

Análise do Risco de Degradação Física da Bacia Hidrográfica do Rio Mulato, no Médio Parnaíba Piauiense

Analysis of the Risk of Physical Degradation of the Mulato River Water Basin in The Middle Parnaíba Region of Piauí

Karoline Veloso Ribeiroⁱ
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, Brasil

Reurysson Chagas de Sousa Moraisⁱⁱ
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Teresina, Brasil

Resumo: Este trabalho buscou elucidar a degradação ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Mulato (BHRM), sendo resultado de uma série de fatores decorrentes da dinâmica do ambiente físico-natural e/ou de ações geradas pela atividade humana. O estudo baseia-se na aplicação da metodologia para o Diagnóstico Físico-Conservacionista (DFC) apoiada por Geoprocessamento. A metodologia parte da definição de seis parâmetros para identificar o risco de degradação, sendo eles: Índice de Cobertura Vegetal (ICV), Cobertura Atual (CA), Declividade (DEC), Erosividade da Chuva (R), Erodibilidade do Solo (K) e Densidade de Drenagem (DD). O mapeamento apontou que as porções da BHRM que apresentam áreas com risco muito baixo concentram-se na porção sudoeste e próximo às planícies fluviais, enquanto as que apresentam risco de degradação média a muito alto ocorrem em áreas destinadas às práticas agrícolas. Ressalta-se a eficiência dessa metodologia, cujos resultados são especializados como reais indicadores do estado de degradação desse sistema.

Palavras-chave: Análise Sistemática; Diagnóstico Físico-Conservacionista; Geoprocessamento.

Abstract: This work aimed to elucidate the environmental degradation of the Mulato river basin, based on a series of factors resulting from the dynamics of the physical-natural environment and/or actions generated by anthropic action. The study is based on the application of the methodology for Physical-Conservationist Diagnosis (DFC) supported by Geoprocessing. The methodology starts from the definition of six parameters to identify the risk of degradation, namely: Vegetation Cover Index (ICV), Current Cover (CA), Declivity (DEC), Rain Erosivity (R), Soil Erodibility (K) and Drainage density (DD). The mapping showed that the portions of the BHRM that present areas with very low risk are

ⁱ Mestrado, Universidade Federal do Piauí. karolvelosogeo@outlook.com.
<http://orcid.org/0000-0003-26976098>.

ⁱⁱ Doutorado, Universidade Federal do Ceará. reurysson@ifpi.edu.br.
<http://orcid.org/0000-0002-1334-4182>.

concentrated in the southwestern portion and close to the river plains, while those that present a medium to very high risk of degradation occur in areas destined for agricultural practices. The efficiency of this methodology is highlighted, as the results are spatialized as real indicators of the state of degradation of this system.

Keywords: Systemic Analysis; Physical-Conservationist Diagnosis; Geoprocessing.

Introdução

A humanidade, ao longo do seu processo histórico, encontrou na natureza as condições necessárias para o seu desenvolvimento. Assim, elaborou técnicas capazes de transformar os espaços naturais e extrair os recursos necessários para satisfazer as suas necessidades (SANTOS, 2011).

Ao se apropriar do território e dos recursos naturais, a ação humana transforma a paisagem natural, com muito mais intensidade que a ação da natureza, provocando alterações nos fluxos energéticos e gerando impactos no ambiente (TROMBETA *et al.*, 2014). Logo, o uso indistinto desses recursos tem resultado, quase sempre, em estado de degradação ambiental (MORAIS, 2018).

Nesse viés, é necessário que se faça um estudo integrado do ambiente, objetivando definir áreas que requerem uma maior proteção ou que apresentem restrições, quanto ao uso e ocupação, além daquelas que necessitam de ações diferenciadas para a gestão.

Do ponto de vista teórico-metodológico, a abordagem sistêmica oferece um conjunto integrado de informações, em perspectiva integrada, que norteia o desenvolvimento das investigações sobre a questão ambiental cujas análises devem ser suficientemente abrangentes e capazes de avaliar as condições dos recursos naturais (RIBEIRO, 2019).

Dentro da dinâmica dos sistemas naturais, a bacia hidrográfica revela-se como uma excelente área para os estudos voltados ao planejamento territorial/ambiental (GUERRA, CUNHA, 2006), pois demonstra seu potencial enquanto unidade de análise e de entidade territorial integrada (LEITE, ROSA, 2009).

Dessa forma, o uso de metodologias para o diagnóstico da situação real dos recursos naturais, especialmente numa bacia hidrográfica, reconhecida como unidade para o manejo, passa a ser um instrumento necessário para a preservação e gerenciamento destes recursos (FERRETI, 2003).

A metodologia do Diagnóstico Físico-Conservacionista (DFC) fornece indicativos concretos para o manejo e uso racional dos recursos naturais renováveis, visto que os parâmetros potenciais de proteção e/ou degradação são considerados a partir da análise integrada do ambiente (MORAIS, 2018).

Nesta acepção, a pesquisa objetivou realizar o Diagnóstico Físico-Conservacionista (DFC) na Bacia Hidrográfica do Rio Mulato (BHRM), a partir da aplicação do Geoprocessamento.

A concepção que norteia esta pesquisa se fundamenta na proposta metodológica operacionalizada por Beltrame (1994) e Morais (2018), uma vez que o DFC consiste em um instrumento no trabalho de preservação ambiental.

No intuito de explicitar a situação real em que se encontram os recursos naturais renováveis em um determinado espaço geográfico é necessária uma análise de indicadores potenciais de proteção ou degradação destes recursos (BELTRAME, 1994), particularmente na área que envolve a BHRM.

Nesse contexto, a justificativa da escolha da BHRM, no médio Parnaíba piauiense, parte da ideia de contribuir com os estudos relativos à degradação/conservação do ambiente, uma vez que sua análise e compreensão proporcionam uma melhor definição das diretrizes a serem implantadas nesse espaço físico-territorial.

Com isso, faz-se necessário um aprofundamento na investigação quanto à dinâmica ambiental associada às pressões antrópicas, a fim de assegurar o bem-estar das populações e o uso sustentável na área.

Materiais e Métodos

Coleta de Dados

A presente pesquisa baseou-se na abordagem sistêmica, fundamentada nos trabalhos de Sotchava (1977), Tricart (1977), Bertrand (2004), Souza (2000), e operacionalizada mediante a metodologia da avaliação dos riscos de degradação física proposta por Morais (2018), a partir do trabalho apresentado por Beltrame (1994).

Para a criação da base de dados, primeiramente, realizou-se a delimitação (de modo automático) da BHRM, a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), disponível no sítio do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), com o uso do plugin/técnica TauDEM integrado ao software ArcGis.

Em seguida, procedeu-se à aquisição de dados físico-ambientais para que subsidiassem a caracterização dos aspectos geoambientais e socioeconômicos da BHRM. Segue abaixo a descrição mais detalhada dos dados geocartográficos utilizados nesta pesquisa.

– Mapeamento geológico: dados obtidos junto à Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM, 2010);

– Hipsometria: dados obtidos junto ao Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2020), a partir da aquisição dos dados MDE, da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), utilizando técnicas de geoprocessamento e Sensoriamento Remoto;

– Mapa de solos: dados obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), seguindo as diretrizes propostas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2013);

– Mapa de uso e cobertura da terra: dados obtidos junto a plataforma do MapBio-mas, a partir do uso de imagens do satélite Landsat 8, do ano de 2020.

Procedimento de cada Parâmetro Utilizado para a Obtenção de Diagnóstico Físico Conservacionista (DFC) da BHRM

Face à complexidade dos procedimentos relativos a cada etapa produto, segue abaixo a descrição mais detalhada dos métodos e técnicas utilizadas na obtenção dos parâmetros que subsidiam o DFC para a BHRM.

O Índice de Cobertura Vegetal (ICV) foi definido com base nas diferenças entre os valores do NDVI obtidos para os anos de 1984 e 2020. Para tanto, foram utilizadas as imagens do satélite Landsat 5, sensor TM, órbita/ponto 219/64, datada de 29/06/1984 (bandas 3 e 4), e Landsat 8, sensor OLI, órbita/ponto 219/64, datada de 19/08/2020 (bandas 4 e 5), adquiridas através do sítio do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

Diante disso, o ICV foi calculado com base no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), resultante da equação: $NDVI = NIR - RED / NIR + RED$. O resultado dessa combinação varia de -1 a 1, de modo que, quanto mais próximo de 1, maior será o indício de presença de vegetação e, quanto mais próximo de -1, maior indício de solo exposto.

Já o grau de semelhança entre a vegetação original e atual foi definida com base nas diferenças entre os valores do NDVI, obtidos para os anos de 1984 e 2020, a partir da equação: $ICV = NDVI_{1984} - NDVI_{2020}$. Dessa maneira, quanto mais distante de zero (para mais e para menos) for o valor de ICV, maior a diferença entre o padrão de cobertura da terra. Enquanto valores próximos de zero indicam alto grau de semelhança da vegetação (MORAIS, 2018).

O Índice de Proteção ao Solo (IPS) foi obtido a partir do mapeamento de uso e cobertura atual da terra, a partir do Processamento Digital de Imagens do satélite Landsat 8, sensor OLI, datada de 19/08/20, órbita/ponto 219/64, apresentando resolução espacial de 30 metros, disponibilizado pelo MapBiomias.

Após o mapeamento das classes de uso e cobertura da terra da BHRM, atribuiu-se os valores do Índice de Proteção do Solo (IPS), proposto por Morais (2018), utilizando o método AHP (Analytic Hierarchy Process). A matriz de julgamento elaborada para esta finalidade é apresentada na Tabela 1, enquanto o peso de cada classe (IPS) está descrito no Quadro 1.

Tabela 1 – Matriz de julgamento do nível de proteção ao solo oferecido pelas classes de uso e cobertura da terra

Classes	Água	VA	VAD	VAR	AA	CAM	SE
Água	1,00	1,0	2,00	3,00	5,00	7,00	9,00
Veg. Arbórea (VA)	1,00	1,0	3,00	2,00	5,00	7,00	9,00
Veg. Arbustiva Densa (VAD)	0,50	0,33	1,00	2,00	5,00	7,00	9,00
Veg. Arbustiva Rala (VAR)	0,33	0,50	0,50	1,00	3,00	7,00	9,00
Áreas Agrícolas	0,20	0,20	0,20	0,33	1,00	3,00	5,00
Campos (CAM)	0,14	0,14	0,14	0,14	0,33	1,00	3,00
Solo Exposto (SE)	0,14	0,14	0,11	0,11	0,20	0,33	1,00

Fonte: Morais (2018).

Quadro 1 – Classes de uso e cobertura da terra da BHRM, seguido de seus respectivos valores do Índice de Proteção do solo

Classes	IPS
Corpos d'água	2,81
Vegetação Arbórea	2,81
Vegetação Arbustiva Densa	1,86
Vegetação Arbustiva Rala	1,42
Áreas Agrícolas	0,6
Campos	0,31
Solo Exposto	0,19

Elaboração: Morais (2018).

A declividade do terreno para a BHRM foi calculada a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), adquirido na plataforma do Instituto Nacional de Dados Espaciais (INPE), com resolução espacial de 30 metros, e processado com uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como o ArcGis 10.5 (Licença Estudantil).

A escolha das classes de declividade seguiu a proposta apresentada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2006), onde foram definidas seis classes de declividade, a fim de subsidiar a interpretação acerca da susceptibilidade do solo à erosão.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2014), a erosividade da chuva (R) é um índice que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção vegetal. Assim sendo, propuseram a obtenção do fator R , a partir do somatório da média mensal do índice de erosão (EI), definida conforme equação: $EI = 67,355 (r2 / P)0,85$.

Onde:

EI = média mensal do índice de erosão, em MJ.mm.ha-1.h-1;

r = precipitação média mensal em milímetros;

P = precipitação média anual em milímetros;

Vale ressaltar que para essa análise foram adquiridos dados de precipitação, estimados por satélite, da plataforma GIOVANNI, disponibilizados pelo Goddard Earth Sciences Data And Information Services Center (GES DISC), da Agência Espacial Americana (NASA).

Já a erodibilidade do solo (K) refere-se à capacidade de um determinado solo resistir ou não à atuação de processos erosivos. Está relacionada às propriedades físicas (textura, estrutura, permeabilidade e densidade), químicas e biológicas do solo. Logo, utilizou-se a proposta metodológica apresentada por Dernadin (1990), conforme equação:

$$k = (0,00000748 * M) + (0,004480 * P) - (0,0631175 * DMP) + (0,01039567 * R)$$

Onde:

k = é a erodibilidade dos solos, expresso em t.ha.h/ha.MJ.mm;

M = (Areia fina + Silte) * ((Areia fina + Silte) + Areia grossa), em porcentagem;

P = permeabilidade do solo, definida com base na descrição geral do perfil, codificada como: 1 – Muito Baixa, 2 – Baixa, 3 – Moderada, 4 – Alta e 5 – Muito Alta;

R = (Areia grossa * (Teor de Matéria Orgânica/100), em porcentagem);

DMP = é o diâmetro médio das partículas do solo, definido pela Equação abaixo, sendo os valores de areia, silte e argila expressos em porcentagem.

$$DMP = ((0,62 * \text{Areia grossa}) + (0,15 * \text{Areia fina}) + (0,0117 * \text{silte}) + (0,00024 * \text{Argila})) / 100$$

A base cartográfica dos solos, bem como os dados de granulometria e concentração de matéria orgânica foram adquiridas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015). Em seguida, realizou-se o recorte para a área da BHRM, onde foi possível verificar as classes de solo que ocorrem na bacia, e na ausência de informações físicas, químicas e biológicas de perfis associados às classes de solos dentro da área da bacia, tomou-se como referência aqueles localizados o mais próximo possível da área de estudo.

A Densidade de Drenagem (Dd) permite conhecer o potencial de escoamento superficial das águas de uma bacia, implicando, assim, na maior ou menor intensidade dos processos erosivos (BELTRAME, 1994). Esse parâmetro é representado pela relação entre o comprimento total dos canais fluviais (Lt) e área total da bacia (A), expressa pela equação: $Dd = Lt/A$. Devido à ausência de base cartográfica, optou-se por extrair a drenagem a partir do MDE, em ambiente SIG, com o uso da ferramenta TauDEM, adicionado a software ArcGis.

O cálculo da Dd foi realizado por meio da aplicação do Estimador de Kernel, disponível na extensão Spatial Analyst do ArcGis, onde realiza a contagem de todas as linhas de drenagem de dentro de uma região de influência, ponderando-as pelo seu comprimento. O resultado desta aplicação é uma superfície contínua que representa, por meio de uma escala de cores, as áreas com maior ou menor concentração de canais de drenagem (MORAIS, 2018). O padrão espacial adotado corresponde a cinco classes de valores de Dd, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação dos valores de Densidade de Drenagem (DD)

Valores de DD (km/km²)	Descrição
$DD \leq 0,5$	Muito Baixa
$0,5 \leq DD < 1$	Baixa
$1 \leq DD < 1,5$	Média
$1,5 \leq DD < 2$	Alta
$DD \geq 2$	Muito Alta

Fonte: Morais (2018).

O Diagnóstico Físico-Conservacionista (DFC) da BHRM resultou, portanto, da integração temática de cada plano de informação anteriormente mencionados, com a apli-

cação de técnicas de inferência espacial baseados na lógica fuzzy e no método AHP permitindo, assim, uma análise espacializada.

Inicialmente, definiu-se para cada parâmetro o intervalo de valores que contribuíram para a definição da classe B1 – Risco Muito Baixo de degradação física da bacia. Em seguida, a associação de cada parâmetro em relação à classe B1, foi realizada a partir da função de pertinência fuzzy, definida pela equação 1 e representada pela Figura 1.

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \leq b \\ \left(\frac{1}{1 + d(x - b)^2} \right) & \text{se } x > b \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

$\mu(x)$ é grau de pertinência;

d é parâmetros que determina a forma da função;

b é o valor máximo estipulado para a função;

x é o valor referente a medida do parâmetro analisado.

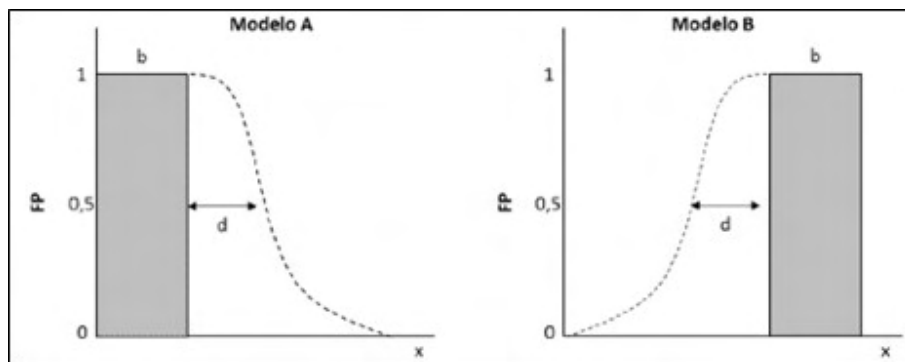


Figura 1 – Função senoidal decrescente (modelo A) e crescente (modelo B).

Fonte: Morais (2018)

Caracterização Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Mulato, Piauí

Localização Geográfica da Área em estudo

A BHRM (Figura 2) está localizada na microrregião do médio Parnaíba piauiense e engloba, no todo ou em parte, os municípios piauienses de: Amarante, Angical do Piauí, Hugo Napoleão, Jardim do Mulato, Palmeirais, Regeneração, Santo Antônio dos Milagres e São Gonçalo do Piauí, compreendendo uma área de 1046,16km² e um perímetro de 244,67km (BRASIL, 2010).

A geologia da BHRM tem sua gênese associada à dinâmica da litosfera, resultante do lineamento transbrasiliiano, e encontra-se alicerçada sobre um ambiente de estrutura sedimentar, com predomínio de formações geológicas que datam do Paleomesozoico, tais como as formações Corda, Pastos Bons, Pedra de Fogo, Piauí e Formação Sardinha (Figura 3).

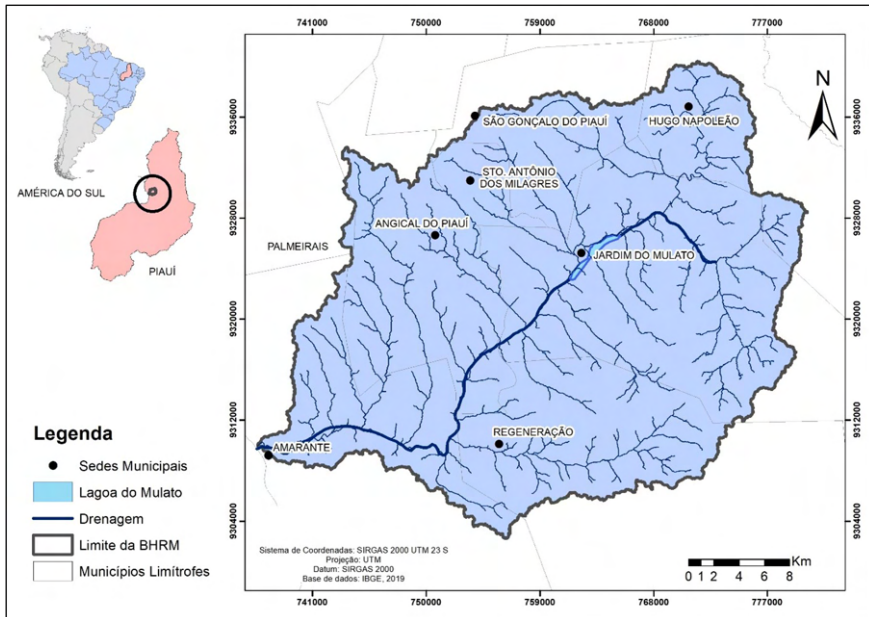


Figura 2 – Localização geográfica da BHRM.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

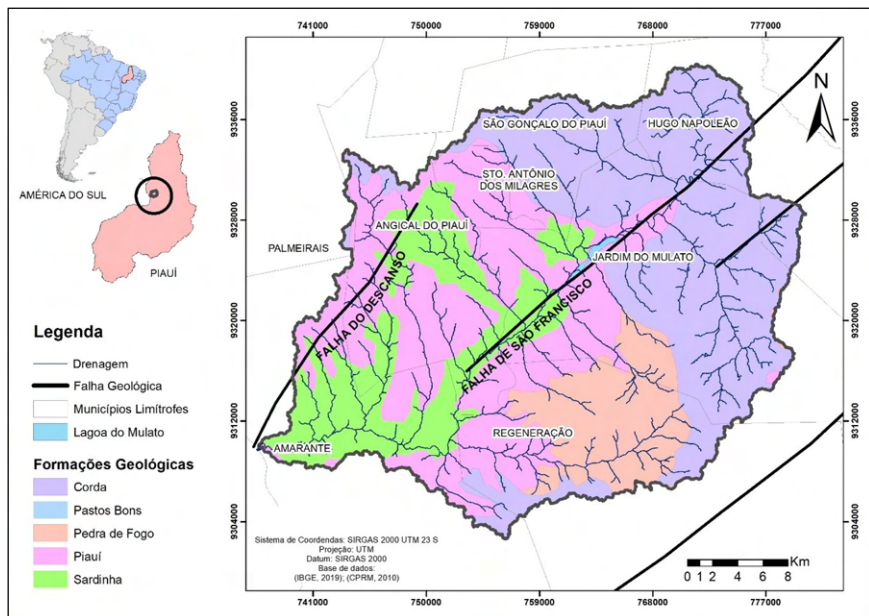


Figura 3 – Geologia da BHRM.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

No que diz respeito às formas e modelados da paisagem da BHRM, estes são decorrentes do desenvolvimento de falhas normais (São Francisco e do Descanso), as quais apresentam uma direção geral NE-SO junto aos municípios de Amarante (PI) e São Francisco do Maranhão (MA) (BRASIL, 1973). Cabe destacar que, além dos falhamentos regionais, ocorre um grande número de fraturamentos por toda a bacia sedimentar que se refletem no comportamento das formas de relevo também a nível local (LIMA, 1987).

Ao considerar a posição geográfica, dentro dos setores estruturais da bacia sedimentar do Parnaíba, a BHRM encontra-se inserida no grupo das bacias difusas do médio Parnaíba piauiense, onde o curso d'água principal tem suas nascentes no município de Jardim do Mulato/PI e sua foz no município de Amarante/PI (Figura 4).

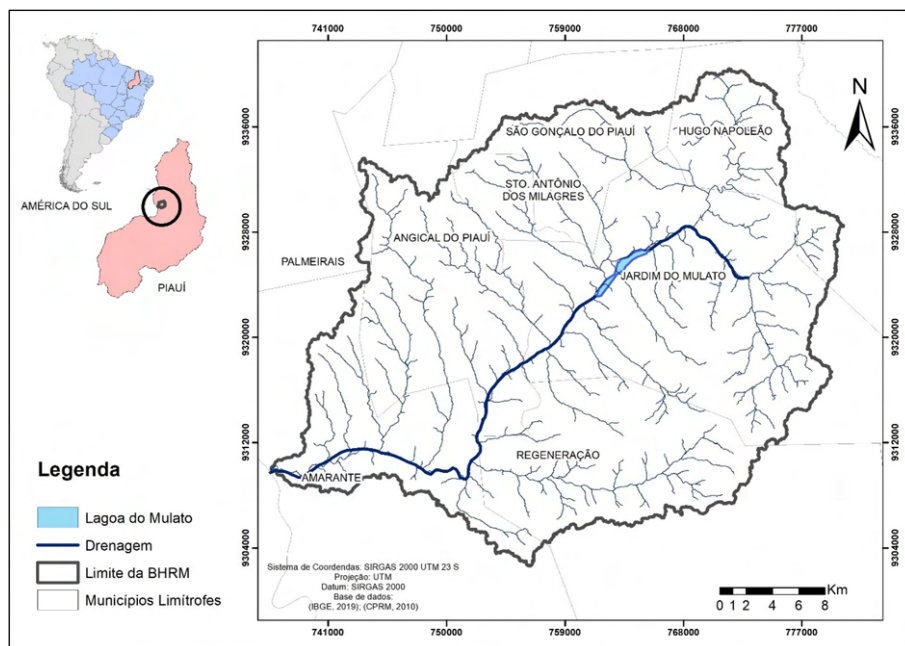


Figura 4 – Drenagem da BHRM.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

Esta drenagem conta com a presença de uma significativa lagoa natural, localizada no mesmo município de suas nascentes principais, com uma área de 2,168 km² e um perímetro de 11,25 km, aproximadamente. No que se refere à ordem de canais, ao considerar a hierarquia fluvial de Strähler (1952), tem-se o rio Mulato como um canal de quarta ordem (RIBEIRO, 2019).

Acerca da rede de drenagem, se encontra diretamente atrelada às formas estruturais do relevo, as quais funcionam como divisores topográficos da bacia hidrográfica, juntamente à própria estrutura litológica e dos lineamentos de falhas. Em termos gerais, apresenta um padrão de drenagem subparalelo, uma vez que esta rede de drenagem se localiza em áreas onde há presença de controles estruturais que motivam a ocorrência de espaçamento regular entre os fluxos hídricos superficiais.

A BHRM apresenta elevações que variam de 90 metros na zona de confluência dos rios Parnaíba e Mulato (no município de Amarante/PI), até 439 metros no topo dos planaltos tabulares, do tipo mesa. As variações altimétricas da bacia são representadas por meio da hipsometria, elaborada com o uso do MDE, como mostra a Figura 5.

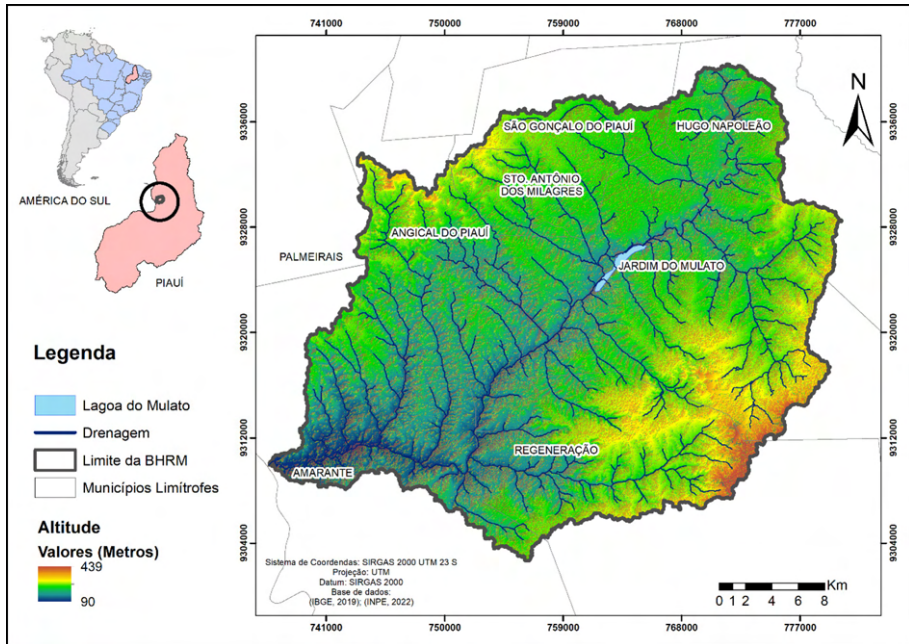


Figura 5 – Hipsometria da BHRM.
Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

Do ponto de vista geomorfológico, partindo, essencialmente, da fisionomia das formas (aspecto fisionômico), que tem por base sua gênese e idade, foi possível classificar o relevo até a quarta ordem de grandeza, obedecendo aos níveis taxonômicos de Ross (1992), como mostra a Figura 6.

Ao considerar que a chuva é o principal agente ativo que intervém na erosão do solo, a variável climática, baseada no comportamento pluviométrico, é considerada fundamental para compreender as análises que envolvem o DFC. Nesse viés, o clima regional está submetido à influência do semiárido (quente e seco – Bsh), segundo a classificação de Köppen e Geiger (1928), cuja principal característica é a irregularidade espaço-temporal das chuvas e elevadas temperaturas durante todo o ano.

Do ponto de vista pedológico, o conhecimento das características do solo, juntamente às suas principais características morfológicas e morfométricas, aparecem como sendo de fundamental importância para a compreensão das condições de resistência, frente aos variados processos e/ou fenômenos erosivos. Assim sendo, na BHRM predominam os Argissolos, Chernossolos, Latossolos, Neossolos e Plintossolos (Figura 7).

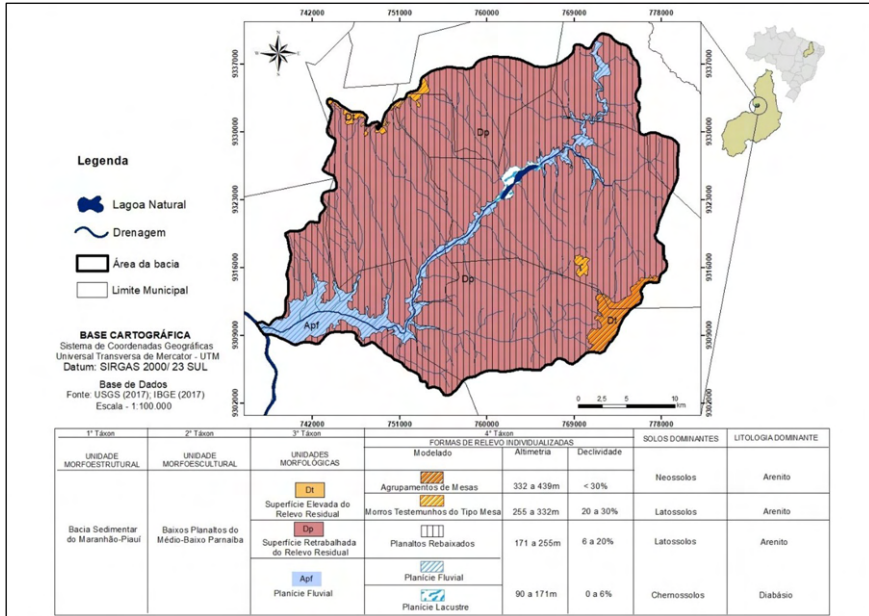


Figura 6 – Mapa geomorfológico da BHRM.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

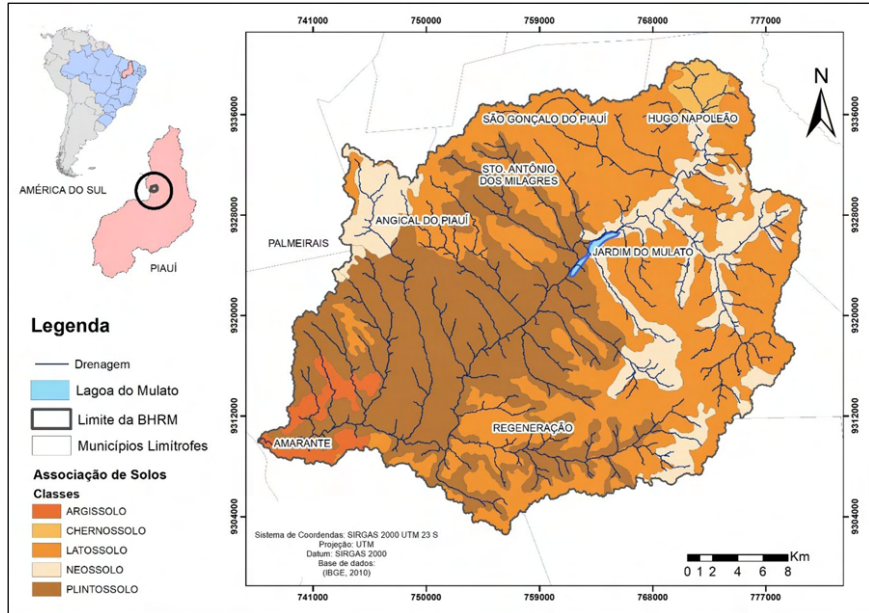


Figura 7 – Associação de solos predominantes na BHRM.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

Assim, fica evidente que o conhecimento das características ambientais da BHRM, possibilitou o entendimento da dinâmica natural desse sistema, o qual serviu como importante subsídio ao entendimento dos diferentes processos que nela ocorrem.

Resultados e Discussões

Distribuição Espacial do Diagnóstico Físico-Conservacionista da BHRM

No intuito de se obter uma espacialização do estado físico-conservacionista da BHRM, todos os parâmetros de entrada da metodologia foram modelados de modo a se apresentarem na forma de planos de informação temáticos. Logo, apresentam-se abaixo os resultados de cada um dos seis parâmetros físico-ambientais selecionados para compor o DFC.

Índice de Cobertura Vegetal (ICV)

Este índice permite analisar o grau de semelhança entre a vegetação atual e a original a fim de monitorar mudanças temporais associadas à vegetação e identificar as mudanças ocorridas ao longo do tempo. A Figura 8 apresenta os valores de NDVI referente aos anos de 1984 e 2020.

A espacialização do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada mostra claramente uma considerável variação da cobertura vegetal, demonstrando os padrões de uso da terra entre os anos de 1984 e 2020. Nota-se uma mudança gradativa na paisagem, evidenciando, principalmente, ampliação de áreas agricultáveis, pastoreio e, conseqüentemente, a constatação de uma enorme perda da vegetação nativa, tendo em vista as atividades agrosilvilpistoris, o sustentáculo para a ocupação do Cerrado.

Para os anos em análise, a maior densidade de cobertura vegetal é registrada nas áreas marginais dos rios e próximas a cabeceiras e/ou nascentes. Na porção central da área da bacia, assim como nas bordas das chapadas e nos planaltos tabulares verifica-se a ocorrência de solo exposto, evidenciados pelos valores de NDVI próximos a -1. As variações de densidade na cobertura vegetal estão diretamente relacionadas com a expansão do agronegócio, a exemplo da silvicultura do eucalipto e da plantação de soja (na porção NE-SE), mesmo não compreendendo a área territorial oficial do MATOPIBA¹, que representa uma nova fronteira agrícola no Brasil, como mostra a Figura 9.

Com base no ICV apresentado na Figura 10, é possível observar que a BHRM apresentou uma significativa alteração em sua cobertura vegetal ao longo dos últimos 36 anos (1984 a 2020), principalmente no que diz respeito à densidade de sua cobertura vegetal, onde se podem ver as classes de grau de semelhança da vegetação, corroborando o avanço das áreas comprovadamente agrícolas em praticamente toda a área da bacia.

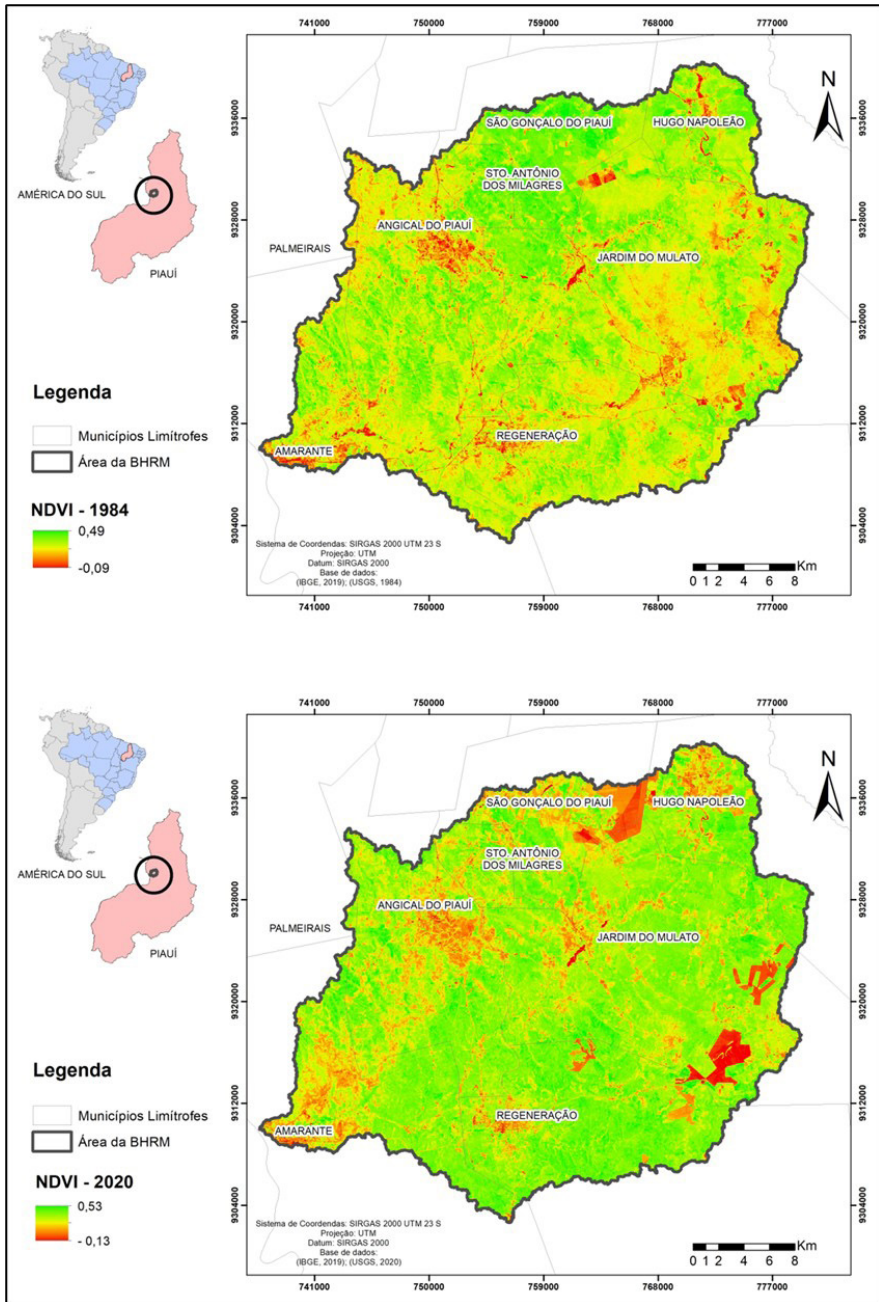


Figura 8 – Índice de vegetação por diferença normalizada da BHRM para os anos de 1984 a 2020.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.



Figura 9 – Expansão do agronegócio de grãos no município de Regeneração/PI.
Fonte: Ribeiro (2022)

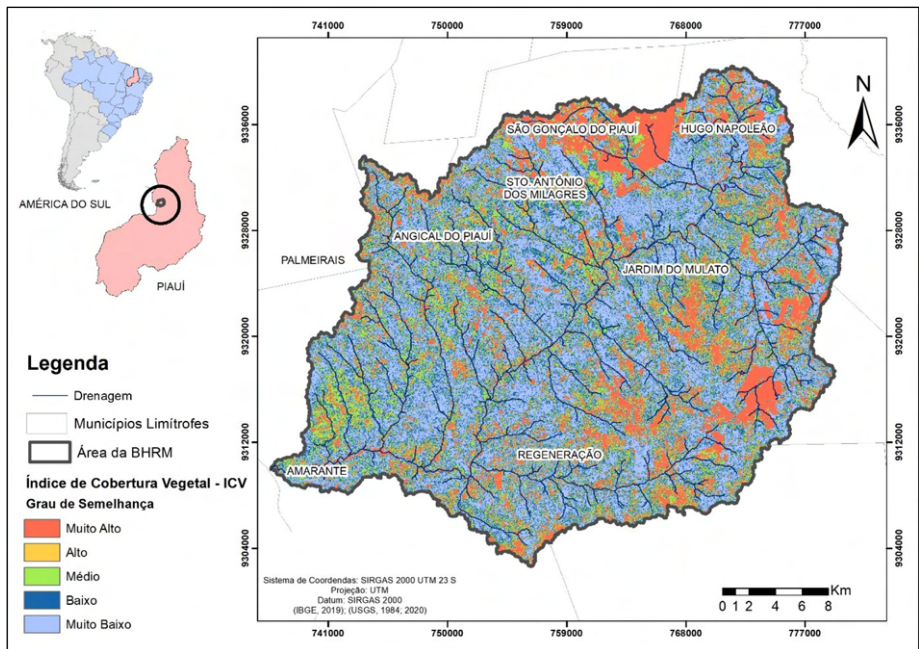


Figura 10 – Índice de Cobertura Vegetal da BHRM nos anos de 1984 a 2020.
Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

Índice de Proteção ao Solo (IPS)

O resultado do processo de classificação do uso e cobertura da terra da BHRM, bem como o nível de proteção ao solo de cada classe é apresentado na Figura 11. O mapeamento de uso e cobertura da terra visou retratar os diferentes usos encontrados na BHRM, uma vez que o conhecimento e o monitoramento destes constitui elemento primordial para a compreensão dos padrões de organização do espaço.

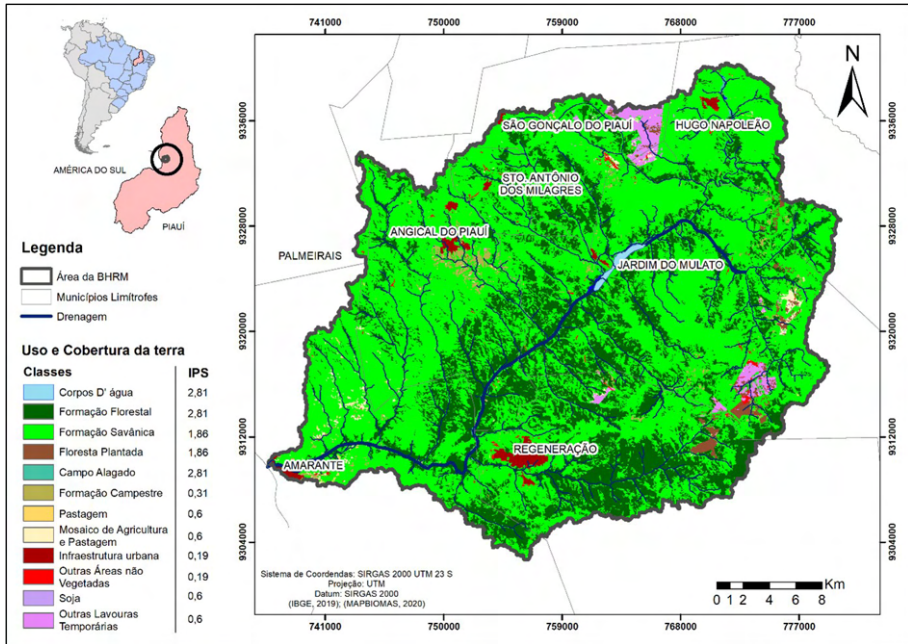


Figura 11 – Mapeamento de uso e cobertura da terra.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

O resultado obtido com o processo de classificação referente ao uso e cobertura da terra, considerando as modificações impostas e a diferenciação das tipologias de uso, serviu para avaliar a pressão antrópica exercida pelo homem na BHRM. Logo, são frutos de atividades econômicas que, via de regra, privilegiam a antropização em detrimento da conservação ou preservação dos ambientes ali inseridos, principalmente nos dias atuais, já que as atividades ali realizadas constituem um dos caminhos indutores ao desenvolvimento socioeconômico.

Declividade (DEC)

A BHRM apresenta relevo predominantemente plano a suave ondulado, onde as classes de maior declive ocupam uma pequena parcela da área total da bacia, sendo a classe de relevo escarpado a de menor representatividade (Figura 12).

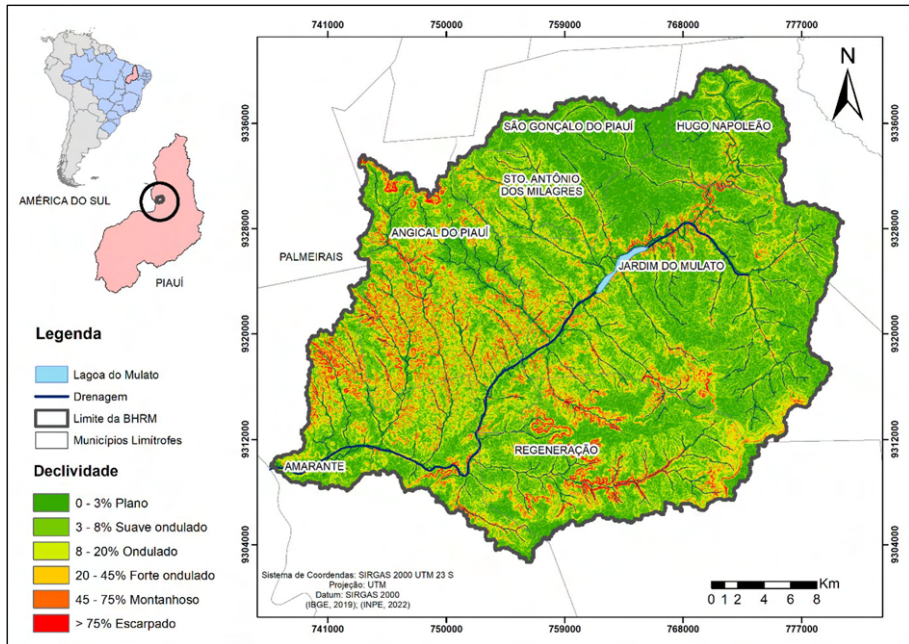


Figura 12 – Declividade da BHRM.
Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

De acordo com Ross (1994), os valores de declividade indicam as características do relevo que geram energia potencial para a ocorrência de processos geomorfológicos, como a erosão e movimentos gravitacionais de massa. Neste sentido, quanto à descrição morfológica, as áreas de relevo plano representam os terrenos com topografia predominantemente horizontal/sub-horizontal, onde os desníveis são quase inexistentes, ao longo das planícies fluviais, planaltos e chapadas.

A classe relevo suave ondulado corresponde aos terrenos pouco movimentados, constituídos por planaltos rebaixados, com declives suave, apresentando início de soflifluxão (escoamento do solo encharcado) e, em alguns setores, escoamento difuso e laminar.

A classe correspondente ao declive ondulado corresponde a terrenos pouco movimentados, no entanto, mais acentuados que a classe anterior, constituindo-se encostas de morros, predominando escoamento laminar, ravinamentos e, em determinadas áreas, movimentos de massa.

Já as classes montanhoso e escarpado constituem-se terrenos movimentados, com predomínio de formas acidentadas, dispostos ao longo das bordas de planaltos tabulares, variando de 300 a 400 metros, sendo comum a ocorrência de movimento de blocos.

Densidade de Drenagem (DD)

Conforme apresentado na Figura 13, a BHRM está na categoria de drenagem Muito Baixa ($DD \leq 0,5$) a Média ($1 \leq DD \leq 1,5$), indicando que o processo de infiltração predomina, enquanto o escoamento superficial é diminuto. Dessa forma, em função de seus atributos físicos, geológicos e topográficos, esta área apresenta certa dificuldade para formar novos canais fluviais.

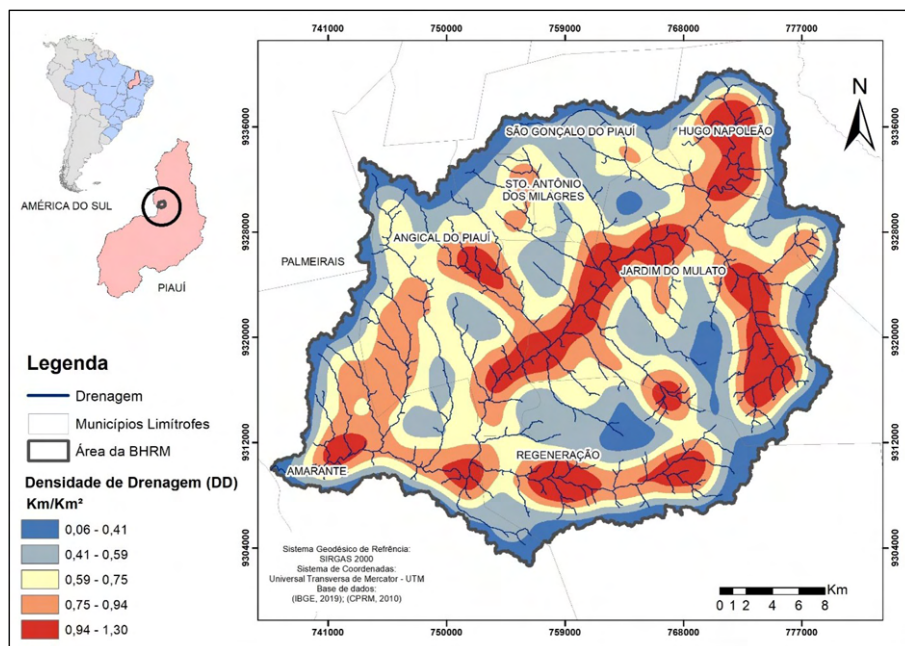


Figura 13 – Densidade de Drenagem da BHRM.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

Erosividade da chuva (R)

Os valores de precipitação média mensal e anual serviram de subsídio para o cálculo de erosividade da BHRM. Na Figura 14, observa-se a variação espacial dos valores de R. O resultado do processo de interpolação indica que a bacia apresenta altos índices de Erosividade com pequenas variações ao longo da bacia, e leve tendência de aumento na direção nordeste, devido aos maiores índices pluviométricos se darem nessa porção da BHRM, o que demonstra certa homogeneidade na distribuição espacial e temporal das precipitações.

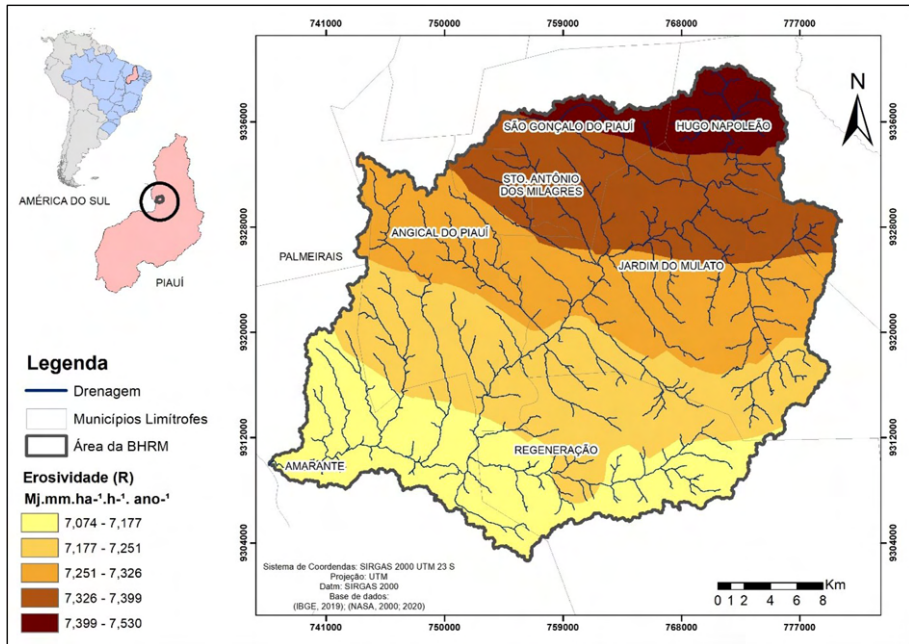


Figura 14 – Erosividade da chuva na BHRM.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

Erodibilidade dos Solos (K)

Na BHRM foi identificada a ocorrência de cinco tipos de associação de solos. A Figura 15 apresenta a distribuição espacial das classes de Erodibilidade e seus respectivos valores. Vale ressaltar que esses valores foram inseridos na tabela de atributos das classes de solos para a obtenção do índice K, no formato matricial.

Dentre as principais classes de solos identificadas com muita baixa suscetibilidade à erosão, destacam-se os argissolos, encontrados especialmente nas áreas do baixo curso fluvial, onde há acúmulo de sedimentos em detrimento do processo erosivo. Os Chernossolos limitados a uma pequena porção da bacia, ocupado por um relevo plano a suave ondulado. Os Latossolos com moderada suscetibilidade, notadamente nas áreas de relevo ondulado ao longo dos planaltos e nas chapadas. Por outro lado, dentre os solos mais suscetíveis à erosão estão os Neossolos e Plintossolos, situados nas encostas dos vales fluviais.

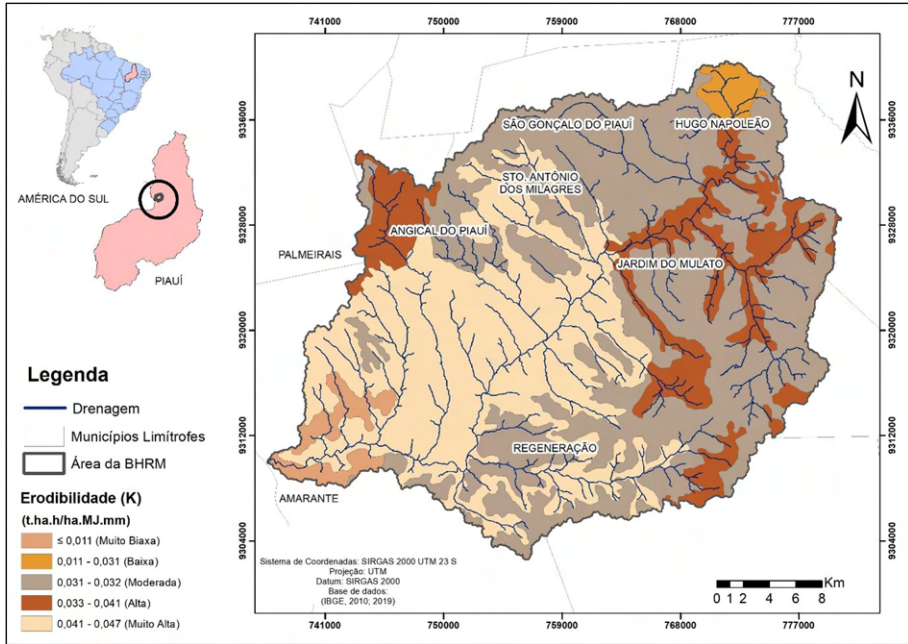


Figura 15 – Erodibilidade dos Solos na BHRM.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

Risco de Degradação Física da BHRM

Este é definido com base na integração dos seis parâmetros anteriormente apresentados e discutidos. A fim de identificar a condição de menor risco de degradação física da BHRM, foi estabelecida uma classificação dos valores de cada parâmetro em cinco classes: Muito baixo, Baixo, Moderado, Alto e Muito alto, como mostra a Tabela 2.

Os valores definidos para a classe B1 indicam a condição de risco Muito Baixo de degradação física. Desse modo, os valores máximos da classe B1 foram considerados o valor central (b) do grupo que representa o risco Muito Baixo de degradação física, ou seja, valor fuzzy igual a 1. Já o maior valor da classe B2 foi considerado o ponto de cruzamento, ou seja, valor fuzzy igual a 0,5. Cabe mencionar que se obtém o valor de d igualando o valor x ao ponto de cruzamento e $\mu(x) = 0,5$, ou seja, $d = ((1 / 0,5) - 1) / (x - b)^2$ (MORAIS, 2018).

Ao aplicar os valores na função de pertinência, determinaram-se os parâmetros da função, como mostra a Tabela 3.

Tabela 2 – Limite dos valores de classe dos parâmetros do DFC da BHRM e suas respectivas classes de risco de degradação física

Parâmetros	Classes de risco de degradação física: Muito Baixo (B1), Baixo (B2), Moderado (B3), Alto (B4) e Muito Alto (B5)				
	B1	B2	B3	B4	B5
ICV	$ICV \leq 1$	$1 < ICV \leq 2$	$2 < ICV \leq 3$	$3 < ICV \leq 4$	$4 < ICV \leq 5$
CA	$CA \geq 2,81$	$2,81 > CA \geq 1,86$	$1,86 > CA \geq 1,42$	$1,42 > CA \geq 0,6$	$0,6 > CA \geq 0$
R	$R \leq 7,177$	$7,177 < R \leq 7,251$	$7,271 < R \leq 7,326$	$7,326 < R \leq 7,399$	$7,399 < R \leq 7,530$
K	$K \leq 0,011$	$0,011 < K \leq 0,031$	$0,031 < K \leq 0,033$	$0,033 < K \leq 0,041$	$0,041 < K \leq 0,047$
DEC	$DEC \leq 3$	$3 < DEC \leq 8$	$8 < DEC \leq 20$	$20 < DEC \leq 45$	$45 < DEC \leq 100$
DD	$DD \leq 0,41$	$0,41 < DD \leq 0,59$	$0,59 < DD \leq 0,75$	$0,75 < DD \leq 0,94$	$0,94 < DD \leq 1,30$

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Tabela 3 – Parâmetros da função de pertinência fuzzy para a classe B1 (Muito Baixo) do risco de degradação física da BHRM

Variáveis	Parâmetros da função	
	B	D
ICV	1	1
CA	2,81	1,108
R	7,177	182,615
K	0,011	2500
DEC	3	0,04
DD	0,41	30,864

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Para o cálculo da função de pertinência *fuzzy*, sobre os planos de informação referente a cada um dos parâmetros do DFC, a equação foi inserida na calculadora *raster* do ArcGis, utilizando a função *Condicional (con)*, através da síntese da função: $FP(x) = Con(x <= b, 1, 1/(1+(d * Square(x-b))))$.

O DFC resultou da soma dos planos de informação *fuzzy* descrita através da fórmula: $DFC = \sum Pij . wi / \sum wi$, onde este método de integração temática leva em consideração que alguns parâmetros têm uma importância maior que outros no processo de modela-

gem ambiental (MORAIS, 2018), sendo que: DFC é Diagnóstico Físico-Conservacionista; w_i é peso relativo a cada plano de informação; P_{ij} são os planos de informação “fuzzificados” referentes aos parâmetros utilizados no estudo (ICV, CA, R, K, DEC, DD).

Vale ressaltar que os pesos de cada parâmetro foram definidos por Morais (2018) utilizando o método AHP e adaptados para esta pesquisa após a exclusão do Índice Climático que não pôde ser obtido em função da ausência de dados climáticos. Assim, o peso desse parâmetro (0,036) foi redistribuído uniformemente entre os demais parâmetros (Tabela 4).

Tabela 4 – Pesos dos parâmetros do DFC da BHRM

Parâmetros	Pesos
ICV	0,203
CA	0,253
DEC	0,193
R	0,148
K	0,166
DD	0,037

Fonte: Adaptado de Morais (2018).

Cabe mencionar que a construção da matriz de julgamento obedece a uma escala fundamental de valores da intensidade de importância, ou seja, expressam níveis de influência que cada um exerce da definição do estado de degradação da bacia, sendo que, o valor a ser atribuído, expressa a opinião de especialistas, como mostra o Quadro 3.

Quadro 3 – Escala de valores AHP para comparação pareada.

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	Um elemento é ligeiramente mais importante do que o outro
5	Importância essencial	Um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada	Um fator é fortemente favorecido e sua relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema	A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos	Quando se necessita de comprometimento ou coerência entre os julgamentos

Fonte: Saaty (1994); Meireles, Moreira e Câmara (2007).

Os resultados ponderados são baseados no principal autovetor da matriz de decisão. Logo, no Quadro 4, são apresentados os resultados ponderados pelos critérios escolhidos na sua comparação entre pares. Neste caso, o que pesa mais é Cobertura Atual (CA), seguido do ICV, R, DEC, K e DD, conforme valores abaixo.

Quadro 4 – Resultados ponderados pelos critérios escolhidos na comparação entre pares

Parâmetros	Prioridade (%)	Rank	(+)	(-)
ICV	20,2	2	7,5%	7,5%
CA	24,9	1	13,4%	13,4%
DEC	17,3	4	3,3%	3,3%
R	18,3	3	13,9%	13,9%
K	16,4	5	5,9%	5,9%
DD	3,0	6	0,6%	0,6%

Fonte: Morais (2018).

Quanto ao resultado do processo de integração dos planos de informação, a verificação da coerência dos julgamentos demonstrados na matriz se dá com base no cálculo da Razão de Coerência (CR), expressa pela equação: $RC = (\lambda_{máx} - n) / (n - 1) RI$. De acordo com Oliveira e Belderrain (2008), um valor de CR menor que 10% indica que os julgamentos da matriz de decisão são consistentes. Nesse viés, o valor de CR para a BHRM resultou em 7,3%, demonstrando confiabilidade.

Logo, o risco de degradação física da BHRM é apresentado na Figura 16. Valores próximos de 1 indicam áreas com risco de degradação física muito baixo, enquanto valores próximos a zero definem áreas de risco de degradação física elevado. Assim, os valores analisados permitiram constatar se os usos estão sendo desenvolvidos de maneira organizada e produtiva diante das características naturais desse sistema, e se as atividades ali desenvolvidas estão potencializando os processos erosivos e os movimentos gravitacionais de massa.

As porções da BHRM que apresentam áreas com risco muito baixo concentram-se na porção sudoeste e próximo às planícies fluviais, onde a cobertura vegetal corresponde a estratos arbustivos naturais e, em alguns setores, estrato arbustivo denso, evidenciando a importância da cobertura vegetal para a manutenção do sistema fluvial. Esta ameniza ou impede o fluxo superficial hídrico e o transporte de detritos, favorecendo a restauração da vegetação, reconstituição do solo e, com este, o processo de pedogênese.

As porções da BHRM que apresentam risco de degradação média ocorrem em áreas onde a cobertura vegetal corresponde às práticas agrícolas, como culturas temporárias e/ou permanentes, bem como áreas com ausência de vegetação e solo exposto (por arado/degradação), ao longo de caminhos e estradas, além de áreas desmatadas, queimadas recentes e àquelas destinadas ao pouso.

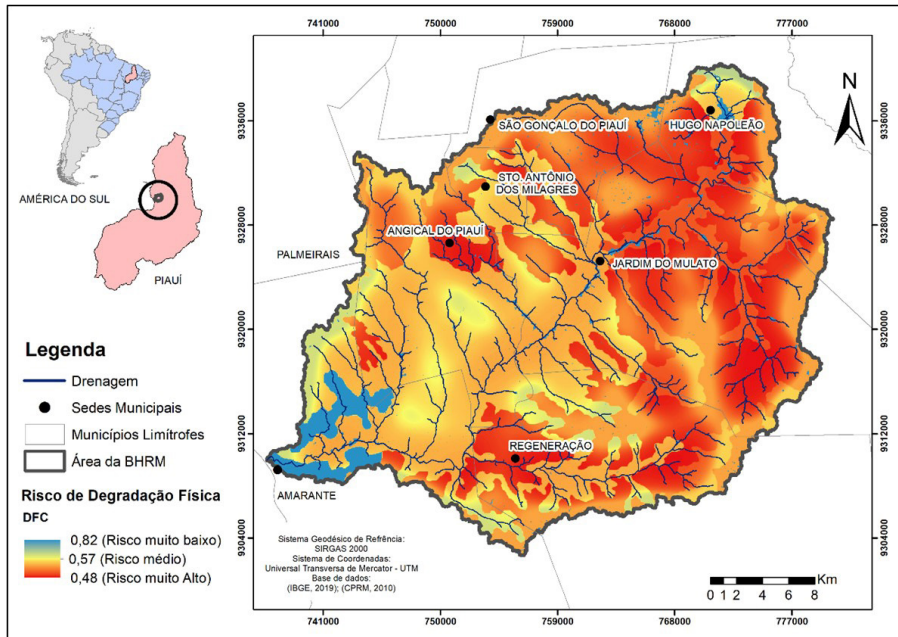


Figura 16 – Risco de degradação física da BHRM.

Fonte: Elaborado por Ribeiro, 2022.

Sabe-se que estas práticas aceleram os processos erosivos, e como consequência ampliam-se os impactos negativos, já que a intervenção antrópica modifica intensamente os ambientes naturais através de desmatamentos e práticas econômicas diversas. No entanto, reforçam-se os aspectos positivos da atividade antrópica frente aos usos e ocupação da terra, desde que aconteça de forma planejada e condizente com as características naturais do ambiente e que se utilize de práticas conservacionistas.

As perdas de solo também precisam ser levadas em consideração, visto que acarreta uma série de mudanças quanto à sua fertilidade natural, além de contribuir, em grande parte, no processo de assoreamento do rio Mulato.

Dessa forma, observou-se que nas áreas mais íngremes, onde a declividade é maior, associada a solos mais suscetíveis aos processos erosivos, como os Neossolos e Plintossolos, a vegetação tende a ser mais suprimida e, conseqüentemente, apresenta um risco muito alto de degradação física.

Atenta-se para o fato de que a declividade apresenta grande influência na determinação das áreas que apresentam maior e menor risco de degradação física, sendo de fundamental importância o monitoramento contínuo desses setores, para a identificação do avanço e/ou restauração destes, com via a gestão ambiental desse território.

Contudo, cabe mencionar que nem sempre áreas que apresentam maior declividade, conseqüentemente, são as que apresentarão maior risco de degradação física e vice-versa, tendo em vista que diversas variáveis atuam e interagem de forma integrada refletindo, assim, de forma eficaz as condições da área estudada.

Considerações Finais

Ao realizar esta pesquisa, a observação dos elementos formadores do ambiente natural da BHRM serviu para conhecer sua dinâmica, bem como seus processos atuantes, visto que a ação humana é, em muitos casos, o fator determinante nesse sistema.

Sabe-se que a BHRM tem um histórico de ocupação marcado pela exploração econômica de seus recursos naturais e que as atividades relacionadas às práticas agropecuárias e ao extrativismo predominam na BHRM, o que potencializa os processos de degradação. No entanto, a desestabilização desse sistema pode ter como indutores tanto processos naturais, como aqueles decorrentes das ações antrópicas.

Diante disso, o mapeamento do risco de degradação física da BHRM expressou o cenário atual, já que tais resultados refletem condições propícias a processos erosivos significativos e de atividades que, por vezes, excedem a capacidade de suporte do ambiente.

Dentre os principais e mais frequentes riscos estão os assoreamentos dos corpos hídricos, deslizamentos de encostas íngremes, que levam à perda da biodiversidade e da qualidade ambiental dos solos e da cobertura vegetal, corroborando com as aceções de Tricart (1977), ao destacar a importância de se conhecer a instabilidade de um ambiente em projetos que visem à gestão do território.

Além destes, práticas agrícolas não conservacionistas, como o plantio em áreas de declive acentuado, solo exposto pelo arado, a substituição da mata nativa por espécies exóticas e a derrubada da mata ciliar, são ações que tem contribuído para o aumento do risco de degradação física nesse sistema natural.

Assim, fica evidente que esses estudos proporcionam uma melhor definição das diretrizes e ações a serem implantadas em um espaço físico-territorial, ao passo que este conhecimento sintetizado, em forma de produto cartográfico, pode servir como uma importante ferramenta para avaliações ambientais estratégicas, especialmente em casos de intervenção antrópica.

Referências Bibliográficas

BELTRAME, A. V. *Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1994.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global. Esboço metodológico. *Ra'eGA – O Espaço Geográfico em Análise*, v. 8, n. 8, p. 141-152, 2004.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 9. ed. São Paulo: Ícone, 2014.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. *Projeto Radam Brasil*. 1973. Levantamento de recursos naturais, v. 2, Folha SB-23 Teresina e Folha 24 Jaguaribe. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=224019&view=detalhes>>. Acesso em: 18 set. 2021.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Projeto Geobank*. 2010. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>. Acesso em: 15 jan. 2020.

CPRM. *Projeto Geobank*. 2010. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Brasília: Embrapa SPI, 2006.

_____. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013.

_____. *Matopiba*. 2013. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-matopiba>. Acesso em: 01 fev. 2021.

FERRETI, E. R. Diagnóstico Físico-Conservacionista – DFC: instrumento para o plano de bacias hidrográficas – uma aplicação na bacia do rio Tagaça – município de Guaraqueçaba – PR. *Boletim Paraense de Geociências*, n. 53, p. 95-97, 2003.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. *Geomorfologia ambiental*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2006.

IBGE. *Cidades*. 2010. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: jan. de 2020.

_____. *Banco de Dados de Informações Ambientais – Bdia*. 2015. Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>>. Acesso em: jan. 2022.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map, 1928.

LEITE, E.F.; ROSA, R. Estudos da geografia física em bacias hidrográficas sob a ótica da paisagem integrada. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, *Anais...* Viçosa – MG, 2009. Disponível em: https://scholar.google.es/citations?view_op=view_citation&hl=ja&user=RMSPXSgAAAAJ&citation_for_view=RMSPXSgAAAAJ:LkGwnXOMwfcC.pdf. Acesso em: 21 ago. 2021.

LIMA, I. M. M. Fé. Relevo piauiense: uma proposta de classificação. *Carta Cepró*, v. 2, n. 2, p. 55-84, 1987.

MEIRELLES, M. S. P.; MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G. Técnicas de inferência espacial. In: MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Orgs.). *Geomática: modelos e aplicações ambientais*. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, p. 105-189, 2007.

MORAIS, R. C. S. *Contribuição metodológica para a elaboração do Diagnóstico Físico-Conservacionista (DFC) em bacias hidrográficas: aplicação na bacia do alto Gurguéia, Piauí (Brasil)*. 2018. 151f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

OLIVEIRA, C. A.; BELDERRAIN, M. C. N. Considerações sobre a obtenção de vetores de prioridades no AHP. In: ENCUESTRO NACIONAL DE DOCENTES EN INVESTIGACIÓN

OPERATIVA, *Anais...* Posadas, Argentina. 2008. Disponível em: http://cleberalmeida.webs.com/T51AVANCES_TEORICOS_BELDERRAIN.pdf. Acesso em: 25 ago. 2021.

RIBEIRO, K. V. *Análise da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Mulato, estado do Piauí*. 2019. 98f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2019.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia da USP*, n. 6, p. 17-29, 1992.

_____. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia da USP*, n. 8, p. 63-74, 1994.

SANTOS, J. O. *Fragilidade e riscos socioambientais em Fortaleza – CE: contribuições ao ordenamento territorial*. 2011. 331f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SAATY, T. L. How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. *Interfaces*, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 19-43, 1994.

SOTCHAVA, V. *O estudo de geossistemas*. São Paulo: ed. USP, 1977.

SOUZA, M. J. N. de. Bases naturais e esboço do zoneamento geoambiental do estado do Ceará. In: SOUZA, M. J. N.; LIMA, L. C.; MORAIS, J. O. (Orgs.) *Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará*. Fortaleza: Ed. FUNECE, p. 13-98, 2000.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, v. 63, p. 1117-1142, 1952.

TRICART, J. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro, IBGE-SUPREM, 1977.

TROMBETA, L. R.; GARCIA, R. M.; NUNES, R. da S.; GOUVEIA, I. C. M. C.; LEAL, A. C. Análise da fragilidade potencial e emergente do relevo da unidade de gerenciamento de recursos hídricos pontal do Paranapanema. *Caderno Prudentino de Geografia*, n. 36, p. 159-173, 2014.

USGS. *Serviço Geológico dos Estados Unidos*. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 22 fev. 2020.

Recebido em: 07/03/2024. Aceito em: 30/04/2024.

Nota

¹ MATOPIBA é uma região formada por áreas majoritariamente de cerrado nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, para onde a agricultura se expandiu a partir da segunda metade dos anos 1980 (EMBRAPA, 2015).