				
Xw	16	9,33	4,53	1,68				
Precipitação					Total	w	λ max	Vulnerabilidade
400 - 500	0,06	0,04	0,04	0,09	0,23	0,06		Baixa
500 - 600	0,19	0,11	0,07	0,12	0,49	0,12		Média
600 - 700	0,31	0,32	0,22	0,20	1,05	0,26		Alta
700 - 800	0,44	0,54	0,66	0,60	2,23	0,56		Muito Alta
total	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00	4,12	
IC = 0,04	**RC = 0,044**							

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, com o modelo de Goepel (2013).

Registra-se ainda uma divergência entre a faixa pluviométrica adotada na modelagem (426-800 mm/ano, série CHIRPS 1981-2024) e a faixa descrita na caracterização da área de estudo (500-1.100 mm/ano, segundo Mello, 1973), bem como quanto ao sentido do gradiente, predominantemente norte-sul na série CHIRPS (Figura 3) e oeste-leste na descrição de Mello (1973). A diferença é esperada, dado o contraste entre uma fonte pontual histórica e uma estimativa por satélite em grade de 5 km, e o limite superior das classes de vulnerabilidade pluviométrica foi definido a partir da série CHIRPS.

2.4 ELABORAÇÃO DO MAPA DE FRAGILIDADE SOCIOECONÔMICA

A caracterização da dimensão social para a elaboração do zoneamento foi estruturada a partir da análise da distribuição espacial da população residente, com base na adaptação da metodologia do atlas de vulnerabilidade social feito pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA (Costa; Marguti, 2015). Os dados primários foram obtidos do Censo Demográfico 2022 do IBGE, na malha base dos setores censitários (IBGE, 2025), utilizando-se a variável de população total por setor (V0001) e o valor do rendimento nominal médio mensal das pessoas responsáveis com rendimentos por domicílios particulares permanentemente ocupados (V06004). Para integrar esses dados ao modelo de análise multicritério, a pressão demográfica foi classificada em quatro intervalos de magnitude, convertidos em uma escala de pesos normalizada de 0,1 a 1,0, conforme demonstrado na Tabela 9. Setores com populações inferiores a 50 habitantes foram classificados com peso 0,1 (baixa pressão), enquanto setores com concentrações superiores a 500 habitantes, característicos da sede urbana e de povoados consolidados, receberam peso 1,0 (alta pressão). Ressalte-se que a variável utilizada é a população absoluta por setor, e não a densidade demográfica; como os setores rurais são muito mais extensos que os urbanos, uma mesma população pode corresponder a densidades muito distintas, e o

resultado torna-se sensível ao desenho dos setores, efeito conhecido como problema da unidade de área modificável (Fotheringham; Wong, 1991).

Tabela 9 - Classificação da intensidade da pressão demográfica por setor censitário e pesos atribuídos ao modelo.

Classe de população (hab./setor)	Peso (w)	Intensidade de pressão	Justificativa técnica
0 a 50 habitantes	0,1	Muito baixa	Áreas de preservação ou áreas de baixa ocupação humana.
51 a 200 habitantes	0,3	Baixa	Zonas rurais com presença de pequenas propriedades e infraestrutura dispersa.
201 a 500 habitantes	0,6	Moderada	Núcleos rurais consolidados, vilas e povoados com demanda intermediária.
Acima de 500 habitantes	1,0	Alta	Sede urbana e distritos densos; áreas de máxima demanda por serviços e gestão.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, a partir de IBGE (2025).

Já o rendimento foi tratado de forma inversamente proporcional, utilizando o salário mínimo como base, em que as áreas com rendimentos médios inferiores a R$ 1.500,00 (valor próximo ao salário mínimo de 2025, superior ao vigente em 2022, ano de referência do Censo, de R$ 1.212,00) receberam peso máximo (1,0), enquanto setores com rendimentos superiores a R$ 6.000,00 foram classificados com peso 0,1. Para mitigar distorções causadas pelo sigilo estatístico do IBGE, setores identificados com o caractere "X" foram padronizados com peso médio (0,5). O processamento geoespacial consistiu na união (join) das tabelas alfanuméricas à base vetorial e posterior rasterização para uma resolução de 30 metros, garantindo a compatibilidade escalar com as demais variáveis do estudo. Esse procedimento permitiu espacializar os polos de maior demanda socioeconômica e infraestrutura no território de Morro do Chapéu.

O mapa de fragilidade social foi concebido através de uma média aritmética simples entre as variáveis de pressão demográfica e resiliência econômica. Este procedimento permitiu construir o índice de vulnerabilidade social (IVS) ao equilibrar a importância da população residente com o poder aquisitivo médio de cada setor censitário. Trata-se de um índice simplificado, de duas variáveis, que não equivale ao IVS do IPEA, composto por dezesseis indicadores distribuídos nas dimensões infraestrutura urbana, capital humano e renda e trabalho (Costa; Marguti, 2015); além disso, a população do setor expressa sobretudo pressão antrópica potencial sobre o meio, e não vulnerabilidade social em sentido estrito. A integração foi realizada em ambiente SIG, utilizando a Calculadora Raster para a execução matemática, conforme a Equação 1:

$$IVS = (W_pop + W_renda) / 2 \quad (1)$$

Onde: IVS é o índice de vulnerabilidade social (adimensional, 0,1-1,0); W_pop é o peso atribuído à população total do setor censitário (adimensional, 0,1-1,0); e W_renda é o peso atribuído ao rendimento nominal médio mensal do responsável pelo domicílio (adimensional, 0,1-1,0). O resultado gerou uma matriz normalizada com valores variando de 0,1 (baixa vulnerabilidade) a 1,0 (vulnerabilidade crítica), espacializando os polos de maior sensibilidade social no município.

2.5 ELABORAÇÃO DO ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO

A síntese final do Zoneamento Ecológico-Econômico foi obtida por meio de uma média ponderada, cruzando a dimensão física (fragilidade natural) com a dimensão social (vulnerabilidade humana). Seguindo adaptações da metodologia de Becker e Egler (1996), atribuiu-se maior relevância aos aspectos biofísicos do território, definindo-se uma ponderação de 70% para o meio físico e 30% para o meio social. A integração final seguiu a Equação 2:

$$ZEE = (M_físico \times 0,7) + (IVS \times 0,3) \quad (2)$$

Onde: ZEE é o índice síntese do zoneamento (adimensional, 0-1); M_físico é o valor normalizado da vulnerabilidade natural à perda de solo obtido na etapa anterior (adimensional, 0-1); e IVS é o índice de vulnerabilidade social definido na Equação 1 (adimensional, 0,1-1,0).

Este cruzamento resultou no mapa de síntese socioambiental, onde áreas com altos índices representam zonas de conflito ou risco (convergência de fragilidade geológica e alta pressão antrópica), enquanto baixos índices apontam para áreas de maior estabilidade ou potencial para conservação. A resolução espacial de saída foi mantida em 30 metros, garantindo a compatibilidade com os dados de sensores remotos utilizados nas etapas anteriores. Cabe precisar que, na proposta de Becker e Egler (1996), a menor vulnerabilidade associa-se, em geral, a unidades de consolidação ou expansão de usos, e a maior vulnerabilidade, a unidades de recuperação ou conservação; neste trabalho, a denominação "conservação" foi atribuída às áreas de menor índice síntese e expressa, portanto, estabilidade natural e baixa pressão social, e não prioridade ecológica de proteção, que dependeria de critérios de biodiversidade e de patrimônio geológico não incorporados ao índice.

3 RESULTADOS

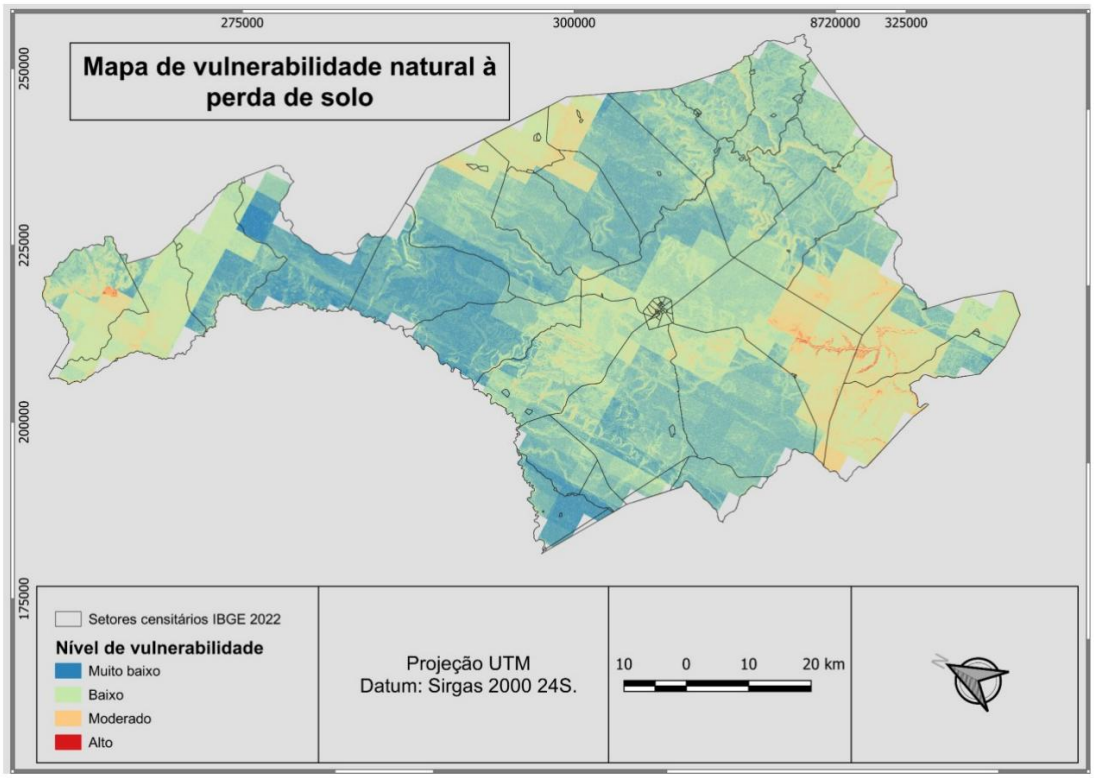
3.1 MAPA DE VULNERABILIDADE NATURAL À PERDA DE SOLO

A camada de vulnerabilidade natural à perda do solo é o resultado da integração das informações ambientais e os graus de estabilidade/vulnerabilidade. Conforme apresentado na Figura 4, grande parte da área apresenta relativa estabilidade, com predomínio de baixa (57,4%) e muito baixa vulnerabilidade (20,6%), em tons de verde e azul, respectivamente. São ambientes que equilibram os fatores pedogenéticos e morfogenéticos por meio de menores declividades, solos desenvolvidos, como os latossolos, maior cobertura vegetal, baixas e médias precipitações e rochas mais resistentes, como arenitos quartzosos e conglomerados.

Em contrapartida, tonalidades laranja e vermelha localizadas no sul, nordeste e extremo norte demonstram moderada e alta vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos, cuja representatividade da área é de 12,7% e 9,3%, respectivamente. Ao sul, a baixa estabilidade foi corroborada, principalmente, pelo alto volume médio das precipitações. Na porção nordeste, o cambissolo háplico, pouco desenvolvido, e a forte presença de atividades humanas, como a agropecuária, contribuem para expor o solo à vulnerabilidade. No extremo norte, a maior implicação acontece devido ao terreno inclinado, onde a altitude ultrapassa 1.000 m.

O padrão obtido é internamente coerente com a ponderação adotada: como a declividade responde por 37,1% do peso global e as chapadas de topo aplainado ocupam 69,33% do território, era esperado que as classes estáveis dominassem a área. As três manchas instáveis, por sua vez, correspondem a três mecanismos distintos energia pluvial ao sul, imaturidade pedológica somada a uso antrópico a nordeste, e energia potencial do relevo ao norte o que indica que o modelo não está sendo governado por uma única variável.

Figura 4 - Mapa de vulnerabilidade natural à perda do solo do município de Morro do Chapéu, Bahia; o norte está orientado para a esquerda da figura.



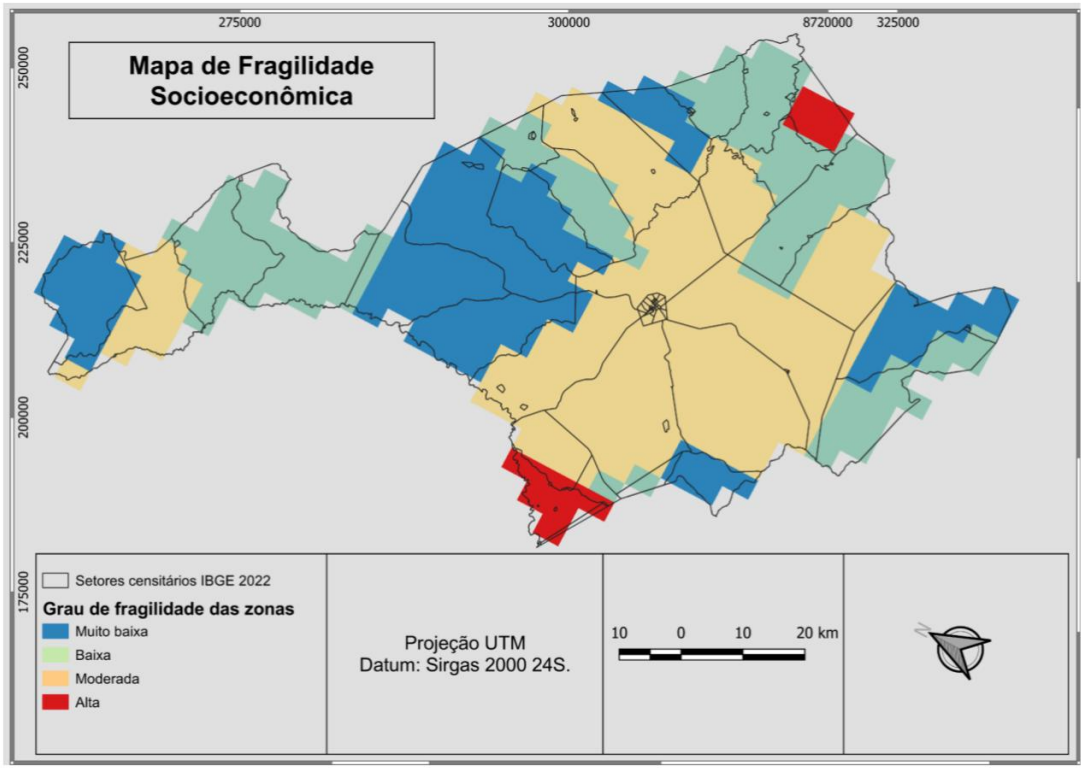
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.2 MAPA DE FRAGILIDADE SOCIOECONÔMICA

O mapa de potencial socioeconômico constitui uma síntese da relação entre população e renda; é a resposta da pressão demográfica e da resiliência econômica. Observa-se, na Figura 5, maior extensão territorial com vulnerabilidade social moderada (43,52%), a qual ocorre, predominantemente, na porção central do município. São áreas de transição econômica, com renda e população média-alta, que podem expandir-se e comprometer a potencialidade socioeconômica.

Sequencialmente, as zonas de baixa (26,80%) e muito baixa (26,51%) vulnerabilidade estão localizadas, principalmente, nas áreas periféricas, associadas à baixa população por setor e/ou à condição relativa da renda média. No que se refere à elevada vulnerabilidade (3,17%), os tons vermelhos estão presentes nos extremos leste e oeste, onde ocorrem altas taxas de concentração de pessoas com baixa renda. A zona oeste possui aglomerados de assentamentos quilombolas, como as comunidades Boa Vista e Ouricuri.

Figura 5 - Mapa de fragilidade socioeconômica do município de Morro do Chapéu, Bahia; o norte está orientado para a esquerda da figura.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores, a partir de IBGE (2025).

3.3 MAPA DE ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO

A integração das informações de vulnerabilidade natural à perda de solo e fragilidade socioeconômica resultou no mapa de zoneamento ecológico-econômico do município de Morro do Chapéu, conforme visualizado na Figura 6. O produto evidenciou a organização espacial estruturada em quatro classes: áreas de conservação, de regulação, de transição e de gestão crítica. Constata-se o predomínio das zonas de transição (45,88%), localizadas na parte central do território, circundadas pelas zonas de regulação (30,90%) e de conservação (22,20%). Já a zona de gestão crítica se restringe a locais específicos no leste e oeste (0,99%).

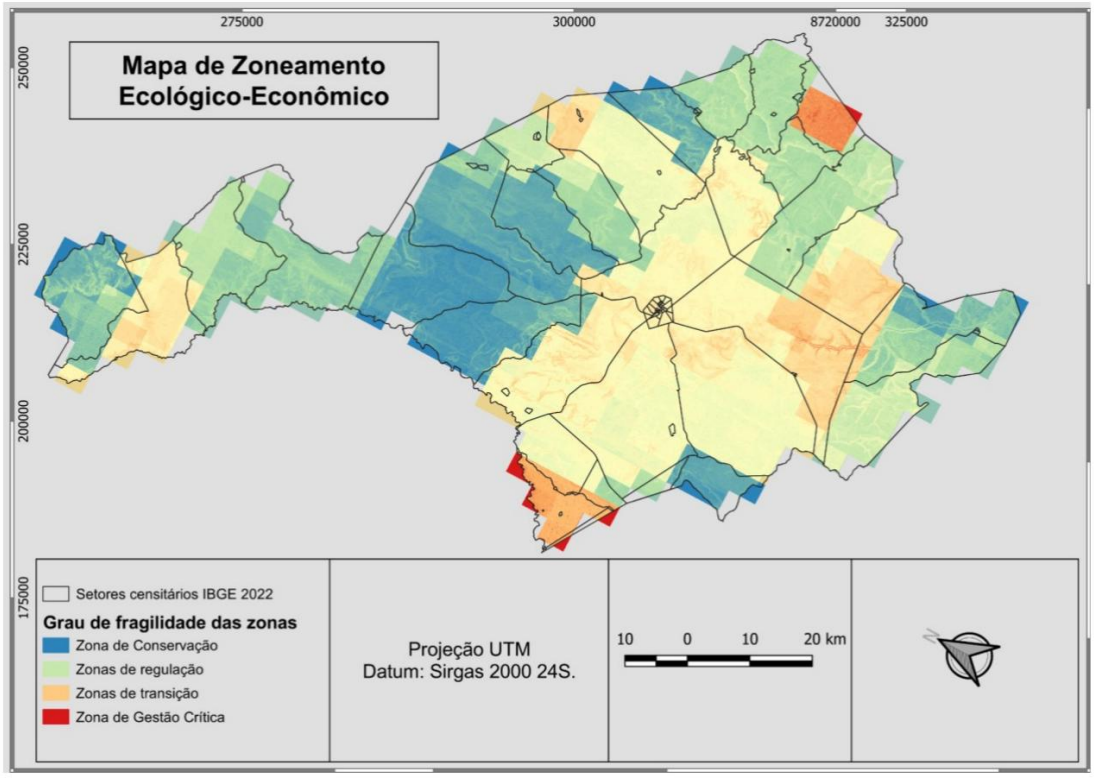
As áreas de transição constituem ambientes que merecem atenção para manter o equilíbrio socioambiental, uma vez que são caracterizadas por apresentarem moderada instabilidade ambiental e certo grau de fragilidade socioeconômica. Concentradas na parte central, destaca-se uma pequena área no nordeste em decorrência, sobretudo, do forte adensamento da agricultura e de outros usos antrópicos, e um trecho no sentido centro-sul, o qual é determinado pela combinação de alto volume de precipitação e declive acentuado do terreno. É necessário, portanto, adotar boas práticas antrópicas associadas às políticas ambientais de adequação das atividades econômicas e do geoturismo,

principalmente, devido à riqueza natural da região.

As zonas de regulação e de conservação representam mais de 50% do território morrense, com expressiva presença no sentido centro-norte. Neste segmento, existe a unidade de conservação de proteção integral, o Parque Estadual do Morro do Chapéu, cuja coincidência com essas classes decorre das condições físicas e da baixa ocupação, uma vez que o limite da unidade não foi incorporado como critério ao modelo. Essas classes refletem a estabilidade natural e a menor pressão antrópica, cujas áreas são prioritárias para a manutenção socioambiental e ecossistêmica.

As zonas de gestão crítica, apresentadas em vermelho, são pontuais, relacionadas, sobretudo, à fragilidade social e a limitações ambientais. Na porção oeste da Figura 6, observou-se a existência de setores populosos de baixa renda, principalmente, em comunidades quilombolas, apesar de grande área ser destinada aos usos antrópicos. Todavia, são ambientes enquadrados com média-alta estabilidade natural, pois estão sob latossolos, no topo da Chapada de Irecê, com baixas precipitações anuais e com menores desníveis topográficos. Portanto, torna-se necessário adotar ações políticas para gestão equilibrada e valorização dos saberes tradicionais. Na porção leste, a unidade geomorfológica corresponde ao Patamar do Médio Rio Paraguaçu, caracterizado por relevo ondulado, atingindo 34% de inclinação, onde a precipitação possui volume médio de 680 mm/ano.

Figura 6 - Zoneamento Ecológico-Econômico do município de Morro do Chapéu, Bahia, com as classes de conservação, regulação, transição e gestão crítica; o norte está orientado para a esquerda da figura.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A leitura conjunta das Figuras 4, 5 e 6 revela que as três camadas não se sobrepõem de maneira trivial. As áreas de maior vulnerabilidade física (9,3% de classe alta) e as de maior vulnerabilidade social (3,17% de classe alta) ocupam posições distintas no território: as primeiras concentram-se ao sul, a nordeste e no extremo norte, as segundas nos extremos leste e oeste. É justamente essa não coincidência que explica por que a classe de gestão crítica do zoneamento final reduz-se a 0,99% a ponderação de 70/30 exige convergência das duas dimensões para produzir a classe extrema, e essa convergência praticamente não ocorre em Morro do Chapéu. Cabe observar, contudo, que a mancha de gestão crítica do oeste ocorre sobre ambientes de média-alta estabilidade natural, no topo da Chapada de Irecê, o que indica que, com os limiares adotados, a vulnerabilidade social elevada pode, isoladamente, conduzir à classe crítica; a exigência de convergência depende, portanto, dos limiares de classe, não informados (seção 4.1). A leitura correta do resultado, portanto, não é a de um território sem problemas, mas a de um território em que os problemas físicos e sociais estão geograficamente separados e demandam, por isso, instrumentos de gestão distintos e territorialmente dirigidos.

4 DISCUSSÃO

O estudo envolvendo dados espaciais para o planejamento territorial tornou-se uma abordagem importante para apoiar a tomada de decisões em políticas públicas. Nesse contexto, o Sistema de Informação Geográfica é fundamental para compreender os fenômenos geográficos, pois engloba um conjunto de ferramentas capazes de coletar, processar e analisar informações georreferenciadas (Fitz, 2008). A análise de múltiplos critérios, a partir de camadas representativas da superfície, constitui uma abordagem para selecionar locais adequados para o ordenamento e o equilíbrio da ocupação social e dos recursos naturais (Collins; Steiner; Rushman, 2001).

Os resultados aqui obtidos alinham-se ao que a revisão de Malczewski (2006) identifica como o uso mais consolidado do acoplamento AHP-SIG: a produção de superfícies contínuas de aptidão a partir de julgamentos discretos de especialistas. A contribuição específica deste trabalho está menos no método, já estabelecido, e mais no fato de aplicá-lo a um território candidato a geoparque, em que a dimensão social não é acessória ao produto cartográfico, mas condição de viabilidade do próprio projeto de conservação.

O município estudado possui o território base para a implantação do Geoparque de Morro do Chapéu (Rocha; Pedreira, 2013), cujo projeto possui 24 geossítios catalogados. Um geoparque fomenta a conservação do patrimônio geológico e da geodiversidade, além do desenvolvimento sustentável para a comunidade local (Brilha, 2005). Desse modo, os resultados desta pesquisa contribuem na perspectiva de orientar a gestão dos projetos de geoparque para o uso responsável da riqueza natural,

sem perturbação da vida cotidiana da população residente. Ademais, o produto é basilar para integrar o plano diretor da cidade.

Cabe destacar que a avaliação quantitativa de geossítios proposta por Brilha (2016) opera na escala do sítio individual, ponderando valor científico, risco de degradação e potencial de uso educativo e turístico. O zoneamento aqui apresentado atua em escala complementar, a do território de suporte, e pode funcionar como camada de contexto para aquela avaliação: um geossítio de alto valor científico inserido em zona de transição ou de gestão crítica requer medidas de proteção e de mediação social que um geossítio equivalente em zona de conservação dispensa.

A análise do Zoneamento Ecológico-Econômico de Morro do Chapéu/BA evidencia a interação entre os componentes físico-ambientais e a fragilidade social. De maneira geral, o zoneamento não indica restrições socioambientais extensas à implantação do geoparque, visto que a área crítica representa menos de 1%. Nesses espaços, em vez da exclusão do projeto, recomenda-se priorizar a participação das comunidades na gestão do geoparque, princípio central do modelo dos Geoparques Mundiais da UNESCO (Henriques; Brilha, 2017), a qual pode contribuir ao incorporar essas populações no grupo de trabalho com empregos duradouros. Além disso, as comunidades presentes nessas áreas devem receber políticas públicas de assistência.

As zonas de conservação são os ambientes com menores fragilidades socioambientais; assim, orienta-se a destinação desses ambientes para a proteção ambiental e a manutenção da biodiversidade, onde as paisagens naturais sejam apenas contemplativas, com o menor contato humano direto. O conhecimento tradicional pode auxiliar na preservação do património geológico e geomorfológico.

A educação da população também está prevista na concepção de um geoparque (Occhipinti, 2025); assim, recomenda-se que as grandes zonas destinadas à regulação, observadas no zoneamento, sejam destinadas para tal função. A ideia central é organizar essas áreas para desenvolver o elemento científico, com programas e materiais educativos, espaço para a pesquisa e cooperação com instituições de ensino.

As áreas de transição necessitam de prudência, em decorrência de sua moderada vulnerabilidade ambiental associada à pressão antrópica. No contexto do geoparque, as atividades turísticas devem ser avaliadas e controladas, requerendo uma infraestrutura adequada para receber o público, com sinalização, visitas guiadas e proteção, entre outros.

Há, contudo, um ponto que merece atenção no desenho do modelo. O uso e a cobertura da terra receberam o menor peso do conjunto (6,4%), empatado com solos, ainda que seja a única variável do modelo diretamente modificável pela ação humana no curto prazo e aquela cuja alteração explica a maior parte do incremento recente da erosão hídrica em escala global (Borrelli et al., 2017). Um peso

baixo para essa camada torna o zoneamento pouco sensível justamente às mudanças que a gestão do geoparque pretende induzir ou evitar. Essa é uma escolha legítima, coerente com a tradição de Crepani et al. (2001), que privilegia o substrato físico; mas é uma escolha que condiciona o produto e que se recomenda submeter a análise de sensibilidade (Chen; Yu; Khan, 2010).

4.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Primeiro, os julgamentos par a par foram emitidos pelos próprios autores, sem painel de especialistas nem consulta às comunidades do território. Em um zoneamento que atribui a determinadas áreas a condição de "gestão crítica" com consequências práticas para comunidades quilombolas identificadas nominalmente no texto a ausência de participação social na atribuição de pesos é uma limitação de fundo, e não apenas procedimental. Destaca-se que o próprio Decreto n.º 4.297/2002 estabelece que a elaboração e a implementação do ZEE devem contar com ampla participação democrática (Brasil, 2002).

Segundo, a matriz de comparação entre os seis critérios ambientais e a sua Razão de Consistência não são apresentadas. Somente as matrizes intraclasse (Tabelas 3 a 8) foram tabuladas. Como os pesos globais (37,1%; 19,6%; 19,6%; 10,9%; 6,4%; 6,4%) governam o resultado final mais do que qualquer ponderação interna, essa omissão impede a verificação independente da etapa mais determinante do modelo.

Terceiro, os limiares de classe do produto final não são informados. O texto define o índice ZEE pela Equação 2, mas não declara os intervalos numéricos que separam conservação, regulação, transição e gestão crítica, nem se a classificação foi feita por intervalos iguais, quantis ou quebras naturais. Sem esses valores, os percentuais reportados (22,20%; 30,90%; 45,88%; 0,99%) não são reprodutíveis.

Quarto, não foi realizada análise de sensibilidade dos pesos. Trata-se de prática recomendada na literatura de avaliação de aptidão em SIG, precisamente porque a extensão e a posição das classes finais podem variar de forma expressiva diante de perturbações modestas nos pesos de entrada (Chen; Yu; Khan, 2010). Dado que a classe de gestão crítica ocupa menos de 1% da área, ela é, por construção, a mais sensível a essas perturbações.

Quinto, há incompatibilidade de escalas entre as camadas de entrada: litologia (1:250.000), solos (1:500.000), geomorfologia (1:250.000), pluviosidade (grade de 5 km) e as camadas derivadas de sensores (30 m). A rasterização comum a 30 m harmoniza o formato, mas não a precisão; a resolução efetiva do produto é governada pela camada mais grosseira, e a apresentação em 30 m pode sugerir uma acurácia posicional que os dados não sustentam. Soma-se a isso que as áreas das classes de

declividade totalizam 5.162 km² e as de solos, 5.808 km², valores que divergem da área municipal (5.745 km²) e indicam diferenças de recorte entre as camadas.

Sexto, o modelo é estático. Ele descreve uma fotografia do território a partir de dados de 2022 (censo) e de médias de 1981-2024 (precipitação), sem incorporar trajetórias de mudança de uso da terra, o que limita seu emprego como instrumento de projeção de cenários.

4.2 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

A contribuição deste trabalho se dá em dois planos. No plano metodológico, apresenta uma cadeia operacional completa e replicável inventário, ponderação AHP com verificação de consistência, álgebra de mapas e integração ponderada entre dimensão física e social executada em software livre (QGIS) e em planilha de AHP de acesso público (Goepel, 2013), com dados públicos e em resolução compatível com o planejamento municipal. No plano aplicado, entrega o primeiro produto cartográfico, até onde alcançou o levantamento realizado, que cruza vulnerabilidade natural à perda de solo e fragilidade socioeconômica para o território do projeto de Geoparque de Morro do Chapéu, oferecendo à gestão municipal e ao grupo proponente do geoparque uma base espacial explícita para decidir onde a visitação pode ser ampliada, onde deve ser condicionada e onde a prioridade não é o uso público, mas a política social.

5 CONCLUSÕES

A metodologia adotada para a elaboração do mapa de Zoneamento Ecológico-Econômico do município de Morro do Chapéu/BA, área base para a implementação de projetos de geoparques, com diversos geossítios catalogados, foi considerada adequada e promissora. A integração da análise multicritério com a ferramenta SIG permitiu a análise espacial dos valores ambientais e socioeconômicos, simultaneamente, agrupando e classificando áreas homogêneas em relação ao grau de vulnerabilidade de vários temas.

O zoneamento revelou que, majoritariamente, o município apresenta estabilidade ambiental e potencial socioambiental: 9,3% de elevada vulnerabilidade natural e 3,17% de elevada vulnerabilidade social, com apenas 0,99% do território classificado como de gestão crítica. Não obstante, a gestão dos geossítios e do futuro geoparque deve se atentar às realidades e condições econômicas das comunidades locais. Cabe investir na propagação científica, na valorização histórico-cultural, na conservação do ambiente, no fomento ao turismo ecológico, na orientação e proteção dos espaços de visitação e na manutenção de áreas de mínimo contato, principalmente na vasta zona moderadamente instável.

Respondendo aos objetivos específicos, as classes de cada um dos seis critérios ambientais foram hierarquizadas com Razões de Consistência entre 0,016 e 0,048 (Tabelas 3 a 8), todas abaixo do limiar de 0,1, embora a Razão de Consistência da matriz entre critérios não tenha sido informada; a vulnerabilidade natural foi espacializada, com 78,0% do território nas classes baixa e muito baixa; o índice de vulnerabilidade social foi construído por setor censitário; as duas dimensões foram integradas em quatro classes de gestão; e o padrão resultante indica que o principal desafio do projeto de geoparque não é a instabilidade física do território, e sim a articulação entre uso público e as comunidades situadas nos extremos leste e oeste do município. Recomenda-se, como desdobramento imediato, a publicação da matriz de comparação entre critérios, dos limiares de classe e de uma análise de sensibilidade dos pesos, de modo a consolidar a reprodutibilidade do produto aqui apresentado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do edital CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 –Presente, Passado e Futuro da Biodiversidade do Semiárido: Inventários, Monitoramento, Impactos das Mudanças Climáticas e Implicações para o Uso e Conservação da Flora, Fauna e Fungos. W.J.F.R. foi apoiado por bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (processo nº 314954/2021-0), Projeto Prospecta 4.0 –CNPq (processo nº 407907/2022-0) e pelo projeto 30202010010121001 –CTBIO –FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS –CTBio-CIMATEC SERTÃO). Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (INCT IN-TREE), financiado pelo CNPq (408930/2024-1), pela CAPES (88887.195651/2025-00) e pela FAPESP. Financiamento adicional foi fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), por meio do programa Bioeconomia, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, no âmbito da Chamada nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Termo de Outorga nº PPF0003/2023. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio institucional, bem como ao SENAI CIMATEC pela contribuição no desenvolvimento científico e tecnológico voltado à inovação aplicada.R.N.V. foi apoiado pelo INCT IN-TREE e agradece a bolsa SET-G 30202010010121001 –CTBIO –FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia doSemiárido (UEFS –CTBio-CIMATEC SERTÃO), vinculado a Projetos Especiais.

REFERÊNCIAS

ACCIOLY, L. J. de O.; SILVA, E. A. da; CAVALCANTI JUNIOR, R. de A.; ALVES, E. da S.; PEREIRA, A. G. de S.; SILVA, R. S. da; RAMOS, R. R. D.; SILVA, R. R. da. Mapeamento do uso e cobertura das terras do semiárido pernambucano (escala 1:100.000). Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. E-book. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1079144/. Acesso em: 2 mar. 2026.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ARAÚJO FILHO, J. C.; MARQUES, F. A.; AMARAL, A. J.; CUNHA, T. J.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; GALVÃO, P. V. M. Solos do semiárido: características e estoque de carbono. In: GIONGO, V.; ANGELOTTI, F. (ed.). Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira. Brasília, DF: Embrapa, 2022.

BECKER, B. K.; EGLER, C. A. G. Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico-econômico pelos estados da Amazônia Legal. Brasília, DF: SAE/MMA, 1996.

BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; FLEISCHER, L. R.; LUGATO, E.; BALLABIO, C.; ALEWELL, C.; MEUSBURGER, K.; MODUGNO, S.; SCHÜTT, B.; FERRO, V.; BAGARELLO, V.; VAN OOST, K.; MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. Nature Communications, v. 8, n. 1, art. 2013, 2017. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.

BRASIL. Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 27 fev. 2026.

BRASIL. Decreto n.º 4.297, de 10 de julho de 2002. Regulamenta o art. 9.º, inciso II, da Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelecendo critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil - ZEE, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2002. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4297.htm. Acesso em: 27 fev. 2026.

BRILHA, J. Património geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica. Viseu: Palimage, 2005. (Colecção Ciência e Desenvolvimento).

BRILHA, J. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. Geoheritage, v. 8, n. 2, p. 119-134, 2016. DOI: 10.1007/s12371-014-0139-3.

CHEN, Y.; YU, J.; KHAN, S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. Environmental Modelling & Software, v. 25, n. 12, p. 1582-1591, 2010. DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.06.001.

COLLINS, M. G.; STEINER, F. R.; RUSHMAN, M. J. Land-use suitability analysis in the United States: historical development and promising technological achievements. Environmental Management, v. 28, n. 5, p. 611-621, 2001. DOI: 10.1007/s002670010247.

COSTA, M. A.; MARGUTI, B. O. (org.). Atlas da vulnerabilidade social nas regiões metropolitanas brasileiras. Brasília, DF: IPEA, 2015.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. São José dos Campos: INPE, 2001. 103 p. (INPE-8454-RPQ/722).

FARR, T. G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, v. 45, n. 2, RG2004, 2007. DOI: 10.1029/2005RG000183.

FITZ, P. R. Cartografia básica. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FOTHERINGHAM, A. S.; WONG, D. W. S. The modifiable areal unit problem in multivariate statistical analysis. Environment and Planning A, v. 23, n. 7, p. 1025-1044, 1991. DOI: 10.1068/a231025.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, v. 2, art. 150066, 2015. DOI: 10.1038/sdata.2015.66.

GOEPEL, K. D. Implementing the analytic hierarchy process as a standard method for multi-criteria decision making in corporate enterprises: a new AHP Excel template with multiple inputs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS, 12., 2013, Kuala Lumpur. Anais [...]. Kuala Lumpur: ISAHP, 2013. DOI: 10.13033/isahp.y2013.047.

GOLDICH, S. S. A study in rock-weathering. The Journal of Geology, v. 46, n. 1, p. 17-58, 1938. DOI: 10.1086/624619.

HENRIQUES, M. H.; BRILHA, J. UNESCO Global Geoparks: a strategy towards global understanding and sustainability. Episodes, v. 40, n. 4, p. 349-355, 2017. DOI: 10.18814/epiiugs/2017/v40i4/017036.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html. Acesso em: 2 mar. 2026.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science, v. 20, n. 7, p. 703-726, 2006. DOI: 10.1080/13658810600661508.

MAPBIOMAS. Coleção 10 da série anual de mapas de uso e cobertura da terra do Brasil. [S. l.]: MapBiomas, 2026. Disponível em: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/. Acesso em: 3 mar. 2026.

MELLO, M. O. de. Ecologia da Bahia e o reflorestamento. In: SIMPÓSIO FLORESTAL DA BAHIA, 1973, Salvador. Anais [...]. Salvador: Secretaria da Agricultura, 1973. p. 45-118.

OCCHIPINTI, S. Beyond conservation: geoparks as multi-faceted tools for scientific research, education, and public engagement. A holistic approach. Earth & Environmental Science Research & Reviews, v. 8, n. 1, p. 1-7, 2025. DOI: 10.33140/EESRR.08.01.04.

PIMENTA, L. B.; BELTRÃO, N. E. S.; GEMAQUE, A. M. D. S.; AMADOR TAVARES, P. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. Interações, Campo Grande, v. 20, n. 2, p. 407-420, 2019. DOI: 10.20435/inter.v20i2.1856.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. Pedologia: base para distinção de ambientes. 6. ed. Lavras: UFLA, 2014.

ROCHA, A. J. D.; PEDREIRA, A. J. Geoparque Morro do Chapéu - Bahia: proposta. Salvador: CBPM; Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração, 2013. (Série Publicações Especiais, 14).

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977. DOI: 10.1016/0022-2496(77)90033-5.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.

SILVA, A. C. D.; NOLASCO, M. C.; ROCHA, A. J. D.; LIMA, U. D. D. S. Valor cultural da geodiversidade: estudo de caso no município de Morro do Chapéu (BA). In: LOBÃO, J. S. B.; CHAVES, J. M.; NOLASCO, M. C.; CASTRO, P. T. A.; ROCHA, W. J. S. F. (org.). Ciências ambientais e interdisciplinaridade. Feira de Santana: UEFS Editora, 2020. p. 67-101. DOI: 10.7476/9786589524939.0004.

SILVA JUNIOR, C. H. L. Lógica fuzzy e Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicados ao zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos: uma revisão. Revista Monografias Ambientais, v. 14, n. 3, p. 42-55, 2015. DOI: 10.5902/2236130818976.

SILVA JUNIOR, C. H. L.; SILVA, F. B.; PEREIRA, D. C. A.; BEZERRA, V. L. A. R. Uso de lógica fuzzy e Processo Analítico Hierárquico (AHP) no zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamento utilizando o operador fuzzy média ponderada AHP: o caso da bacia hidrográfica do rio Anil em São Luís - MA. Revista de Geociências do Nordeste, v. 3, n. 2, 2016.

SPÍNOLA, H.; VICTORIA, S. Zoneamento das áreas susceptíveis aos movimentos de massa no município de Tarrafal, Ilha de Santiago, Cabo Verde. Revista do Instituto Geológico, v. 33, n. 1, p. 41-56, 2012. DOI: 10.5935/0100-929X.20120003.

SVAMPA, M. Las fronteras del neoextractivismo en América Latina: conflictos socioambientales, giro ecoterritorial y nuevas dependencias. Guadalajara: CALAS, 2019. 144 p.

TRICART, J. Ecodinâmica. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977.