



Serviço Público Federal
Universidade Federal de Goiás – UFG
Instituto de Estudos Socioambientais – IESA
Programa de Pós-Graduação em Geografia – PP GEO

JANAIRA MARQUES LEAL

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DA
VULNERABILIDADE À PERDA DE SOLOS: ESTUDO DE CASO
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MARATAOAN, PIAUÍ**

GOIÂNIA, GOIÁS
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Janaira Marques Leal

3. Título do trabalho

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE À PERDA DE SOLOS: ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MARATAOAN, PIAUÍ.

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;

- Submissão de artigo em revista científica;

- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Ivanilton Jose De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 05/03/2024, às 09:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Janaira Marques Leal, Discente**, em 05/03/2024, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4426900** e o código CRC **61373224**.

JANAIRA MARQUES LEAL

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DA
VULNERABILIDADE À PERDA DE SOLOS: ESTUDO DE CASO DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MARATAOAN, PIAUÍ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Geografia.

Área de Concentração: Natureza e Produção do Espaço.

Linha de Pesquisa: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica.

Orientação: Prof. Dr. Ivanilton José de Oliveira.

Co-orientação: Prof^a. Dr^a. Cláudia Maria Sabóia de Aquino

GOIÂNIA, GOIÁS
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

LEAL, JANAIRA MARQUES
PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DA
VULNERABILIDADE À PERDA DE SOLOS: [manuscrito] : ESTUDO
DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MARATAOAN, PIAUÍ /
JANAIRA MARQUES LEAL. - 2024.
CLX, 160 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. IVANILTON JOSÉ DE OLIVEIRA; co
orientadora Dra. CLAUDIA MARIA SABOIA DE AQUINO.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de
Estudos Socioambientais (Iesa), Programa de Pós-Graduação em
Geografia, Goiânia, 2024.
Bibliografia.

1. vulnerabilidade erosiva;. 2. erosão linear e laminar; . 3. formas
de relevo;. 4. HAND. I. OLIVEIRA, IVANILTON JOSÉ DE, orient. II.
Título.

CDU 911



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 06/2024 da sessão de Defesa de Tese de Janaira Marques Leal que confere o título de Doutora em **Geografia**, na área de concentração em **Natureza e Produção do Espaço**.

Aos cinco dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e quatro, a partir das 9 horas, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa da Tese intitulada “**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE À PERDA DE SOLOS: ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MARATAOAN, PIAUÍ**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Ivanilton José de Oliveira (IESA/UFG), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora Patrícia de Araújo Romão (IESA/UFG), membro titular externo; Professor Doutor Gustavo Souza Valladares (PPGGeo/UFPI), membro titular externo; Professora Doutora Gladis de Fátima Nunes da Silva (PPGeo/UERR), membro titular externo; Professor Doutor Diego Tarley Ferreira Nascimento (IESA/UFG), membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamado o resultado pelo Professor Doutor Ivanilton José de Oliveira, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata, que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos cinco dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e quatro.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Ivanilton Jose De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 05/02/2024, às 11:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Souza Valladares, Usuário Externo**, em 05/02/2024, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gladis de Fátima Nunes da Silva, Usuário Externo**, em 05/02/2024, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patricia De Araujo Romao, Professor do Magistério Superior**, em 05/02/2024, às 12:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diego Tarley Ferreira Nascimento, Professor do Magistério Superior**, em 05/03/2024, às 09:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4355853** e o código CRC **253BE54B**.

Referência: Processo nº 23070.071784/2023-27

SEI nº 4355853

Dedico
À minha mãe, Valmisa Marques de Pinho,
pois sem ela nada desse sonho seria possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado todas as possibilidades de chegar até aqui e concluir esse curso.

Ao professor Dr. Ivanilton José de Oliveira, meu orientador, pela compreensão nos momentos mais difíceis desses anos de doutorado, pelas orientações e ensinamentos dentro da pesquisa e fora dela.

À professora Dra. Cláudia Maria Sabóia de Aquino, minha coorientadora, pelos conselhos, pelas palavras de apoio e que tanto me fortaleceram durante vários momentos dentro da minha jornada acadêmica, por ter acreditado em mim em momentos que nem eu mesma acreditava. Obrigada por ter me ensinado sobre humanidade e sobre o que sei dentro da ciência geográfica.

À professora Dra. Patrícia Romão, por ter estado sempre disponível a me ajudar nas questões relacionadas aos softwares e na pesquisa. Não esquecerei tamanha ajuda quando nem nos conhecíamos direito, sempre muito solícita. Obrigada.

Ao prof Dr. Gustavo Valladares por ser um ponto de apoio na pesquisa e por ser sempre esse prof amigo que auxilia em todos os momentos durante a jornada acadêmica. Por ter se disponibilizado a me acompanhar no campo em meio a uma pandemia mundial. Muito obrigada, prof, muito do que sou, devo a você.

Às queridas amigas Ana Foli, Rose Felix e Andréa Maciel, pela amizade, carinho e cuidado comigo durante minha estadia em Goiânia. Muito obrigada por terem me abrigado em seus lares durante vários momentos do período de pagamento dos créditos nas disciplinas. Vocês foram essenciais nesse processo, juro que sem vocês esse sonho não estaria agora sendo real. Muito obrigada.

Ao amigo Jonh Lennon (let it be), que sempre esteve disposto a ajudar nesse processo acadêmico, que ouviu minhas lamúrias por vários momentos e que torceu até o fim pra que tudo desse certo. Obrigada, let it.

À minha mãe, por ter feito todos os esforços possíveis e impossíveis para me colocar na cidade de Goiânia em meio a um momento difícil economicamente falando, momento esse que eu ainda não tinha bolsa, mas que eu não poderia perder a oportunidade de estar ali. Muito obrigada, mamãe, a senhora é meu exemplo de amor e dedicação a quem se ama, tudo até aqui, é e sempre será pela senhora.

À minha esposa, Catarina Borges, pelo companheirismo, por sempre me impulsionar, por acreditar nos meus sonhos e no meu potencial. Muito obrigada, meu amor.

Aos meus amigos, Bruno Leite, Daniel Coimbra, Hannah Pessoa e João Victor, pela amizade e por sempre torcerem por mim.

À Universidade Federal de Goiás – UFG, por ser local de disseminação de ciência e cultura e por me proporcionar momentos inesquecíveis.

Aos meus familiares, pela dedicação, paciência e compreensão durante todos os momentos da execução desse trabalho.

À minha sobrinha Laura, por ser luz nos momentos difíceis.

À CAPES por fornecer a bolsa de doutorado para que eu pudesse concluir esse curso.

Ao amigo Pedro, por toda ajuda na parte de análise química das amostras de solos coletadas em campo.

Ao laboratório de solos da Universidade Federal do Piauí – UFPI, por oferecer o espaço para que fossem analisadas as amostras de solos da área de estudo da presente pesquisa.

À coordenação do PPGeo/UFG pela disponibilidade em ajudar sempre que necessário durante o período do doutorado.

E a todos que, aqui não foram citados, mas que direta ou indiretamente colaboraram na execução desta pesquisa.

“É preciso estar atento e forte
Não temos tempo de temer a morte”.
(Caetano Veloso e Gilberto Gil)

RESUMO

A presente pesquisa tem por objetivo geral apresentar uma metodologia de mapeamento da vulnerabilidade à perda de solos, aprimorando a proposta de Crepani et. al (2001), a partir da substituição do “índice de dissecação” pelo parâmetro “forma das vertentes” (sobreposição das curvaturas horizontal e vertical) e da “amplitude altimétrica” pelo modelo HAND - *Height Above the Nearest Drainage*. Como objetivos específicos, o trabalho pretende caracterizar os aspectos geoambientais da bacia hidrográfica do rio Marataoan (geologia, geomorfologia, hidrografia, uso e cobertura das terras, clima e associações de solos); discutir os pressupostos teórico-metodológicos da metodologia de Crepani et. al (2001); testar e avaliar as adaptações propostas quanto aos parâmetros geomorfológicos. Como principais resultados, foi realizada análise da dissecação vertical da área de estudo por meio da aplicação do algoritmo HAND, observando-se que a classe que se destaca na área é a moderada, com 40,9%, seguida da classe de baixa vulnerabilidade, com 36,3%. Quanto à utilização das Curvaturas Vertical e Horizontal na análise do escoamento dos fluxos de águas e de sua relação com a intensidade da erosão pluvial, a área apresentou destaque para as classes de baixa e alta vulnerabilidade, sendo 51,3% e 35,5% da superfície total, respectivamente. Observou-se que o modelo de análise proposto, integrando novas variáveis geoambientais, caracterizou de forma mais coerente as possíveis áreas de perda de material por erosão linear, em áreas convergentes com concentração de fluxo, e por erosão laminar, em áreas divergentes com dispersão de fluxo. Dessa forma, os parâmetros utilizados como adaptação da metodologia de Crepani et al. (2001) se mostraram de fundamental importância na relação entre ambiente e processos erosivos ocorrentes. Assim, a presente pesquisa se mostra relevante para que se possa subsidiar a análise da vulnerabilidade erosiva da bacia hidrográfica do rio Marataoan, de modo a orientar intervenções por parte do poder público com vistas ao desenvolvimento sustentável tanto da área de estudo aqui trabalhada, como em outras áreas a serem aplicadas o mesmo método.

Palavras-chave: vulnerabilidade erosiva; erosão linear e laminar; formas de relevo; HAND.

ABSTRACT

The general objective of this research is to present a methodology for mapping vulnerability to soil loss, improving the proposal by Crepani et. al (2001), by replacing the “dissection index” with the parameter “shape of the slopes” (overlap of horizontal and vertical curvatures) and the “altimetric amplitude” with the HAND model - Height Above the Nearest Drainage. As specific objectives, the work aims to characterize the geoenvironmental aspects of the Marataoan River watershed (geology, geomorphology, hydrography, land use and cover, climate and soil associations); discuss the theoretical-methodological assumptions of Crepani et.'s methodology. al (2001); test and evaluate the proposed adaptations regarding geomorphological parameters. As main results, an analysis of the vertical dissection of the study area was carried out through the application of the HAND algorithm, observing that the class that stands out in the area is the moderate one, with 40.9%, followed by the low vulnerability class, with 36.3%. Regarding the use of Vertical and Horizontal Curvatures in the analysis of water flow and its relationship with the intensity of rain erosion, the area highlighted the low and high vulnerability classes, being 51.3% and 35.5% of the total surface, respectively. It was observed that the proposed analysis model, integrating new geoenvironmental variables, characterized in a more coherent way the possible areas of material loss by linear erosion, in convergent areas with flow concentration, and by laminar erosion, in divergent areas with dispersion of flow. Therefore, the parameters used to adapt the methodology of Crepani et al. (2001) proved to be of fundamental importance in the relationship between the environment and occurring erosion processes. Thus, the present research is relevant to support the analysis of the erosive vulnerability of the Marataoan river basin, in order to guide interventions by public authorities with a view to sustainable development both in the study area studied here and in other areas to apply the same method.

Keywords: erosive vulnerability; linear and laminar erosion; relief forms; HAND.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas.....	33
Tabela 2 - Classes de declividade e valores de vulnerabilidade	38
Tabela 3 - Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns	39
Tabela 4 - Valores de vulnerabilidade dos solos	41
Tabela 5 - Vulnerabilidade do solo de acordo com a escala de erosividade da chuva ...	43
Tabela 6 - Grau de vulnerabilidade de cada unidade geológica da BHRM.....	59
Tabela 7 - Definição das classes de erodibilidade	60
Tabela 8 - Intervalos de Erosividade das chuvas (R), classes atribuídas.....	62
Tabela 9 - Classes de declividade e referidos valores de vulnerabilidade.....	64
Tabela 10 - Índices estipulados para cada curvatura para representar os tipos de formas de relevo	66
Tabela 11 - Fatiamento das classes do HAND	68
Tabela 12 - População total segundo municípios – anos de 2000 e 2010	88
Tabela 13 - Produção de lavoura temporária e permanente desenvolvidas na BHRM ..	89
Tabela 14 - Rebanho de bovinos, caprinos e ovinos nos municípios do alto curso da sub-bacia do rio Longá.....	90
Tabela 15 - Unidades geológicas da BHRM e seus respectivos valores de vulnerabilidade erosiva.....	93
Tabela 16 - Classes de solos IBGE (2014) e Classes correspondentes a Erodibilidade dos solos (K), segundo Crepani et al. (2001)	94
Tabela 17 - Classes de Erodibilidade dos solos (K) com respectivas áreas em porcentagens da BHRM.....	96
Tabela 18 - Análise física dos perfis superficiais dos solos coletados na BHRM.....	99
Tabela 19 - Análise do carbono orgânico e matéria orgânica dos horizontes superficiais dos solos da BHRM.....	100
Tabela 20 - Erodibilidade dos solos (fator K) dos horizontes superficiais dos solos da BHRM	101
Tabela 21 - Intervalos de Declividade com respectivas denominações das classes, áreas e porcentagens correspondentes a cada peso, na BHRM	103

Tabela 22 - Classes de curvaturas verticais da BHRM.....	121
Tabela 23 - Classes de curvaturas horizontais da BHRM, Piauí	123
Tabela 24 - Intervalos e classes de Erosividade das chuvas (R) com respectivas áreas em porcentagens, para a Bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí.	131
Tabela 25 - Erosividade das chuvas (R) mensal/anual dos postos pluviométricos do entorno da bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí.	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios de avaliação das variáveis para determinar o grau de vulnerabilidade à perda dos solos	36
Quadro 2 - Classificação do HAND quanto à vulnerabilidade à perda de solo	54
Quadro 3 - Informações de metadados das fontes utilizadas na pesquisa.....	57
Quadro 4 - Parâmetros e suas respectivas características de análise da vulnerabilidade	58
Quadro 5 - Postos pluviométricos utilizados para a obtenção dos dados “r” da BHRM, Piauí.....	62
Quadro 6 - Valores de vulnerabilidade para uso e cobertura das terras	63
Quadro 7 - Classes de formato das vertentes e vulnerabilidade à perda de solos de acordo com a concentração de fluxos de escoamento superficial	67
Quadro 8 - Associação das unidades fitogeográficas e as classes de solos presentes na BHRM	83
Quadro 9 - Amostras de horizontes superficiais dos solos coletados na BHRM.....	99
Quadro 10 - Classificação do HAND quanto à vulnerabilidade à perda de solos da BHRM	112
Quadro 11 - Formas das vertentes da bacia hidrográfica do rio Marataoan.....	125
Quadro 12 - Classes de forma das vertentes e vulnerabilidade à perda de solos de acordo com a concentração de fluxos de escoamento superficial	127
Quadro 13 - Pontos de validação de uso e cobertura do solo.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conjunto de elementos que compõem uma paisagem.....	24
Figura 2 - Fluxograma de teorias que antecederam e influenciaram a proposta de Crepani et al. (2001)	28
Figura 3 - Escala de vulnerabilidade à perda de solos baseado nos processos de pedogênese e morfogênese e grau de saturação.	34
Figura 4 - Declividade de vertente e processos morfogenéticos e pedogenético.	38
Figura 5 - Nove unidades hipotéticas que caracterizam o modelo de vertente	48
Figura 6 - Quatro tipos básicos de vertentes e os processos atuantes.....	49
Figura 7 - Formas geométricas das vertentes	51
Figura 8 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno	51
Figura 9 - Fluxograma da metodologia	56
Figura 10 - Representação de curvaturas.....	65
Figura 11 - Formas do relevo	66
Figura 12 - Representação da adequação dos limiares para o HAND: (I) Limiar 1000; (II) Limiar 2000; e (III) Limiar 3000.....	68
Figura 13 - Etapas de processamento do modelo de terreno HAND.....	69
Figura 14 - Esquema metodológico da pesquisa	69
Figura 15 - Área de estudo – Bacia hidrográfica do rio Marataoan	70
Figura 16 - Seção Geológica Esquemática da Bacia do Parnaíba	72
Figura 17 - Perfil geológico e topográfico da Bacia Sedimentar Maranhão-Piauí.....	72
Figura 18 - Unidades geológicas da bacia hidrográfica do rio Marataoan.....	73
Figura 19 - Unidades de relevo da bacia hidrográfica do rio Marataoan	76
Figura 20 - Fotografia da área localizada na unidade geomorfológica Baixada de Campo Maior no município de José de Freitas	77
Figura 21 - Fotografia da área localizada na unidade geomorfológica Tabuleiros do Parnaíba no município de Lagoa Alegre	78
Figura 22 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do rio Marataoan.....	79
Figura 23 - Presença de Plintossolo Pétrico Concrecionário encontrados na BHRM no município de José de Freitas.....	80

Figura 24 - Presença de Plintossolo Argilúvico Distrófico na BHRM no município de Campo Maior.....	81
Figura 25 - Presença de Latossolo Amarelo Distrófico presente na BHRM no município de Cabeceiras do Piauí.....	81
Figura 26 - Presença de Planossolo Háplico Distrófico presente na BHRM no município de José de Freitas.....	82
Figura 27 - Carnaubais presentes na área de estudo no município de José de Freitas ...	84
Figura 28 - Presença de Caatinga arbustiva na BHRM no município de Cabeceiras do Piauí.....	84
Figura 29 - Imagem fotográfica das margens do Riachão na BHRM no município de Barras.....	86
Figura 30 - Rede hidrográfica da área de estudo	87
Figura 31 - Classes de vulnerabilidade da geologia da BHRM.....	93
Figura 32 - Perfil de Plintossolo Pétrico Concrecionário no município de José de Freitas	95
Figura 33 - Perfil de Latossolo Amarelo Distrófico presente na BHRM no município de Cabeceiras do Piauí	95
Figura 34 - Perfil de Planossolo Háplico Distrófico presente na BHRM no município de José de Freitas.....	96
Figura 35 - Erodibilidade dos solos (K) da BHRM.....	98
Figura 36 - Mapa de declividade da BHRM.....	105
Figura 37 - Mapa de Vulnerabilidade erosiva para a declividade da BHRM.....	105
Figura 38 - Classes altimétricas da BHRM	107
Figura 39 - Grade do HAND para limiar de 1000 de rede de drenagem.....	109
Figura 40 - Grade do HAND para limiar de 2000 de rede de drenagem.....	110
Figura 41 - Grade do HAND para limiar de 3000 de rede de drenagem.....	111
Figura 42 - Mapa de classes de Vulnerabilidade erosiva do HAND da BHRM	113
Figura 43 - Mapa de curvatura horizontal das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 50x50 m.....	115
Figura 44 - Mapa de curvatura vertical das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 50x50 m.....	116
Figura 45 - Mapa de curvatura horizontal das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 100x100 m.....	117

Figura 46 - Mapa de curvatura vertical das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 100x100 m.....	118
Figura 47 - Mapa de curvatura horizontal das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 250x250 m.....	119
Figura 48 - Mapa de curvatura vertical das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 250x250 m.....	120
Figura 49 - Exemplo de vertente Côncava no município de José de Freitas	122
Figura 50 - Exemplo de vertente Convexa no município de José de Freitas.....	123
Figura 51 - Áreas propensas a dispersão de fluxo (divergente) no município de Cabeceiras do Piauí	124
Figura 52 - Áreas propensas a recebimento de sedimentos pelo fluxo de água superficial (convergente), no município de Barras.....	125
Figura 53 - Mapa de formas das vertentes da Bacia hidrográfica do rio Marataoan....	126
Figura 54 - Exemplo de erosão laminar na BHRM no município de Cabeceiras do Piauí	129
Figura 55 - Exemplo de erosão linear na BHRM no município de José de Freitas.....	129
Figura 56 - Classes de vulnerabilidade das formas das vertentes da bacia hidrográfica do rio Marataoan.....	130
Figura 57 - Erosividade das chuvas (R) da Bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí	133
Figura 58 - Mapa de uso e cobertura das terras da BHRM, Piauí do ano de 2021.....	134
Figura 59 - Imagens de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí ...	136
Figura 60 - Mapa de vulnerabilidade do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí.	137
Figura 61 - Mapa de vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí.....	139
Figura 62 - Área ao norte da BHRM, associada a classe vulnerável.....	140
Figura 63 - Área próxima ao leito do rio Marataoan no município de Barras, Piauí. ..	141
Figura 64 - Área com presença de erosão laminar na BHRM, Piauí.....	142
Figura 65 - Área associada a classe estável da BHRM, Piauí.	143

LISTA DE SIGLAS

BHRM	Bacia Hidrográfica do rio Marataoan
CEPRO	Fundação Centro de Pesquisas Econômicas e Sociais do Piauí
CPRM	Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HAND	<i>Height Above the Nearest Drainage</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
1 REFERENCIAL TEÓRICO	19
1.1 Abordagem geossistêmica como uma concepção integradora.....	19
1.2 Cartografia Geoambiental como ferramenta de suporte à decisão sobre o uso das paisagens.....	23
1.3 Os princípios da estruturação do relevo e vulnerabilidade à perda de solos	28
1.4 Vulnerabilidade à perda de solos e sua representação nos ambientes.....	35
1.5 Curvaturas Vertical, Horizontal, Formas de Relevo de Terreno e os processos erosivos	44
1.6 O algoritmo HAND aplicado à geomorfologia.....	52
2 MATERIAIS E MÉTODOS	55
2.1 Procedimentos técnicos-operacionais	57
2.2 Procedimentos metodológicos.....	57
2.2.1 Mapas intermediários	57
2.2.2 Vulnerabilidade ambiental.....	58
2.2.2.1 <i>Geologia</i>	59
2.2.2.2 <i>Erodibilidade dos solos</i>	59
2.2.2.3 <i>Erosividade das chuvas</i>	60
2.2.2.4 <i>Uso e cobertura das terras</i>	62
2.2.2.5 <i>Geomorfologia (formas de vertentes, HAND e declividade)</i>	63
3 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MARATAOAN, PIAUÍ	70
3.1 Condições geológicas	71
3.1.1 Formação Longá.....	73
3.1.2 Formação Poti.....	74
3.1.3 Formação Piauí.....	74
3.1.4 Formação Pedra de Fogo	74
3.1.5 Grupo Barreiras	74
3.2 Condições geomorfológicas.....	75
3.2.1 Baixada de Campo Maior	76
3.2.2 Domínio das Superfícies Aplainadas da Bacia do Rio Parnaíba	77
3.2.3 Tabuleiros do Parnaíba	77
3.3 Condições Pedológicas e fitogeográficas.....	78

3.4 Condições climáticas e hidrológicas	85
3.5 Condições socioeconômicas da Bacia Hidrográfica do rio Marataoan.....	87
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
4.1 Atribuição dos valores de vulnerabilidade à perda de solos na bacia hidrográfica do rio Marataoan.....	92
4.1.1 Geologia	92
4.1.2 Pedologia	94
4.1.2.1 Erodibilidade dos solos (K).....	94
4.1.3 Geomorfologia.....	102
4.1.3.1 Declividade.....	102
4.1.3.2 HAND.....	107
4.1.3.3 Curvaturas vertical e horizontal.....	114
4.1.4 Erosividade da Chuva	131
4.1.5 Uso e cobertura do solo	133
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144
6 REFERÊNCIAS	147

INTRODUÇÃO

É possível observar o surgimento de questionamentos acerca da utilização dos recursos naturais como mercadoria a partir das relações estabelecidas entre sociedade e natureza, principalmente após a sociedade progressivamente intervir de forma mais intensa na apropriação dos recursos naturais. Tais questionamentos transformam-se em preocupações quando as diversas formas de uso desenfreado dos sistemas naturais revelam-se acima da sua capacidade de suporte.

Assim, as pesquisas que enfatizam a temática da fragilidade dos ambientes visam proporcionar um melhor entendimento de suas dinâmicas para que as intervenções antrópicas sejam menos nocivas, apresentando-se, assim, de grande valia, uma vez que estas oferecem subsídios para o planejamento ambiental territorial, contribuindo na análise da capacidade de suporte, das potencialidades e das limitações relacionadas às atividades antrópicas.

A carência de estudos com esse viés no contexto do recorte espacial delimitado para análise, a saber, a bacia hidrográfica do rio Marataoan, justifica a presente pesquisa, uma vez que poderá contribuir para a compreensão integrada acerca da maneira como a sociedade pode utilizar os ambientes naturais no âmbito da referida bacia hidrográfica de forma racional, respeitando suas potencialidades e limitações.

Atrelado à carência dessas discussões sobre a questão ambiental na área estudada, muito se fala sobre novas metodologias voltadas para o estudo do meio ambiente e na utilização de tecnologias mais aptas à abordagem da complexidade natural e da consideração da interferência humana no próprio ambiente.

É neste contexto metodológico que a presente pesquisa busca suscitar considerações pertinentes acerca da área de estudo, analisando as atividades antrópicas dentro de uma abordagem integrada, refletindo sobre a influência destas na dinâmica natural, por meio da aplicação da metodologia de vulnerabilidade à perda de solos de Crepani *et al.* (2001). Esta metodologia utiliza parâmetros que, relacionados entre si, possibilitam diagnósticos sobre a capacidade de suporte dos ambientes, podendo assim, ser utilizada como ferramenta norteadora para o uso racional da bacia hidrográfica estudada, justificando a sua relevância para a população inserida na área de estudo.

Os critérios para a escolha da bacia hidrográfica do Rio Marataoan como área de estudo – além de sua importância como objeto de estudo dentro da temática ambiental suscitada anteriormente – foram suas características geográficas relativas às recorrentes situações de enchentes que ocasionam prejuízos à população ribeirinha do município de

Barras em virtude da presença de sangradouros nas barragens em seu nível mais elevado, como destaca Ribeiro Júnior (2016) ao exemplificar o bairro Boa Vista no referido município, onde é comum tal situação. Outra questão relevante levada em consideração para a escolha da área foi a disponibilidade de dados, e, por fim, sua proximidade com a capital Teresina, aspecto este que favoreceu a realização dos trabalhos de campo.

Compreende-se, ainda, que atualmente, apesar da intensa utilização de tecnologias em mapeamentos, observa-se, em alguns casos, que há uma dificuldade em apresentar aspectos mais pertinentes e confiáveis para o estudo da área em questão, dificultando assim resultados mais precisos. Observou-se em alguns trabalhos que utilizam apenas o parâmetro da declividade para determinar a geomorfologia, a exemplo de Matule e Macarringue (2020); Rockett et al. (2014); e Igawa e Maciel (2018).

Neste ínterim, a presente pesquisa busca contribuir metodologicamente com a utilização de índices que possam subsidiar resultados que se apresentem coerentes para com a área pesquisada, a partir da adequação de metodologias de mapeamentos já consolidadas.

Assim, a pesquisa apresenta como **problema central** o seguinte questionamento: sabendo-se que a proposta de Crepani et al. (2001) foi pensada para as condições geoambientais da Amazônia, a alteração dos parâmetros que estabelecem os valores da geomorfologia (relevo) na classificação de vulnerabilidade à perda de solos seria capaz de apresentar resultados mais precisos para a realidade de uma área na transição da Caatinga para o Cerrado?

Além do problema central supracitado, outros questionamentos delineiam o presente trabalho: que lacunas e possibilidades a metodologia de Crepani et. al (2001) apresenta em sua aplicação em relação às peculiaridades da área estudada? Tendo em vista a natureza dos produtos geocartográficos existentes para a área de estudo, a variação dos índices propostos apresenta resultados satisfatórios para a realidade local?

Baseando-se nas questões-problema que motivam o desenvolvimento do presente estudo, a pesquisa se fundamenta na seguinte **hipótese**: o se aplicar a metodologia proposta por Crepani et. al (2001), para a bacia hidrográfica do rio Marataoan, como trabalhos vêm aplicando, utilizando apenas a declividade como parâmetro geomorfológico, isso pode mascarar os resultados e dificultar a possibilidade de correlação dos aspectos ambientais como processos erosivos hídricos existentes na área estudada. No entanto, ao considerar a proposta de Valeriano (2008), com a inserção dos formatos das vertentes (curvaturas horizontal e vertical), e o modelo HAND, inicialmente

proposto por Rennó et al. (2008) e atualizada por Nobre et al. (2010), referenciando a dissecação vertical do relevo, será possível obter uma melhora significativa nos resultados da modelagem da vulnerabilidade, pois trará a possibilidade de correlacionar de forma menos generalizada, os processos erosivos hídricos lineares e laminares da bacia hidrográfica.

Nesse contexto, destaca-se o **objetivo geral** da pesquisa: apresentar uma proposta metodológica de mapeamento da vulnerabilidade à perda de solos alternativa à formulada por Crepani et. al (2001), a partir da substituição do “índice de dissecação” pelo parâmetro “forma das vertentes” (com a sobreposição entre as curvaturas horizontal e vertical) e a “amplitude altimétrica” pelo modelo HAND - *Height Above the Nearest Drainage*¹.

Como **objetivos específicos**, destacam-se: a) caracterizar os aspectos geoambientais da bacia hidrográfica do rio Marataoan (geologia, geomorfologia, hidrografia, uso e cobertura das terras, clima e associações de solos); b) discutir os pressupostos teórico-metodológicos da metodologia de Crepani et. al (2001); c) testar e avaliar as adaptações propostas quanto aos parâmetros da geomorfologia.

A presente tese encontra-se dividida da seguinte forma: o capítulo um explana acerca da discussão teórica que embasa as pesquisas voltadas para estudos dessa natureza; o capítulo dois identifica os processos metodológicos que foram executados para chegar ao resultado final; o capítulo três descata os aspectos geoambientais da bacia hidrográfica do rio Marataoan; o capítulo quatro aborda os resultados atingidos a partir da adaptação metodológica proposta; e o quinto capítulo conta com as considerações finais.

Desse modo, esta tese possui o intuito de contribuir metodologicamente com a redução da subjetividade do método de mapeamento da vulnerabilidade à perda de solos, em particular quanto ao parâmetro geomorfológico, uma vez que a área do presente estudo apresenta características diferenciadas daquelas analisadas no trabalho de Crepani et al. (2001) e, a partir da adaptação do parâmetro mencionado, espera-se contemplar determinadas especificidades.

¹ Altura acima da drenagem mais próxima, numa tradução livre.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o intuito de atingir os objetivos propostos tornou-se necessária a busca de conhecimentos na literatura, envolvendo questões relacionadas às ideias que permeiam os diálogos na ciência geográfica, e que fomentam o debate dos estudos dos ambientes naturais.

1.1 Abordagem geossistêmica como uma concepção integradora

A abordagem sistêmica trouxe à ciência, a partir da segunda metade do século XX um viés de entendimento mais globalizante em relação ao paradigma dominante até então, o modelo cartesiano-mecanicista. O pensamento sistêmico, conforme sugere o próprio termo, propõe uma distinta forma de pensar a produção científica, que seria desenvolver uma nova estrutura intelectual que procurasse descrever a ‘complexidade organizada’ como redes dinâmicas de interações, baseado no conceito de sistema (WEAVER, 1948).

Esse pensamento com uma proposta de análise integrada buscou/busca superar as limitações da perspectiva analítica no tratamento de vasto conjunto de novas questões que não encontram no seu arcabouço a abordagem adequada.

Para a Geografia, em particular, esta nova maneira de entender os fenômenos e objetos permitiu uma maior integração entre os elementos que a compõem, como a sociedade e a natureza. No entanto, as dificuldades metodológicas de aplicação da abordagem sistêmica têm gerado a necessidade de inclusão de outras formas de pensar.

Linberger (2006) p. 35 destaca:

“Até os dias atuais, é extremamente perceptível a utilização de modelos simplistas de fragmentação do conhecimento, tanto na Geografia Física quanto na Geografia Humana. Apesar disso, a Geografia Física tem experimentado a elaboração de estudos que almejam uma abordagem integrada da paisagem com o uso da TGS (Teoria Geral dos Sistemas), formulada por Karl Ludwig von Bertalanffy (1901 – 1972)”.

Na década de 1950, Bertalanffy publicou sua *General System Theory* (Teoria Geral dos Sistemas), e este “novo” modo de pensar a Ciência é empregado por vários pesquisadores, principalmente na Física, Química e Biologia, destacando que o emprego de sistemas já era relativamente comum nessas áreas do conhecimento. Ele propunha, com este novo conceito, uma *epistême* complexa, na qual buscava uma linguagem científica única, capaz de englobar todos os campos do conhecimento (BERTALANFFY, 1973; VICENTE e PEREZ FILHO, 2003).

Assim, Bertalanffy criticava, veementemente, o enfoque cartesiano dado à pesquisa científica. Para ele, a excessiva especialização da ciência deveria deixar de

existir, pois uma abordagem interdisciplinar eficiente poderia ter como ponto de partida as interações entre os campos científicos, evitando estudos em duplicidade e sem efeito prático em um mundo integrado.

Bertalanffy (1973) relaciona alguns motivos que o levaram a formular a Teoria Geral dos Sistemas, que seriam: a) necessidade de generalização dos conceitos científicos e modelos; b) introdução de novas categorias no pensamento e na pesquisa científicas; c) os problemas da complexidade organizada, que são agora notados na ciência, exigem novos instrumentos conceituais; d) pelo fato de não existirem instrumentos conceituais apropriados que sirvam para a explicação e a previsão na biologia; e) introdução de novos modelos conceituais na ciência; f) interdisciplinaridade: daí resulta o isomorfismo dos modelos, dos princípios gerais e mesmo das leis especiais que aparecem em vários campos.

No que se refere aos frutos da TGS no âmbito da Geografia, destaca-se a Teoria Geossistêmica, inicialmente formulada pelo cientista soviético Viktor Borisovich Sochava (1905 – 1978).

Sochava (1977, p. 9) diz que os geossistemas são “formações naturais, experimentando, sob certa forma, o impacto dos ambientes social, econômico e tecnogênico”. Indica também que os estudos em Geografia Física não podem estar dissociados dos aspectos antrópicos do ambiente, às ligações diretas e de *feedback* que aparecem nesse caso. Troppmair (2004, p. 102) indica por outro lado, que o geossistema compreende “um espaço que se caracteriza pela homogeneidade dos seus componentes, suas estruturas, fluxos e relações que, integrados, formam o sistema do ambiente físico e onde há exploração biológica”, ou seja, não considera o fator socioeconômico. Assim, o geossistema pode ser entendido como formações naturais que se desenvolvem influenciados tanto por fenômenos naturais quanto econômicos e sociais, que alteram sua estrutura e peculiaridades espaciais.

Segundo Sochava (1977), no estudo dos geossistemas destacam-se não os componentes da natureza, mas as conexões entre eles; quanto ao estudo da paisagem, sob esta abordagem, é necessário destacar sua dinâmica, estrutura funcional, conexões etc., e não somente analisar sua morfologia e subdivisões.

Para a Geografia, duas escolas se destacam entre as que mais contribuíram para a disseminação e aplicabilidade da abordagem geossistêmica nas análises das paisagens: a escola Russo-Soviética, representada, primariamente, por Sochava, e a escola Francesa, liderada por Bertrand. Essas contribuições foram de grande importância para a Geografia, pelo fato de ter colocado em evidência uma série de premissas relevantes e

de pressupostos necessários para o processo de planejamento e gestão territorial integrada do espaço geográfico (TROPMAIR; GALINA, 2006).

A partir da criação do conceito de geossistema, a TGS foi disseminada no mundo ocidental por Bertrand (1972), sendo aplicada também por Tricart (1977) e Christofolletti (1999).

Na escola francesa de Geografia destaca-se pela primorosa contribuição o geógrafo Georges Bertrand (1972) que trazia a ideia de que o Geossistema era composto por ação antrópica, exploração biológica e potencial ecológico. Nesse contexto, Monteiro (2000) destaca que pela dificuldade de aplicação do modelo conceitual de geossistema, posteriormente o mesmo passou de “modelo conceitual de Geossistema” para “modelo teórico da paisagem” (VICENTE e PEREZ FILHO, 2003).

Diferentemente de Sochava, Bertrand, que levantou sérias críticas às conceituações de geossistema de Sochava (1977; 1978), aproxima o homem da natureza, ao analisá-lo na mesma hierarquia. Nesse aspecto, Bertrand (1968), apoiado nos princípios de bioestasia e resistasia do edafólogo Erhart, define o geossistema em relação à constituição e destruição do solo através da dinâmica do relevo.

Bertrand, a partir de suas proposições sobre os estudos da Paisagem, apresentou uma abordagem específica na classificação das mesmas, no qual ele abordava a taxonomia das paisagens como destaca Neves et al. (2014) p. 24:

"[...] taxonomias para a delimitação das unidades de paisagem global, destacando as zonas superiores (Zona, Domínio e Região) e as zonas inferiores (Geossistema, Geofácia e Geótopo), estas últimas de forte alteração antrópica, tendo por base as propostas de Tricart, Cailleux e Viers para o relevo, Max Sorre referente ao clima, e Brunet para as unidades valoradas pelo homem."

Assim, os estudos da paisagem avançaram significativamente, constituindo-se como categoria de análise geográfica primordial para a apreensão dos sistemas naturais e sociais que compõem o espaço.

Neste contexto, é de suma importância destacar que as concepções de Sochava e Bertrand se diferenciam em alguns aspectos. Acerca da escala geográfica a ser utilizada, que para Bertrand é inseparável no estudo das paisagens, não é possível notar uma taxonomia padrão nas contribuições teóricas do russo. Os estudos de Sochava necessitam de uma maior precisão espacial. Além disso, Sochava (1977) apresenta sua proposta numa perspectiva de elevada abstração, em virtude da questão da escala.

Por sua vez, Tricart (1977) se destaca com sua classificação ecodinâmica dos ambientes, respaldada nos pressupostos da TGS. Tricart (1977) “define um sistema como um conjunto de fenômenos que se processam mediante fluxos de matéria e energia” Janise e Leonardo (2007).

Esses fluxos originam relações de dependência mútua entre os fenômenos. Surge daí uma entidade global e dinâmica. A partir da análise de um sistema, Tricart (1977) indicou que era possível reconhecer conceitualmente as suas partes interativas, o que torna possível captar a rede interativa sem ter de separá-las.

É notória a importante relevância das contribuições de alguns geógrafos físicos do Brasil para a disseminação da concepção geossistêmica, a exemplo de Antônio Christofolletti, no qual destaca em seus estudos os mais relevantes tipos de sistemas para o campo de atuação da Geografia Física e dos estudos ambientais em geral, que se denominam de sistemas morfológicos, sistemas em sequência ou encadeantes, sistemas de processos-respostas e sistemas controlados (CHRISTOFOLETTI, 1979).

Outro exemplo de diversidade de utilização e adaptação realizadas partindo das ideias da TGS são os estudos propostos por Jurandyr Ross, em que este autor apresentou proposições, a partir do método ecodinâmico de Tricart (1977), para fins de apreensão sobre a fragilidade ambiental em diferentes áreas, o que fez da abordagem ecodinâmica um dos recursos mais utilizados nas pesquisas de geomorfologia ambiental levadas a efeito no Brasil, e especificamente na Universidade de São Paulo – USP.

Monteiro (1974) apresentou importantes contribuições no âmbito da disseminação do pensamento geossistêmico ao afirmar que

A paisagem é vista de um modo bem mais dinâmico porquanto não ignora as relações, seus *feedbacks* e interações, de modo a configurar um verdadeiro “sistema” onde as áreas pertinentes a ela estão muito além das formas e aparências assumidas pelos elementos, sendo capazes, até mesmo de provocar importantes reações em áreas distantes. Isso decorre do fato: o homem é considerado na paisagem como qualquer outro elemento ou fator constituinte do sistema paisagem (geossistema) por que ele desempenha aqui um papel realmente ativo (MONTEIRO, 2001, p. 97).

Compreende-se que a concepção geossistêmica trouxe relevantes avanços para os estudos da ciência geográfica, sobretudo em Geografia Física, possibilitando uma satisfatória análise das relações mútuas e integradas entre os aspectos naturais e sociais, municiando esta ciência para uma melhor “focalização das suas pesquisas e para delinear com maior exatidão o seu setor de estudo, permitindo também reconsiderações de seus conceitos” e uma revitalização de vários setores (LINBERGER, 2006).

A partir das proposições de Bertrand calcadas na teoria geossistêmica é possível observar uma visão holística da paisagem, indo na contramão do pensamento cartesiano proposto no âmbito da ciência geográfica até então. Neste sentido, é possível retratar o meio a partir de uma visão da totalidade, o que pode ser um subsídio para os estudos

voltados ao planejamento territorial, bem como apresentar caminhos para uma evolução epistemológica na questão dicotômica ainda existente na ciência geográfica, fazendo com que haja trabalhos que visem uma integração dos fatores analisados e que transcendam o simples catalogar ou diagnosticar os fenômenos que se desenvolvem no espaço geográfico.

1.2 Cartografia Geoambiental como ferramenta de suporte à decisão sobre o uso das paisagens

A utilização dos recursos naturais constitui um meio imprescindível para a sobrevivência e desenvolvimento da humanidade. Porém, os diferentes tipos de uso inadequado e desenfreado dos recursos naturais apresentam-se em níveis consideravelmente elevados quando comparados ao tempo que a natureza necessita para se estabilizar novamente. Neste sentido, é importante destacar a importância da Cartografia como suporte à decisão sobre os diversos tipos de usos das paisagens, uma vez que a sociedade cria distintos discursos sobre o uso das mesmas que podem interferir de forma negativa no ambiente como um todo, caso realizada de forma desordenada.

A paisagem é um conceito amplamente discutido na Geografia desde o século XIX, em que essa discussão é pautada no interesse em compreender as relações sociais e naturais em um determinado recorte do espaço geográfico (RODRIGUEZ, SILVA e CAVALCANTI, 2004).

Entre os geógrafos há uma diferenciação entre a paisagem natural e a paisagem cultural. A paisagem natural refere-se aos elementos combinados de terreno, vegetação, solo, rios, clima, enquanto a paisagem cultural, humanizada, abarca todas as modificações feitas pelo homem, nos espaços rurais e urbanos.

Com o advento da tecnologia, principalmente a partir da Revolução Industrial os ambientes naturais foram fortemente explorados, fazendo com que uma paisagem, por mais natural que ela fosse, ainda apresentaria elementos essencialmente culturais, uma vez que toda a superfície da Terra já se encontraria apropriada pelo homem. Assim, Rodriguez, Silva e Cavalcanti (2004, p. 18) explanam que “a paisagem é definida como um conjunto inter-relacionado de formações naturais e antroponaturais”.

Nas perspectivas clássicas de paisagem, os geógrafos a percebiam como a expressão materializada das relações do homem com a natureza, com seus limites atrelando-se à possibilidade visual (SUERTEGARAY, 2001). No decorrer dos anos, diferentes correntes de pensamento geográfico definiram distintas perspectivas acerca do conceito de paisagem. Segundo Rodriguez, Silva e Cavalcanti (2004), os estudos da paisagem se iniciaram já no século XIX com Humboldt na escola alemã, e Lomonosov

e Dokuchaev na escola russo-soviética. Estas escolas definiram a paisagem como um complexo integrado formado por diferentes elementos, e tiveram importantes pensadores como Passarge (1919), Troll (1950), Riábchicov (1976), Sochava (1978), dentre outros (AUGUSTO, 2016).

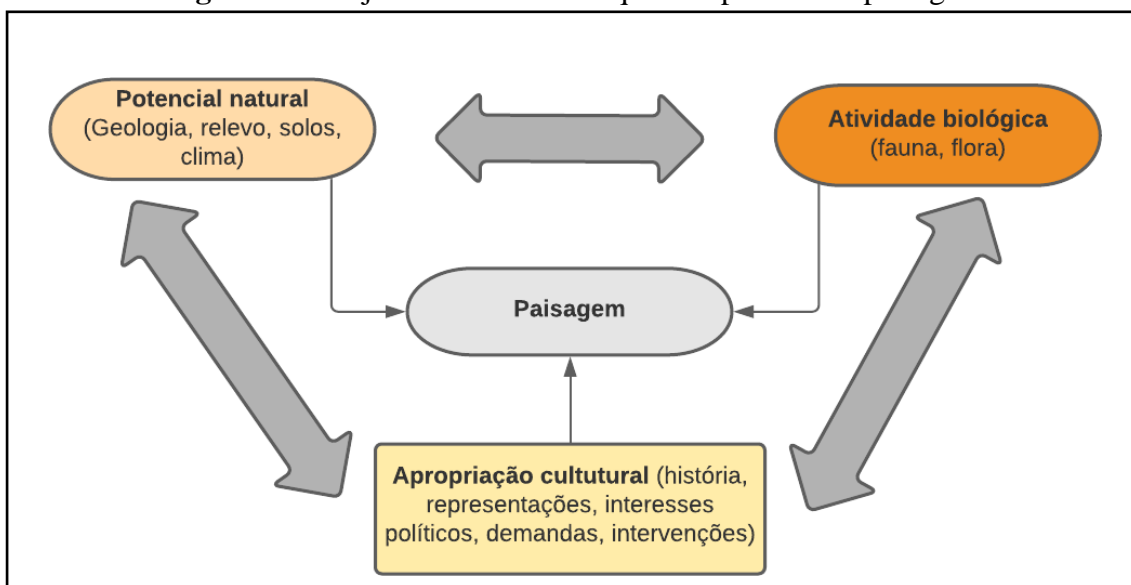
Dentro da diversidade conceitual em que se encontra o termo, surge Georges Bertrand (1971, p. 2), geógrafo francês, a partir da tradução dos artigos de Sochava, e com seus esquemas taxonômicos no qual apresenta

A paisagem não é a simples adição de elementos geográficos disparatados. É uma determinada porção do espaço, resultado da combinação dinâmica, portanto instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução.

Compreende-se, assim, a partir das proposições de Bertrand, que ele não aborda de forma privilegiada nem a esfera natural nem a cultural na paisagem e apresenta uma certa facilidade em visualizar a paisagem de forma integrada, propondo que sociedade e natureza estão relacionadas entre elas formando uma só “entidade” de um mesmo espaço geográfico.

Nessa perspectiva, entende-se que as paisagens são formadas por três camadas: uma física, uma biológica e outra de ordem cultural/social, como destaca a Figura 1.

Figura 1 - Conjunto de elementos que compõem uma paisagem



Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2018).

A camada física ou potencial natural inclui os aspectos que influenciam na diversidade da paisagem relacionados ao relevo e ao regime de drenagens superficial. A segunda camada é constituída pela atividade biológica, que vai condicionar a história

biogeográfica, bem como a fauna e a flora e o resultado da sua interação com o processo de formação dos solos. A terceira e última camada se refere à apropriação cultural, ou seja, a ação da apropriação humana dos ambientes naturais (CAVALCANTI, 2018).

A partir dessa compreensão, pontua-se que a cartografia de paisagens consiste no mapeamento da fisionomia dessas camadas, isto é, o aspecto visível, e secundariamente seu funcionamento e desenvolvimento, que são estudados por meio de técnicas específicas (CAVALCANTI, 2018).

Ainda em relação à paisagem, Claval (1999, p. 420) afirma que

Não há compreensão possível das formas de organização do espaço contemporâneo e das tensões que lhes afetam sem levar em consideração os dinamismos culturais. Eles explicam a nova atenção dedicada à preservação das lembranças do passado e a conservação das paisagens.

Assim, o autor supracitado transmite uma ideia de que o homem possui a responsabilidade de transformar uma determinada paisagem, destacando que essas transformações são ocasionadas por diferentes grupos culturais, fazendo com que haja uma preocupação ainda maior sobre os sistemas culturais do que com os próprios elementos físicos que compõem uma paisagem.

É nessa perspectiva que a cartografia geoambiental se apresenta como um importante instrumento no que diz respeito ao suporte que ela pode oferecer na decisão sobre os tipos de usos das paisagens, com ênfase principalmente no apoio oferecido à cartografia de síntese para os estudos de ordenamento territorial, através do mapeamento das unidades de paisagem, utilizam-se critérios baseados em uma metodologia de análise integrada de cunho sistêmico.

Seguindo os fundamentos na TGS e os apontamentos geossistêmicos de Sochava, Tricart (1977) apresentam uma cartografia de paisagem baseada em seu comportamento ecodinâmico, no qual sua elaboração prevê que as unidades de paisagem sejam apresentadas a partir dos diferentes graus de fragilidades dos ambientes naturais, face às intervenções do homem nos diversos componentes da natureza.

Na concepção de Tricart (1977), a representação gráfica da paisagem é apresentada na chamada “Carta de Unidades Ecodinâmicas”, que possui o objetivo de evidenciar as diversas formas de funcionamento do ambiente dos seres vivos (inclusive o homem), definindo o grau de sensibilidade desse meio em face da ocorrência de fenômenos naturais e espontâneos potencializados pela ação antrópica, no qual são categorizados em meios estáveis (prevalece a pedogênese), meios intergrades (pedogênese/morfogênese) e meios instáveis (prevalece a morfogênese).

Esse tipo de material geocartográfico, a exemplo da proposta por Tricart (1977), permite a existência de uma documentação rica em informações que reúne em um único documento dados de geologia, pedologia, geomorfologia, unidades morfoestruturais, morfometria, o uso do solo, bem como, contempla uma interpretação complexa, descritiva, derivada de uma representação gráfica fruto da superposição ou justaposição de informações, que podem auxiliar no desenvolvimento de medidas que possam favorecer um ordenamento territorial de uma determinada área.

Ross (2006) ressalta a paisagem como uma unidade homogênea dotada de dinâmica própria, destacando a necessidade de sua análise de forma integrada para auxiliar a aplicação de sua análise a um planejamento ambiental e territorial. Neste sentido, compreende-se que os estudos ambientais necessitam de uma fundamentação cartográfica, sobretudo com vistas ao suporte de atividade de planejamento e gestão do ambiente.

Neste sentido, Cavalcanti (2014) ratifica a afirmação de Ross (2006) ao explicar que, em geral, os estudos ambientais carecem de fundamentação cartográfica, sobretudo com vistas ao suporte de atividades de planejamento e gestão do ambiente que estes podem oferecer a partir de medidas viabilizadas pelo setor público.

De acordo com Augusto (2016) p. 16:

“A Cartografia de Paisagens ou Cartografia Geoambiental é uma atividade de caráter físico-geográfico, e está preocupada com a representação de complexos naturais, também chamados de geossistemas, que compreendem áreas naturais resultantes da interação entre os componentes da natureza, influenciados em maior ou menor grau pela sociedade (CAVALCANTI, 2014). Nessa acepção, é através dos mapeamentos que essas áreas heterogêneas de um terreno são identificadas e delimitadas.”

Através da utilização de um material geocartográfico é possível observar as localizações, as extensões, os padrões de distribuição e as relações entre os componentes distribuídos no espaço, além de representar generalizações e extrapolações. Por conseguinte, devem favorecer a síntese, a objetividade, a clareza da informação e a sistematização dos elementos a serem representados, no qual se tornam ferramentas imprescindíveis ao ordenamento territorial dos ambientes.

É de suma importância levar em consideração, que ao elaborar mapeamentos temáticos voltados para o ordenamento territorial, o uso da cartografia de síntese (integradora) e cartografia geoambiental (características ambientais da paisagem) constitui-se em proposta indissociável. Por isso deve-se compreender a importância da Cartografia Geoambiental de Síntese, nos trabalhos voltados ao ordenamento territorial, pela sistematização das representações gráficas da paisagem segundo suas

características e potencialidades ambientais, para o uso e ocupação do solo (ZACHARIAS, 2006).

No Brasil, o Decreto-lei nº 4.297/02, em seu Artigo 13º, inciso I, no qual indica como o produto básico do diagnóstico de recursos naturais as “Unidades dos Sistemas Ambientais, definidas a partir da integração entre componentes da natureza” e que constituem o elemento inicial para a composição de um zoneamento ecológico-econômico.

É importante destacar alguns princípios metodológicos aplicados nas representações das fisionomias das paisagens a partir do suporte da cartografia geoambiental, uma vez que essas paisagens são compostas por partes interatenuantes que se organizam numa hierarquia, podendo ser individualizadas ou classificadas por seus atributos em comum, refletindo um regime funcional em um contexto evolutivo.

De acordo com Cavalcanti (2018), inicialmente tem-se o princípio da síntese, no qual este remonta ainda às ideias de Humboldt em que os distintos elementos da natureza devem ser avaliados de forma conjunta. Como exemplo desse contexto metodológico tem-se os trabalhos de diferenciação da paisagem em domínios de natureza abordados por Ab’Sáber (2003), que refletem o princípio da síntese, no qual exige uma ponderação entre os elementos que compõem a organização da paisagem.

Partindo dessa perspectiva, um segundo princípio metodológico se apresenta como a hierarquia dos componentes da paisagem. O próprio estudo de Ab’Sáber pode ser um exemplo disso quando se refere à organização interna espacial dos conjuntos naturais, no qual unidades menores se associam com unidades maiores (CAVALCANTI, 2018). Tem-se ainda o princípio regional-tipológico e o princípio temporal, no qual o primeiro individualiza as paisagens em regiões e tipos, e o segundo refere-se a dinamicidade causada na paisagem em função do tempo.

Esses princípios metodológicos são fundamentais na compreensão do fenômeno paisagístico, sendo de suma importância no contexto do estudo integrado da paisagem, buscando considerar não apenas a organização espacial (estrutura), mas também o funcionamento, evolução e planejamento das paisagens.

Portanto, as paisagens agregam elementos e processos de diferentes naturezas, dimensões e durações que, relacionando-se numa determinada área da superfície terrestre, dão origem a uma unidade visível sujeita às ações e decisões da sociedade e suas necessidades variadas, que muitas vezes se apresentam de forma conflitante, gerando consequências indesejáveis ao meio ambiente, mas que podem ser suavizadas com o apoio da cartografia geoambiental, na decisão sobre esses diversos tipos de uso

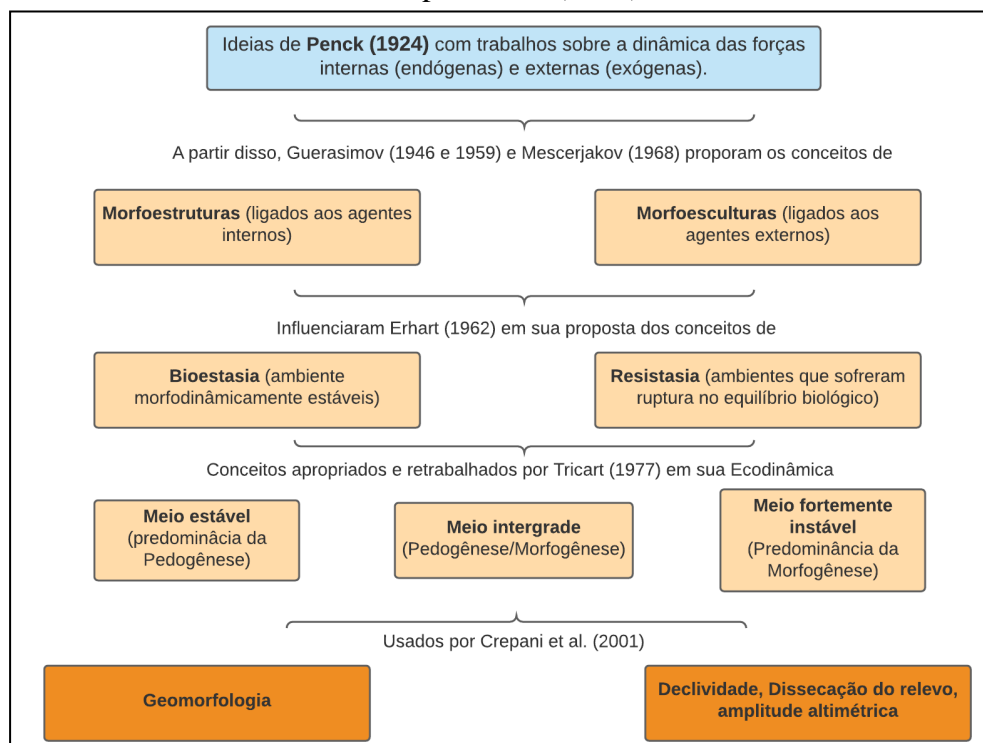
das paisagens.

1.3 Os princípios da estruturação do relevo e vulnerabilidade à perda de solos

Como discutido anteriormente, a paisagem representa um importante conceito na ciência geográfica, o que torna bastante pertinente a realização de estudos que a tenha como foco, a exemplo da temática da vulnerabilidade ambiental. Acerca disso, é necessário deixar em evidência inicialmente como foram se fundamentando as ideias de alguns autores sobre a formação do relevo no que se refere a sua estabilidade e instabilidade e os tipos de eventos que as originam.

O progressivo desenvolvimento da concepção de existência de uma organização natural da superfície terrestre que se estabelece a partir da inter-relação de seus elementos internos (rochas, solos, seres vivos, água) e externos (sol, movimentos orbitais, atividade interna do planeta), bem como a sua interação com a sociedade, promoveu uma série de formulações teórico-metodológicas nas ciências naturais e na Geografia, com destaque para a Geografia Física. O ponto de partida para uma compreensão dos estudos sobre relevo tem como marco os estudos de Penck (1924), com seus apontamentos acerca da dinâmica das forças internas (endógenas) e externas (exógenas), da qual a evolução geomorfológica dependeria (Figura 2).

Figura 2 - Fluxograma de teorias que antecederam e influenciaram a proposta de Crepani et al. (2001)



Fonte: Adaptado de Tavares e Oliveira (2021).

Ao querer auxiliar as pesquisas geológicas referentes à dinâmica da crosta, W. Penck (1953) propôs três aspectos que se tornariam chave para o pensamento geomorfológico, que viriam a constituir a base para o entendimento da morfologia:

1.the exogenetic processes; 2. the endogenetic processes; 3. the products due to both, which may here be called the actual morphological features (W. PENCK, 1953, p. 3 E 4 apud ABREU, 2003, p. 59).

É a partir das proposições de Penck (1924) que têm início os diálogos sobre a temática de análise integrada da paisagem. Os estudos abordados por Guerasimov (1946) indicam um problema teórico central das ciências da Terra, o qual era identificado como a necessidade da elaboração de uma classificação dos fenômenos estudados na época. Tal classificação era indicada por Guerasimov como sendo os conceitos de morfoestruturas e morfoesculturas, na qual era fundamentada sobre a ideia de que a formação do relevo resultava da interação das forças endógenas e exógenas, cujo papel na elaboração das formas de natureza diferente não é o mesmo.

Para que se fizesse possível a classificação anteriormente citada, Mescerjakov utilizou os conceitos de morfoestrutura e morfoescultura de Guerasimov (1946), em que o autor designa que a morfoestrutura são os elementos do relevo de ordem maior que parecem complicar a superfície das morfotecturas, tendo como representações as cadeias de montanhas, maciços, platôs, colinas e depressões provenientes de forças endógenas vinculadas à morfotectura que abarca os resultados da movimentação das placas tectônicas. Guerasimov ainda deixa em evidência que esta se compõe das formas do relevo particularmente grandes, resultado da interação contraditória dos fatores endógenos e exógenos, sendo predominante o papel ativo dos fatores internos (endógenos), e que tiveram uma considerável relevância a partir dos estudos acerca da neotectônica que determinaram a expressão das estruturas no relevo.

Neste sentido, os elementos morfoestruturais não podem ser considerados como substratos passivos, mas sim, como elementos ativos no processo de desenvolvimento do relevo.

A partir do estudo das relações entre o relevo e a estrutura tem sido possível ampliar ainda mais o conceito inicial da noção de "morfoestrutura". Guerasimov (1946) aponta que com as grandes formas da superfície da Terra, relaciona-se também agora as morfoesculturas de formas de dimensões relativamente pequenas, na formação das quais o papel principal coube aos movimentos da crosta terrestre. As morfoesculturas apresentam-se com dimensões relativamente reduzidas. Entretanto, a análise de sua

repartição tem demonstrado que elas existem nos territórios de grande superfície, diferenciando-se da primeira ao ser relacionada aos agentes modeladores externos, uma vez que são formas embutidas nas morfoestruturas e que apresentam maior escala de detalhe.

Neste sentido, Ross (2003) destaca que no contexto estrutural de análise seus principais elementos são as morfoestruturas e as morfoesculturas, cujos conceitos, estabelecidos a partir de Guerasimov (1946), Guerasimov e Mescerjakov (1968), forneceram uma nova direção teórico-metodológica para os estudos de geomorfologia (MOURA-FÉ, 2016).

Seguindo às proposições acerca da morfoestrutura e morfoescultura, observa-se na Figura 1 o surgimento das concepções de bioestasia e resistasia de Erhart (1962), a partir delas se possibilitou avançar nos estudos acerca dos ambientes, colocando os problemas a serem solucionados sobre a estruturação do relevo em um novo nível de abordagem.

Na elaboração da teoria da bio-resistasia, Erhart (1962) levou em consideração a importância que a cobertura vegetal exercia na evolução das paisagens. Segundo ele, a vegetação é responsável pela proteção dos meios contra os processos morfogenéticos. O termo bioestasia tem o significado de equilíbrio biológico e designa, portanto, meios morfodinamicamente estáveis, enquanto resistasia refere-se àqueles meios que sofreram uma ruptura do equilíbrio biológico. Desse modo, o autor inclui que, nos meios em bioestasia há a preponderância da pedogênese em detrimento da morfogênese. Por outro lado, nos meios em resistasia, ocorre justamente o oposto.

Dessa forma, compreende-se que a vegetação possuía um importante destaque na análise dos meios, sobretudo do ponto de vista geoquímico e sedimentológico, uma vez que os trabalhos pedológicos que conduziram a elaboração de tal teoria, principalmente em relação ao processo de laterização das rochas.

Dentro da análise do relevo de forma sistêmica e quanto aos anseios de uma sociedade pós revolução industrial, Tricart (1977) se apresenta destacando os trabalhos de Geomorfologia Dinâmica e aqueles voltados à aferição da vulnerabilidade ambiental das paisagens, sobretudo face ao impacto das atividades antrópicas (CARDOSO, 2003, p.102). Em uma época em que a Geografia Física ainda estava à mercê dos modelos dedutivos e cíclicos de evolução de paisagem, Tricart preconizou o valor do trabalho de campo, complementado por métodos experimentais e de laboratório.

Nesse debate, Tricart (1977) questiona Bertrand (1971) por utilizar a teoria bio-resistasia de H. Erhart, uma vez que, segundo Tricart, esta exclui a possibilidade da

dialética da natureza. Assim, Tricart (1977) propõe uma classificação a partir do conceito de ecodinâmica dos meios ambientes, sendo tal classificação apresentada em três níveis: os meios estáveis (com predominância da Pedogênese), meios intergrades (equilíbrio entre Pedogênese/Morfogênese) e meios fortemente instáveis (predominância da Morfogênese), baseado na intensidade, frequência e interação dos processos evolutivos, possibilitando uma abordagem dialética da paisagem, algo que aparentemente não era identificável na teoria de Erhart.

Na ecodinâmica elaborada por Tricart (1977), a abordagem sobre as unidades de paisagem, permite a classificação em meio estável com uma característica principal, a lenta evolução resultante da permanência no tempo de combinação dos fatores, sendo a pedogênese o processo que predomina em sua dinâmica. O autor deixa em evidência ainda que há a presença de uma estabilidade que é transferida para o modelado quando a inter-relação entre atmosfera-litofera está em equilíbrio, proporcionando, assim, uma evolução lenta e gradativa, quase imperceptível e, também, apresentando uma constância permanente, aproximando-se da condição do clímax. Esses meios encontram-se em regiões que apresentam características como a existência e uma cobertura vegetal densa que possa impedir os efeitos erosivos das águas pluviais, e apresentem uma dissecação moderada e ausência de manifestações vulcânicas.

Tricart (1977) destaca o debate acerca da importância da cobertura vegetal trabalhada por Erhart (1962) no termo bioestasia. O autor afirma que o termo não abarca o real sentido estabilizador dos processos erosivos nos ambientes, uma vez que os animais não possuem nenhuma importância na exposição aos processos erosivos ocasionados pelo efeito das gotículas de águas da chuva, cabendo esse papel apenas às plantas. Neste sentido, o conceito mais preciso seria o de fitoestasia, que ratificava com a representação de ambientes relativamente estáveis. Entretanto, algumas áreas que compreendiam uma geodinâmica estável, não apresentavam uma cobertura vegetal densa, o que impedia o uso do termo fitoestasia, nesse caso.

Outra classificação relacionada à dinâmica dos meios morfodinâmicos em função da intensidade dos processos atuais são os meios *intergrades*. Tricart (1977) explana que a característica principal desses meios é a interferência permanente de morfogênese e pedogênese, no qual ambos os processos ocorrem de forma competitiva em um mesmo espaço.

Quando se aborda os aspectos qualitativos dos meios *intergrades*, Tricart (1977) corrobora que é de suma importância que se possa chegar a uma compreensão aos resultados do processo morfogenéticos que atuam de forma mais superficial nas

camadas superiores do solo, e aqueles que interferem em todo o perfil gerando resultados que intervenham na dinâmica normal de um determinado solo, gerando solos mais profundos. O autor complementa

Os processos peculiares, como ablasão generalizada sob o efeito do escoamento instável ou da reptação, retiram a parte superior do perfil pedológico; por vezes, tais processos apenas se limitam a afetar a cobertura vegetal. Eis aí o domínio da aplicação do conceito pedogênese-morfogênese (TRICART, 1977, p. 47).

É imprescindível destacar que os meios *intergrades* são meios delicados e suscetíveis a fenômenos de amplificação, podendo vir a tornarem-se meios instáveis, e com relação aos critérios quantitativos, levando em consideração o balanço pedogênese/morfogênese, verifica-se que a diferença entre os meios estáveis e meios *intergrades* ainda não está bem definida de acordo com métodos já existentes, sendo necessários estudos para quantificar tais números, sendo a cobertura vegetal um fator bastante importante.

Os meios fortemente instáveis, segundo a classificação de Tricart (1977), são aqueles em que a morfogênese se apresenta como o elemento que se sobressai quando se retrata a dinâmica natural, e fator determinante do sistema natural, ao qual todos os outros elementos estão subordinados. Este fenômeno pode ser desencadeado por paroxismos naturais como tectonismo, vulcanismo, ou pela degradação antrópica, especialmente com a retirada da cobertura vegetal. O que podem corresponder, grosso modo, aos meios em resistasia de Erhart (1924).

Nos meios fortemente instáveis é de suma importância se levar em consideração a vegetação, uma vez que esta influência direta ou indiretamente na estabilidade climática, pois a vegetação mal adaptada, as irregularidades climáticas permitem que os eventos meteorológicos extremos ganhem um potencial elevado de destruição (TRICART, 1977).

Portanto, é incontestável a importância das revisões feitas por Tricart (1977) para o desenvolvimento dos estudos relativos ao meio ambiente, no que se refere a uma classificação dos ambientes que expresse sua dinâmica evolutiva. Tanto Erhart (1952) quanto Tricart (1977), buscam no balanço morfogênese/pedogênese os fundamentos para a classificação dos meios, tendo a esculturação do relevo como parâmetro básico do sistema evolutivo. A movimentação ou perda de material sólido constitui-se no elemento principal para a classificação dos meios ambientes em ambos os autores.

Pautado nessas premissas de análise dos ambientes de Tricart (1977), Crepani et al. (2001) apresentaram uma análise do meio físico e biótico que subsidiasse a ocupação

racional e o uso sustentável dos recursos naturais disponíveis, a partir da análise dos atributos de geologia, relevo, solos, clima e uso e ocupação das terras.

Para Tricart (1977), as paisagens devem ser analisadas através do seu comportamento dinâmico, a partir da classificação em unidades de paisagens. Dentro de cada unidade existem relações mútuas entre os diversos componentes da dinâmica e fluxo de energia e matéria do meio ambiente. Neste sentido, compreende-se que o conhecimento e entendimento das relações existentes entre as variáveis dinâmicas, ou seja, a articulação de várias esferas do conhecimento, como o geológico, pedológico, geomorfológico e climático, constrói a noção de um conjunto interdisciplinar e dinâmico.

Seguindo essa linha de raciocínio, Crepani et al. (2001) elaboraram uma proposta considerando seu pensamento sobre as unidades ecodinâmicas estáveis e instáveis, avaliando o grau de vulnerabilidade a partir da caracterização morfodinâmica de determinadas unidades, corroborando assim com os princípios da ecodinâmica (Tabela 1). A delimitação destas unidades é realizada a partir do processamento e interpretação de cores e texturas de imagens do satélite que, posteriormente, recebem o conteúdo oriundo das informações temáticas.

Tabela 1 - Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas

Categoria morfodinâmica	Relação Morfogênese / Pedogênese	Valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio entre pedogênese / morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a morfogênese	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

De acordo com essa avaliação realizada por Crepani et al. (2001), é possível notar que as limitações quantitativas preconizadas nos estudos de Tricart (1977) quanto aos critérios de análise dos ambientes foram trabalhadas pelo autor no sentido de sanar tais limitações, acrescentando uma análise tanto quantitativa como qualitativa dos ambientes no intuito de delimitar áreas mais e menos vulneráveis aos processos erosivos existentes.

Neste ínterim, Crepani et al. (2001) estabeleceram 21 classes de vulnerabilidade à perda de solos, nas quais foram distribuídas entre situações que apresentam predomínio dos processos pedogenéticos, passando pelas situações intermediárias, até situações em que há a predominância dos processos morfogenéticos. Assim, os autores

classificaram as unidades em cinco níveis hierárquicos diferentes: vulnerável, moderadamente vulnerável, medianamente estável/vulnerável, moderadamente estável e estável, como se apresenta na Figura 3.

Figura 3 - Escala de vulnerabilidade à perda de solos baseado nos processos de pedogênese e morfogênese e grau de saturação.

UNIDADE DE PAISAGEM	MÉDIA		GRAU DE VULNERAB.	GRAU DE SATURAÇÃO			
				VERM.	VERDE	AZUL	CORES
U1	↑	3,0	VULNERÁVEL	255	0	0	
U2		2,9		255	51	0	
U3		2,8		255	102	0	
U4	V	2,7		255	153	0	
U5	U	2,6	MODERADAM. VULNERÁVEL	255	204	0	
U6	L	2,5		E	255	255	
U7	N	2,4	S	204	255	0	
U8	E	2,3	T	153	255	0	
U9	R	2,2	A	102	255	0	
U10	A	2,1	B	51	255	0	
U11	B	2,0	I	0	255	0	
U12	I	1,9	L	0	255	51	
U13	L	1,8	I	0	255	102	
U14	I	1,7	D	0	255	153	
U15	D	1,6	A	0	255	204	
U16	A	1,5	D	0	255	255	
U17	D	1,4	E	0	204	255	
U18	E	1,3	MODERADAM. ESTÁVEL	0	153	255	
U19		1,2		0	102	255	
U20		1,1		0	51	255	
U21	↓	1,0		0	0	255	

Fonte: Crepani et al. (2001).

É importante destacar que os estudos que aplicam a metodologia de Crepani et al. (2001) avaliam os componentes naturais em conjunto, trazendo uma perspectiva de integralidade sistêmica.

Para um melhor entendimento, Crepani et al. (2001) apresentam dentro da proposta de promover a integração de dados sobre uma imagem que possa ser interpretada, as unidades territoriais básicas (UTBs), que são entidades geográficas que contêm atributos ambientais que permitem diferenciá-la de suas vizinhas, ao mesmo tempo em que possui vínculos dinâmicos que a articulam a uma complexa rede integrada por outras unidades territoriais, podem ser divididas em duas categorias: as “unidades de paisagem natural” e os “polígonos de intervenção antrópica”.

Os autores afirmam que uma unidade de paisagem natural é uma porção do terreno onde se inscreve uma combinação de eventos e interações, visíveis e invisíveis, que apresentam características genéticas de sua formação, representando um elo de ligação entre a Geografia e a Ecologia. Já os polígonos de intervenção antrópica são áreas físicas onde a sociedade já tem atuado, modificando as condições naturais do ambiente (CREPANI et al. 2001, p. 13).

Assim, a partir da observação e avaliação individual de cada tema para determinar o grau de vulnerabilidade ambiental de determinado ambiente, é adotado um modelo que avalie o estágio da evolução morfodinâmica das Unidades Territoriais Básicas (UTBs), atribuindo valores de estabilidade às categorias morfodinâmicas, de forma a se construir uma “escala de vulnerabilidade” para situações que ocorram naturalmente.

É importante destacar como a ação antrópica se insere na dinâmica natural modificando a mesma. A discussão sobre vulnerabilidade mostra-se de extrema importância quando se fala no uso racional dos ambientes, uma vez que a ação antrópica se apresenta como um fator intensificador na modificação das paisagens.

Após essa reflexão, sob a inspiração teórica de Penck (1924) e os postulados modernos da geomorfologia, perpassando pelos estudos de Guerasimov e Mescerjakov (1968), Tricart (1977) com sua ecodinâmica, até as preposições de Crepani et al. (2001), entende-se que o estudo do relevo se dá a partir dos questionamentos realizados por diversos pensadores que foram fundamentais no amadurecimento de ideias que fundamental a ciência geográfica, na qual a partir de análises cada vez mais aprofundadas acerca da evolução das diferentes paisagens e seus agentes modeladores, fornecem um arcabouço teórico-metodológico importante para a realização de trabalhos que trilham o caminho da geografia física.

1.4 Vulnerabilidade à perda de solos e sua representação nos ambientes

Os ambientes naturais estão inseridos em um contexto de vários tipos de problemas acarretados tanto por questões das ações antrópicas que geram problemas muitas vezes irreversíveis, como pela própria natureza de formação de determinado ambiente. Segundo a FAO (2015), cerca de 33% dos solos aráveis do mundo estão degradados. Ainda segundo o mesmo relatório, as principais causas dessa degradação estão relacionadas aos processos erosivos, em especial os causados pela ação da água.

Assim, é por meio do mapeamento das áreas de vulnerabilidade que as medidas de prevenção e mitigação se tornam mais fáceis de serem vislumbradas devido à espacialização destes problemas, conseqüentemente, o planejamento ambiental se torna mais eficaz, e a resposta disto é a melhoria da qualidade de vida da população que se encontra nestas áreas.

O estudo da vulnerabilidade à perda de solos de Crepani et al (2001) foi desenvolvida no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com o objetivo de fornecer suporte a elaboração do Zoneamento Ecológico e Econômico (ZEE) para a

Amazônia com o auxílio de mapas temáticos, cartas topográficas e imagens aéreas que torna possível a delimitação das áreas mais propensas à perda de solos e, conseqüentemente a riscos naturais.

Como citado anteriormente, Crepani et al. (2001) utilizam elementos do meio físico como características litológicas, pedológicas, climáticas, relevo e vegetacional para fazer inferências quanto às relações entre morfogênese e pedogênese em unidades de paisagem natural, no qual atribui-se uma relevância na estabilidade de cada uma das referidas unidades de paisagem.

Sobre os valores de estabilidade, Florenzano (2008, p. 298) afirma que eles

[...] foram atribuídos às categorias morfodinâmicas. Nessa análise, quando predomina a morfogênese, prevalecem os processos erosivos, modificadores do relevo, e quando predomina a pedogênese, prevalecem os processos formadores do solo.

Assim sendo, cada elemento possui relevância na estabilidade das unidades de paisagem sendo de suma importância sua análise de forma aprofundada, como propõe Crepani et al. (2001). No Quadro 1 são apresentados os critérios de avaliação de cada tema adotados pelos referidos autores para determinar o grau de vulnerabilidade natural à perda dos solos.

Quadro 1 - Critérios de avaliação das variáveis para determinar o grau de vulnerabilidade à perda dos solos

TEMA		CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO	ESCALA DE VALOR
G E O M O R F O L O G I A	Dissecação do relevo pela drenagem	Porosidade e permeabilidade do solo e da rocha	Maiores interflúvios (menor dissecação) – estável; Menores interflúvios (maior dissecação) – instável
	Declividade	Grau de inclinação das vertentes	Menor declividade – estável; Maior declividade – instável.
	Dissecação do plano vertical	Superfície exposta à ação da energia cinética da chuva, o desnível associado à energia potencial	Menor amplitude altimétrica – estável; Maior amplitude altimétrica – instável.
GEOLOGIA		Dureza e porosidade da rocha	Rocha muito coesa – estável (Pedogênese); Rocha pouco coesa – instável (Morfogênese)
PEDOLOGIA		Estrutura, permeabilidade e condutividade hidráulica,	Solos desenvolvidos, intemperizados – estável;

TEMA	CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO	ESCALA DE VALOR
	profundidade, e manejo do solo	Solos rasos, pouco desenvolvidos – instável.
VEGETAÇÃO	Densidade da cobertura vegetal	Altas densidades- estável; Baixas densidades- instável.
CLIMA	Intensidade pluviométrica e distribuição sazonal	Menores índices pluviométricos e maior duração para o período chuvoso – estável; Maiores índices de pluviosidade e menor duração do período chuvoso – instável.

Fonte: Adaptado de Fagundes (2011).

A análise da vulnerabilidade à perda de solos é influenciada diretamente pela geomorfologia do ambiente estudado, uma vez que os parâmetros morfométricos interferem de maneira marcante nos processos ecodinâmicos que ocorrem nas vertentes. Assim, os índices propostos por Crepani et al. (2001) para tal análise do parâmetro geomorfológico são a dissecação do relevo pela drenagem, cujo qual está relacionada à porosidade e à permeabilidade e condutividade hidráulica da rocha e do solo; a amplitude altimétrica, que por sua vez se relaciona com o aprofundamento da dissecação; e a declividade, que indica a inclinação do relevo em relação ao plano horizonte.

A dissecação pela drenagem está diretamente ligada à porosidade e à permeabilidade e a condutividade hidráulica do solo e da rocha, sendo essa associada aos menores valores na escala de vulnerabilidade quanto maiores forem os interflúvios, e associada aos maiores valores de vulnerabilidade quanto menores forem os seus interflúvios (CREPANI et al. 2001).

De acordo com Crepani et al. (2001), a amplitude altimétrica é um indicador da energia potencial disponível para o “*runoff*”. Assim, quanto maior o valor da amplitude altimétrica, maior é a energia potencial das águas pluviais, conseqüentemente, apresentarão maior influência sobre os processos morfogenéticos.

A declividade, parâmetro utilizado no presente estudo, se refere à inclinação da reta que une dois pontos do relevo em relação ao plano horizontal, que apresenta relação direta com os processos de morfogênese. Afinal, quanto maior o declive, maior a velocidade das águas e mais rapidamente a energia potencial das águas são transformadas em energia cinética, ocasionando assim processos erosivos no local e conseqüentemente modificações a jusante (CREPANI et al. 2001). A Tabela 2 apresenta

as classes de declividade e seus respectivos valores de vulnerabilidade.

Tabela 2 - Classes de declividade e valores de vulnerabilidade

Classes Morfométricas	Declividade (%)	Valores de Vulnerabilidade
Muito Baixa	< 2	1,0
Baixa	2 – 6	1,5
Média	6 – 20	2,0
Alta	20 – 50	2,5
Muito Alta	> 50	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001) Adaptado de Ross (1994).

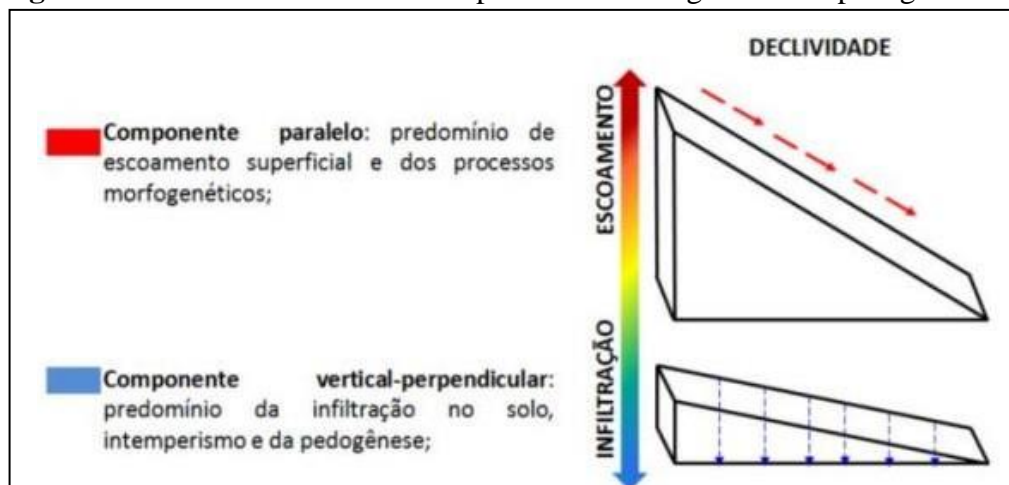
Nesse sentido, quando se atribui um valor de estabilidade próximo a 1,0 indica-se que os ângulos de inclinação das encostas são pequenos, prevalecendo os processos pedogenéticos, da mesma forma que encostas que apresentem maior declividade indicando onde prevalecem os processos erosivos morfogenéticos, os valores atribuídos devem ser próximos de 3,0.

Freires et al. (2019, p. 25) destaca:

“Ainda relacionado à declividade, o escoamento e a infiltração apresentam forte interação com ela, que associada à litologia, tipo de solos, cobertura vegetal, precipitação e outros fatores morfométricos podem indicar um grau maior ou menor da probabilidade do risco de erosão das vertentes (PRADHAN, 2010).”

Conforme a declividade do terreno (Figura 4), o desenvolvimento dos solos (pedogênese) pode ocorrer por meio de fluxo com componente vertical ou perpendicular, ou o desenvolvimento dos processos erosivos (morfogênese) em função de fluxos com componentes paralelos que se caracterizam pela remoção de detritos das vertentes, resultando na perda de solos e esculturação do relevo (SILVA NETO, 2013).

Figura 4 - Declividade de vertente e processos morfogenéticos e pedogenético.



Fonte: Silva Neto (2013).

A Geologia é utilizada para entender a história da evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra, e as informações relativas ao grau de coesão das rochas que a compõem, no qual o grau de coesão indica a intensidade da ligação entre os minerais ou partículas que a compõe. Quanto mais coesas são as rochas mais atrelados aos processos pedogenéticos essas se encontram, ao passo que as rochas menos coesas se encontram associados aos processos morfogenéticos (FLORENZANO, 2008). Na Tabela 3 são apresentadas as rochas mais comumente encontradas na superfície terrestre dentro da escala de vulnerabilidade à perda de solos relacionados ao processo de denudação.

Tabela 3 - Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns

Rochas	Vuln.	Rochas	Vuln.	Rochas	Vuln.
Quartzito ou metaquartzito	1,0	Milonitos, quartzo, muscovita, biotita, clorita xisto	1,7	Arenitos quartzosos ou ortoquartzosos	2,4
Riólito, granito, docito	1,1	Piroxeito, anfibolito kimberlito, dunito	1,8	Conglomerados, subgrauvacas	2,5
Granodiarito, quartzo diorito, granulitos	1,2	Hornblenda, tremolita, actinolita xisto	1,9	Grauvacas, arcózios	2,6
Migmatitos, gnaisses	1,3	Estaurolita xisto, xisto granatíferos	2,0	Siltitos, argilitos	2,7
Fonólito, nefelina sienito, traquito, sienito	1,4	Filito, metassiltito	2,1	Folhelhos	2,8
Andesito, diorito, basalto	1,5	Ardósea, metargilito	2,2	Calcários, dolomitos, margas, evaporitos	2,9
Anortosito, gabro, peridotito	1,6	Mármore	2,3	Sedimentos inconsolidados: aluviões, colúvio etc.	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

Outro aspecto abordado por Crepani et al. (2001) está relacionado à Pedologia, na qual este fornece informações quanto ao grau de maturação dos solos. O presente fator refere-se as questões relacionada à erosão hídrica, uma vez que a água da chuva se apresenta como um agente erosivo ativo, enquanto o solo recebe a energia fornecida pelas gotículas de água. Nesse sentido, como aponta Florenzano (2008), a erodibilidade de um solo é referente à função das suas condições internas e suas características físicas e químicas, bem como das condições externas e situações relacionados às atividades de uso existentes no mesmo.

As condições de manejo adequadas do solo são fundamentais para que os

mesmos mantenham suas potencialidades físicas e diminuam os impactos que acompanham o desenvolvimento econômico, uma vez que a ação antrópica possui grande influência na intensificação dos processos de modificação da paisagem, processos esses que podem reverberar por todo o sistema. Neste sentido, Crepani et al. (2001, p. 82) destacam

É praticamente impossível estabelecer-se uma linha divisória entre o que é erosão natural e o que é erosão induzida pelas atividades antrópicas, por isso o correto é considerar-se que o processo natural de erosão é acelerado pelas atividades do homem. A questão é saber qual o nível de erosão a partir do qual a capacidade do solo em sustentar a vida fica prejudicada e o material transportado para fora da área de erosão vai provocar problemas em outro local.

Quando se fala de vulnerabilidade do fator solo, infere-se uma relação com o grau de amadurecimento do mesmo, produto direto do balanço pedogênese/morfogênese, ou seja, dentro de um contexto em que os processos erosivos da morfogênese estão prevalecendo, a tendência é a existência de solos mais jovens que possuam pequena evolução no desenvolvimento dos seus perfis e conseqüentemente são mais vulneráveis, e da mesma forma quando tem-se uma prevalência dos processos pedogenéticos, os resultados são solos mais bem desenvolvidos, maduros, que possuam uma boa lixiviação, apresentando uma estabilidade maior.

No entanto, há a necessidade de se analisar as peculiaridades de determinados locais. Para a análise da erosão linear, existem outras propriedades desses solos que devem ser levadas em conta.

Em relação aos solos predominantes na área de estudo e suas relações com o boçorocamento, os Latossolos, ao estarem presentes em cabeceiras de drenagem de elevados gradientes hidráulicos subterrâneos, podem ser suscetíveis ao boçorocamento. Ao possuírem uma textura relativamente homogênea ao longo do perfil pedológico, os Latossolos podem apresentar perda em grande volume devida ação da erosão tubular interna (“piping”) sendo esta condição agravada pela concentração de escoamentos superficiais nos perfis homogêneos arenosos em condições de uso e ocupação (SALOMÃO, 1994).

Sobre o comportamento hidrológico no perfil dos Latossolos, Queiroz Neto (2002, p. 85) ressalva:

[...] as coberturas latossólicas não apresentam restrição ao fluxo interno das soluções. A disposição difusa do lençol freático no sopé das vertentes não determina sítios de maior sensibilidade à erosão. Somente o uso inadequado dos solos é capaz de desencadear processos intensos de erosão pelo escoamento concentrado.

Além disso, se os Latossolos forem de textura arenosa, são mais suscetíveis ainda. Os argilosos muito antigos, formam agregações que tornam o comportamento dele mais próximo a um solo arenoso do que argiloso, quanto à granulometria (Camapum de Carvalho et al., 2006).

Dito isso, fica claro a importância de se realizar uma observação mais a fundo acerca das características específicas dos solos de determinada área estudada.

A Tabela 4 a seguir apresenta os valores de vulnerabilidade estabelecidos para os principais tipos de solos.

Tabela 4 - Valores de vulnerabilidade dos solos

CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (Camargo et al., 1987)	CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (EMBRAPA, 1999)	VULN.
Latossolos Amarelos	Latossolos Amarelos	
Latossolos Vermelho-Amarelos	Latossolos Vermelho-Amarelos	
Latossolos Vermelho-Escuros	Latossolos Vermelhos	
Latossolos Roxos	Latossolos Vermelhos	1,0
Latossolos Brunos	Latossolos Brunos	
Latossolos Húmicos	Latossolos (...) Húmicos	
Latossolos Húmicos Brunos	Latossolos Brunos (...) Húmicos	
	Argissolos	
Podzólicos Amarelos	Argissolos Luvisolos Alissolos	
Podzólicos Vermelho-Amarelos	Nitossolos	
Podzólicos Vermelho-Escuros	Argissolos Luvisolos Alissolos	
Terras Roxas Estruturadas	Nitossolos	
Brunos Não-Cálcicos	Argissolos Nitossolos	
Brunizéns	Luvisolos	2,0
Brunizéns Avermelhados	Chernossolos	
Rendzinas	Chernossolos	
Planossolos	Chernossolos	
Solos Hidromórficos (abrupticos)	Planossolos	
Podzóis	Planossolos	
	Espodossolos	
Cambissolos	Cambissolos	2,5
Solos Litólicos	Neossolos Litólicos	
Solos Aluviais	Neossolos Flúvicos	
Regossolos	Neossolos Regolíticos	
Areias Quartzosas	Neossolos Quartzarênicos	
Vertissolos	Vertissolos	
Solos Orgânicos	Organossolos	
Solos Hidromórficos (não abrupticos)	Gleissolos	3,0
Glei Húmico	Gleissolos Plintossolos	
Glei Pouco Húmico	Gleissolos Plintossolos	
Plintossolo	Plintossolos	
Laterita Hidromórfica	Plintossolos	
Solos Concrecionários Lateríticos	Plintossolos	
Afloramento Rochoso	Afloramento Rochoso	

Fonte: Modificado de Crepani et al. (2001), incluindo a correlação com a nova nomenclatura de solos da Embrapa (1999), baseado em Prado (2001).

A cobertura vegetal possui um importante papel no que diz respeito ao grau de proteção que ela pode proporcionar aos solos. Ao precipitar, as águas pluviais são interceptadas pela vegetação fazendo com que ocorra a transformação da energia potencial em energia cinética, e por conseguinte uma maior infiltração dessa água através da estrutura física da planta, reduzindo assim o impacto das gotas no solo e conseqüentemente de sua ação erosiva. Sobre a vegetação, Crepani et al. (2001 p. 88) explicam:

A densidade de cobertura vegetal da unidade de paisagem natural (cobertura do terreno) é um fator de proteção da unidade contra os processos morfogenéticos que se traduzem na forma de erosão, por isso para as altas densidades de cobertura os valores atribuídos na escala de vulnerabilidade se aproximam da estabilidade (1,0), para as densidades intermediárias atribuem-se valores intermediários (ao redor de 2,0), e para baixas densidades de cobertura vegetal valores próximos da vulnerabilidade (3,0).

Entende-se que diante do intenso desenvolvimento econômico seria impossível abordar o parâmetro vegetação e não levar em consideração os diversos tipos de usos da terra existentes atualmente. Neste sentido, atribuem-se valores que possam refletir os resultados na intensificação dos processos erosivos em que os ambientes são constantemente expostos. Apesar disso, Florenzano (2008) assinala:

Portanto, para áreas com alta densidade de cobertura vegetal, são atribuídos menores valores de vulnerabilidade; já para áreas com baixa densidade de cobertura vegetal e maior intensidade de uso da terra, atribuem-se os maiores valores de vulnerabilidade (FLORENZANO, 2008, p. 305).

Nesse sentido, é de suma importância evidenciar que a classificação do parâmetro Vegetação proposta por Crepani et al. (2001) teve como objetivo a análise da vulnerabilidade natural à perda de solos para a região da Amazônia, diferenciando-se da região pesquisada no presente trabalho, seja pelo próprio tipo de vegetação encontrada, seja devido a forma habitual de exploração do solo. Assim, é necessário que haja uma adaptação nas classes de acordo com a realidade da área estudada, uma vez que o uso do solo é um importante fator de análise dos processos erosivos, como bem sugere Florenzano (2008).

Percebe-se que a variável de precipitação está vinculada à característica climática, em que Crepani et al. (2001) propõem que seja trabalhado na análise da vulnerabilidade natural à perda de solos. Nesse contexto, enfatiza-se que:

A causa fundamental da denudação é a ação da chuva agindo inicialmente sobre as rochas provocando o intemperismo, e mais tarde sobre o solo removendo-o pela erosão hídrica. O impacto direto das gotas e o escoamento superficial do excesso de água da chuva (“*runoff*” ou enxurrada) são os agentes ativos da erosão hídrica, o solo é o agente passivo (CREPANI et al. 2001, p. 98).

Crepani et al. (2001) relatam que por meio do nível de pluviosidade, da temperatura e do tipo de vegetação existente em uma dada região, o clima acaba por influenciar diretamente no intemperismo ali presente. Dentre os fatores anteriormente citados, a pluviosidade pode ser considerada a causa fundamental da denudação das rochas, uma vez que a chuva possui um poder de causar erosão denominada de erosividade, na qual é resultado direto do processo de interação entre a chuva e o solo.

Crepani et al. (2001, p. 95) evidenciam que são três as principais características relacionadas aos processos erosivos que influenciam na modificação da paisagem, sendo eles “a quantidade ou pluviosidade total, a intensidade ou intensidade pluviométrica e a distribuição sazonal”. Na Tabela 5 apresenta-se a escala de erosividade da chuva, ou seja, seu poder de causar erosão, de acordo com a sua intensidade.

Tabela 5 - Vulnerabilidade do solo de acordo com a escala de erosividade da chuva

Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vuln.	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vuln.	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vuln.
< 50	1,0	200 – 225	1,7	375 – 400	2,4
50 – 75	1,1	225 – 250	1,8	400 – 425	2,5
75 – 100	1,2	250 – 275	1,9	425 – 450	2,6
100 – 125	1,3	275 – 300	2,0	450 – 475	2,7
125 – 150	1,4	300 – 325	2,1	475 – 500	2,8
150 – 175	1,5	325 – 350	2,2	500 – 525	2,9
175 – 200	1,6	350 – 375	2,3	> 525	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

Assim, os ambientes que apresentarem menores índices pluviométricos demonstram associação com os processos pedogenéticos, sendo atribuído a esses valores menores de vulnerabilidade, bem como em áreas em que a intensidade pluviométrica é mais elevada, por sofrerem mais com processos morfogênicos, recebem valores maiores. Acerca disso, Florenzano (2008, p. 305) destaca que:

A maior importância da intensidade pluviométrica é facilmente verificada quando se observa que uma elevada pluviosidade anual, mas com distribuição ao longo de todo o período chuvoso, tem um poder erosivo muito menor do que uma baixa precipitação, mas que ocorre torrencialmente num determinado período do ano. Esta última situação é responsável pela intensa denudação das regiões semiáridas, caracterizadas pela abundância de afloramentos rochosos e pequena

espessura do solo.

A utilização do material geocartográfico resultante de mapeamentos que utilizem metodologias com esse teor, favorecem a possibilidade de estudar os ambientes em função dos seus diversificados níveis de fragilidade, possibilitando assim a identificação de áreas menos frágeis e conseqüentemente mais favoráveis a determinados tipos de manejos, além de áreas mais vulneráveis, que necessitem de ações mais adequadas de gestão.

A partir da definição das áreas mais e menos vulneráveis é possível identificar as potencialidades e limitações existentes com base na combinação das características naturais somadas às formas de explorações de determinados ambientes, dando aos mapeamentos a característica importante de ferramenta básica a ser utilizada pelo poder público para a realização de planejamentos territorial ambiental.

Neste sentido, a análise da vulnerabilidade de um ambiente pode servir como base para a definição e execução de propostas que visem a sustentabilidade dos recursos naturais, proporcionando assim uma melhor definição das diretrizes a serem seguidas para uma melhor segmentação e utilização territorial (SPÖRL, 2001).

A intensa exploração dos recursos naturais de forma desenfreada gera a perda do equilíbrio ecodinâmico existente entre os seus elementos físicos e bióticos. Dentre os processos de degradação, os processos erosivos do solo possuem maior destaque (ROSS 1994).

1.5 Curvaturas Vertical, Horizontal, Formas de Relevo de Terreno e os processos erosivos

Os processos erosivos do solo têm se mostrado, então, ao longo do tempo e em diferentes localidades, modificadores da paisagem e, dessa forma, tem sido objeto de estudo de diversas áreas do conhecimento, inclusive a exemplo deste trabalho, a Geografia Física.

A erosão é um fenômeno bastante complexo, uma vez que envolve a ação direta ou indireta de diversos fatores, tais como as características geológicas e geomorfológicas, os tipos de solos, clima, vegetação, além da interferência humana que modifica as condições naturais de cada um deles Oliveira et al. (2018).

Inúmeros são os aspectos preocupantes relacionados aos processos erosivos. Alguns autores, como Machado (2002), associam a erosão com a degradação dos recursos naturais, principalmente do solo e da água, que vem crescendo de forma alarmante nas últimas décadas, atingindo níveis críticos com reflexo na deterioração do

meio ambiente. A ação antrópica tem aumentado a velocidade desses processos erosivos, acarretando como implicações à perda de solos superficiais, denominadas de camada fértil, o assoreamento dos recursos hídricos e completando com a poluição da água (SPÖRL, 1982).

A este respeito, Bertoni e Lombardi Neto (2008) ratificam que o desequilíbrio, em geral desencadeado pela ação do homem, costuma estar relacionado ao uso inadequado do solo, como: desmatamento, crescimento urbano desordenado, agricultura, obras de grande porte (fabricas, barragens), entre outros (Oliveira et al. (2018).

Os processos erosivos são classificados com base na forma de escoamento superficial e subterrâneo das águas da chuva, sendo eles denominados de processos laminares e processos lineares.

O processo de erosão laminar movimentada na vertente grandes volumes de sedimentos, em proporções muitas vezes maiores do que a taxa de material removido das vertentes (MOORE; BRUCH, 1986). A suscetibilidade desse tipo de erosão é que, por ser uma forma de erosão bastante difícil de ser observada, pode permanecer, às vezes, por muitos anos à vista sem que se perceba sua atuação, constatada pelo decréscimo de produção das culturas e também pelo aparecimento de raízes, ou mesmo marcas no caule das plantas onde o solo tenha sido arrastado (FENDRICH et al., 1997).

Os processos lineares apresentam concentração das linhas de fluxo superficial, resultando em pequenas incisões na superfície do terreno, que podem evoluir por aprofundamento a ravinhas (PENTEADO, 1980).

Esses processos erosivos são uma das principais causas do esgotamento das terras, podendo estes fatores serem critérios agravantes para o mapeamento da fragilidade dos ambientes (TUCCI; BERTONI, 2003).

Os mecanismos de definição e observação dos limites entre os processos erosivos laminares e os lineares são complexos de serem estabelecidos. Para tanto, Salomão, Canil e Rodrigues (2012) ratificam o debate acerca da diferenciação ou mesmo da conceituação dos tipos de processos erosivos com base na forma de escoamento superficial e subterrâneo das águas de chuva. Neste sentido, destacam

Erosão laminar ou em lençol, condicionada ao escoamento difuso; erosão em sulco, por concentração das linhas de fluxo superficial, resultando em pequenas incisões na superfície do terreno, que podem evoluir por aprofundamento a ravinhas; e erosão em boçoroca ou voçoroca, que se desenvolve por influência não somente das águas superficiais, mas também dos fluxos de água subsuperficial, onde se inclui o aquífero freático, com desenvolvimento de fenômeno de piping (SALOMÃO, CANIL e RODRIGUES, 2012, p. 40).

Sabe-se que os processos erosivos ocorrem de forma natural de acordo com as características de formação dos solos e das rochas, fazendo parte do processo de esculturação do relevo. No entanto, a intensa utilização dos recursos naturais por parte da sociedade tem acelerado esses processos, trazendo problemas muitas vezes com resultados irreversíveis.

Neste sentido, Crepani et al. (2001) explanam sobre a importância de um planejamento territorial ambiental que leve em consideração as fragilidades dos ambientes naturais diante dos distintos tipos de uso pela sociedade na natureza, tornando assim essa relação mais equilibrada. Sobre essa questão, os autores citam que:

O tipo de atividade antrópica desenvolvida sobre uma determinada unidade de paisagem natural pode representar sua destruição devido a sua pequena capacidade de absorver os estímulos advindos desta atividade econômica, enquanto que sua interação com outra unidade de menor vulnerabilidade, seguindo os sistemas de manejo mais indicados com práticas conservacionistas, pode representar uma atividade economicamente rentável (CREPANI et al., 2001, p. 17).

Relacionados à essa questão, tem-se os componentes topográficos analisados conjuntamente à utilização antrópica intensa do meio, em uma relação em que os processos erosivos são intensificados, afetando assim, nas classes de vulnerabilidade à perda de solos. Por isso é de extrema importância compreender de que forma isso ocorre.

Segundo Schimidt e Dikau (1999), a geomorfometria é definida como a caracterização numérica de formas topográficas, no qual sugere a necessidade de técnicas e modelos de classificação associados a um ambiente que possua o potencial de gerar seus índices. Os referidos autores ainda explanam que os desenvolvimentos tecnológicos e de sensoriamento subsidiaram vultosos avanços nas análises geomorfométricas, por meio do acréscimo tecnológico no uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e do Modelo Digital de Elevação (MDE).

É importante deixar em evidência que os índices geomorfométricos podem ser diferentes em cada ponto de uma superfície morfométrica de acordo com suas características genéticas, conforme Evans (1972). O autor citado ainda destaca que existe uma segunda classe de índice, como o comprimento da trajetória de fluxo, no qual descreve como as características da vertente e interflúvio interferem no fluxo. Há ainda uma terceira classe de índice, que é o escoamento inicial.

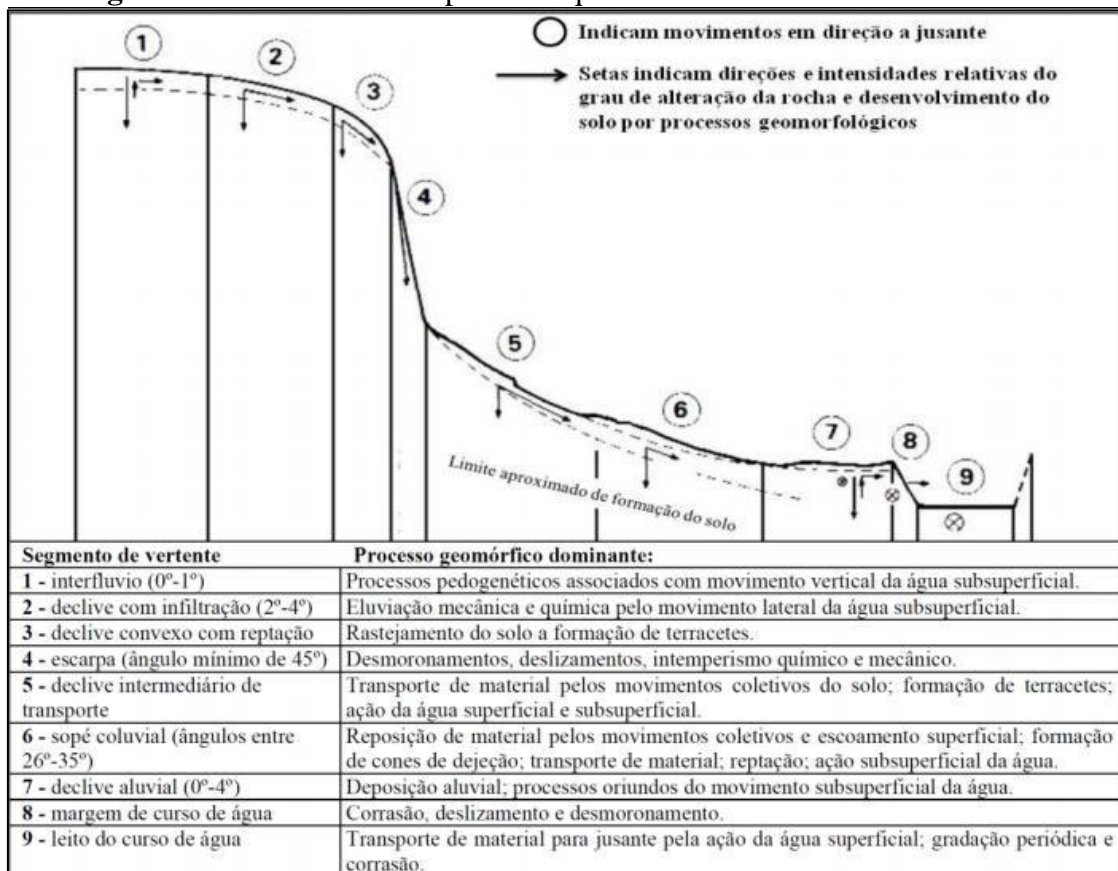
Sabendo que a vertente interfere no fluxo das águas escoadas superficialmente e conseqüentemente no processo erosivo, é que Jan Dylik (1968 citado por

CHRISTOFOLETTI, 1974) conceitua vertente como “forma tridimensional que foi modelada pelos processos de denudação, atuantes no presente ou no passado, e representando a conexão dinâmica entre interflúvio e fundo de vale”. Sobre a dinâmica de um sistema vertente Christofolletti (1974, p. 46) salienta que:

[...] a sua dinâmica pode ser estudada na perspectiva dos sistemas abertos, recebendo e perdendo tanto matéria como energia. As fontes primárias de matéria são a precipitação, a rocha subjacente e a vegetação. Enquanto as fontes originais de energia são constituídas pela gravidade e radiação solar. Os vários processos que se verificam na vertente (escoamento, meteorização, movimentos de regolito, infiltração, eluviação e outros) fazem que haja o fluxo de matéria e energia através do sistema, que acaba sendo transferido para o sistema fluvial.

Ruhe (1975) diz que uma vertente pode ser descrita por meio de três grandezas geométricas, sendo estes o gradiente que se refere à inclinação do plano horizontal; o comprimento relacionado a maior linha de inclinação; e a largura, cuja qual é a medida de forma perpendicular ao comprimento. Além desses três atributos, o autor explana que podem haver ainda outras variáveis importantes quando se refere a análise morfológicas da vertente como altitude, área real, amplitude, dentre outros. Dylik (1968) citado por Sopchaki e Sampaio (2013) afirma que isso confere o caráter tridimensional à vertente que são os limites laterais somados aos limites superior, inferior e interno.

Assim, considerando um sistema de vertente como um modelo tridimensional que se estende em uma distância que vai do interflúvio ao meio do leito fluvial e da superfície do solo ao limite superior à rocha matriz, que Dalrymple et al. (1968) dividiram a vertente em nove unidades hipotéticas, sendo estas caracterizadas de acordo com os processos genéticos de formação atuavam de forma dominante atuavam sobre ela (Figura 5).

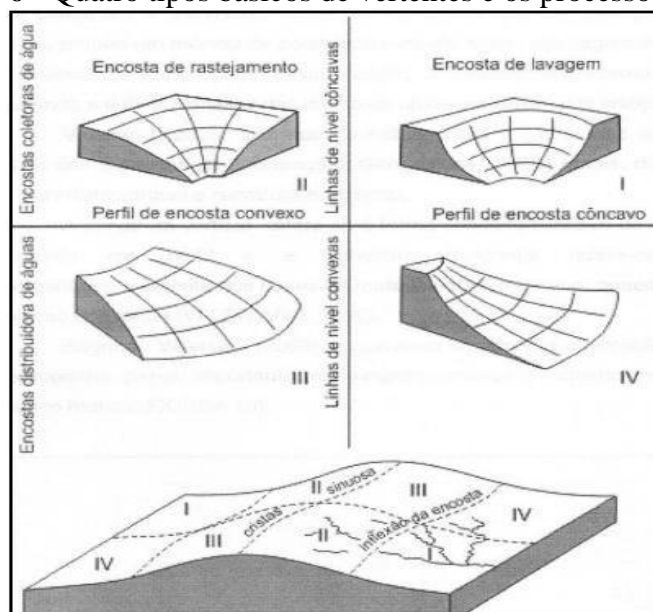
Figura 5 - Nove unidades hipotéticas que caracterizam o modelo de vertente

Fonte: Silveira (2010), adaptado de Darlymple et al. (1968).

Ao considerar as proposições de Darlymple et al. (1968), quando se fala da descrição tridimensional das vertentes, observa-se o mesmo problema pontuado por Dylik (1968), quando analisado a vertente em perfil, acaba por classificando-a como forma bidimensional.

Um dos primeiros trabalhos levando em consideração a forma tridimensional das vertentes foi elaborado por Troeh (1965), considerando a curvatura vertical e a curvatura horizontal, além de associar as vertentes à processos relacionados as águas pluviais, classificando assim as vertentes em quatro tipos principais: a) vertentes com radiais convexas e contornos côncavos (I); b) vertentes com radiais côncavas e contornos côncavos (II); c) vertentes com radiais convexas e contornos convexos (III); d) vertentes com radiais côncavas e contornos convexos (IV), como representado na Figura 6.

Figura 6 - Quatro tipos básicos de vertentes e os processos atuantes



Fonte: Troeh (1965).

Tem-se ainda Bigarella et al. (2007) que retrabalham o conceito de vertente associando-o aos processos relacionados à sua gênese. Assim, os autores supracitados apresentam a vertente como um elemento de forma tridimensional que apresenta uma modelagem partindo dos processos de denudação que já atuaram e ainda atuam na modificação do relevo, dando ênfase a conexão existente entre o interflúvio e o fundo do vale.

Valeriano (2008) revela que a partir da associação da topografia e formas de vertentes aos processos erosivos modificadores do relevo, é possível identificar as áreas que apresentem um impacto maior em relação ao grau de fragilidade frente a determinados tipos de usos, fazendo com que fiquem em evidência as áreas mais e menos vulneráveis aos processos erosivos, podendo assim, serem propostas formas manejo que melhor se adequem aos diversos tipos de ambientes.

Fagundes (2013, p. 38) descata que:

“Alguns autores como Christofolletti (2005), Iwasa (1998), Zuquette e Gandolfi (1990), entre outros, indicam em seus estudos que o mapeamento de áreas de riscos morfogênicos, bem como a elaboração de cartas de declividade das vertentes e sua conexão com a rede de drenagem, apresentam-se como importantes instrumentos capazes de avaliar as limitações referentes às práticas agrícolas e pastoris e servir de guia para orientar escolha entre as técnicas para a conservação dos solos”.

Os ambientes que possuem uma situação de estabilidade apresentam os fluxos de energia e matéria sendo processados por meio de relações em equilíbrio dinâmico, ou seja, a evolução natural dos componentes do ambiente se daria em harmonia entre si. Entretanto, algumas ações antrópicas na natureza afetam a funcionalidade do sistema e

induz processos degenerativos (CHRISTOFOLETTI, 2005).

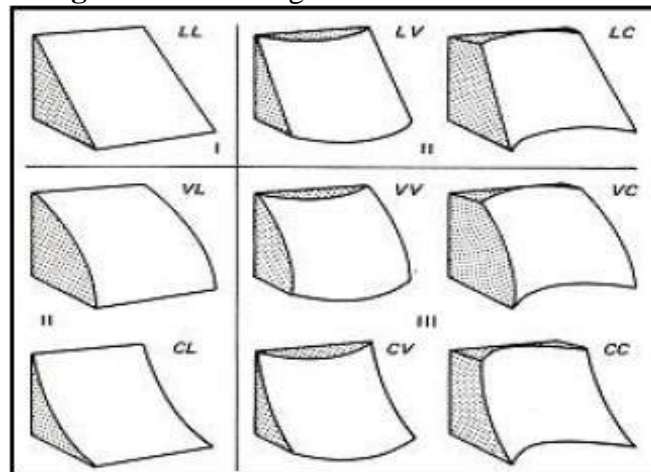
A depender do estado de equilíbrio de um determinado ambiente, os processos erosivos irão responder com intensidades diversas, na qual a partir dessa relação a intensidade de tais processos estará interligado as características de formação dos ambientes em função de sua vulnerabilidade juntamente com a erosão do solo.

Destaca-se a teoria das vertentes sendo levado em consideração ao analisar os processos erosivos relacionados aos impactos nos ambientes. A análise da inclinação de uma vertente permite a classificação da mesma em perfis de curvatura ao longo do seu comprimento e largura, sendo estas classificadas em retilíneas, quando partes da vertente indicam ângulos constantes e, variabilidade de ângulos formando curvas, sendo estas classificadas como côncavas ou convexas, quando não podem ser descritas por um simples ângulo na direção da curvatura.

Rueh (1969) evidenciou em seus estudos que as vertentes deveriam ser descritas em sua forma tridimensional moldada por processos externos à superfície, ou seja, o intemperismo e posteriormente propôs que as vertentes também poderiam ser classificadas de acordo com a sua geometria, isto é, quanto a sua forma.

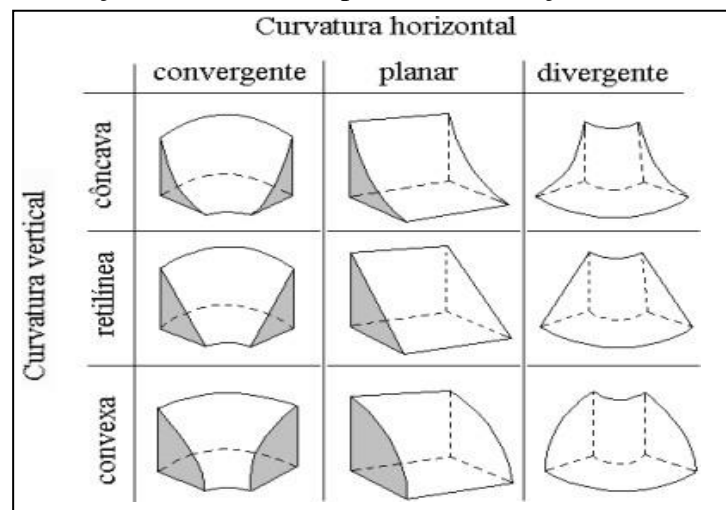
De acordo com Romão (2006), o efeito da topografia sobre os processos hidrológicos e sedimentares é reconhecido, afetando significativamente os processos de erosão e escoamento superficial. A curvatura ao longo da inclinação máxima, ou seja, do perfil (também denominada de curvatura do gradiente) define a forma da superfície nessa direção, e afeta a aceleração e desaceleração do fluxo vertical, influenciando os processos de erosão e deposição, respectivamente.

Romão (2006) faz uma indicação acerca da classificação das vertentes com relação a sua forma, sendo estas formas – retilínea (L), convexa (V) e côncava (C) - ao longo do comprimento e largura da vertente, na qual produzem em combinação novas geometrias básicas, com três grupos de complexidade. A Figura 7 sendo analisada como uma matriz, a forma mais simples (grupo I) é aquela de comprimento e largura retilíneos (LL). As superfícies do grupo II têm comprimento retilíneo com largura curva (LV, LC) ou largura retilínea com comprimento curvo (VL, CL). E as superfícies mais complexas (grupo III) têm comprimento curvo e largura curva (VV, VC, CV e CC).

Figura 7 - Formas geométricas das vertentes

Fonte: Ruch (1975).

Partindo dessa premissa, Valeriano (2008) apresenta as classes de curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e verticais (côncavo, retilíneo ou convexo) que podem ser combinadas para fornecer indicação da forma do terreno como apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno

Fonte: Adaptada de Dikau (1990) por Valeriano (2008).

Valeriano (2008) ainda aponta que as classes de forma do terreno podem ser agrupadas em função da sua de sua similaridade frente aos aspectos das condições locais de terreno, substrato e processos vigentes. Os casos extremos de combinações de curvatura do terreno são representados pela forma côncavo-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) e pela forma convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento). As combinações intermediárias têm características hidrológicas mais dependentes das relações entre as intensidades (módulos) dos efeitos individuais.

Sabe-se que o campo de análises e modelagem espacial está cada vez mais desafiador. Dessa maneira, necessita-se constantemente do desenvolvimento de novas tecnologias e teorias, de identificação de processos e procedimentos importantes, pesquisar padrões significativos, criação de visualizações de dados de modo mais efetivos, melhorar as análises espaciais e as técnicas de modelagem, providenciar estudos empíricos e experiências geográficas para que se possa chegar a um resultado que mais se aproxime da realidade de uma determinada área estudada.

1.6 O algoritmo HAND aplicado à geomorfologia

Em busca dessas novas formas de se analisar uma vertente em um contexto mais aprofundado, desenvolveu-se o algoritmo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*), que explicando suas siglas pode ser chamado de a distância vertical à drenagem mais próxima, no qual tem como objetivo exibir em nível de encostas a medição da energia potencial para diferentes bacias (BATISTA, 2012).

De acordo com Rennó et al. (2008), com o modelo HAND é possível realizar a correção topológica para impedir picos e depressões, e também correlacionar as correções de direção de fluxo. Dessa forma, é possível realizar processamentos para gerar parâmetros hidrológicos como direção de fluxo e áreas de contribuição.

Assim, o HAND funciona como uma ferramenta que apresenta a possibilidade de medir a diferença altimétrica entre qualquer ponto da grade do modelo digital de terreno e o respectivo ponto de escoamento na drenagem mais próxima, considerando a trajetória superficial de fluxo que liga topologicamente os pontos da superfície com a rede de drenagem (PIRES; BORMA, 2013). Neste sentido, os resultados alcançados por meio da utilização do referido algoritmo podem auxiliar as análises acerca dos processos erosivos intensificados pelos fluxos de água superficial nas vertentes.

Quando se analisa a topografia, tem-se uma noção direta dos mecanismos hidrológicos e sedimentares, o que passa a afetar a dinâmica dos processos erosivos modificadores da paisagem juntamente com o escoamento superficial. As condições específicas de drenagem vinculadas à vertente são as principais causas da alteração das características pedológicas do local. Assim, é de extrema importância estudos que enfatizem a análise de determinados processos.

Como proposta de adaptação metodológica, aplicou-se o algoritmo denominado de HAND que expressa as distâncias verticais acima de cada drenagem, o qual, foi elaborado em substituição ao de amplitude altimétrica, uma das adaptações em relação à metodologia adotada.

De acordo com INPE (2010), a distância vertical à drenagem mais próxima (HAND) está indiretamente relacionado com a profundidade do lençol freático, indicando maior ou menor disponibilidade de água no solo. Neste sentido, compreende-se que valores altos de distância vertical apresentados no modelo HAND indicam regiões bem drenadas, com solo pouco saturado, já as áreas com valores baixos estão próximas ao lençol freático e apresentam condições de saturação do solo. As proposições de Salomão, Canil e Rodrigues (2012), ratificam essas colocações acerca da influência da água nos processos erosivos a partir do caminho que o escoamento superficial realiza, bem como também a relação com a percolação da água, associada ao nível freático.

O HAND permite obter todos os pontos (*grid points*) de acordo com o seu potencial de drenagem, comportando uma categorização em classes equipotenciais, ou seja, de potencial gravitacional de drenagem equivalente (RENNÓ et al., 2008) o que se relaciona com a energia potencial em função do seu nível de erosão em desníveis maiores.

Esses dados são referentes a distância vertical entre o canal fluvial e o ponto mais alto da vertente, o que está diretamente relacionado com o escoamento das águas. Em função disso, para que se pudesse realizar a análise a partir do uso do algoritmo, levou-se em consideração o trabalho de Salomão, Canil e Rodrigues (2012), no qual estes fazem uma análise acerca da influência da suscetibilidade à erosão linear e laminar dos compartimentos morfopedológicos; Rennó et al., (2008), que apresentaram a proposta de um fatiamento de classes do HAND; e Nobre et al. (2011), que atualizaram esse fatiamento ao proporem a classificação do terreno em 4 classes, sendo estas Alagamento (até 5 metros), Ecótono (de 5 a 15 metros), Encostas (de 15 m a 50 m), e Topos de morro (maior que 50 m) (Quadro 6).

Como é possível observar no Quadro 2, a classificação do HAND com relação à perda de solos se dá a partir da ideia de que, quanto maior o desnível maior é a energia potencial para desencadear perda de solos. Neste sentido, quanto maior o desnível e do curso d'água, mais vulnerável determinado ambiente se apresenta.

Quadro 2 - Classificação do HAND quanto à vulnerabilidade à perda de solo

Classes de suscetibilidade		Distância de classificação	Comportamento Hídrico do Terreno	Comportamento Erosivo em Relação às Formas de Uso e Ocupação
1 (Baixa)	Suscetíveis a ravinas e não suscetíveis a voçorocas	0 a 5 m Baixo/Alagamento	Aquífero freático situado a pequena profundidade ou aflorante, apresentando elevado gradiente hidráulico em solos hidromórficos e/ou com erodibilidade muito alta, situados, em geral, em áreas de nascentes, fundos de vales, e de cabeceira de cursos d'água.	Áreas muito favoráveis à instalação de fenômenos de piping, onde as voçorocas se desenvolvem logo após a destruição da cobertura vegetal natural, independente das formas de ocupação.
1,5 (Moderada)	Moderadamente suscetíveis a ravinas e pouco suscetíveis a voçorocas	5 a 15 m Transição/Ecótono Erosão Linear	Áreas favoráveis à concentração de fluxos de água por escoamento superficial e subsuperficial, em geral situadas em terrenos com certa declividade, associados a solos muito erodíveis, apresentando alto gradiente textural, como observado nos Argissolos.	Os processos de ravinamento se desenvolvem em função da ocupação do solo a partir de pequena concentração das águas de escoamento superficial; fenômenos de piping que condicionam a formação de voçorocas somente se manifestam quando as ravinas se aprofundam, interceptando o nível freático.
2,0 (Moderadamente alta)	Muito suscetível a ravinas e pouco suscetíveis a voçorocas	15 a 50 m Encostas, Erosão Laminar	Áreas de dissipação dos fluxos de água, mal drenadas com predomínio de solos rasos, facilitando rápida infiltração da água de chuva; entretanto a cobertura pedológica constituída por solos pouco coesos permite fácil remoção das partículas por escoamento das águas superficiais.	Processos erosivos por ravinamento ocorrem condicionados a grandes concentrações das águas de escoamento superficial, devido a determinadas formas de ocupação que favorece os caminhos preferenciais das águas, como exemplo, estradas, arruamentos, caminhos de serviços, trilhas de gado e cercas; fenômenos de piping desenvolvendo voçorocas somente ocorrem quando o aprofundamento da ravina interceptar o nível freático. Em geral, são áreas com declividades suficientes para permitir o escoamento das águas superficiais, constituído por solos de textura arenosa ou textura média, como o Neossolo Quartzarênico e Latossolo de textura média.
3,0 (Alta)	Extremamente suscetível a ravinas e voçorocas	> 50 m Topo	Áreas favoráveis à concentração dos fluxos de água por escoamento superficial, entretanto a cobertura pedológica apresenta grandes profundidades e com ausência de lençol freático.	Ravinamentos ocorrem condicionados à declividade das encostas, e a determinada forma de ocupação, que favorece a concentração das águas de escoamento superficial.

Fonte: adaptado de Salomão, Canil e Rodrigues (2012), Rennó et al. (2008), Nobre et al. (2011) e Barbosa (2020).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O suporte metodológico baseia-se na abordagem sistêmica, proposta de origem soviética, mas que teve uma ampla disseminação a partir do esboço metodológico de Bertrand (2004) e propostas de Tricart (1977) acerca da ecodinâmica dos ambientes. Esta abordagem é amplamente utilizada nos estudos ambientais.

A presente pesquisa foi desenvolvida em três etapas. A primeira delas consistiu na obtenção dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) que foram adquiridos no banco de dados da *United States Geological Survey* (USGS) com resolução de 30 m. Como realizado em Freires et al. (2019), a aquisição das variáveis morfométricas deu-se conforme metodologia descrita por Valeriano (2008) a partir do modelo digital de elevação. Para análise multicritério foi utilizado como referência Crepani et al. (2001), que atribuíram valores de estabilidade (1 a 3) às categorias morfodinâmicas estabelecidas na ecodinâmica de Tricart (1977). Cabe mencionar que a presente pesquisa apresenta uma adaptação apenas no parâmetro geomorfologia da metodologia de Crepani et al. (2001).

Na segunda etapa da pesquisa, realizou-se o processamento dos dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com o intuito de extrair as variáveis morfométricas (declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal e HAND), a partir da ferramenta *Spatial Analyst* do *software* ARCGIS/ESRI 10.3. Em seguida, foram definidas as classes temáticas das variáveis e, posteriormente, reclassificadas utilizando a ferramenta *Reclassify* do *software* ARCGIS/ESRI 10.3, com o objetivo de transformar os intervalos dessas classes para valores inteiros.

Atribuiu-se valores para os temas de Geomorfologia (formas das vertentes, HAND, declividade), Geologia (grau de coesão das rochas), Pedologia (Erodibilidade), Clima (Erosividade das chuvas) e Uso e ocupação das terras.

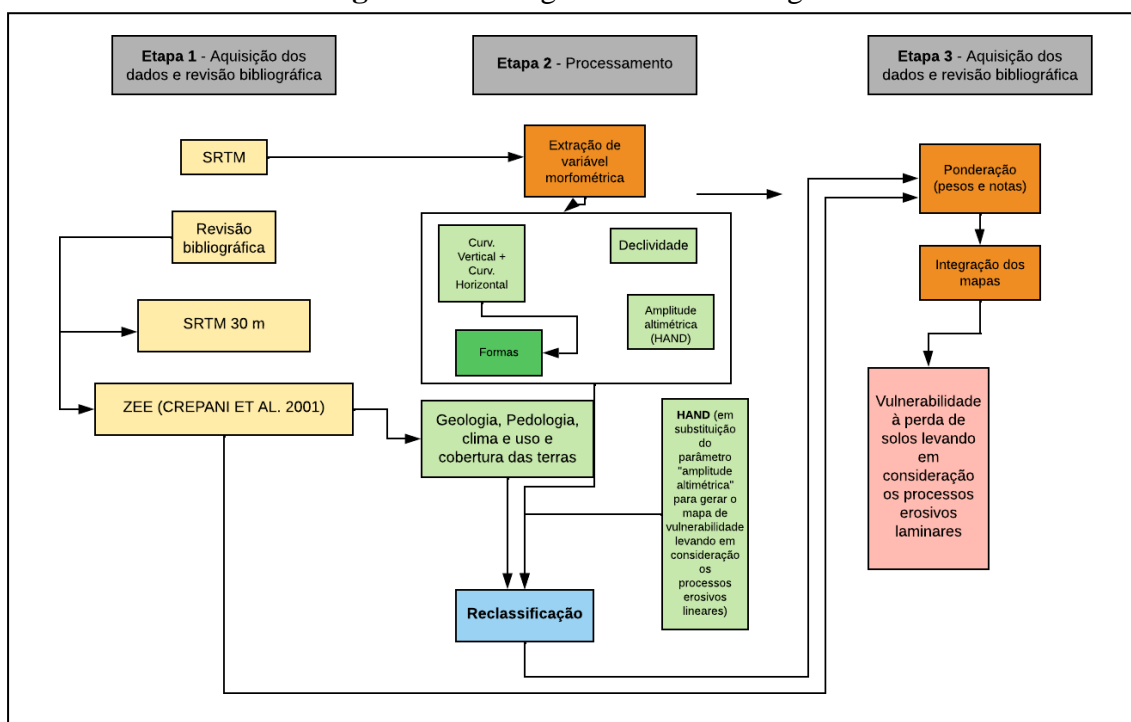
Adaptando a metodologia de Crepani et al. (2001), utilizou-se as curvaturas de relevo (Curvaturas Verticais e Horizontais – formas de relevo), juntamente com o HAND em substituição ao parâmetro de “índice de dissecação do relevo” e “amplitude altimétrica”, respectivamente. O processamento do algoritmo HAND, no qual foi o parâmetro empregado na confecção do mapa de vulnerabilidade que levasse em consideração os processos erosivos lineares, se deu por meio da utilização do *software TerraView* 4.2.0. Empregou-se também, em conjunto com os parâmetros anteriormente citados para a nova classificação, a proposta de Salomão, Canil e Rodrigues (2012), Rennó et al. (2008) e Nobre et al. (2011), para analisar o funcionamento hídrico para determinar a suscetibilidade a erosão laminar e linear.

A terceira e última etapa correspondeu à álgebra de mapas realizada a partir da

aplicação da média aritmética após atribuição o peso (valor) para cada classe de cada tema. Nesta etapa, para cada variável analisada foram estabelecidos valores em conforme o grau de importância para o fenômeno analisado. Ao final desta etapa foram gerados dois mapas de vulnerabilidade ambiental, um levando em consideração os processos laminares e outro os processos erosivos lineares. Por meio da referida proposta, apresenta-se a possibilidade de fornecer subsídios para o ordenamento territorial da área estudada.

Na Figura 9 estão representados os processos metodológicos fundamentais para a realização da presente pesquisa.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Adaptado de Freitas et al. (2019). Org. Própria autora (2024).

2.1 Procedimentos técnicos-operacionais

Os procedimentos técnico-operacionais são fundamentais para o alcance dos objetivos traçados na pesquisa em questão. As etapas apresentadas a seguir resultaram da análise de material que constem em dados referentes à área de estudo existentes em imagens SRTM (curvas de nível, pontos cotados e hidrografia), utilizados em trabalho de campo, bem como em mapeamentos temáticos (geológico, geomorfológico e pedológico), sites oficiais (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Serviço Geológico do Brasil – CPRM e Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais – CEPRO) para busca de informações referente ao clima (intensidade e distribuição pluviométrica) e interpretação de imagens de satélite para confecção do mapa de uso e cobertura das terras, bem como pesquisa de campo.

2.2 Procedimentos metodológicos

2.2.1 Mapas intermediários

A primeira etapa da presente proposta consistiu na construção do banco de dados, com a compilação dos mapeamentos temáticos ou produção de mapas derivados que possuem o papel de subsidiar informações para a aplicação do método utilizado (Quadro 3).

Quadro 3 - Informações de metadados das fontes utilizadas na pesquisa

Parâmetros	Fonte	Escala/Resolução	Observações
Geologia	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)	1:400.000	Dados litológicos especificados do ano de 2004
Solos	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) (IBGE)	1:250.000	Dados do ano de 2014
Declividade	SRTM	90/30 m	Foram obtidos os dados e refinados da resolução espacial original (~90m) no formato GRID para (~30m)
Precipitação	SUDENE (1990)	1:250.000	Séries históricas de 30 anos
Uso e cobertura das terras	MapBiomias	1:100.000	Imagem do ano de 2021

Hidrografia	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)	1:100.000	Recorte da drenagem da bacia do rio Longá
--------------------	--	-----------	---

Fonte: Organização própria autora (2024).

2.2.2 Vulnerabilidade ambiental

A análise da vulnerabilidade ambiental baseia-se na metodologia proposta por Crepani et al. (2001), devidamente adaptada conforme equações abaixo:

(Equação 1)

$$V = \frac{G + C + S + UC + R}{5}$$

Onde:

V = Vulnerabilidade;

G = Geologia;

C = Clima;

S = Solos;

UC = Uso e Cobertura das Terras;

R = Geomorfologia;

Sendo:

$$R = \frac{F + HAND + D}{3} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

R = Vulnerabilidade para o tema Geomorfologia;

F = Vulnerabilidade atribuída às Formas de Relevo;

HAND = Vulnerabilidade atribuída ao HAND;

D = Vulnerabilidade atribuída à Declividade;

Para que se atribua os determinados valores aos ambientes mapeados, foram levadas em consideração as seguintes características de cada parâmetro (Quadro 4).

Quadro 4 - Parâmetros e suas respectivas características de análise da vulnerabilidade

Parâmetro	Característica
Geologia	Grau de coesão das rochas

Parâmetro	Característica
Geomorfologia	Declividade Índice de dissecção (substituído pelas formas de relevo: curvatura vertical e horizontal). Amplitude altimétrica (substituído pelo HAND)
Pedologia	Grau de amadurecimento dos solos
Uso e cobertura das terras	Biomassa da vegetação e tipos de uso
Clima	Intensidade pluviométrica (pluviosidade anual/duração do período chuvoso)

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

2.2.2.1 Geologia

Para que se realizasse a caracterização geológica foram utilizados os dados da CPRM (2004), e os referidos dados do recorte espacial utilizados nesta pesquisa foram trabalhados no *software* ARCGIS/ESRI 10.3, e posteriormente foi recortado e confeccionado o esboço geológico.

Para que se pudesse estimar as classes de fragilidade do fator geologia, aplicou-se a metodologia de Crepani et al. (2001) no qual leva-se em consideração o grau de coesão das rochas. A Tabela 6 apresenta o grau de vulnerabilidade de cada Formação Geológica que compõe a área de estudo.

Tabela 6 - Grau de vulnerabilidade de cada unidade geológica da BHRM

Litologia	Valor de Vulnerabilidade
Formação Longá – Folhelho, Arenito e Siltito	2,0
Poti – Folhelho, Arenito e Siltito	2,0
Pedra de Fogo – Folhelho, Arenito e Siltito	2,0
Piauí – Arenito, Argilito, Folhelho e Siltito	2,5
Barreiras – Argilito arenoso e Arenito conglomeráticos	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

2.2.2.2 Erodibilidade dos solos

Para que se fizesse possível a análise da erodibilidade dos solos, utilizou-se o

fator K da RUSLE (Equação Universal de Perda de Solos Revisada), na qual vem sendo bastante utilizada e alcançando bons resultados em trabalhos com esse teor.

É importante destacar que foi realizado campo com coleta de amostras de perfis representativos das unidades de mapeamento de solos.

Com base na análise exclusiva do fator K que compõe a equação, foi possível chegar aos valores de erodibilidade para a área em questão. Desta maneira, Tomaz (2013) destaca que a erodibilidade dos solos pode ser equacionada da seguinte forma:

(Equação 3)

$$K = [2,1 \times 10^{-4} \times M^{1,14} \times (12 - k_a) + 3,25 \times (k_b - 2) + 2,5 \times (k_c - 3)] \times 0,001313$$

Onde:

K = fator de erodibilidade do solo (ton/MJ)/(mm/h). **k_a** = % de matéria orgânica;

k_b = coeficiente relativo à estrutura do solo;

k_c = classe de permeabilidade;

M = (% silte + % areia muito fina) x (100 - % argila).

Tomaz (2013) exemplificou como calcular o fator de erodibilidade K usando a equação citada anteriormente, considerados valores hipotéticos, sendo:

k_a = 2,5%; **k_b** = 3,5; **k_c** = 2,5; % de argila = 13% e % silte + % areia muito fina =

36%. **M** = (% silte + % areia muito fina) x (100 - % argila). **M** = 36 x (100 - 13) = 3132.

Substituindo na Equação: $K = [2,1 \times 10^{-4} \times 3132^{1,14} \times (12 - 2,5) + 3,25 \times (3,5 - 2) + 2,5 \times (2,5 - 3)] \times 0,001313$ obtém-se o seguinte valor de K:

$$K = 0,03 \text{ (ton/MJ)/(mm/h)}$$

A Tabela 7 a seguir mostra a definição das classes de erodibilidade do solo.

Tabela 7 - Definição das classes de erodibilidade

Classe	Fator K (t*ha/MJ*mm)	Crepani
Baixa	0.020 – 0.039	1
Moderada	0.039 – 0.053	2
Alta	0.053 – 0.066	3

Fonte: adaptado de Tomaz (2013).

2.2.2.3 Erosividade das chuvas

O clima é analisado a partir do parâmetro erosividade das chuvas (R). Um fator da Equação Universal de Perdas de Solos, considerado por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) como o principal agente causador de erosão no solo, que varia de acordo com a duração, a intensidade e a distribuição das chuvas, conforme exposto na Equação 4.

$$E = 67,355 (r^2 / P)0,85 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

E = média mensal do índice de erosão (t/ha.mm/h);

r^2 = precipitação média mensal em mm

P = precipitação média anual em mm

O procedimento inicial para elaboração da Erosividade das chuvas (R) foi a realização de levantamento de postos pluviométricos, junto ao site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), com dados disponíveis para a área da Bacia Hidrográfica do Rio Marataoan. Considerou-se a série histórica de 30 anos (1981 a 2010), logo, foram selecionados 4 (quatro) postos pluviométricos.

Os dados de precipitação foram organizados em planilhas eletrônicas e, em seguida, empregados para estimativa da Erosividade das chuvas (R), utilizando método indireto, conforme Equação 4, elaborada por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992). O referido método estima com relativa precisão os valores de R para longos períodos, baseando-se em regressão linear entre o índice médio mensal de erosão e o coeficiente de chuva, tendo boa aceitação entre os pesquisadores brasileiros. Os dados de 'r' foram obtidos das planilhas de dados pluviométricos das 4 (quatro) postos pluviométricos, supracitados.

O emprego desta equação justifica-se em face da carência de dados obtidos de modo direto para a área da pesquisa, aliada a aplicações de estudos semelhantes ao aqui proposto, já realizados no estado do Piauí, a exemplo dos estudos de Aquino (2010), Santos (2015) e Leal (2019).

Para realizar a espacialização dos dados do fator R no SIG QGIS, foi, inicialmente, criada uma camada de texto delimitado para inserção dos dados dos postos pluviométricos e, em seguida, exportada no formato vetor do tipo ponto, com sistema de referência SIRGAS 2000 UTM 23S. Feito isso utilizou-se o vetor para geração de arquivo matricial (*raster*) por meio da ferramenta interpolação e método peso pelo inverso da distância (IDW). O produto resultante foi reclassificado a partir da ferramenta *r.reclass*, tendo sido delimitadas 5 (cinco) classes, conforme está disposto na tabela 8. Na sequência foi convertido o arquivo matricial em arquivo vetorial do tipo polígono, que foi utilizado como arquivo de entrada para recorte da área de interesse, nesse caso a Bacia Hidrográfica do Rio Marataoan.

Neste íterim, os dados de "R" foram obtidos das planilhas de dados pluviométricos

de 3 estações da rede hidrogeológica da SUDENE (1990), presentes no Estado do Piauí e 1 no Estado do Maranhão, sendo este último identificadas com Caxias (Quadro 5).

Quadro 5 - Postos pluviométricos utilizados para a obtenção dos dados “r” da BHRM, Piauí.

Município	Nome do Posto	Latitude	Longitude	R
Caxias	Caxias	43°25’	04°49’	9598,6
Esperantina	Esperantina	42°13’	04°16’	11016,9
Piripiri	Piripiri	41°47’	04°16’	9530,9
Teresina	Teresina	42°48’	05°01’	10104,9

Fonte: SUDENE (1990).

Com base nos dados pluviométricos obtidos das 4 estações, estabeleceram-se as seguintes classes de erosividade das chuvas (Tabela 8).

Tabela 8 - Intervalos de Erosividade das chuvas (R), classes atribuídas.

Intervalos de R (MJ.mm/ha.h.ano)	Classes atribuídas
10.044,00 a 10.150,8	Muito baixa
10.150,81 a 10.257,6	Baixa
10.257,61 a 10.364,4	Média
10.364,41 a 10.471,2	Alta
10.471,21 a 10.578,1	Muito alta

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

É importante destacar que o uso deste parâmetro é uma adaptação à proposta de Crepani et al. (2001), uma vez que o mesmo considera a intensidade da chuva e não a erosividade para determinar a vulnerabilidade do fator clima.

2.2.2.4 Uso e cobertura das terras

O levantamento das classes de uso e cobertura das terras da bacia hidrográfica do rio Marataoan apresenta-se como uma adaptação metodológica de Crepani et al. (2001), uma vez que o mesmo utiliza a análise do tema vegetação, sendo esta substituída pela do uso e cobertura das terras.

A confecção do mapa de uso e cobertura das terras consistiu na extração dos dados do projeto MapBiomias. Os mapas de cobertura e uso da terra disponibilizados são mapas no formato matricial (pixel de 30 m x 30 m). A legenda destes mapas, assim como o período coberto, evolui ao longo das coleções. Os mosaicos de imagens de satélite para cada ano da série histórica, com resolução espacial máxima de 30 m, são formados pela composição dos pixels representativos de cada conjunto de imagens de

um local num determinado período de tempo (ex.: filtrando as nuvens). Os períodos do ano em que são selecionadas as imagens variam conforme a região, tema ou bioma. Cada mosaico contém até 105 camadas de informação incluindo as bandas espectrais, frações e índices (ex.: NDFI, NDVI, etc). Este projeto permite, por fim, o acesso gratuito e rápido a dados de qualidade em diferentes escalas (Souza et al., 2020).

Dessa forma, foram adquiridos os dados do ano de 2021 para compor a presente análise de vulnerabilidade. A definição inicial das classes de mapeamento para a área de estudo foram as seguintes: agropecuária, floresta, formação natural não florestal, solo exposto, área urbana e corpos d'água. Portanto, após a definição das classes citadas, foram atribuídos valores de vulnerabilidade para as classes de uso e cobertura das terras (Quadro 6), segundo o que foi sugerido por Crepani et al. (2001), denominado por ele de casos especiais.

Quadro 6 - Valores de vulnerabilidade para uso e cobertura das terras

Uso e Cobertura das Terras	Vulnerabilidade
Floresta	1,0
Formação natural não florestal	1,5
Corpos d'água	2,0
Agropecuária	3,0
Solo exposto	3,0

Fonte: Metodologia adaptada pelo autor com base em Crepani et al. (2001).

2.2.2.5 Geomorfologia (*formas de vertentes, HAND e declividade*)

Para que se fizesse possível a determinação dos valores de vulnerabilidade para o tema geomorfologia, seguiram-se adaptações ao que foi proposto por Crepani et al. (2001). Com base nos índices morfométricos do terreno, foram produzidos mapas de Declividade Média, Formas das vertentes e de altura acima da drenagem mais próxima (*Height Above Network Drainage – HAND*), esses dois últimos, substituindo os temas sugeridos por Crepani et al. (2001), dissecação do relevo e amplitude altimétrica, respectivamente. Posteriormente, foram atribuídos valores para cada categoria, em cada mapa.

- Declividade

A determinação das classes de declividade baseou-se no Modelo Digital de Elevação (MDE), que foi obtido por meio da rede de triângulos irregulares (TIN) com curvas de nível com distâncias de 1 m em 1 m, no intuito de se alcançar melhores

resultados em sua modelagem. O agrupamento dos valores em categorias se deu por meio de adaptações nas classes sugeridas em Crepani *et al.* (2001), com base nas características locais do relevo. As classes aqui utilizadas se deram a partir do processamento de imagens e utilizando a quebra natural das mesmas. Neste sentido, as classes de declividade de acordo com Lohar, Balasubramani e Bhatt (2018), são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Classes de declividade e referidos valores de vulnerabilidade

Classes Morfométricas	Declividade (%)	Classes de vulnerabilidade
Muito Baixa	< 4	1,0
Baixa	4 – 8	1,5
Média	8 – 16	2,0
Alta	16 – 24	2,5
Muito Alta	> 24	3,0

Fonte: Lohar, Balasubramani e Bhatt (2018) e Crepani et al. (2001).

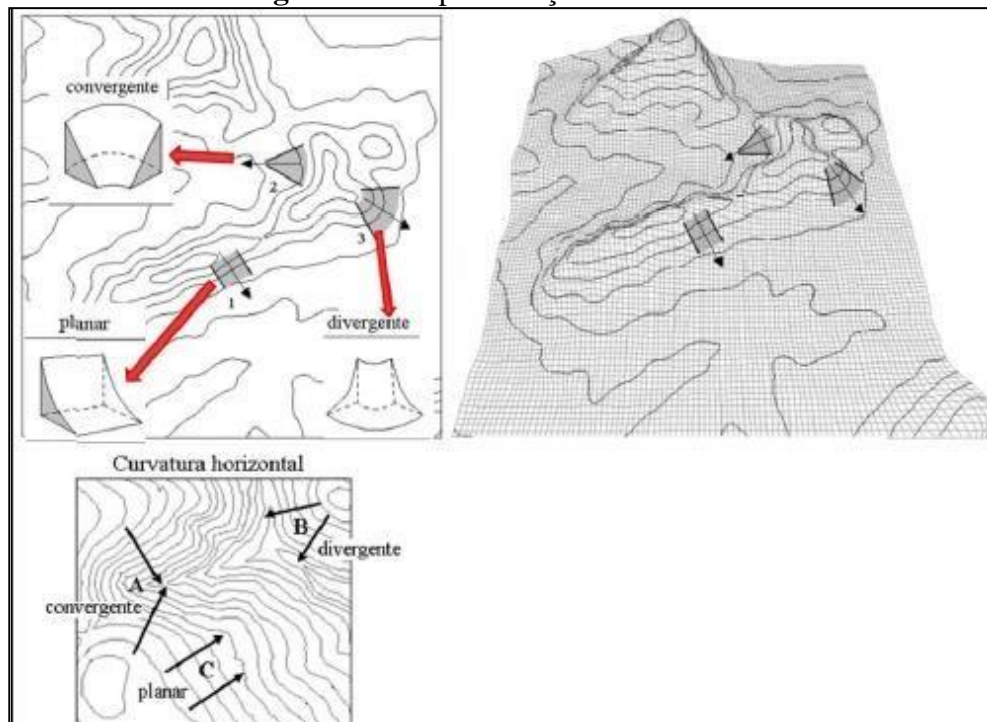
- Curvaturas Vertical, Horizontal e Mapa de Formas de Relevo de Terreno

O material cartográfico utilizado foi obtido através do processamento e da análise de dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), retirados do Banco de dados Topodata/INPE, tratadas no *Software* ARCGIS 10.3 e estabelecida uma nova projeção, em um sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) fuso 23, hemisfério sul. Esse material auxiliou na elaboração dos mapas temáticos de curvaturas horizontal e vertical do relevo.

Após a execução dos padrões de curvatura horizontal e vertical estipulados por Valeriano (2008), o Modelo Digital de Elevação (MDE) foi inserido no ambiente de SIG (Sistemas de Informações Geográficas) e fatiado em classes temáticas. O fatiamento consiste na conversão de um Modelo Digital em um Modelo Temático.

Em seguida, foi possível a geração de temáticas de curvatura vertical e horizontal, dispostas em três classes distintas, sendo estas, para curvatura vertical, as classes côncavas, retilíneas e convexas e, para curvatura horizontal, as classes convergente, planar e divergente, como disposto na Figura 10, a seguir.

Figura 10 - Representação de curvaturas



Fonte: Valeriano e Albuquerque (2010).

O processo de implementação do plano de informações correlacionado à Forma do Terreno derivou da combinação das curvaturas Vertical e Horizontal que, por meio da linguagem de programação espacial do SIG (Álgebra de Mapas) no ARCGIS/ESRI 10.3.

Para o cálculo da curvatura utilizou-se o programa ARCGIS/ESRI 10.3 segundo McCoy & Johnston (2002), no qual o referido cálculo parte de uma equação quadrática conforme a Equação 5 a seguir.

$$Z = Ax^2y + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad \text{Equação (5)}$$

A curvatura é representada em uma equação derivada de segunda ordem, onde é responsável por uma representação média das formas de relevo; após o alcance do resultado de cada pixel para aquisição dos valores das curvaturas, é possível chegar nas respectivas curvaturas horizontais e verticais do relevo. Para este resultado, deve-se relacionar células vizinhas a partir da Equação 6.

$$\eta = -2(D + E) * 100 \quad \text{Equação (6).}$$

As classes de curvatura vertical (côncavo, retilíneo ou convexo) e horizontal

(convergente, planar ou divergente) ao serem combinadas originam diferentes formas do terreno.

Após a realização da sobreposição dos mapas de formas do relevo horizontal e vertical com o auxílio do método de álgebra cartográfica, consegue-se produzir as formas do relevo. Propondo valores para cada curvatura, a intersecção desses valores simula uma determinada forma, conforme indicado na Tabela 10 os valores atribuídos para análise das formas de relevo.

Tabela 10 - Índices estipulados para cada curvatura para representar os tipos de formas de relevo

	Convergente	Planar	Divergente
Côncavo	11	12	13
Retilíneo	21	22	23
Convexo	31	32	33

Fonte: Silva Neto (2013) Adaptado de Valeriano (2008).

Agrupou-se a cada pixel, de curvatura horizontal e vertical, valores prefixados determinados para cada classe de curvatura, com isso, cada célula matricial foi representada e especializada com os devidos valores, apresentados na Tabela 7.

Após a associação dos valores dos pixels, a intersecção das células permitiu identificação dos tipos de forma de relevo de acordo com o seu padrão de concentração ou dispersão do escoamento superficial realizado na tabela de atributos do *software* ARCGIS/ESRI (Figura 11).

Figura 11 - Formas do relevo



Fonte: Silva Neto (2013) Adaptado de Valeriano (2008).

O Quadro 7 apresenta as classes de vulnerabilidade para o parâmetro curvatura, seguindo como adaptação da metodologia de Crepani et al. (2001).

Quadro 7 - Classes de formato das vertentes e vulnerabilidade à perda de solos de acordo com a concentração de fluxos de escoamento superficial

Curv. Horizontal	Curv. Vertical	Forma do Terreno	Sigla	Valor para a vulnerabilidade
Convergente	Côncavo	Côncavo-convergente	cc-cg	1,0
	Retilíneo	Retilíneo-convergente	rt-cg	1,0
	Convexo	Convexo-convergente	cv-cg	1,0
Planar	Côncavo	Côncavo-planar	cc-pl	2,0
	Retilíneo	Retilíneo-planar	rt-pl	3,0
	Convexo	Convexo-planar	cv-pl	3,0
Divergente	Côncavo	Côncavo-divergente	cc-dg	2,0
	Retilíneo	Retilíneo-divergente	rt-dg	2,0
	Convexo	Convexo-divergente	cv-dg	3,0

- HAND – *Height Above the Nearest Drainage*

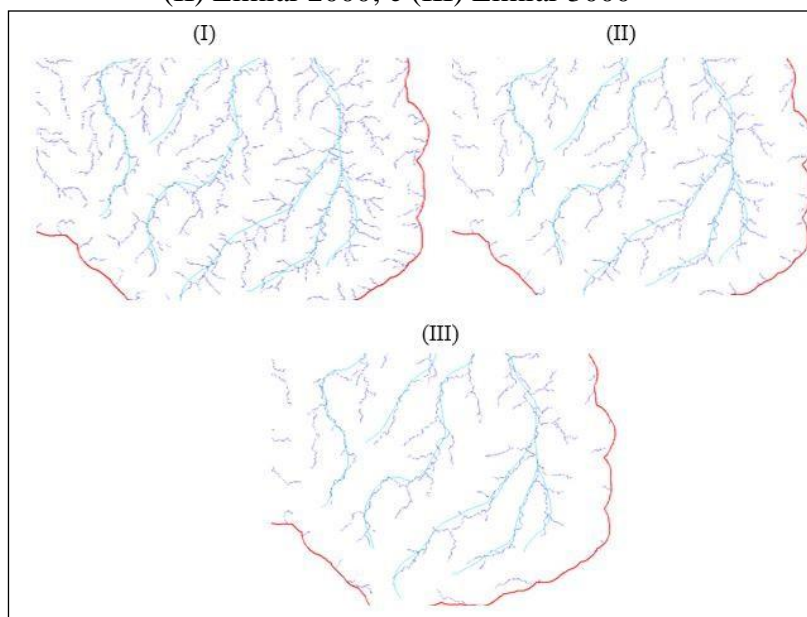
Para que se pudesse gerar os dados e obter as informações necessárias para o tema Geomorfologia, realizou-se adaptações ao que foi proposto na metodologia de Crepani et al. (2001). Seguindo os índices morfométricos do terreno a serem levados em consideração, utilizou-se a altura acima da drenagem mais próxima (*Height Above Network Drainage* – HAND) em substituição aos dados de amplitude altimétrica.

As informações foram extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE), no qual permitiu os processamentos iniciais para gerar o modelo do HAND. Utilizou-se o *software TerraViewHidro 4.2.0*,/INPE (RENNÓ et al., 2008), em conjunto com o *plug-in TerraHidro 0.4.1*, para a realização das modelagens hidrológicas. Para a classificação e finalização dos dados, utilizou-se o *software ARCGIS/ESRI 10.3*.

Os processamentos se realizaram inicialmente com a criação de um banco de dados no *software TerraView 0.4.2* a partir da importação do Modelo Digital. Em

seguida utilizou-se o *plug-in* “*TerraHidro 0.4.1*” para modelagem do MDE, corrigindo o mesmo e gerando uma grade de direção de fluxo (*Drain Direction*), fluxo acumulado (utilizando a ferramenta “*Basic Tools*”). A partir dessa etapa, gerou-se um arquivo rede de drenagem, o que possibilitou a indicação de um parâmetro limiar de área de contribuição mínima, para avaliar uma célula do MDE como pertencente à rede de drenagem (Figura 12).

Figura 12 - Representação da adequação dos limiares para o HAND: (I) Limiar 1000; (II) Limiar 2000; e (III) Limiar 3000



Fonte: Própria Autora (2021).

A partir do arquivo de rede de drenagem, foi escolhido um limiar por meio de testes, como sugerido por Rennó et al., (2008). Com os dados obtidos foi gerado o mapa com valores do HAND e posteriormente salvo em formato “imagem” (em formato TIFF), que foi levado para o programa ARCGIS/ESRI 10.3, para classificação e finalização, no qual aplicou-se a ponderação de valores correspondentes à vulnerabilidade para o HAND.

O modelo HAND foi classificado de acordo com Rennó et al., (2008), e Nobre et al. (2011), e adaptado de acordo com as classes de vulnerabilidade de Crepani et al. (2001). As classes, os intervalos e os valores de vulnerabilidade constam na Tabela 11.

Tabela 11 - Fatiamento das classes do HAND

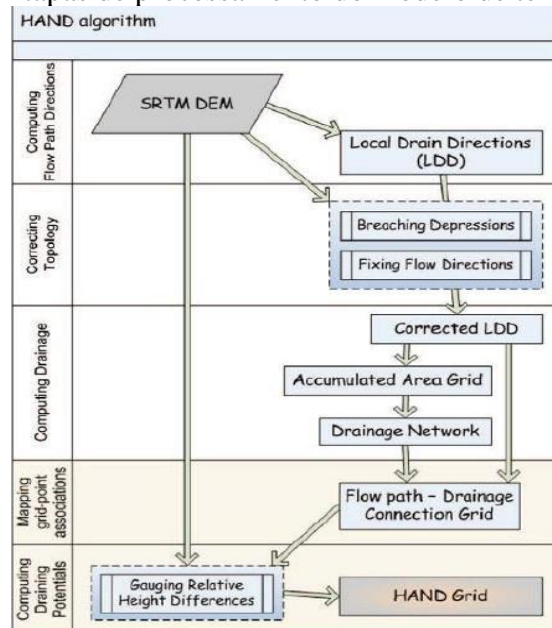
Classes	Metros (m)	Valor de vulnerabilidade
Alagamento	Até 5 m	1,0
Ecótono	5 a 15 m	1,5
Encostas	15 a 50 m	2,0

Topos de morros	> 50m	3,0
-----------------	-------	-----

Fonte: Rennó et al., (2008), e Nobre et al. (2011), Org. Própria autora (2021).

As etapas de processamento do modelo de terreno HAND são especificadas claramente em Rennó et al. (2008) e de forma resumida na Figura 13.

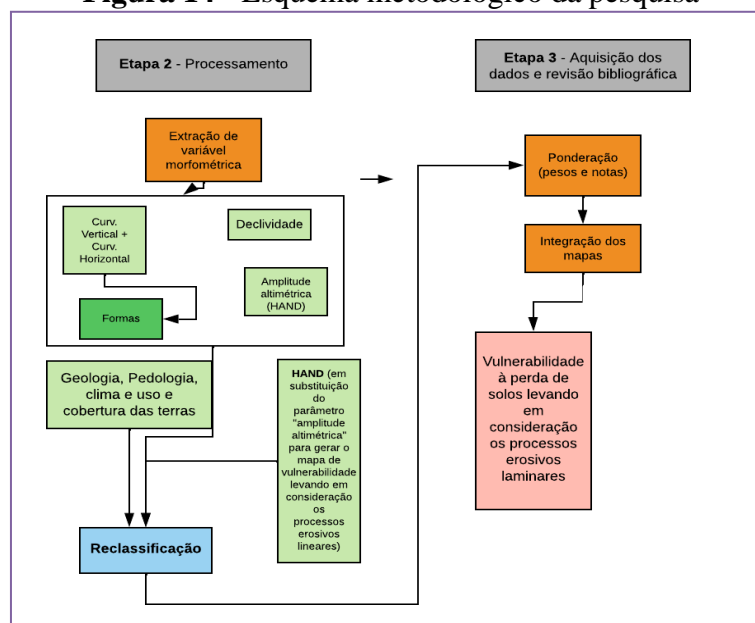
Figura 13 - Etapas de processamento do modelo de terreno HAND



Fonte: Rennó et al. (2008).

Objetivando uma melhor compreensão do que foi executado anteriormente, a Figura 14 aponta um esquema para obtenção da nova proposta de mapeamento de vulnerabilidade ambiental.

Figura 14 - Esquema metodológico da pesquisa

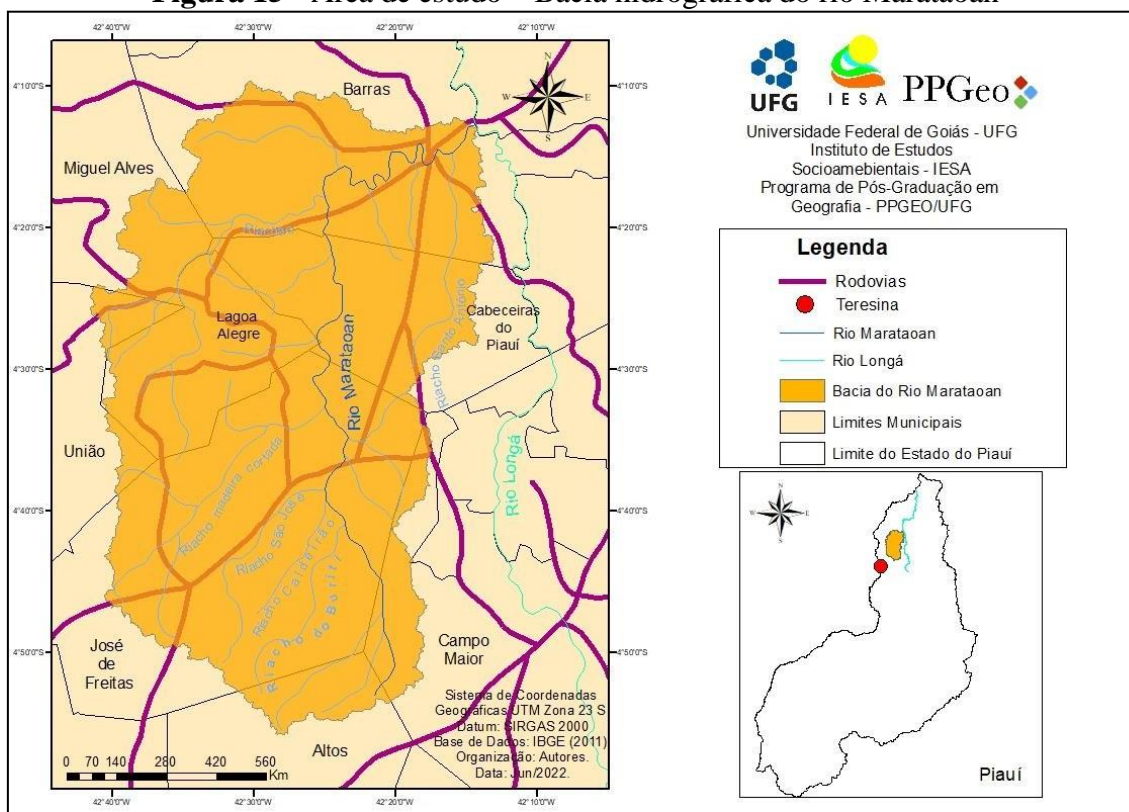


Fonte: Própria autora (2021).

3 CARACTERIZAÇÃO FISIOGRAFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MARATAOAN, PIAUÍ

O recorte espacial utilizado para a realização da presente pesquisa encontra-se inserido no médio/baixo curso da bacia do rio Longá, identificada como bacia do rio Marataoan (Figura 15), que ocupa aproximadamente 2987,9 km² de extensão do total da bacia. Os municípios inseridos na referida área identificam-se como Barras, Miguel Alves, Cabeceiras do Piauí, Lagoa Alegre, União, José de Freitas, Campo Maior e Altos.

Figura 15 - Área de estudo – Bacia hidrográfica do rio Marataoan



O rio Marataoan é afluente direto do rio Longá, e tem sua nascente na localidade conhecida como “Quintas”, entre os municípios de Altos e José de Freitas, e desagua no rio Longá no município de Barras, a uma altitude de 140 m. Apresenta 100 km de extensão total do seu curso (RÊGO, 2007).

É importante salientar que várias nomenclaturas foram identificadas para o rio principal em questão, porém adotou-se a nomenclatura do IBGE (1990) denominada de rio Marataoan.

3.1 Condições geológicas

A descrição da estrutura geológica de uma determinada área estudada permite conhecer a vulnerabilidade das rochas às intempéries naturais. Pois na análise e definição da morfodinâmica da paisagem, a geologia compreende as informações relacionadas à história da evolução geológica do ambiente, bem como o grau de coesão das rochas. De forma geral, ao passo que em rochas pouco coesas ocorre morfogênese, por outro lado, em rochas bastante coesas predomina a pedogênese (VALERIANO, 2008).

No que concerne à geologia regional, a área de estudo encontra-se totalmente inserida no domínio de uma bacia sedimentar, e suas formações se dispõem sucessiva e paralelamente em camadas sub-horizontais, com um mergulho suave no sentido oeste, portanto, para o interior da Bacia Sedimentar Maranhão-Piauí (CPRM, 2004). As formações presentes na bacia do rio Marataoan são: Longá (1,64%), Poti (que corresponde a 55,1% da área total), Piauí (18,8%), Pedra de Fogo (2,6%) e Barreiras (21,6%).

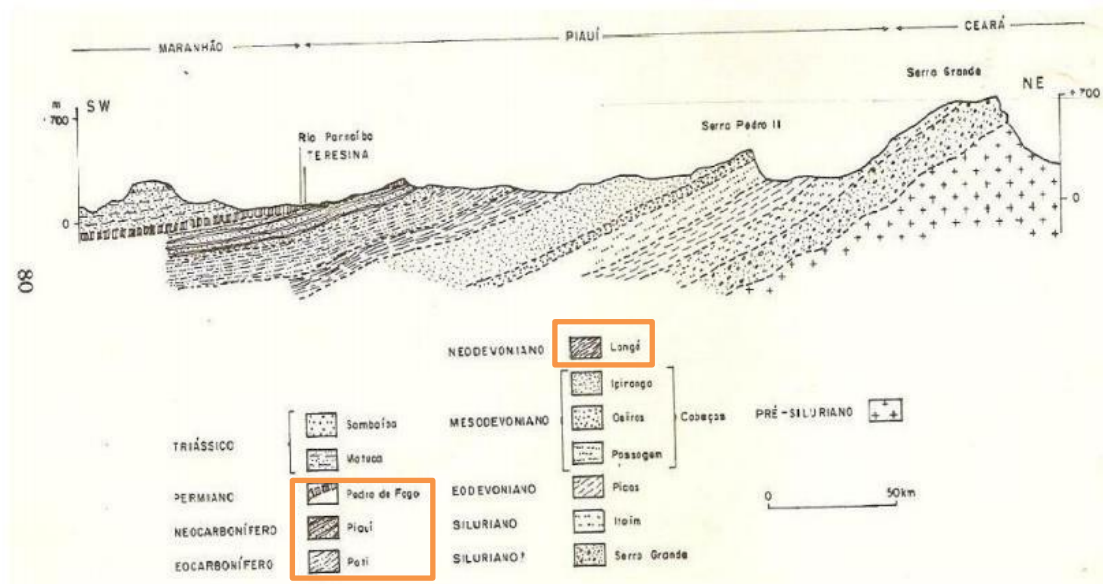
De acordo com Lima (1982), a sedimentação da bacia sedimentar Maranhão-Piauí procedeu-se em ciclos de duração e intensidade variados, comandados pela ação das transgressões e regressões marinhas durante o Siluriano e Devoniano, sobre uma estrutura geológica que se rebaixou lentamente em consequência de perturbações da crosta terrestre, verificadas a partir do Pré-Cambriano. Assim, as camadas sedimentares foram sendo sobrepostas umas sobre as outras, formando a Bacia Sedimentar Maranhão-Piauí (Figura 16 e 17) por meio da atuação da ação da deposição.

Figura 16 - Seção Geológica Esquemática da Bacia do Parnaíba

Fanoeróico	Terciário	Neógeno	23,5	Nd Depósitos Detríticos e/ou Lateríticos (d): sedimentos arenosos, areno-argilosos e lateríticos		
			ENb Grupo Barreiras: arenitos e conglomerados, com intercalações de siltitos e argilitos			
	Mesozóico	Cretáceo	Paleógeno	65	ENd Formação Dois Irmãos: arenitos, conglomerados e pavimentos seixosos, lateritizados	
				Bacia Sanfranciscana		
		Jurássico	Mesozóico	Paleógeno	135	K1ps Formação Sardinha: basaltos e diabásios (134 Ma Ar-Ar) K1a Grupo Areado: arenitos, siltitos, folhelhos e conglomerados
					K1s Formação Santana: folhelhos, calcários, argilitos, margas e evaporitos. Ambientes marinho e estuarino	
					K2e Formação Exu: arenitos caulníticos, siltitos e conglomerados (fluvial entrelaçado)	
					K2u Grupo Urucua: arenitos com estratificação cruzada de grande porte, arenitos conglomeráticos, pelitos	
		Triássico	Mesozóico	Paleógeno	203	J2c Formação Corda: arenitos, argilitos e folhelhos. Ambientes desértico, fluvial e lacustre
					J2pb Formação Pastos Bons: arenitos, folhelhos e calcários. Ambientes desértico, fluvial e lacustre	
Permiano		Mesozóico	Paleógeno	250	T12s Formação Sambaiba: arenitos bimodais com estratificação cruzada de grande porte. Ambientes desérticos, dunas eólicas	
				P12pf Formação Pedra de Fogo: arenitos, folhelhos, calcários e silexitos. Ambientes marinho raso e litorâneo		
Devoniano	Paleozóico	Paleógeno	295	C2pl Formação Piauí: arenitos, siltitos, folhelhos e calcários. Ambientes continental fluvial e litorâneo, com intercalações marinhas		
			Grupo Canindé			
			C1po Formação Poti: arenitos, siltitos e folhelhos. Ambientes deltaico e litorâneo			
			D3C1l Formação Longá: folhelhos e siltitos. Ambiente marinho raso			
Siluriano	Paleozóico	Paleógeno	410	D2c Formação Cabeças: arenitos e siltitos. Ambientes fluvial, estuário e marinho raso		
			D2p Formação Pimentelras: arenitos, siltitos e folhelhos. Ambiente marinho raso			
			435	Ssg Grupo Serra Grande: conglomerados, arenitos e intercalações de siltitos e folhelhos. Ambientes fluvial entrelaçado, marinho raso e glacial		

Fonte: Mendes (1971).

Figura 17 - Perfil geológico e topográfico da Bacia Sedimentar Maranhão-Piauí

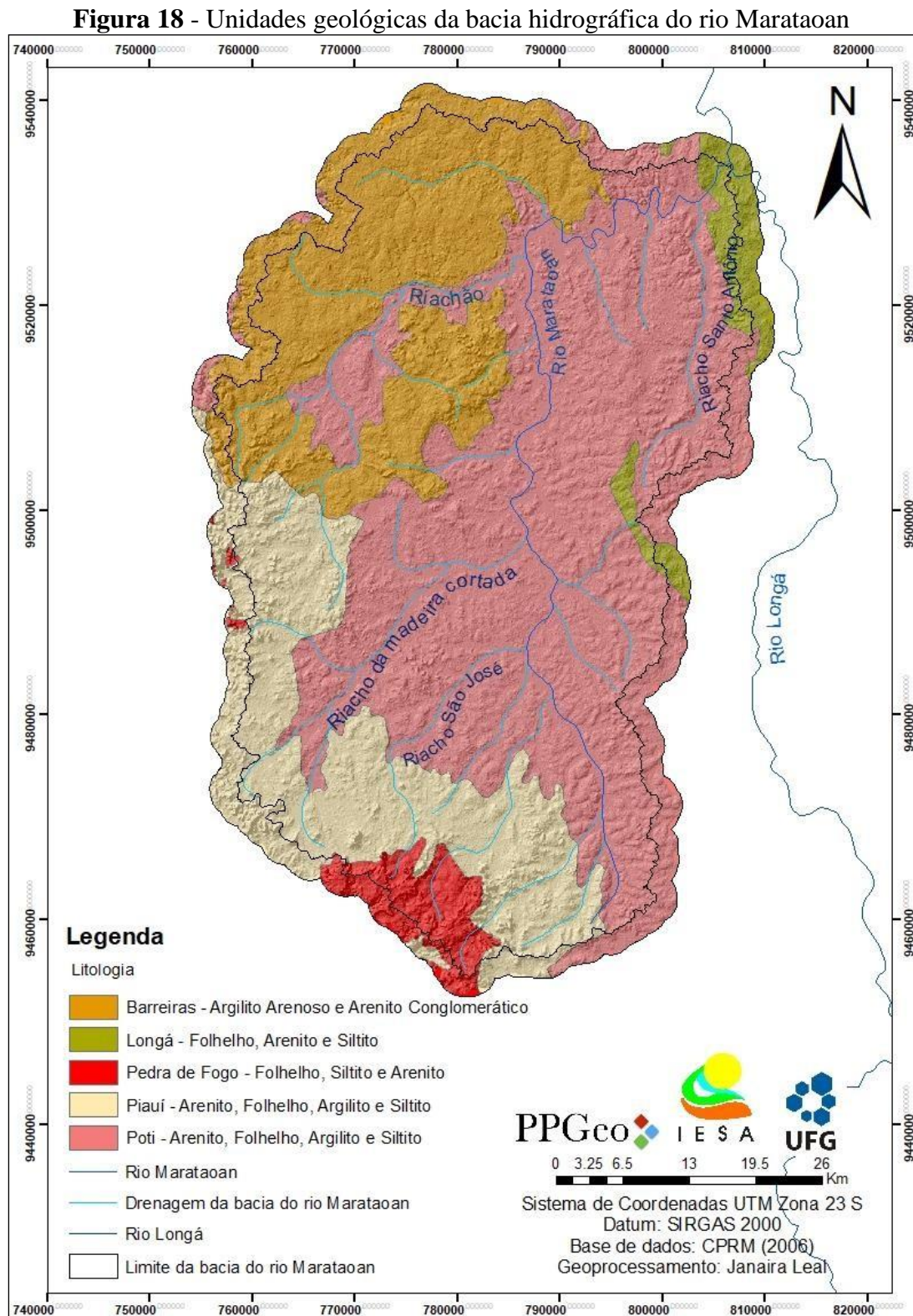


Fonte: Mendes (1971).

A Formação Longá resultou da sedimentação Devoniana nessa bacia compreendendo principalmente arenitos, folhelhos e siltitos. A Formação Poti e Piauí apresentam em sua composição arenito, folhelhos e siltitos, e sedimentos da Formação Barreiras sendo estes compostos por arenitos argilosos, de tons avermelhados, creme ou amarelados, às vezes litificados, com granulação variando de fina a média, com grãos mal selecionados e subarredondados. A Formação Pedra de Fogo apresenta composição mineralógica de arenitos, siltitos folhelhos avermelhados, amarelos e róseos com leitões

de sílex e calcárioossilífero e gipsita (RADAM, 1973).

O mapa da Figura 18 apresenta a disposição das formações geológicas e sua litologia para a bacia hidrográfica do rio Marataoan.



3.1.1 Formação Longá

A Formação Longá data do devoniano superior, constituindo-se por folhelho e

siltito cinza-médio e arenito branco, fino e argiloso e apresenta em cerca de 51,3% da área estudada. Apresenta uma existência de folhelhos que possuem um sistema de diaclasamento que dá origem à existência das grandes lajes exploradas em Campo Maior. Possui uma espessura estimada em 100 a 150 m (BAPTISTA, 1981).

3.1.2 Formação Poti

Com relação às Formações presentes na área de estudo a Poti apresenta-se como a mais recente constituída no ciclo de sedimentação marinha, sendo formada por Arenito cinza-esbranquiçado intercalado e laminado com folhelho e siltito. Representando o Grupo Canidé, identifica-se também uma intensa presença de falhas, algumas associadas a diques, e, sedimentação continental (BAPTISTA, 1981). A referida Formação apresenta uma abrangência em torno de 55,1% da área de estudo.

3.1.3 Formação Piauí

Fazendo parte do Grupo Balsas e datada do Carbonífero Superior, a presente Formação é constituída por arenito cinza-esbranquiçado, predominantemente fino a médio e bem selecionado, eventualmente conglomeráticos, folhelho vermelho e calcário esbranquiçado (CPRM, 1995). Apresenta-se em um total de 18,8% da área total estudada.

3.1.4 Formação Pedra de Fogo

A referida Formação é constituída sílex e calcário olítico e pisolítico, creme a branco, eventualmente estromatolítico, intercalado com arenito fino-médio amarelado, folhelho cinzento e anidrita franca. São característicos desta Formação os troncos petrificados de *Psaronius*. Se apresentando em cerca de 2,6% da área de estudo, a presente Formação remonta ao Permiano Inferior a Médio fazendo parte do Grupo Balsas (CPRM, 1995).

3.1.5 Grupo Barreiras

O presente grupo é formado por sedimentos pouco ou nada consolidados constituídos por argila de coloração variada, associada a camadas arenosas e níveis sílticos ou conglomeráticos, e se apresenta em cerca de 21,6% da área total da bacia do rio Marataoan, encontrando-se na parte norte da referida bacia. É possível notar a presença de areias semi-consolidadas, feldspáticas, conglomeráticas e com estratificações cruzadas (BAPTISTA, 1981). As camadas de sedimentos do presente grupo, recobrem áreas da porção norte da bacia estudada, associadas aos tabuleiros que

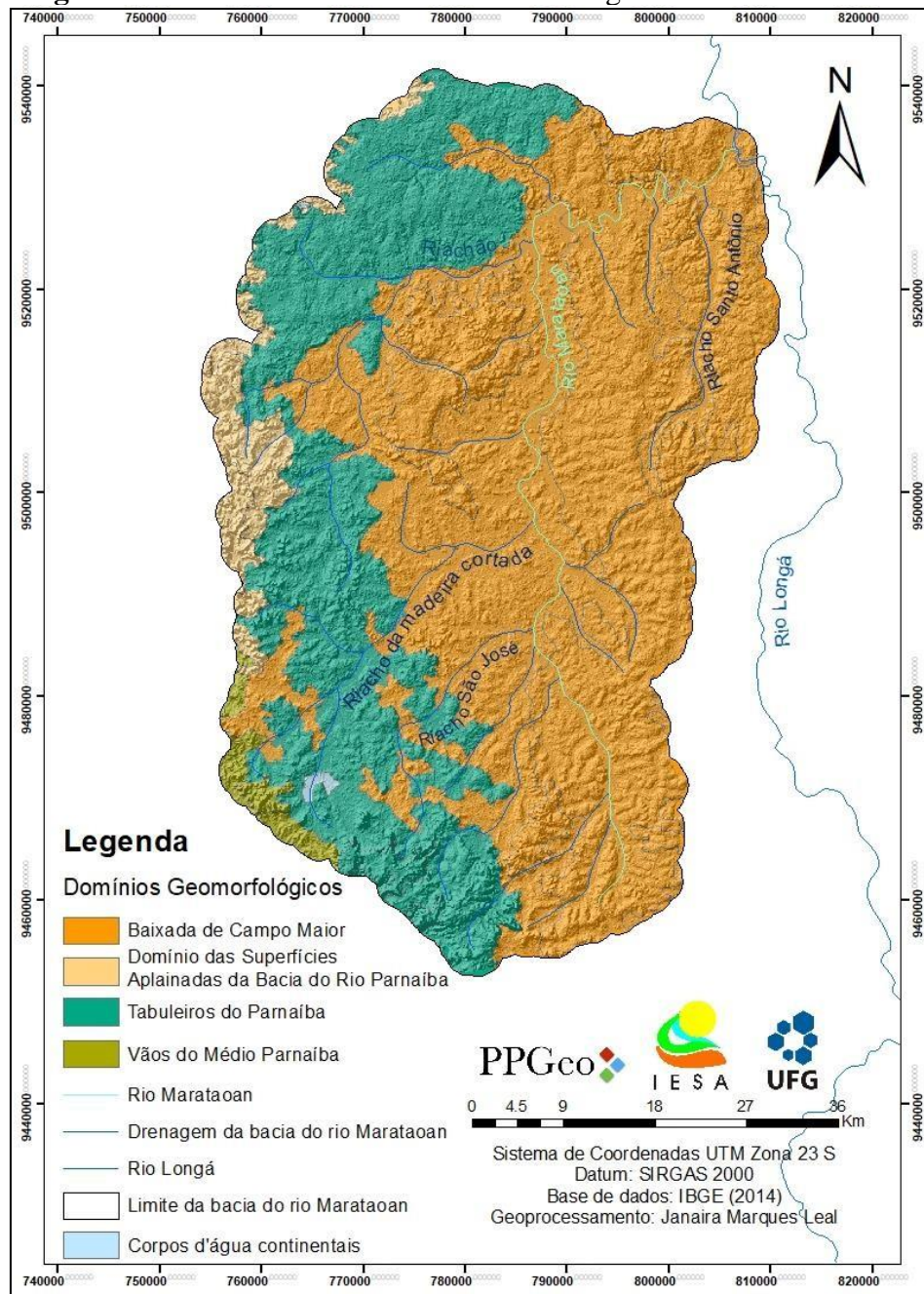
se destacam no relevo da área (RADAM, 1973).

Com relação ao referido grupo, encontram-se os depósitos aluviais e lacustres, que são compostos essencialmente por areias, cascalhos, siltes e argilas, com ou sem matéria orgânica, compreendendo os sedimentos fluviais e lacustres recentes (BRANDÃO, CAVALCANTE & SOUZA, 1995).

3.2 Condições geomorfológicas

As unidades de relevo encontradas na área de estudo são aquelas feições esculpidas pelos agentes relacionados a dinâmica externa do globo, que atuaram e ainda atuam na sua modificação, possuindo uma grande influência no atual clima da região. Neste sentido, o relevo da BHRM pode ser dividido em 03 (três) unidades distintas, sendo estas: 1) Baixada de Campo Maior; 2) Patamares do Parnaíba; e 3) Tabuleiros do Parnaíba (CPRM, 2014), como apresentado no mapa da Figura 19.

Figura 19 - Unidades de relevo da bacia hidrográfica do rio Marataoan



3.2.1 Baixada de Campo Maior

Esta unidade de relevo compreende as áreas deprimidas da região de Campo maior, situada no baixo curso do rio Parnaíba, drenada pelo rio Longá e seus afluentes. Trata-se de uma extensa depressão (Figura 20), contendo áreas alagadiças, resultantes da baixa permeabilidade das seqüências pelíticas dos sedimentos da Formação o Longá aí aflorantes. Dessas seqüências derivam solos predominantemente plúnticos e concrecionários (CPRM, 2014).

Essa é a unidade geomorfológica de maior expressão espacial da bacia, abrangendo uma área de aproximadamente 1.970,6 km², o que corresponde a

aproximadamente 6% da extensão territorial da BHRM.

Figura 20 - Fotografia da área localizada na unidade geomorfológica Baixada de Campo Maior no município de José de Freitas



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

3.2.2 Domínio das Superfícies Aplainadas da Bacia do Rio Parnaíba

A presente unidade geomorfológica Domínio das Superfícies Aplainadas da Bacia do Rio Parnaíba, outrora denominada Patamares do Rio Parnaíba (IBGE, 1995), consiste em uma vasta superfície arrasada por processos de erosão generalizada do relevo em diferentes níveis altimétricos, invariavelmente em cotas baixas, entre 50 e 300m. Observa-se nessas superfícies de aplainamento ambientes suavemente ondulados, promovidas pelo arrasamento dos terrenos e posterior retomada erosiva proporcionada pela incisão suave de uma rede de drenagem incipiente (CPRM, 2014). Essa unidade corresponde a aproximadamente 1,8% da área total da bacia, o que em valores absolutos equivale a 54,5 km².

3.2.3 Tabuleiros do Parnaíba

Ocupando em torno de 32,2%, o que corresponde a cerca de 960,6 km² da área total da BHRM, os Tabuleiros do Parnaíba (Figura 21) correspondem a sedimentos paleo-mesozóicos, referentes a afloramentos das formações geológicas Longá e Poti. Observa-se nessa unidade geomorfológica que nos interflúvios predominam feições tabulares esculpidas sobre arenitos e siltitos recobertos por material areno-argiloso, do qual derivam Latossolos Amarelos álicos e distróficos; e Podzólicos vermelho-amarelos álicos. Esses tabuleiros terminam em rampas com declives de 2 a 5%.

Figura 21 - Fotografia da área localizada na unidade geomorfológica Tabuleiros do Parnaíba no município de Lagoa Alegre



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

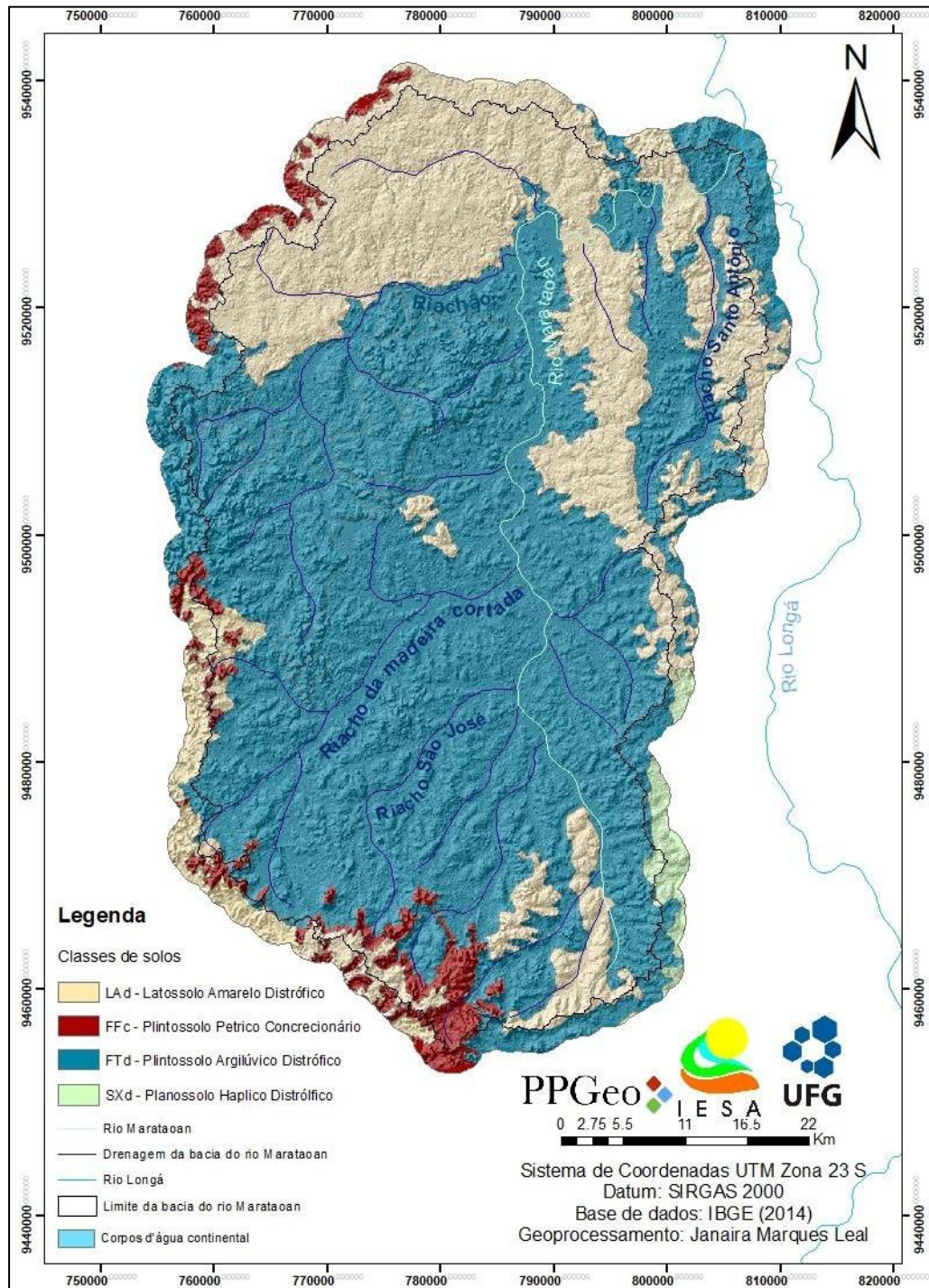
3.3 Condições Pedológicas e fitogeográficas

É importante salientar a importância de se trabalhar os componentes ambientais de forma integrada, uma vez que esses componentes se encontram em constante interação na paisagem, tornando assim o todo indissociável (SOUZA, 2005).

Sabe-se que para se compreender a origem e evolução dos solos é importante levar em consideração que estes estão atrelados aos fatores que caracterizam os condicionantes litológicos, climáticos e de relevo no decorrer da história da terra (SANTOS, 2011), os quais fazem com que esses solos se materializem em compartimentos individuais e/ou de forma associativa.

Assim, utilizou-se como base o mapeamento do Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014) disponibilizado no *site* da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), para o reconhecimento das classes de solos da BHRM (Figura 22).

Figura 22 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do rio Marataoan



Apresentando uma extensão de 72,3 km², cerca de 2,3% da área total da bacia, os Plintossolos Pétricos Concrecionários (Figura 23) apresentam-se geralmente como solos bem drenados, com presença de concreções em seus perfis, apresentando uma maior ocorrência nas Regiões Centro-Oeste e Norte de alguns platôs na Amazônia, como também na presença de vegetação campestre ou Cerrado (IBGE, 2007).

Figura 23 - Presença de Plintossolo Pétrico Concrecionário encontrados na BHRM no município de José de Freitas



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Os Plintossolos Argilúvicos (Figura 24) são identificáveis por apresentarem uma drenagem mais restrita e horizonte plínticos, caracterizados principalmente por cores mosqueadas ou variegadas, apresentando, portanto, tons desde vermelhos a acinzentados. É também esse tipo de solo no qual necessita-se de um manejo mais adequado, devido a sua baixa drenagem, podendo ter consequência o endurecimento da plintita (IBGE, 2007). É o solo mais abundante na área estudada, com 2.184 km², correspondendo a 70,3% da area total da bacia, e localizado em toda a porção central.

Figura 24 - Presença de Plintossolo Argilúvico Distrófico na BHRM no município de Campo Maior



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Apresentando uma área de 843 km², o que corresponde a 27,1% da área total da BHRM, os Latossolos são constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico, abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte superficial. São solos em estágio de intemperização avançado. Os Latossolos Amarelos Distróficos (Figura 25) se apresentam como solos profundos, de coloração amarelada perfis muito homogêneos, com boa drenagem, baixa fertilidade natural e boas propriedades físicas em sua maioria (IBGE, 2007).

Figura 25 - Presença de Latossolo Amarelo Distrófico presente na BHRM no município de Cabeceiras do Piauí



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Por fim, os Planossolos (Figura 26), apresentam uma extensão de 4,2 km², correspondendo a 0,1% da área de estudo, são solos minerais que apresentam uma imperfeição em sua drenagem, chegando até a serem caracterizados como mal drenados. Apresentam horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, textura mais leve, contrasta abruptamente com o horizonte B ou com transição conjugada. Geralmente, com acentuada concentração de argila e permeabilidade lenta a muito lenta (IBGE, 2007).

Embora o mapeamento apresente a presença de Planossolos em uma pequena porcentagem, em trabalho de campo foram identificadas manchas de Planossolos em vários pontos da área de estudo.

Figura 26 - Presença de Planossolo Háptico Distrófico presente na BHRM no município de José de Freitas



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Para além da análise dos outros componentes ambientais já discutidos, destaca-se a cobertura vegetal como de fundamental importância para a caracterização da área, uma vez que esta torna possível, por meio de um olhar integrado, a análise dos fatores ambientais e antrópicos aos quais a mesma encontra-se submetida. Assim, compreende-se também a sua associação com as classes de solos encontradas na região como assim apresenta o Quadro 8.

Quadro 8 - Associação das unidades fitogeográficas e as classes de solos presentes na BHRM

Unidade Fitogeográfica	Classes de solos
Caatinga	Plintossolo Pétrico Concrecionário Plintossolo Argilúvico Latosolo Amarelo Distrófico Planossolo Háptico Distrófico
Cerrado	Plintossolo Pétrico Concrecionário Plintossolo Argilúvico Latosolo Amarelo Distrófico

Fonte: Adaptado de Souza (2005).

A BHRM apresenta pequenas porções do seu território cobertas com vegetação nativa e sucessionais. Isso se deve ao fato de que as formas de ocupação marcaram a supressão da vegetação para o desenvolvimento de atividades diferenciadas, com ênfase para o desmatamento em função da produção agrícola, a pecuária e a própria expansão urbana, sobretudo no município de Barras e José de Freitas.

Em uma porção da área nota-se a vegetação de Cerrado em dois subtipos: campos de cerrado e cerradão. A vegetação Savânica ocupa as partes mais elevadas, e a Estepe, é comum a presença de extensos carnaubais (Figura 27), é observada nas áreas baixas e propensas a serem alagadas periodicamente. Comumente no contato Savana/Estepe estão presentes espécies vegetais como Murici, goiabinha, araçá, jatobá, pinhão, aroeira-da-praia, jurema preta, quebra-faca, lixeira, entre outros. Na Baixada de Campo Maior ocorrem espécies características do contato Savana/Floresta estacional, onde é frequente a ocorrência de espécies como a aroeira, braúna, jatobá, pau-ferro, jacarandá, mangabeira, angico-de bezerro, sucupira, coração-de-negro, entre outros (CPRM, 2001).

Figura 27 - Carnaubais presentes na área de estudo no município de José de Freitas



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Outro tipo vegetacional identificado na área de estudo é caatinga arbórea e arbustiva associando-se aos terrenos de domínio sedimentares, estando presente em toda a BHRM, sendo a primeira caracterizada por sua vegetação com poucas folhas e atualmente observada apenas em algumas áreas restritas, sendo ainda dividida em caatinga arbórea densa e caatinga arbórea aberta; a segunda, caatinga arbustiva caracterizada principalmente pela uniformidade do estrato arbustivo, sendo ainda está dividida em caatinga arbustiva densa e caatinga arbustiva aberta (RADAMBRASIL, 1973). A Figura 28 retrata este compartimento presente na área estudada.

Figura 28 - Presença de Caatinga arbustiva na BHRM no município de Cabeceiras do Piauí



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Ao considerar a realidade local, com base nos trabalhos de campo, percebe-se nitidamente que há um intenso processo de uso e ocupação da terra em vários setores da bacia estudada, sobretudo à medida que se aproxima das áreas urbanas.

3.4 Condições climáticas e hidrológicas

O diagnóstico das condições hidroclimáticas da BHRM é de suma importância para a percepção do conjunto dos diversos componentes geoambientais presentes nesta porção do espaço piauiense, uma vez que, o fator clima influencia na distribuição e disponibilidade dos recursos hídricos e, controla a ação dos processos exógenos que ocorrem na superfície da Terra.

Lima (2006) citado por Aquino, Dias e Santos (2016) destaca em seu trabalho que o espaço piauiense sofre a atuação de três massas de ar: a mEc, com características quente e úmida; mTa, sendo esta por sua vez quente e seca; e mEa, caracterizadas por ser quente e úmida. A ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), é o principal sistema causador de chuvas no Estado durante o outono enquanto a mTa é responsável pela ausência de chuvas na primavera e no inverno, porque permanece sobre o espaço semiárido a maior parte do ano.

A BHRM encontra-se inserida na bacia do rio Longá. Assim, pode-se aferir que o clima da área de estudo, segundo a classificação de Köppen é do tipo Aw, quente e úmido com estação chuvosa no outono, com início no verão. A temperatura média situa-se em torno de 26°C a 28°C, submetida a variações em função da estação chuvosa. A média das máximas é da ordem de 32°C a 34°C, enquanto a média das mínimas é da ordem de 20 °C a 22°C, com uma umidade relativa do ar em média de 70% a 75%, crescendo de sudeste para noroeste, e precipitação média anual em média de 1.200 mm/ano (EMBRAPA, 2004).

De acordo com RADAMBRASIL (1981) a avaliação do potencial de recursos hídricos apresenta a disponibilidade de água superficial e subsuperficial, por meio da integração das diversas fases do ciclo hidrológico no continente, incluindo a precipitação, o escoamento superficial, a infiltração, a evapotranspiração e o armazenamento em subsuperfície (SOUZA, 2005).

A hidrografia é uma das principais variáveis utilizadas para se entender a dinâmica de formação de uma bacia hidrográfica, permitindo, nesse sentido, avaliar as diferentes dinâmicas, interações ecossistêmicas e fluxos de massa. Assim, a área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Marataoan, com rio principal em uma média de 76,6 Km de extensão, apresentando um caráter de drenagem dentrítico.

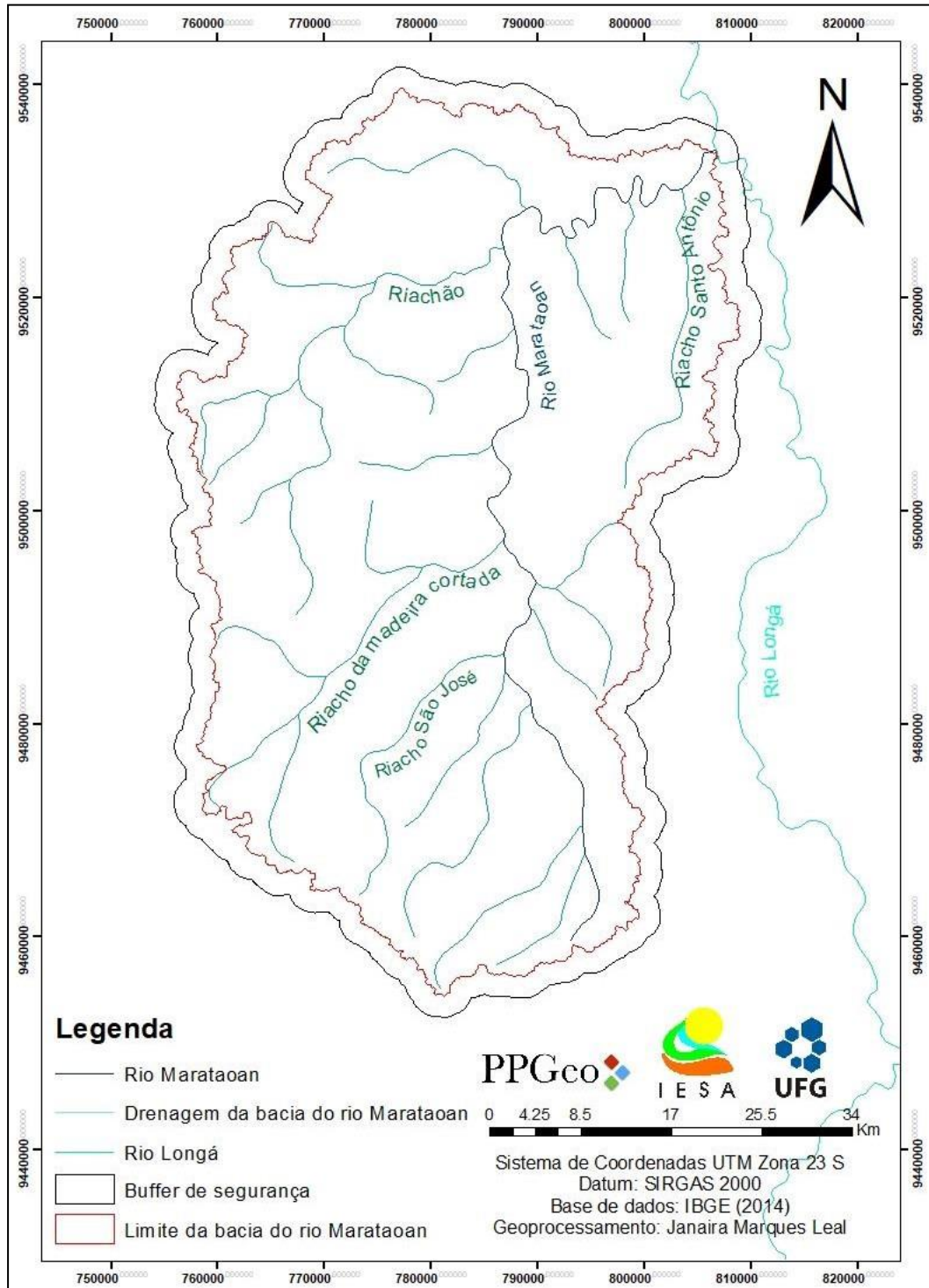
Os principais rios que formam a bacia estudada são: rio Marataoan (rio principal), riacho Santo Antônio, riacho do Angico Branco, Riachão, riacho São José, Riacho Buriti e riacho Madeira Cortada. Esses afluentes seguem em direção ao rio principal e este segue em direção a foz para desaguar, no caso da BHRM, no rio Longá. A Figura 29 apresenta canal fluvial na BHRM, e a Figura 30 a rede hidrográfica da área de estudo.

Figura 29 - Imagem fotográfica das margens do Riachão na BHRM no município de Barras



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Figura 30 - Rede hidrográfica da área de estudo



É importante destacar que o *Buffer* de segurança realizado no mapeamento da rede hidrográfica, apresenta uma distância de 3 km fora no limite da bacia, uma vez que essa distância é bastante utilizada em estudos dessa natureza.

3.5 Condições socioeconômicas da Bacia Hidrográfica do rio Marataoan

Para que se possa analisar uma bacia hidrográfica é de grande importância o entendimento das atividades econômicas desenvolvidas nesse espaço. Assim,

compreende-se que os dados do IBGE são uma base de fundamental importância para a definição do perfil socioeconômico de uma área, pois é considerada a base de dados mais completa referente às atividades econômicas desenvolvidas, educação, saúde, renda, moradia e demografia.

Neste sentido, os dados aqui utilizados tiveram como recorte geográfico os municípios inseridos parcial ou totalmente nos limites da BHRM. Com isso, se aproxima das condições reais de ocupação, como, por exemplo, a população total da bacia em setores urbanos e rurais. A Tabela 12 apresenta os habitantes a partir de cada município presente na área da BHRM nos anos de 2000 e 2010.

Tabela 12 - População total segundo municípios – anos de 2000 e 2010

Município	Área (km ²)	2000			2010		
		Pop. Total (hab.)	Pop. Urbana (hab.)	Pop. Rural (hab.)	Pop. Total (hab.)	Pop. Urbana (hab.)	Pop. Rural (hab.)
Barras	1.719,80	40.893	18.808	22.085	44.850	22.126	22.724
Campo Maior	1.675,71	43.129	31.923	11.206	45.177	33.521	11.656
Altos	957,66	39.106	26.188	12.918	38.822	27.388	11.434
José de Freitas	1.538,18	32.821	18.074	14.747	37.085	21.601	15.484
Miguel Alves	1.393,71	29.839	9.614	20.225	32.289	10.711	21.578
União	1.173,45	39.790	16.073	23.717	42.654	20.965	21.689
Lagoa Alegre	394,66	6.850	2.338	4.512	8.008	3.042	4.966
Cabeceiras do Piauí	608,53	8.501	1.389	7.112	9.928	1.657	8.271

Fonte: IBGE (2000); IBGE (2010).

Compreende-se a partir da leitura da Tabela 12 que os municípios Barras, José de Freitas e União apresentaram um aumento considerado na população urbana no intervalo de 10 anos, evidenciando o desenvolvimento da expansão urbanas nesse período.

No que se refere às atividades econômicas desenvolvidas na bacia do rio Marataoan, nota-se que a área de estudo tem como principal atividade econômica o setor de serviços, acompanhado pela agropecuária e a indústria (IBGE, 2010). A Tabela 13 apresenta as atividades de lavoura desenvolvidas na bacia estudada.

Tabela 13 - Produção de lavoura temporária e permanente desenvolvidas na BHRM

Municípios	Lavoura temporária	Quantidade produzida (t)	Lavoura permanente	Quantidade produzida (t)
Barras	Arroz	3.262	Banana	87
	Cana-de-açúcar	7.200	Castanha de caju	128
	Fava	02	Coco-da-baía	72
	Feijão	222	Laranja	126
	Mandioca	6.500	Manga	520
	Melancia	11.100	-	-
	Milho	1.388	-	-
Campo Maior	Arroz	377	Castanha de caju	248
	Feijão	157	Coco-da-baía	336
	Mandioca	1.512	Manga	70
	Melancia	5.625	-	-
	Milho	720	-	-
Altos	Arroz	1.770	Banana	120
	Batata-doce	50	Castanha de caju	208
	Cana-de-açúcar	400	Coco-da-baía	144
	Feijão	132	Goiaba	14
	Mandioca	3.760	Laranja	350
	Melancia	1.125	Manga	730
	Milho	1.379	Tangerina	64
José de Freitas	Arroz	1.600	Banana	200
	Cana-de-açúcar	215.591	Castanha de caju	87
	Fava	01	Coco-da-baía	240
	Feijão	275	Laranja	248
	Mandioca	2.880	Limão	720
	Melancia	1.800	Manga	360
	Milho	1.015	-	-
Miguel Alves	Arroz	13.745	Banana	384
	Cana-de-açúcar	1.064	Castanha de caju	39
	Feijão	138	Coco-baía	325
	Mandioca	3.240	Laranja	129
	Milho	1.058	Manga	183
União	Arroz	1.170	Banana	207
	Cana-de-açúcar	142.117	Castanha de caju	48
	Feijão	194	Coco-da-baía	120
	Mandioca	4.224	Laranja	216

Municípios	Lavoura temporária	Quantidade produzida (t)	Lavoura permanente	Quantidade produzida (t)	
	Melancia	800	Manga	300	
	Milho	1.163	-	-	
	Lagoa Alegre	Arroz	700	Castanha de caju	26
		Feijão	37	-	-
		Mandioca	630	-	-
		Melancia	660	-	-
Milho		150	-	-	
Cabeceiras do Piauí	Arroz	900	Castanha de caju	120	
	Feijão	64	Coco-da-baía	50	
	Mandioca	2.912	-	-	
	Melancia	120	-	-	
	Milho	651	-	-	

Fonte: IBGE (2010).

De acordo com a Tabela 13 compreende-se que na BHRM é possível destacar na cultura temporária a produção de cana-de-açúcar (José de Freitas e União), da Melancia (União e Campo Maior) e arroz (Miguel Alves). Com relação a cultura de permanente, identifica-se a produção de Castanha de caju, coco-da-baía e manga como as lavouras maior destaque na área estudada.

Para além da produção de lavouras, na área de estudo também foram identificadas a criação de ovinos, caprinos, suínos e bovinos como principais rebanhos. Salienta-se que esses rebanhos apresentam em sua maioria um caráter extensivo, uma vez que estes animais são utilizados pelos pequenos e médios proprietários para a subsistência e para a comercialização de sua carne e do couro. A Tabela 14 apresenta os rebanhos com maiores destaques por município da área de estudo.

Tabela 14 - Rebanho de bovinos, caprinos e ovinos nos municípios do alto curso da sub bacia do rio Longá

Municípios	Rebanhos		
	Ovino (cabeça)	Bovino (cabeça)	Caprino (cabeça)
Barras	6.867	18.986	24.229
Campo Maior	31.135	30.323	20.310
Altos	10.208	8.902	11.437
José de Freitas	18.826	13.907	23.229
Miguel Alves	3.538	10.200	12.001
União	11.624	12.908	16.008
Lagoa Alegre	5.293	3.996	7.223
Cabeceiras do Piauí	7.461	7.518	14.982

Fonte: IBGE (2010).

A partir dos dados de efetivos de pecuária da área de estudo é possível afirmar que os municípios que compõem a BHRM, possuem uma variedade importante na criação de animais para oferta de carne e de matéria-prima para a indústria do couro. O município de Barras destaca-se na criação de caprinos e bovinos, e o município de Campo Maior na criação de ovinos.

É de grande valia destacar a importância da pecuária para a subsistência das pessoas de baixa renda, sobretudo nas zonas rurais desses municípios. E também aliada a pecuária os projetos de irrigação configuram-se como um importante instrumento econômico em alguns municípios ao longo do seu curso como é o caso de Miguel Alves com o cultivo do arroz (IBGE, 2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na presente etapa da pesquisa serão discutidos os dados com ênfase na análise integrada dos elementos que compõem a paisagem, sendo seus resultados expressos por meio de mapas temáticos da vulnerabilidade à perda de solos da bacia hidrográfica do rio Marataoan, no estado do Piauí.

4.1 Atribuição dos valores de vulnerabilidade à perda de solos na bacia hidrográfica do rio Marataoan

A realização da atribuição dos valores da vulnerabilidade erosiva da BHRM teve como referência a metodologia de mapeamento da vulnerabilidade à perda de solos aplicada por Crepani et al. (2001), na qual são necessários os dados de geologia, pedologia, geomorfologia, clima e uso e cobertura das terras. A partir disso, realizou-se a adaptação do atributo geomorfologia, passando a utilizar as curvaturas (horizontal e vertical) e o HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) para gerar a amplitude altimétrica da área estudada.

4.1.1 Geologia

Como referido anteriormente, o grau de vulnerabilidade do tema geologia é trabalhado de acordo com o grau de coesão das rochas. As rochas que apresentam um grau de coesão maior entre seus minerais, conseqüentemente exibirão valores de vulnerabilidade menores e, logo, grau de coesão menor resulta em valores maiores de vulnerabilidade.

Dessa forma, na área da BHRM predomina valores de vulnerabilidade mais acentuados na Formação denominada de Grupo Barreiras, cujas rochas apresentam um grau menor de coesão devido a sua característica de formação mais suscetível aos processos erosivos, haja vista a grande presença de sedimentos areno-argilosos não consolidados e conglomeráticos. A Tabela 15 apresenta o grau de vulnerabilidade de cada Formação Geológica que compõe a área de estudo.

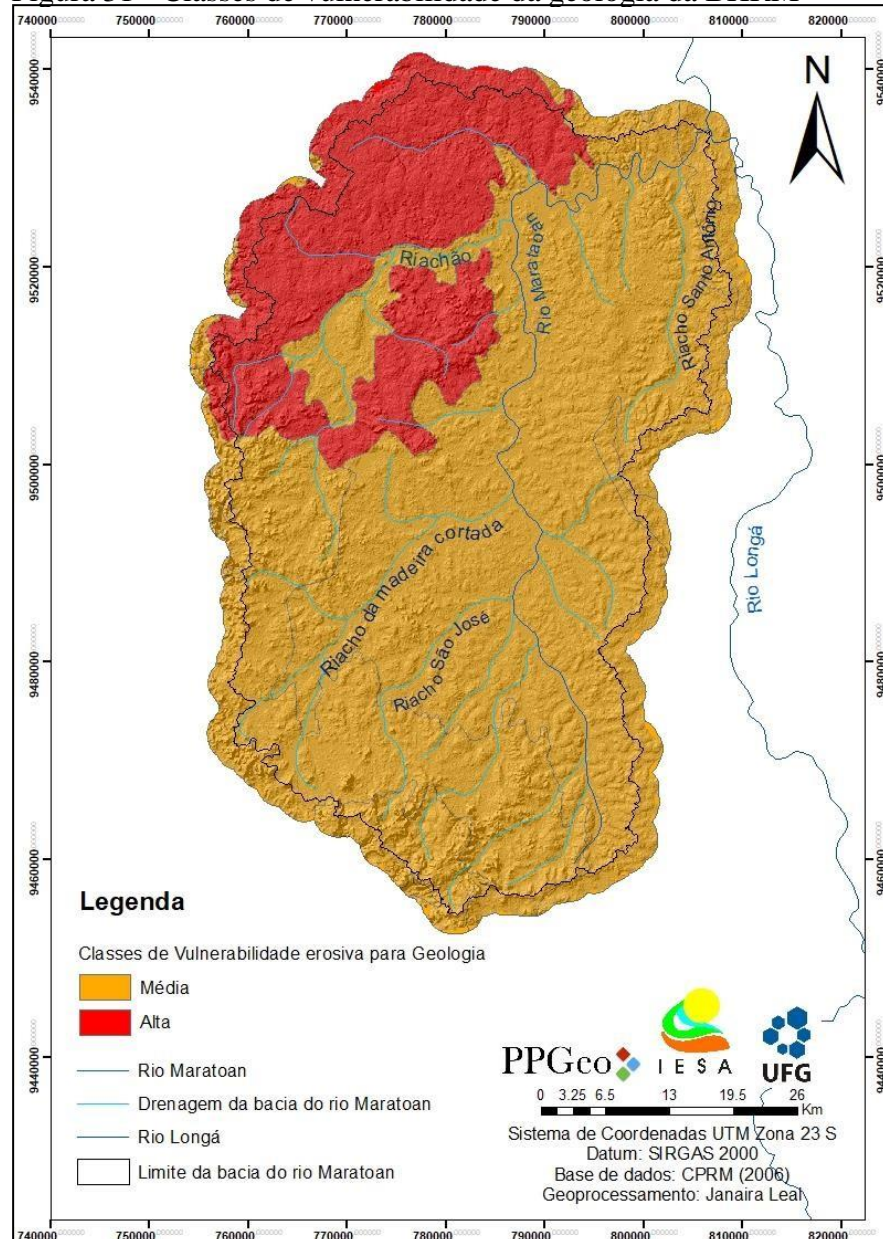
Tabela 15 - Unidades geológicas da BHRM e seus respectivos valores de vulnerabilidade erosiva

Formação Geológica	Valor de Vulnerabilidade	Área	%
Barreiras	3,0	674,8	22,4
Pedra de Fogo	2,5	83,04	2,7
Piauí	2,5	529,2	17,7
Longá	2,0	51,3	1,0
Poti	2,0	1.659,1	55,5

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

No mapa da Figura 31 é possível observar que a BHRM possui uma predominância de sua área constando na classe de média vulnerabilidade erosiva em função do grau de coesão de suas rochas.

Figura 31 - Classes de vulnerabilidade da geologia da BHRM



4.1.2 Pedologia

4.1.2.1 Erodibilidade dos solos (K)

Para que se pudesse delimitar a vulnerabilidade erosiva do fator pedológico, utilizou-se os valores de erodibilidade dos solos, no qual este refere-se à capacidade de um determinado solo resistir à erosão ocasionada pelas precipitações. O mapa pedológico teve como base o trabalho desenvolvido pelo IBGE (2014), constatando-se que as seguintes classes de solos e suas respectivas classes de erodibilidade (Tabela 16).

Tabela 16 - Classes de solos IBGE (2014) e Classes correspondentes a Erodibilidade dos solos (K), segundo Crepani et al. (2001)

Classe de solo	Classe atribuída	Média de vulnerabilidade atribuída	Área (km ²)	%
Plintossolo Argilúvico	Média	2,0	2.068,0	69,20
Latossolo Amarelo Distrófico	Baixa	1,0	844,5	28,26
Plintossolo Pétrico Concrecionário	Média	2,0	72,3	2,40
Planossolo Háptico Distrófico	Média	2,5	4,2	0,14

Fonte: IBGE (2014).

A Figura 32 apresenta um perfil de Plintossolo Pétrico Argilúvico Distrófico identificado na BHRM. Nesse perfil foi possível observar em campo um mosqueado abundante a médio proeminente. No horizonte Ac¹ a maioria da petroplintita é proveniente de áreas mais altas da encosta. O Ac² as petroplintita são formadas *in situ* com forma lamelar de tamanhos grandes.

Figura 32 - Perfil de Plintossolo Pétrico Concrecionário no município de José de Freitas



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Outro solo que se destaca na área de estudo são os Latossolos Amarelo Distróficos. O perfil apresentado na Figura 33 apresenta horizontes denominados de A, AB, BA e Bw, com profundidades de 0 – 20, 20 – 45, 45 – 105, 105 – 150+ respectivamente, apresentando-se como um solo coeso e bem drenado. O valor de erodibilidade atribuído para esse tipo de solo de acordo com Crepani et al. (2001) foi de Baixa erodibilidade (1,0).

Figura 33 - Perfil de Latossolo Amarelo Distrófico presente na BHRM no município de Cabeceiras do Piauí



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Outro tipo de solo encontrado na BHRM são os Planossolos Háplico Distróficos. No perfil da Figura 34 é possível identificar os horizontes A, E, Bt e C/R, apresentando uma profundidade em centímetros de 0 – 10, 10 – 30, 30 – 45 e 45 – 70+, sucessivamente. No presente perfil é possível identificar também a rocha num volume elevado no horizonte C.

Figura 34 - Perfil de Planossolo Háplico Distrófico presente na BHRM no município de José de Freitas



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

A erodibilidade da bacia hidrográfica do rio Marataoan apresenta 71,65% da sua área com características de Alta Erodibilidade, enquanto que 0,14% apresenta Média Erodibilidade e 28,21% em Baixa Erodibilidade, bem como apresentam a Tabela 17.

Tabela 17 - Classes de Erodibilidade dos solos (K) com respectivas áreas em porcentagens da BHRM

Classe de Erodibilidade	Área (Km ²)	%
Baixa	843	28,21
Média	4,2	0,14
Alta	2.141	71,65

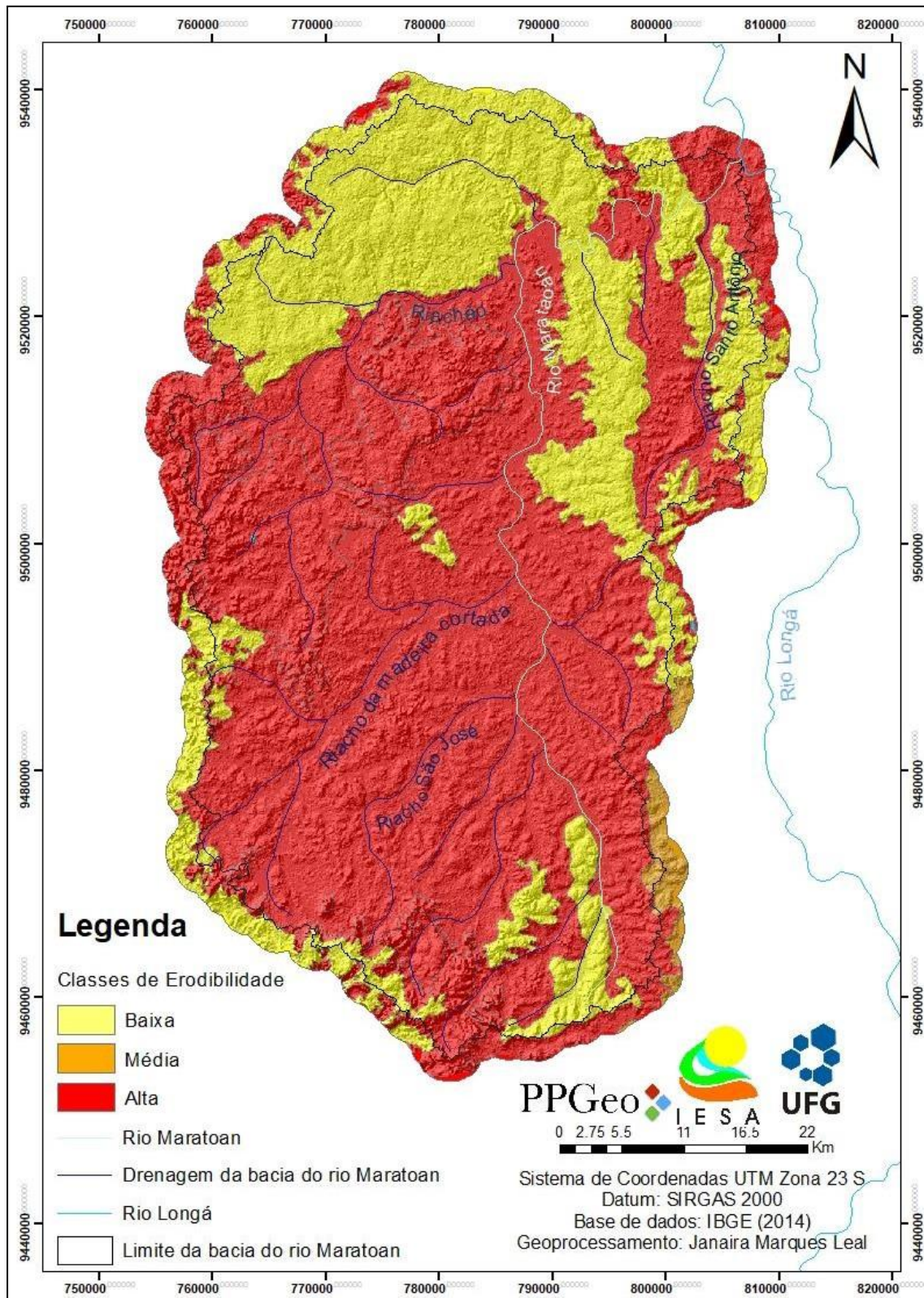
Fonte: Pesquisa direta. Organização: Janaira Marques Leal (2024).

O predomínio da classe Alta Erodibilidade dos solos da BHRM justifica-se em função da grande quantidade de solos Plínticos, cujo valor máximo (3) encontra-se atribuído para esse componente, visto a sua alta suscetibilidade à erosão,

principalmente, devido a sua constituição dar-se por material arenoso com sérias restrições ao uso agrícola devido ao enraizamento das plantas. O mapa da Figura 34 apresenta as classes de Erodibilidade da BHRM de acordo com Crepani et al. (2001).

Esses solos aliados à concentração das precipitações, especificamente de janeiro a maio, e a área de alto a muito alto potencial de erosividade das chuvas, contribuem para aumentar a fragilidade da área estudada (Figura 35).

Figura 35 - Erodibilidade dos solos (K) da BHRM.



Além da observação das análises morfológica e físicas, a análise dos atributos químicos é imprescindível para realizar a classificação e estudo dos solos, uma vez que é com base no julgamento desse atributo que fazemos um estudo mais detalhado e aprofundado sobre os mesmos.

O presente estudo fez uma análise dos solos, considerando os atributos físicos (granulometria) e químicos (Carbono orgânico e matéria orgânica). As amostras de solo foram coletadas de horizontes superficiais dos solos, a profundidade variando de 10 a 30cm, de acordo com a espessura do horizonte superficial A. O Quadro 9 apresenta os dados referentes às coletas na área de estudo.

Quadro 9 - Amostras de horizontes superficiais dos solos coletados na BHRM.

Ponto de coleta	Tipo de solo	Latitude	Longitude	Altitude (m)
P01	Planossolo Háplico Distrófico Típico	4° 50'34,3" S	42°34'21,6" W	202
P02	Plintossolo Pétrico	4°51'29,3" S	42°31'38,4" W	230
P03	Plintossolo Argilúvico Eutrófico Típico	4°49'01,8" S	42°50'26,9" W	147
P04	Planossolo Nátrico Órtico Típico	4°43'08,1" S	42°22'02,8" W	97
P05	Planossolo Nátrico Órtico	4°31'45" S	42°21'00,1" W	107
P06	Plintossolo Argilúvico	4°20'26" S	42°47'29" W	113
P07	Latossolo Amarelo Distrófico	4°12'55" S	42°47'38" W	106
P08	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	4°15'45,1" S	42°18'31,8" W	112

Fonte: Pesquisa direta (LEAL, 2023).

A Tabela 18 apresenta os resultados da análise granulométrica para as amostras dos horizontes superficiais dos solos coletados na BHRM.

Tabela 18 - Análise física dos perfis superficiais dos solos coletados na BHRM.

Pontos de coleta	Calhau e cascalho g kg ⁻¹	Teor de Areia grossa g kg ⁻¹	Teor de terra fina g kg ⁻¹	Teor de Silte g kg ⁻¹	Teor de Argila g kg ⁻¹
P01	00,00	63,5	814,5	91,5	30,5
P02	374,09	132,5	401,0	237,2	229,3
P03	512,20	209,5	102,0	369,1	319,4
P04	00,00	51,0	772,0	119,0	58
P05	00,00	47,5	732,0	199,1	21,4
P06	150	144,5	405,0	307,3	143,2
P07	00,00	74,0	637,5	188,7	99,8

Pontos de coleta	Calhau e cascalho g kg ⁻¹	Teor de Areia grossa g kg ⁻¹	Teor de terra fina g kg ⁻¹	Teor de Silte g kg ⁻¹	Teor de Argila g kg ⁻¹	Peso total
P08	1267,40	82,0	257,0	407,9	253,1	1.000

Fonte: Pesquisa direta (LEAL, 2023).

Vale destacar que as informações das frações granulométricas através da análise granulométrica do solo são indispensáveis para classificar o corpo natural de uma determinada área, uma vez que a classe textural varia muito pouco com passar do tempo, e fornece dados essenciais para o conhecimento e estudo do solo.

Observando as informações da Tabela 18, os teores de areia grossa variaram de 63 a 209,5 g kg⁻¹, os de areia fina de 102 a 814,5 g kg⁻¹, os de silte de 91,5 a 407,9 g kg⁻¹ e os de argila de 30,5 a 253,1 g kg⁻¹. Na maioria dos perfis, as partículas de areia fina e silte são mais predominantes nos solos, em comparação com as partículas de argila e areia grossa, o que pode demonstrar que estes apresentam pouca consistência e se transformam em lama facilmente em contato com a água, apresentando uma alta susceptibilidade a erosão. Essa é uma característica negativa para o desenvolvimento adequado das plantas e de atividades econômicas.

Com relação às análises químicas, a Tabela 19 traz as informações acerca das amostras coletadas na BHRM.

Tabela 19 - Análise do carbono orgânico e matéria orgânica dos horizontes superficiais dos solos da BHRM

Pontos de coleta	Carbono Orgânico (g.kg ⁻¹)	Matéria Orgânica (g.kg ⁻¹)	Fator K (t*ha/MJ*mm)
P01	5,7	9,8	0,58
P02	12,0	20,7	0,30
P03	11,3	19,5	0,21
P04	6,2	10,7	0,56
P05	5,6	9,6	0,58
P06	7,5	12,9	0,40
P07	3,9	6,7	0,48
P08	9,3	16,0	0,33

Fonte: Pesquisa direta (LEAL, 2023).

A matéria orgânica no solo tem relação direta com a qualidade do solo, uma vez que ela propicia um aumento na estabilidade dos agregados e fertilidade, além disso tem um papel imprescindível na conservação do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005).

Com relação a matéria orgânica, as amostras superficiais dos perfis de solos

coletados apresentam uma relativa concentração da mesma (até 15g), deixando evidente uma tendência a solos mais arenosos, com algumas intercalações de solos com maiores valores apresentando uma textura média (16 a 30g). É esperado o baixo teor de matéria orgânica para solos formados em ambientes de cobertura vegetal menos densa como os da área em estudo (AQUINO, 2010).

O solo, com baixa proteção na sua superfície, sofre grandes perdas, não só de terra, como também de carbono (CO) e nitrogênio (N). O carbono orgânico é a principal fonte de N e serve para determinar a qualidade do solo e tem uma importância muito grande na agricultura sustentável (RÊGO et. al, 2013). Dessa forma, para a área da BHRM, os solos que apresentaram uma maior concentração de matéria orgânica foram, também, identificados com uma maior concentração no teor de carbono orgânico.

Seguindo a metodologia descrita anteriormente, para o fator erodibilidade do solo K, chegamos aos resultados que estão descritos na Tabela 20.

Tabela 20 - Erodibilidade dos solos (fator K) dos horizontes superficiais dos solos da BHRM

Pontos de coleta	Fator K (t*ha/MJ*mm)
P01	0,58
P02	0,30
P03	0,21
P04	0,56
P05	0,58
P06	0,40
P07	0,48
P08	0,33

Fonte: Pesquisa direta (LEAL, 2023).

A distribuição espacial dos valores calculados do fator erodibilidade do solo estimada para a área de estudo são observados com uma relativa variação. As amostras P06 e P07 apresentam média erodibilidade e P01, P04 e P05 alto valor de K, o que é coerente com os atributos dos solos apresentados e discutidos. Os altos valores de K podem ser justificados pela elevada presença de areia fina nas amostras de solo, sendo caracterizada por uma estrutura fraca, associada a sua composição de grão simples, e baixo teor de matéria orgânica.

Os perfis de solos que apresentaram os valores de K mais baixos foram P02, P03 e P08, com valores de 0,30, 0,21 e 0,33 respectivamente, estando estes diretamente relacionados com o elevado teor de matéria orgânica, como correlacionado também por

Pérez-Rodríguez et al. (2007), sendo considerados com uma erodibilidade baixa. Os solos que apresentam os menores valores de K demonstram, também, os maiores valores de matéria orgânica, revelando, assim, uma correlação entre o aumento da matéria orgânica e a diminuição da erodibilidade dos solos.

Neste sentido, possível perceber a relação existente entre a maior presença do carbono orgânico e um maior valor de matéria orgânica, resultando na diminuição dos valores de K. Desta forma, depreende-se a importância da cobertura vegetal para a diminuição de grandes perdas, não só de terra, como também de carbono nos solos.

Contudo, os solos da área de estudo possuem erodibilidade que varia entre moderada, alta e muito alta. Entretanto, com o predomínio de erodibilidade muito alta, esses tipos de solos tendem a sofrer processos erosivos mais intensos.

4.1.3 Geomorfologia

Para o parâmetro geomorfologia, foram considerados os aspectos morfométricos, representados pelos mapeamentos de declividade, HAND e de curvaturas vertical e horizontal, conforme explanado a seguir.

4.1.3.1 Declividade

O relevo da BHRM é caracterizado por predomínio de baixas declividades (Figura 36). A Tabela 21 deixa em evidência que a área de estudo apresenta cerca de 85,9% de sua área na classe de declividade classificada como Plano, com declives < 4%; a segunda classe que mais se destaca na área é a Suave Ondulado, abrangendo cerca de 10,8% da bacia estudada, com declividade variando entre 4 e 8%; com 2,7% a terceira classe identificada na área foi a Ondulado, com declives variando entre 8 e 16%; recebendo um destaque bastante pequeno, identificou-se as classe Fortemente Ondulado e Montanhoso, com uma declividades variando entre 16 e 24% e > 24% ocupando uma pequena área de 0,5% e 0,1% respectivamente, da área total. A Figura 37 identifica os valores de vulnerabilidade erosiva do fator declividade representados para a área de estudo.

Tabela 21 - Intervalos de Declividade com respectivas denominações das classes, áreas e porcentagens correspondentes a cada peso, na BHRM

Intervalo de Declividade (%)	Classe atribuída	Valor de vulnerabilidade	Área (km²)	%
< 4	Plano	1,0	2.549,0	85,9
4 – 8	Suave Ondulado	1,5	320,4	10,8
8 – 16	Ondulado	2,0	79,5	2,7
16 – 24	Fortemente Ondulado	2,5	14,3	0,5
> 24	Montanhoso	3,0	2,9	0,1

Fonte: Pesquisa direta (2022). Organização: Janaira Marques Leal (2024).

Figura 36 - Mapa de declividade da BHRM

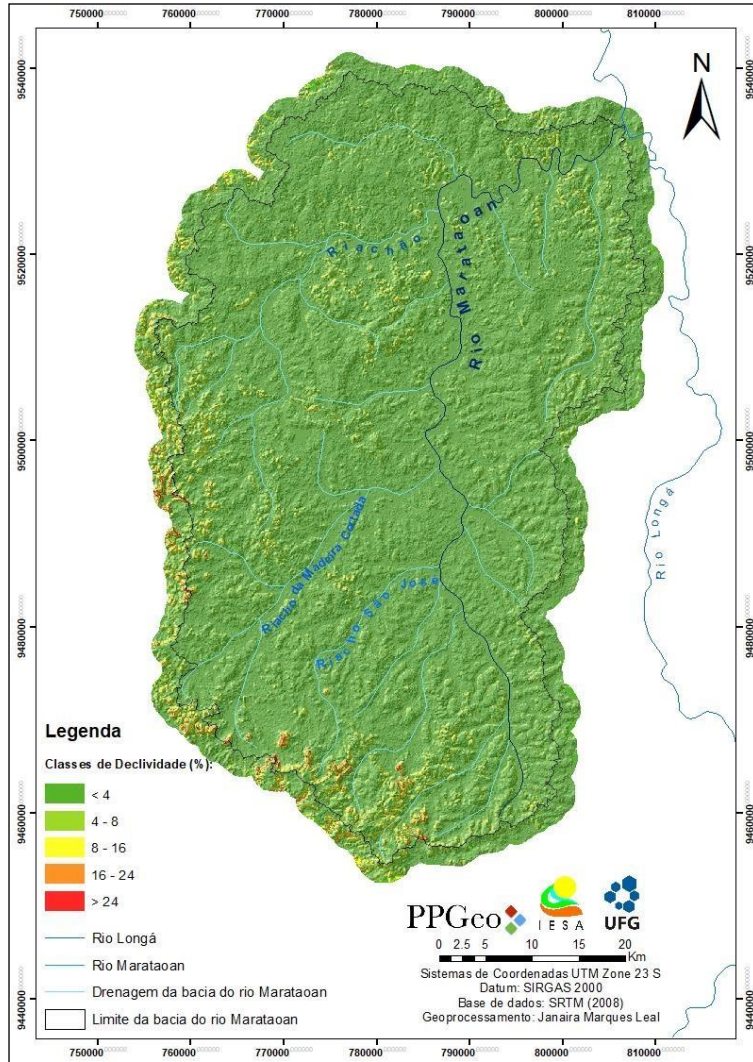
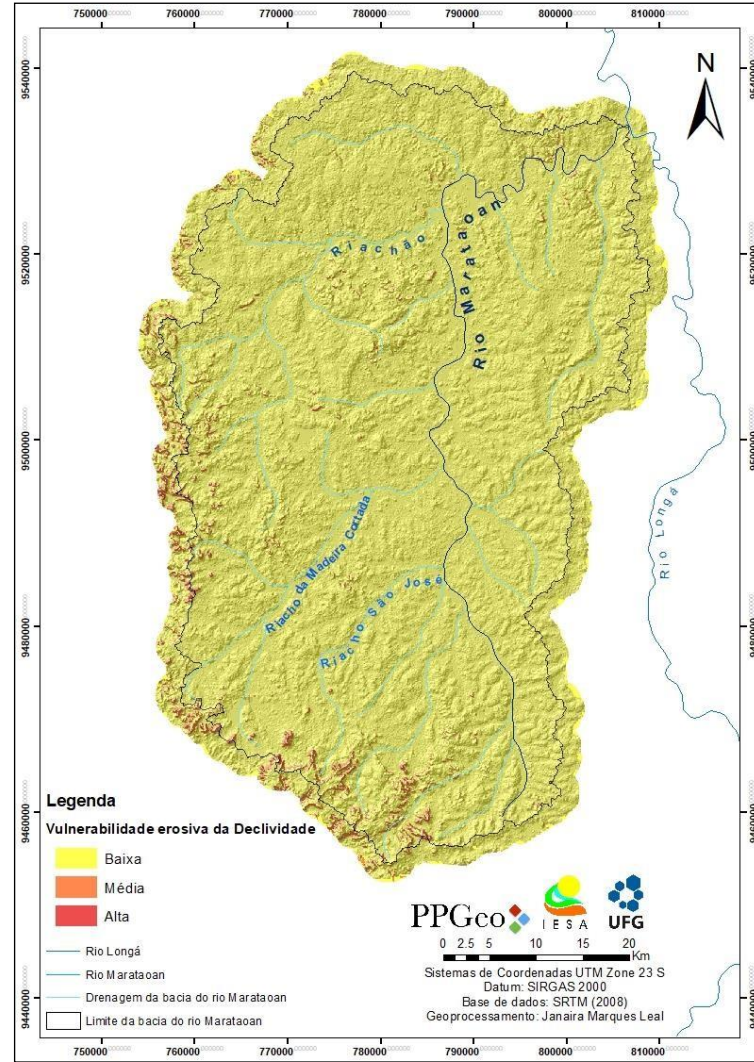


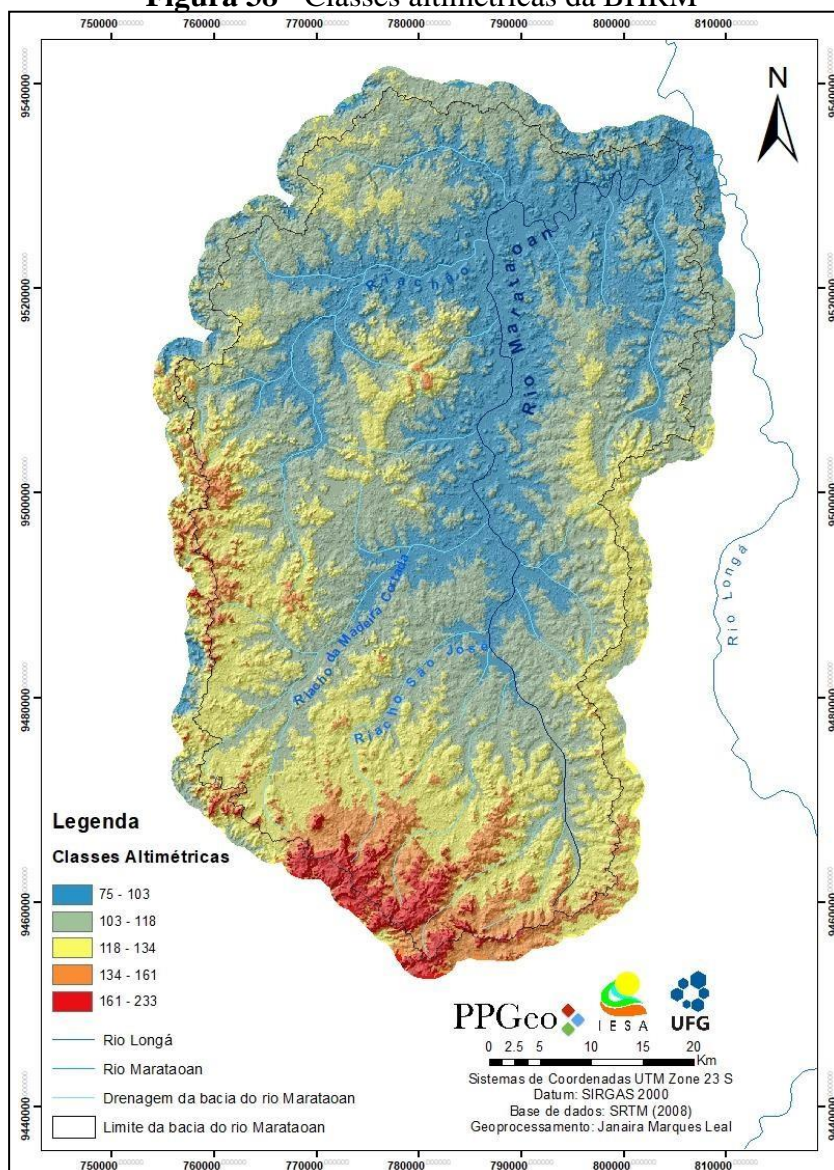
Figura 37 - Mapa de Vulnerabilidade erosiva para a declividade da BHRM



A análise das classes altimétricas em bacias hidrográficas possibilita a observação da variação de altitude do relevo da área. Esta análise torna-se relevante na abordagem da dinâmica de uso e cobertura das terras e ainda representando melhor a configuração topográfica e a relação com a dinâmica de escoamento superficial e a erosão hídrica.

De modo geral a área apresenta baixas declividades porque os terrenos são, em sua maioria, planos ou suave ondulados, com poucos desníveis e ressaltos topográficos, que ocorrem mais concentrados nas porções próximos das bordas leste e sul da bacia. O mapa da Figura 38 apresenta as classes altimétricas da BHRM. O destaque vai para a classe que de 103 a 118 m, que ocupa 38,2% da área, seguida pelas classes de 118 a 134m e 75 a 103m, que apresentam uma distribuição semelhante (~1/4 da área total cada). É importante destacar que as classes foram produzidas pelo método de quebras naturais (Jenks), o que reflete bem os compartimentos do relevo da área estudada.

Figura 38 - Classes altimétricas da BHRM



4.1.3.2 HAND

A classificação do terreno por meio do algoritmo HAND determina que os valores baixos (próximos de zero) indicam que nessas áreas o lençol freático está próximo da superfície, estando assim o solo próximo de sua saturação. Por outro lado, os valores mais altos indicam uma maior probabilidade de o lençol freático encontrar-se profundo, logo, de se tratar de áreas bem drenadas.

A primeira classe (0 a 5 m) apresenta em 1.070,9 km², o que se traduz em cerca de 35,8% da área de estudo, é determinada como baixa vulnerabilidade aos processos erosivos e classificada como áreas suscetíveis a ravinas e não suscetíveis a voçorocas, no qual são associadas a áreas favoráveis à concentração de fluxos de água por escoamento superficial e subsuperficial, em que o aquífero freático encontra-se situado a pequena profundidade ou aflorante, determinando assim solos próximos do seu nível

máximo de saturação.

A segunda classe do fatiamento (5 a 15 m) classificada como moderada vulnerabilidade frente aos processos erosivos, ocupa a maior parcela da área de estudo com 1.214,2 km², cerca de 40,6% do total da bacia, indica áreas moderadamente suscetíveis a ravinas e pouco suscetíveis a voçorocas, sendo no geral situadas em terrenos que apresentam uma certa declividade, e são associados à solos muito erodíveis, no qual processos de ravinamento se desenvolvem em função da ocupação do solo a partir de pequena concentração das águas de escoamento superficial.

A terceira classe (15 a 50 m) classificada como moderadamente alta vulnerabilidade erosiva e identificada como muito suscetível a ravinas e pouco suscetíveis a voçorocas, engloba 686,4 km² (23%) da área de estudo e está relacionada às áreas de dissipação dos fluxos de água, mal drenadas e com elevadas permeabilidades até grandes profundidades, apresentando solos pouco coesos permitindo a fácil remoção das partículas por escoamento das águas superficiais.

No que diz respeito à classe de alta vulnerabilidade (maior que 50 m), está associada à processos erosivos que ocorrem condicionados à declividade das encostas, no qual é possível notar áreas favoráveis à concentração dos fluxos de água por escoamento superficial.

Para um melhor resultado de análise do terreno, foram testados limiares de extração de drenagens para a área de estudo, no qual estes foram 1000, 2000 e 3000. Estes resultados podem ser observados nas Figuras 39, 40 e 41.

Figura 39 - Grade do HAND para limiar de 1000 de rede de drenagem

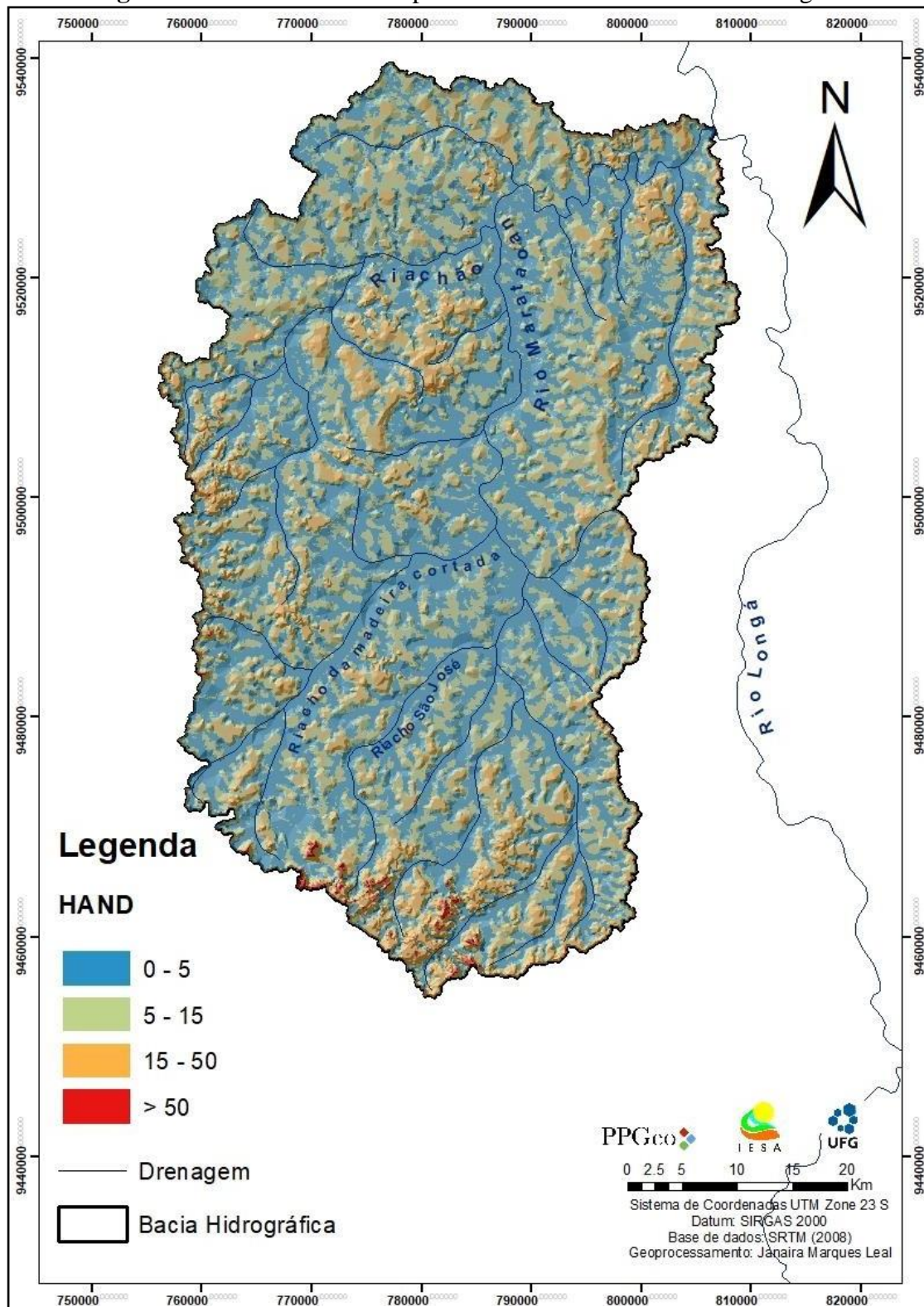


Figura 40 - Grade do HAND para limiar de 2000 de rede de drenagem

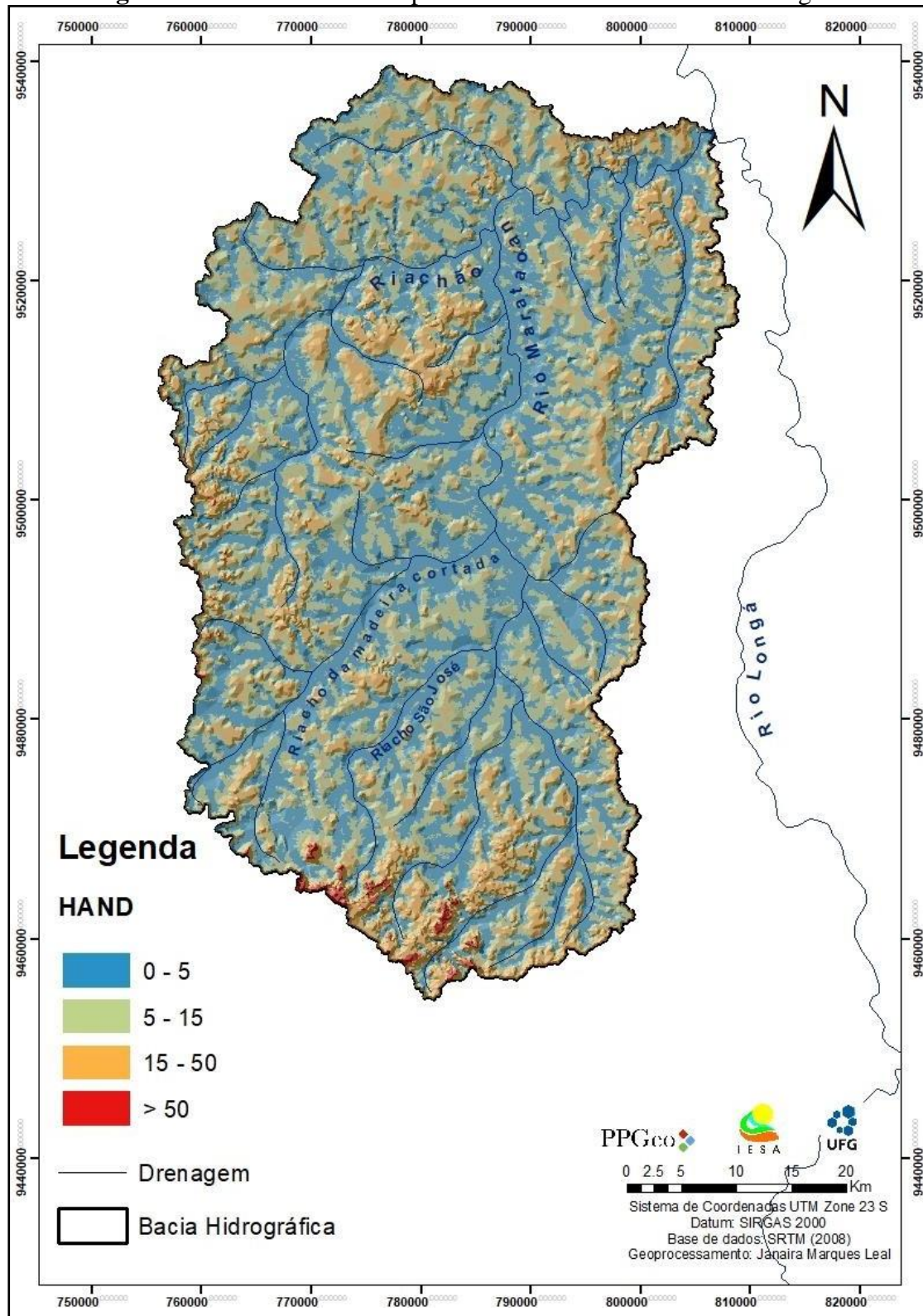
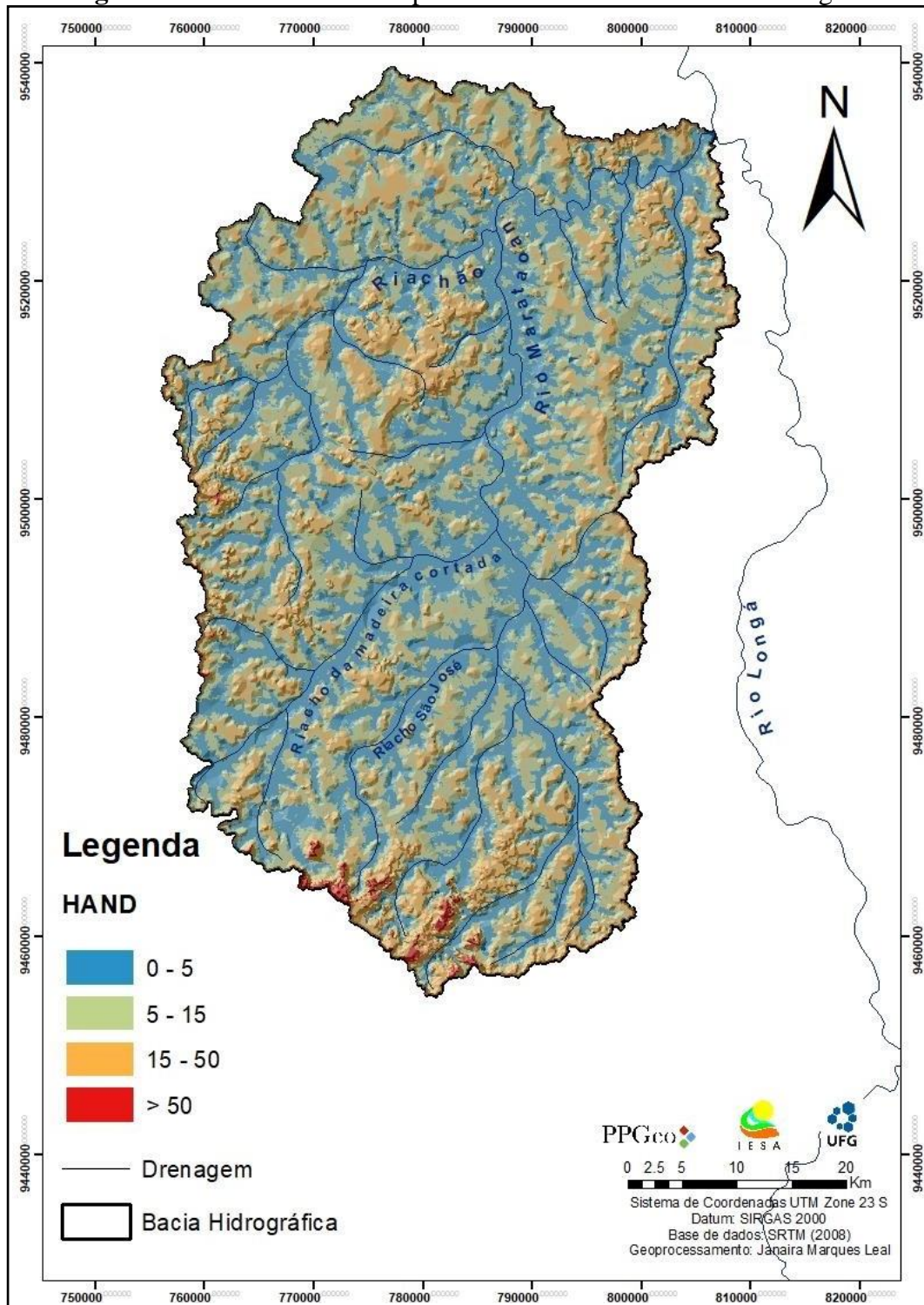


Figura 41 - Grade do HAND para limiar de 3000 de rede de drenagem



Os mapas apresentados anteriormente revelam que quão menor o limiar de extração de drenagem mais dissecado é a superfície do modelo de terreno HAND, com maior quantidade de drenagens sendo representadas.

O limiar que melhor coincidiu com as drenagens em formato vetorial representativo para a área de estudo foi o de 3000, sendo assim este utilizado para a realização da classificação das classes de HAND para a área de estudo (Figura 42). O

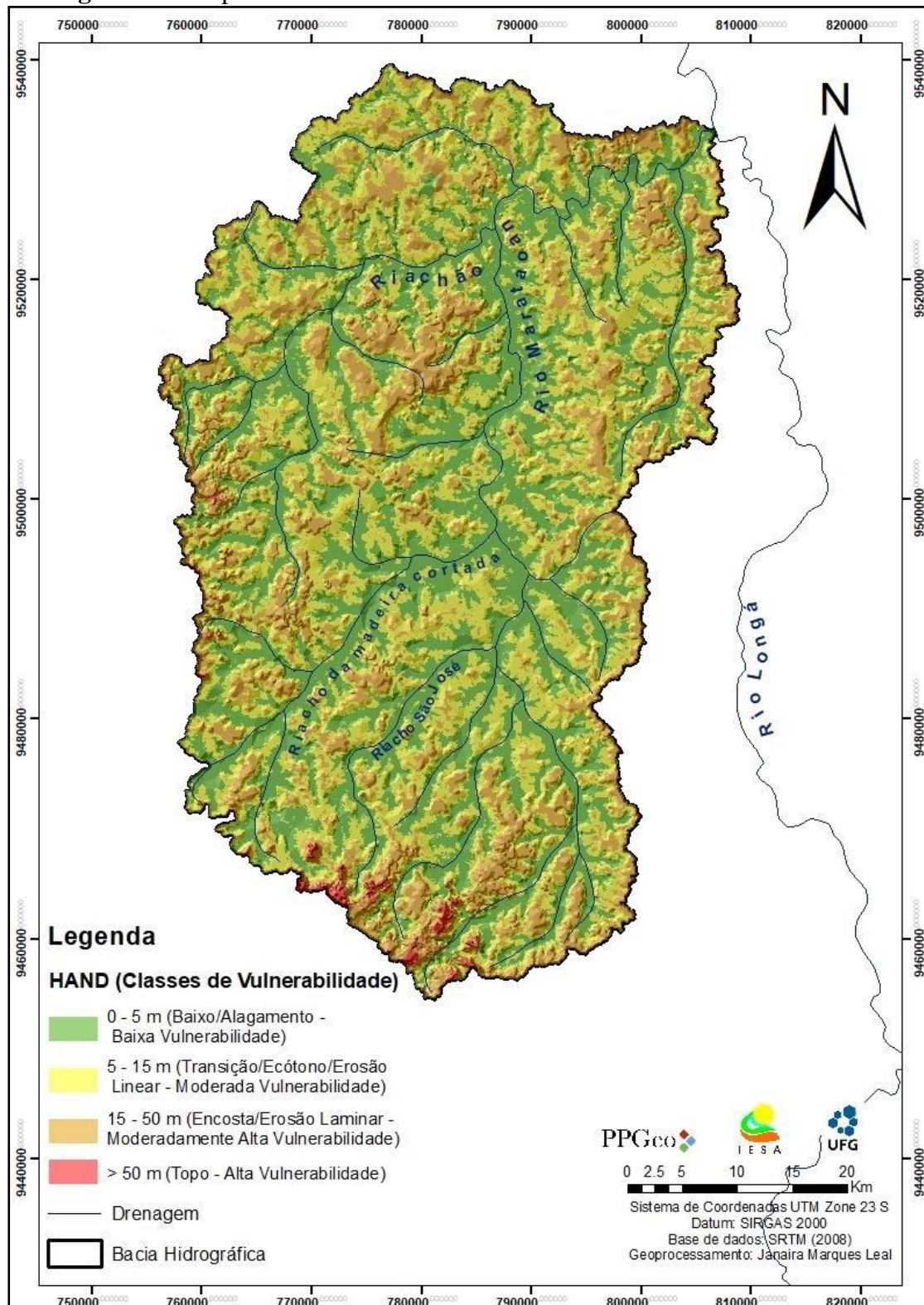
Quadro 10 apresenta as classes de HAND associados e seu respectivos valores de vulnerabilidade.

Quadro 10 - Classificação do HAND quanto à vulnerabilidade à perda de solos da BHRM

Classes de suscetibilidade		Distância de classificação	Área (km ²)	%
1 (Baixa)	Suscetíveis a ravinas e não suscetíveis a voçorocas	0 a 5 m Baixo/Alagamento	1.070,9	35,8
1,5 (Moderada)	Moderadamente suscetíveis a ravinas e pouco suscetíveis a voçorocas	5 a 15 m Transição/Ecótono Erosão Linear	1.214,2	40,6
2,0 (Moderadamente alta)	Muito suscetível a ravinas e pouco suscetíveis a voçorocas	15 a 50 m Encostas, Erosão Laminar	686,4	23
3,0 (Alta)	Extremamente suscetível a ravinas e voçorocas	> 50 m Topo	17,6	0,6

Fonte: adaptado de Salomão, Canil e Rodrigues (2012) e Rennó et al. (2008), Nobre et al. (2011) e Barbosa (2020).

Figura 42 - Mapa de classes de Vulnerabilidade erosiva do HAND da BHRM



4.1.3.3 Curvaturas vertical e horizontal

Christofolletti (1980) destaca que em função das vertentes representarem a categoria de forma, esta se constitui no objeto primordial da geomorfologia. Neste sentido, utilizou-se os dados geomorfométricos derivados de processamentos efetuados em imagens SRTM, como curvatura horizontal, curvatura vertical e formas do terreno, para realizar as análises da vulnerabilidade erosiva da BHRM por meio dos diferentes fluxos do escoamento superficial da água.

Neste ínterim, foram gerados mapas das curvaturas em diferentes resoluções espaciais (Figuras 43, 44, 45, 46, 47 e 48), sendo estas de 50x50 m, 100x100 m e 250x250 m, para que se pudesse realizar uma análise observando como se comportavam os processos erosivos e de deposição de sedimentos nas vertentes em cada uma delas. A partir disso, percebeu-se que os mapeamentos de menores resoluções apresentam, de acordo com Romão (2006), fragmentos classificados como curvaturas convexas ou côncavas, em descontinuidade, que se devem ou a pequenas descontinuidades na vertente, dependendo do tamanho do interflúvio, ou a erros inerentes à modelagem digital das elevações na superfície do terreno.

É importante destacar que, de acordo com Wood (1996), a escala na qual as redes são bem conectadas, sem essas descontinuidades, parecem mais detalhadas para as convexidades do que para as concavidades. Assim, para resoluções maiores, grande parte das feições são determinadas de forma mais clara.

Em função da área de estudo apresentar em grande parte de seu território características de um relevo plano, verificou-se que a resolução espacial que se mostrou mais adequada frente à realidade em campo, para as análises das curvaturas, foi a de 250x250m, uma vez que nela os canais apresentaram-se com um melhor grau de conectividade, como pode ser observado nas Figuras 47 e 48.

Figura 43 - Mapa de curvatura horizontal das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 50x50 m

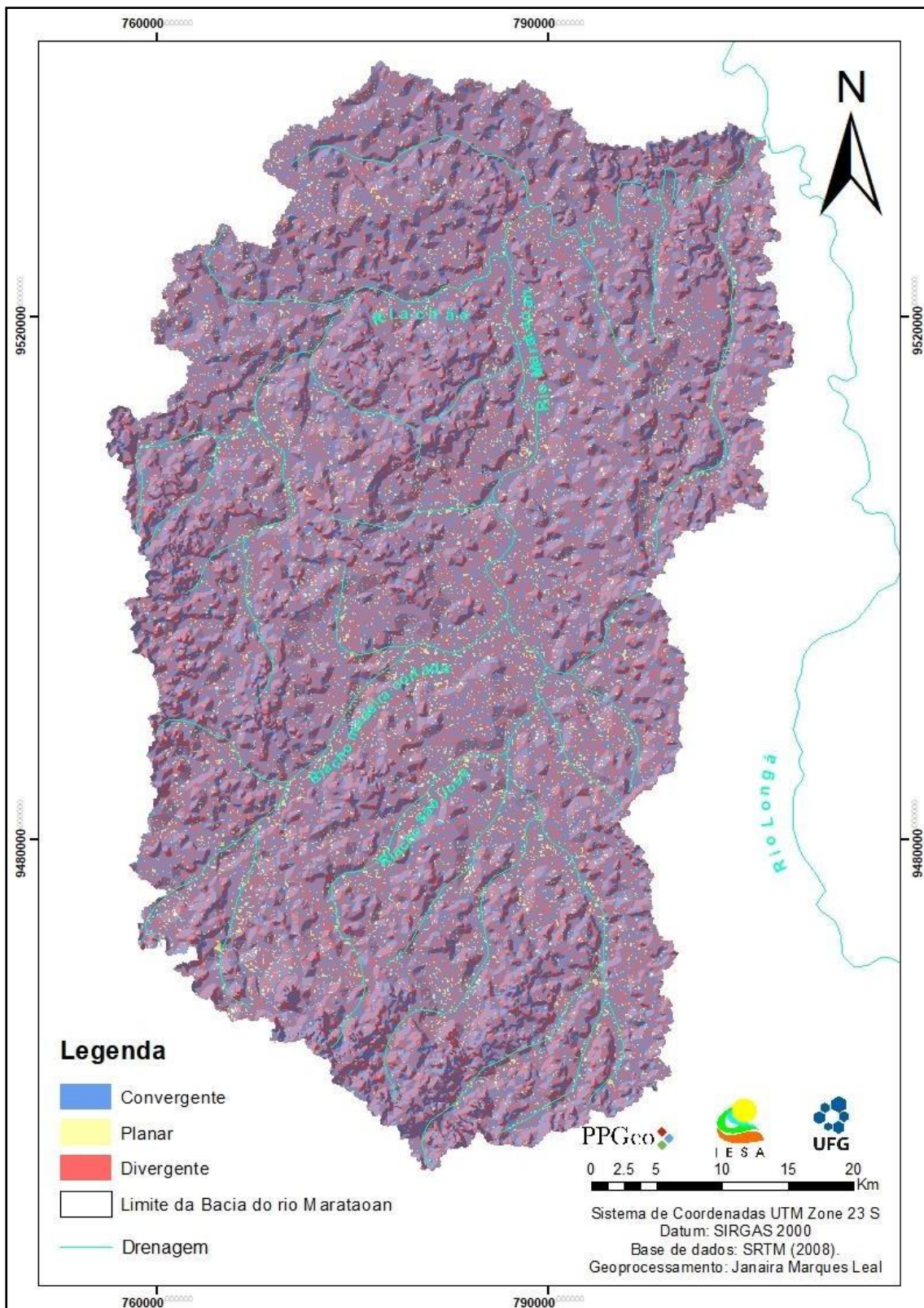


Figura 44 - Mapa de curvatura vertical das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 50x50 m

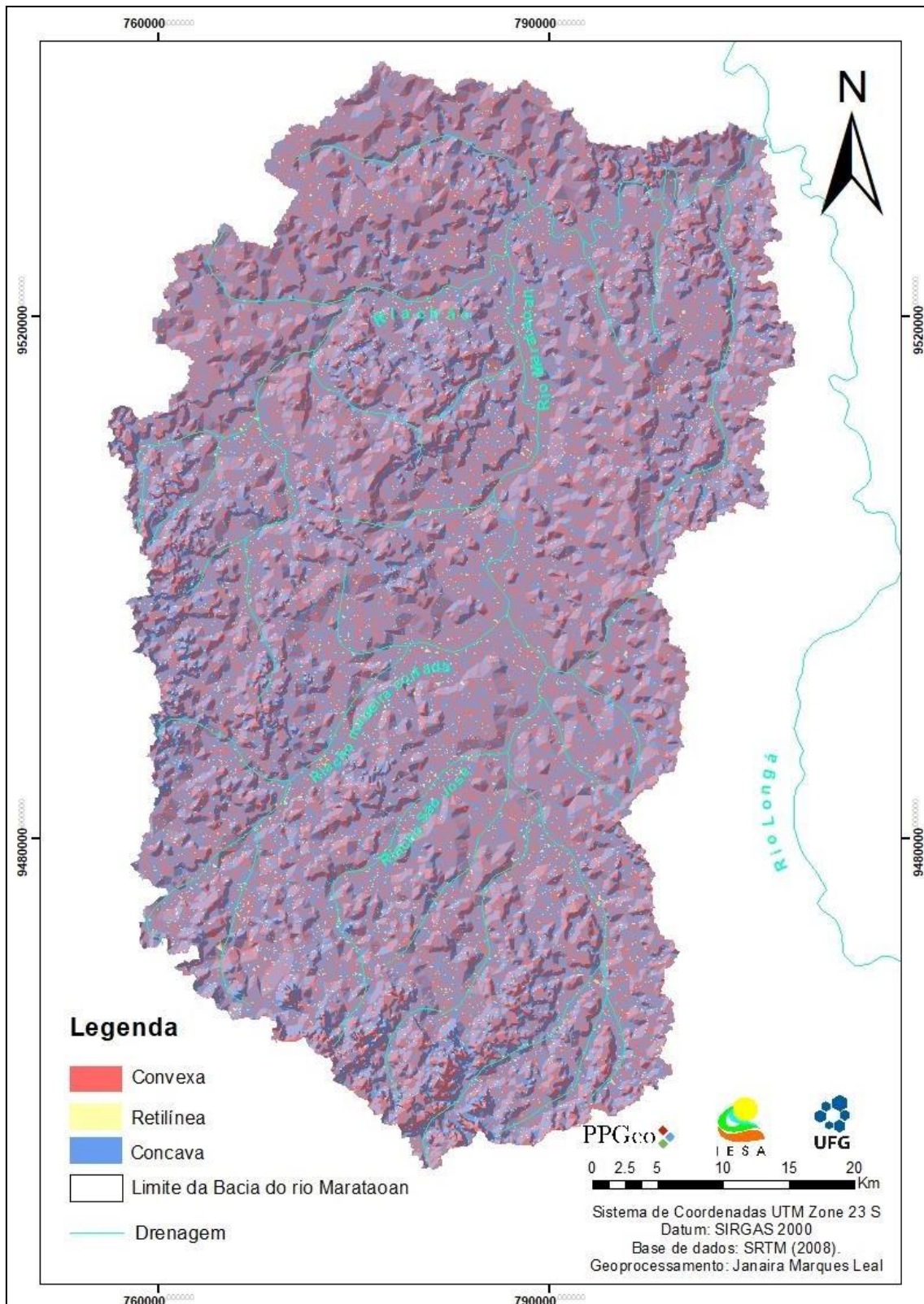


Figura 45 - Mapa de curvatura horizontal das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 100x100 m

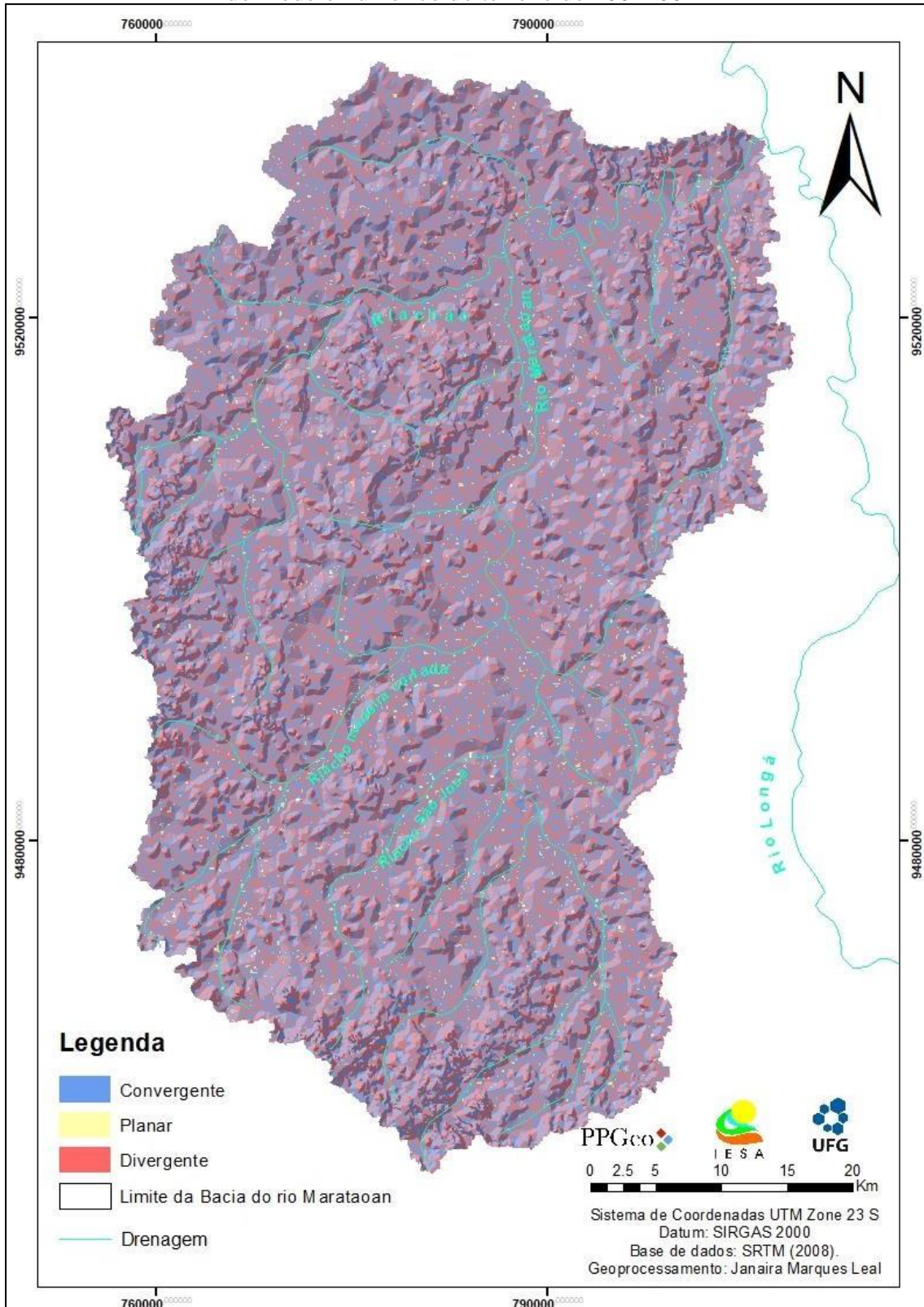


Figura 46 - Mapa de curvatura vertical das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 100x100 m

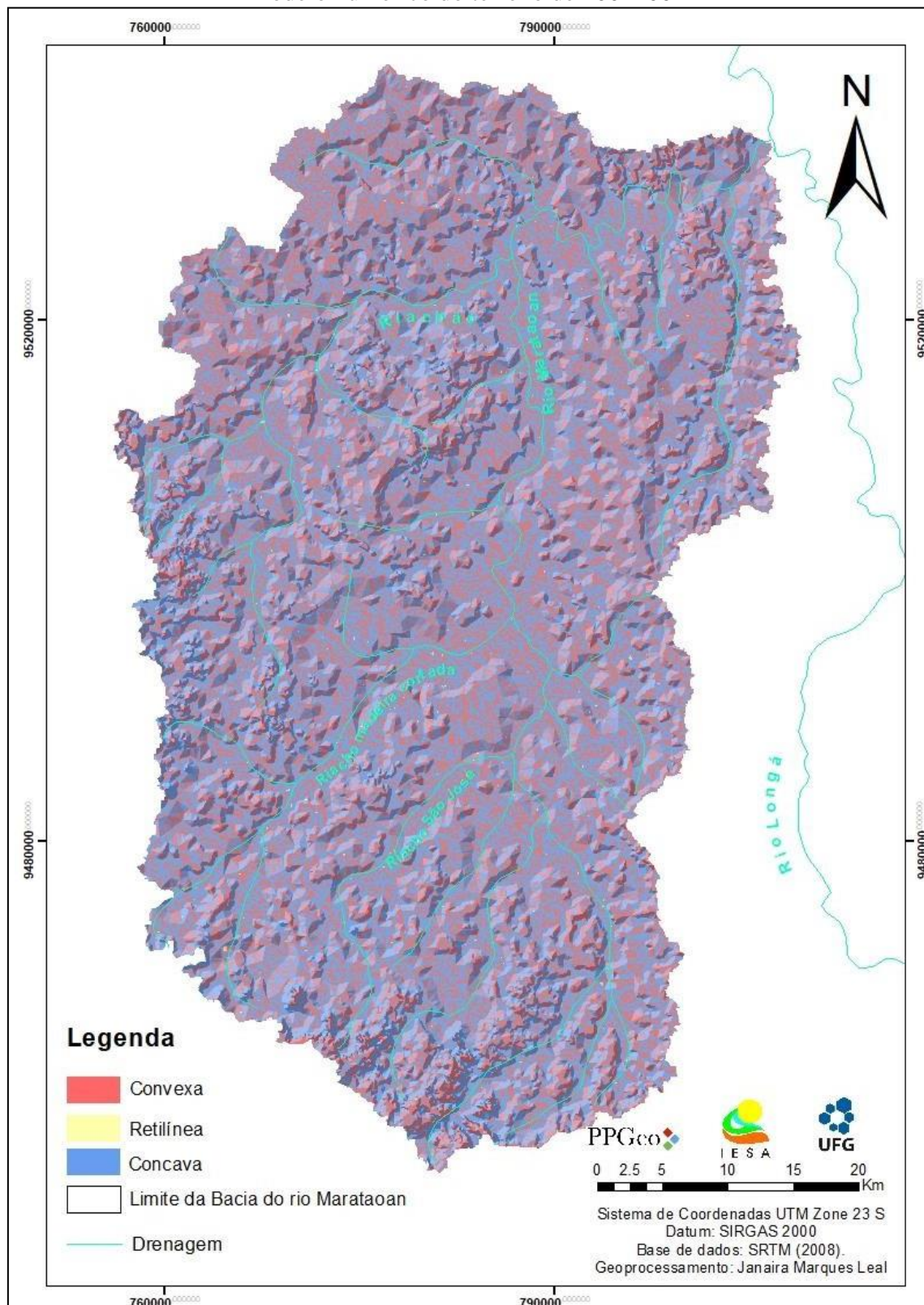


Figura 47 - Mapa de curvatura horizontal das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 250x250 m

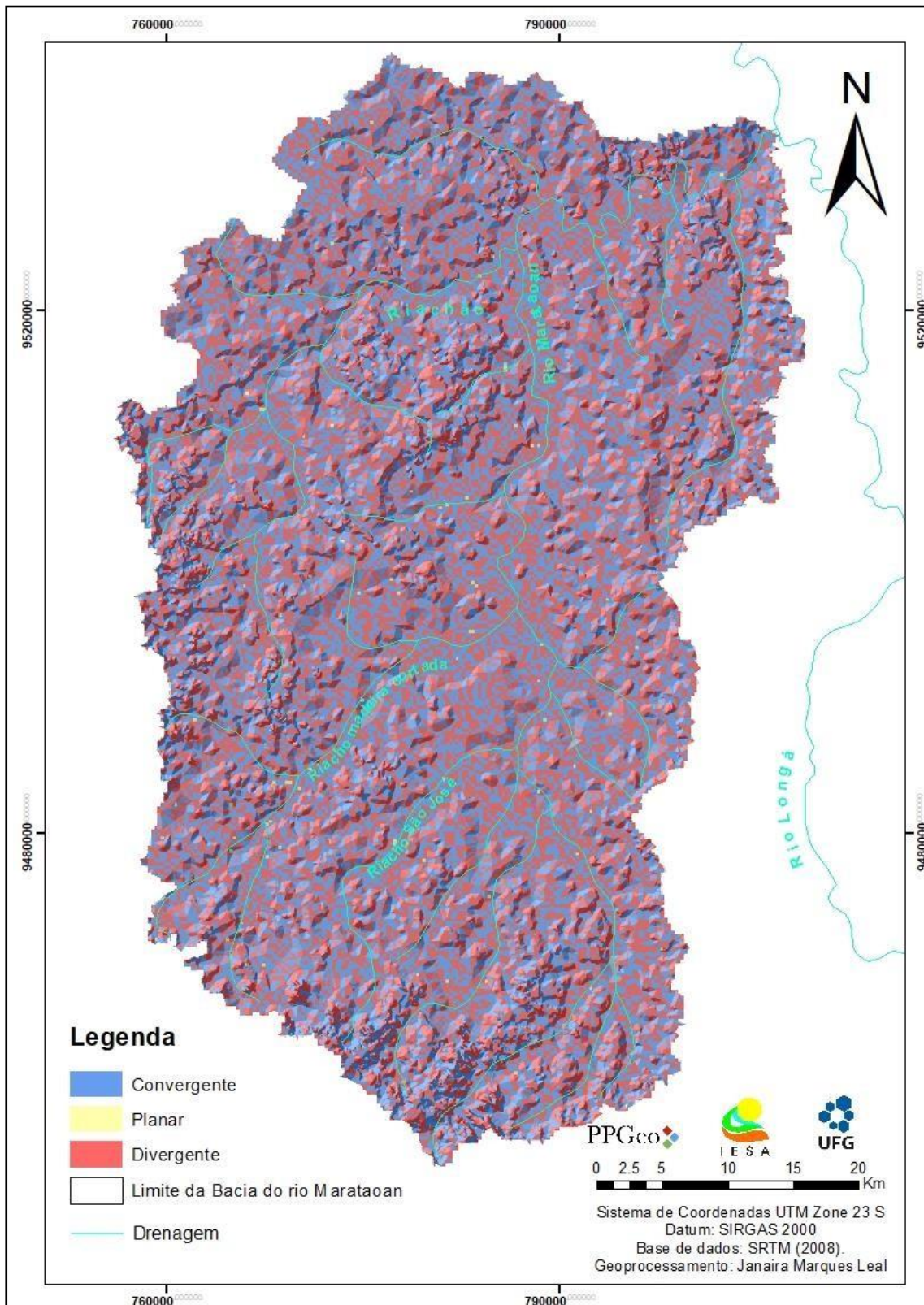
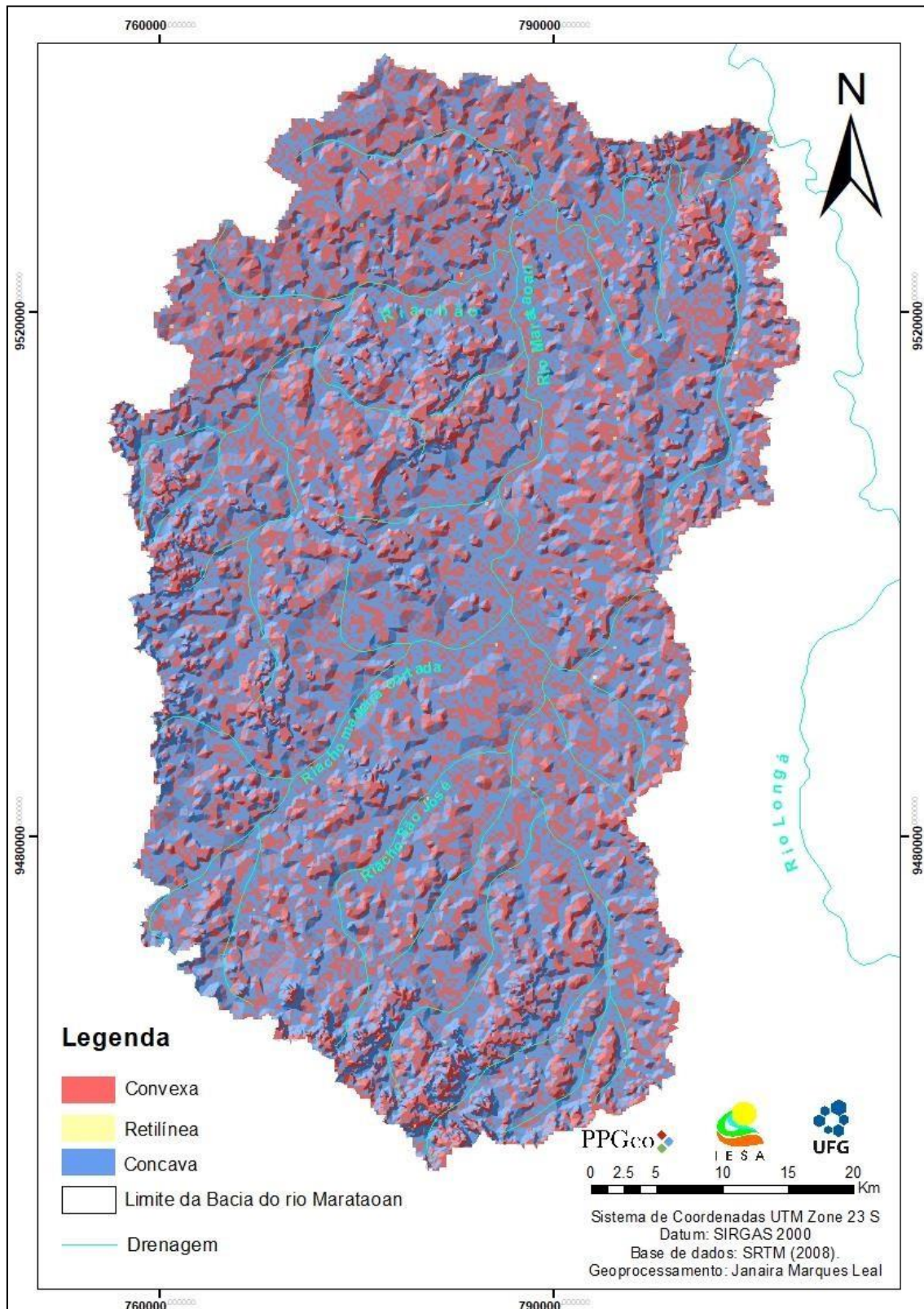


Figura 48 - Mapa de curvatura vertical das vertentes da BHRM, resolução espacial do modelo numérico do terreno de 250x250 m



As curvaturas vertical e horizontal apresentam influência direta nos processos de migração e acúmulo de água, minerais e materiais orgânicos no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade (BISPO et al., 2011).

Neste sentido, para a BHRM verificou-se uma predominância da classe convexa, correspondendo a 52,3% da área total da bacia, o que em valores absolutos equivale a 1.564,1 km². Em seguida, a outra classe de destaque é côncava, que ocupa uma área de 1.387,7 km², algo correspondente a 46,5% da área total da bacia. Por último, tem-se a classe retilínea, com a menor expressão espacial na área estudada, abrangendo tão somente 35,3 km², o que corresponde a 1,2% da extensão territorial da BHRM (Tabela 22).

Tabela 22 - Classes de curvaturas verticais da BHRM

Classe de Curvatura	Área (km²)	%
Convexa	1.564,1	52,3
Côncava	1.387,7	46,5
Retilínea	35,3	1,2

Fonte: Pesquisa direta (2021).

Como explicitado anteriormente, para a área da bacia hidrográfica do rio Marataoan, as resoluções maiores delineiam melhor as feições, deixando em evidência as formas Côncavas, Retilíneas e Convexas. As áreas inseridas na classe de relevo côncavo indicados pela cor azul no mapa da Figura 47 indicam a forma contínua de representação dos canais fluviais, ratificando a colocação de Romão (2006) acerca da descontinuidade na vertente dos corpos hídricos presentes em mapeamentos em resoluções menores, bem como apresentam-se como áreas com predomínio de transporte e acumulação detrítica. As formas da classe Convexo foram destacadas de forma clara na cor vermelho, na qual é observado predomínio de escoamento superficial. As áreas na classe Retilíneo foram observadas em menores proporções na área de estudo, sendo identificados alguns pontos em áreas mais rebaixadas.

A dissecação vertical permite indicar de maneira geral em qual segmento da vertente podem atuar as maiores energias dos fluxos superficiais e dessa forma, no ponto condicionado ao relevo, em que a ação erosiva é mais suscetível. Assim, quando analisado em perfil, apresenta uma relação com os processos de concentração e convergência de fluxos de água, as áreas côncavas indicam uma menor capacidade na ação de retirada dos sedimentos de um determinado local, ao passo que a forma convexa apresenta um acentuado poder de erosão. As áreas retilíneas apresentam valores de declividade similares em todos os pontos da vertente e são característicos transicionais

entre as classes Côncavo e Convexo. A Figura 49 apresenta exemplo de vertente encontrada na BHRM com característica Côncava e a Figura 50 apresenta vertentes convexas.

Figura 49 - Exemplo de vertente Côncava no município de José de Freitas



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Figura 50 - Exemplo de vertente Convexa no município de José de Freitas

Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

A curvatura horizontal indica uma relação direta com o escoamento superficial nas vertentes com a concentração e dispersão dos fluxos de água. Ao espacializar a curvatura horizontal, estas foram classificadas em vertentes Convergente, Planar e Divergente, conforme pode ser visualizado na Tabela 23 em que são individualizadas as extensões territoriais de cada classe.

Tabela 23 - Classes de curvaturas horizontais da BHRM, Piauí

Classe de Curvatura	Área (km ²)	%
Divergente	1.465,8	49
Convergente	1.373,2	46
Planar	148,2	5

Fonte: Pesquisa direta (2021).

As vertentes convergentes que são caracterizadas pelo processo de concentração de fluxos abrangem 1.373,2 km², o que corresponde a cerca de 46% da área de estudo. As áreas com características de vertentes planar ocupam uma área de 148,2 km², o equivalente à 5% da bacia. As vertentes divergentes totalizam uma extensão de 1.465,8 km², representando as formas mais expressivas na área, com cerca de 49% da área total da BHRM.

Ao observar a forma de vertente em destaque no mapa da Figura 47, constata-se que as áreas divergentes podem ser associadas aos processos erosivos laminares, uma vez que essa forma apresenta geometria que tendem à distribuição dos fluxos de água com menor capacidade de transporte das partículas do solo, e as áreas convergentes tendem ao transporte de partículas maiores de solo. A partir na análise do mapa da

Figura 48 entende-se que a BHRM apresenta um caráter de vertentes divergente predominando em toda sua área total, sendo assim, a resolução de 250x250 m se mostrando como eficaz no mapeamento da bacia.

Por terem essa característica de concentração e dispersão dos fluxos de água, a curvatura horizontal constitui-se em atributo do relevo importante na interpretação de áreas suscetíveis a ação erosiva linear na vertente, conjugado a dinâmica superficial condicionada pelo relevo.

As Figuras 51 e 52 tornam possível a observação de áreas com potenciais ações divergente e convergente de fluxo de água.

Figura 51 - Áreas propensas a dispersão de fluxo (divergente) no município de Cabeceiras do Piauí



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Figura 52 - Áreas propensas a recebimento de sedimentos pelo fluxo de água superficial (convergente), no município de Barras



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

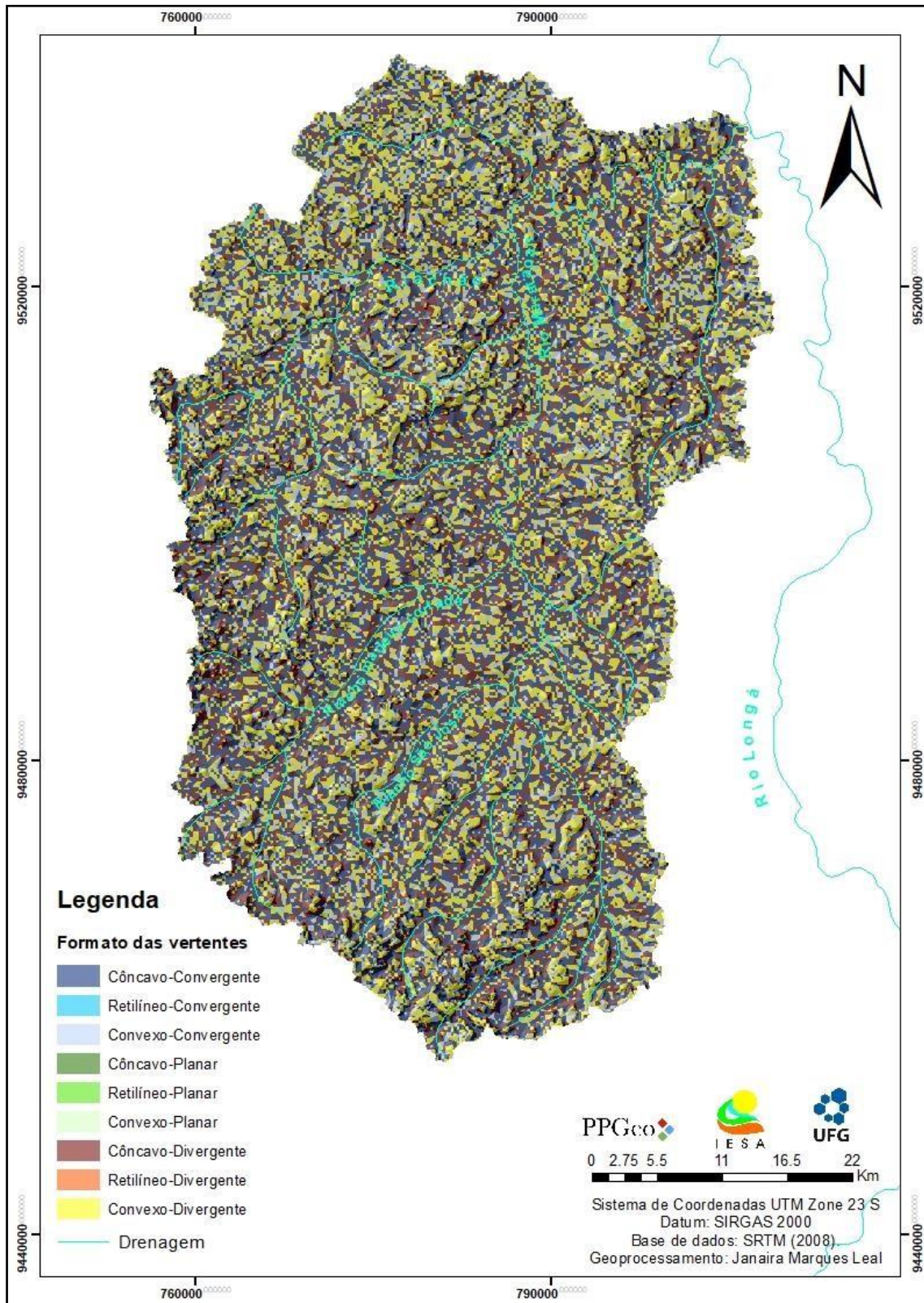
Ao término da etapa de análise das curvaturas separadamente, realizou-se a confecção do mapa de forma das vertentes, no qual este resulta da combinação entre as curvaturas vertical e horizontal. Como produto final da associação da curvatura vertical (côncavo, retilíneo e convexo) e curvatura horizontal (convergente, planar e divergente), estabelecendo-se nove classes distintas para as formas do terreno (Quadro 11 e Figura 53).

Quadro 11 - Formas das vertentes da bacia hidrográfica do rio Marataoan

Curvaturas	1 = Convergente	2 = Planar	3 = Divergente
1 = Convexa	11 convexo-convergente	12 convexo-planar	13 convexo-divergente
2 = Retilínea	21 retilíneo-convergente	22 retilíneo-planar	23 retilíneo-divergente
3 = Côncava	31 côncavo-convergente	32 côncavo-planar	33 côncavo-divergente

Fonte: Própria autora (2021) Adaptado de Valeriano (2008).

Figura 53 - Mapa de formas das vertentes da Bacia hidrográfica do rio Marataoan



Para que se fizesse possível a atribuição de valores de vulnerabilidade erosiva da forma das vertentes estabeleceu-se três classes de vulnerabilidade valores variando de 1,0 à 3,0, sendo que os valores próximos a 1,0 correspondem às classes de alta vulnerabilidade aos processos erosivos intensos, correspondendo as formas de vertentes côncavas – convergentes. Para formas de vertentes convexo-divergentes foram atribuídos os valores de baixa vulnerabilidade à perda de solos, portanto próximos à 1,0.

O Quadro 12 apresenta como estão associadas as formas de terreno aos devidos graus de vulnerabilidade de acordo com o grau de concentração de fluxos de escoamento superficial.

Quadro 12 - Classes de forma das vertentes e vulnerabilidade à perda de solos de acordo com a concentração de fluxos de escoamento superficial (processos erosivos laminares)

Curv. Horizontal	Curv. Vertical	Forma do Terreno	Sigla	Valor para a vulnerabilidade	Classe de vuln.	Área (%)
Convergente	Côncavo	Côncavo-convergente	cc-cg	1,0	Baixa	35,5
	Retilíneo	Retilíneo-convergente	rt-cg	1,0	Baixa	0,02
	Convexo	Convexo-convergente	cv-cg	1,0	Alta	12,7
Planar	Côncavo	Côncavo-planar	cc-pl	2,0	Moderada	0,10
	Retilíneo	Retilíneo-planar	rt-pl	3,0	Alta	0,001
	Convexo	Convexo-planar	cv-pl	3,0	Alta	0,04
Divergente	Côncavo	Côncavo-divergente	cc-dg	2,0	Moderada	21,5
	Retilíneo	Retilíneo-divergente	rt-dg	3,0	Alta	0,02
	Convexo	Convexo-divergente	cv-dg	3,0	Alta	29,8

Fonte: Próprio autor (2024), Adaptado de Silva Neto (2013).

A partir da análise do Quadro 12, observa-se a simplificação das classes levando em consideração a forma e a aceleração do fluxo, deste modo, as formas das vertentes mais vulneráveis à perdas de solos são as classes, cuja geometria das vertentes estão condicionadas à maior escoamento laminar e menor aceleração de fluxo.

Na área de estudo foram identificadas formas de relevo que apresentam geometria que tendem à distribuição dos fluxos de água, ou seja, menor capacidade de transporte das partículas do solo e mais vulneráveis a processos erosivos laminares (Figura 51). Nesse sentido, as formas Retilíneo-Planar, Retilíneo-Divergente, Convexo-Planar e Convexo-Divergente foram classificadas como “Alta” vulnerabilidade aos processos erosivos, apresentado um total de 42,9% da área total da bacia. Já as formas

Côncavo-Planar e Côncavo-divergente, foram classificadas como vulnerabilidade “Moderada” aos processos erosivos superficiais (21,6%). A classe “Baixa” vulnerabilidade apresenta na área da BHRM, cerca de 35,5% da área total da bacia.

Observou-se que 0,001% da BHRM apresentou vertentes na forma Retilíneo-Planar, tipo de forma que corresponde a uma classe intermediária entre as vertentes convergentes e divergentes. Classificou-se essa classe como “Alta” vulnerabilidade aos processos de escoamento superficial.

Neste sentido, a forma das vertentes identificadas como Convexo-Divergente, Retilíneo-Planar, Convexo-Planar e Retilíneo-Divergente foram classificadas como “Alta” Vulnerabilidade ambiental por apresentarem uma tendência maior ao escoamento laminar e menor aceleração de fluxo. Horton (1945) explana que a erosão laminar ocorre de maneira lenta e é de difícil mensuração, porém sempre se espalha sobre extensas áreas, chegando a recobrir cerca de dois terços ou mais das encostas, em uma bacia de drenagem, durante um pico de evento chuvoso, sendo considerada por muitos autores como o principal responsável pela maior produção de sedimento em uma bacia hidrográfica.

As formas Côncavo-Planar e Côncavo-Divergente foram classificadas como “Moderada”, por serem áreas de dispersão de fluxo correspondem às classes mais fortemente suscetível aos processos erosivos menos intensos.

Na área de estudo foram identificadas formas de relevo que apresentam geometria que tendem à distribuição dos fluxos de água, ou seja, menor capacidade de transporte das partículas do solo e mais vulneráveis a processos erosivos laminares (Figura 51). Porém, verificou-se também, uma forte presença de formas que tendem a favorecer os processos erosivos lineares, como as áreas Retilíneo-Convergente, Convexo-Convergente e Côncavo-convergente, sendo estes caracterizados com uma “Baixa” vulnerabilidade aos processos erosivos superficiais (35,5%).

Assim, percebe-se que a BHRM apresenta em sua maioria áreas com uma relação direta com os processos erosivos laminares, uma vez que ela possui 42,9% de sua superfície com predominância de escoamento difuso. A bacia também apresenta uma intensidade dos processos erosivos lineares, observáveis a partir da análise do escoamento concentrado existente na BHRM, fazendo com que ela apresente pontos com processos erosivos bastante intensificados. As Figuras 54 e 55 demonstram exemplos desses processos erosivos discutidos anteriormente.

Figura 54 - Exemplo de erosão laminar na BHRM no município de Cabeceiras do Piauí



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Figura 55 - Exemplo de erosão linear na BHRM no município de José de Freitas



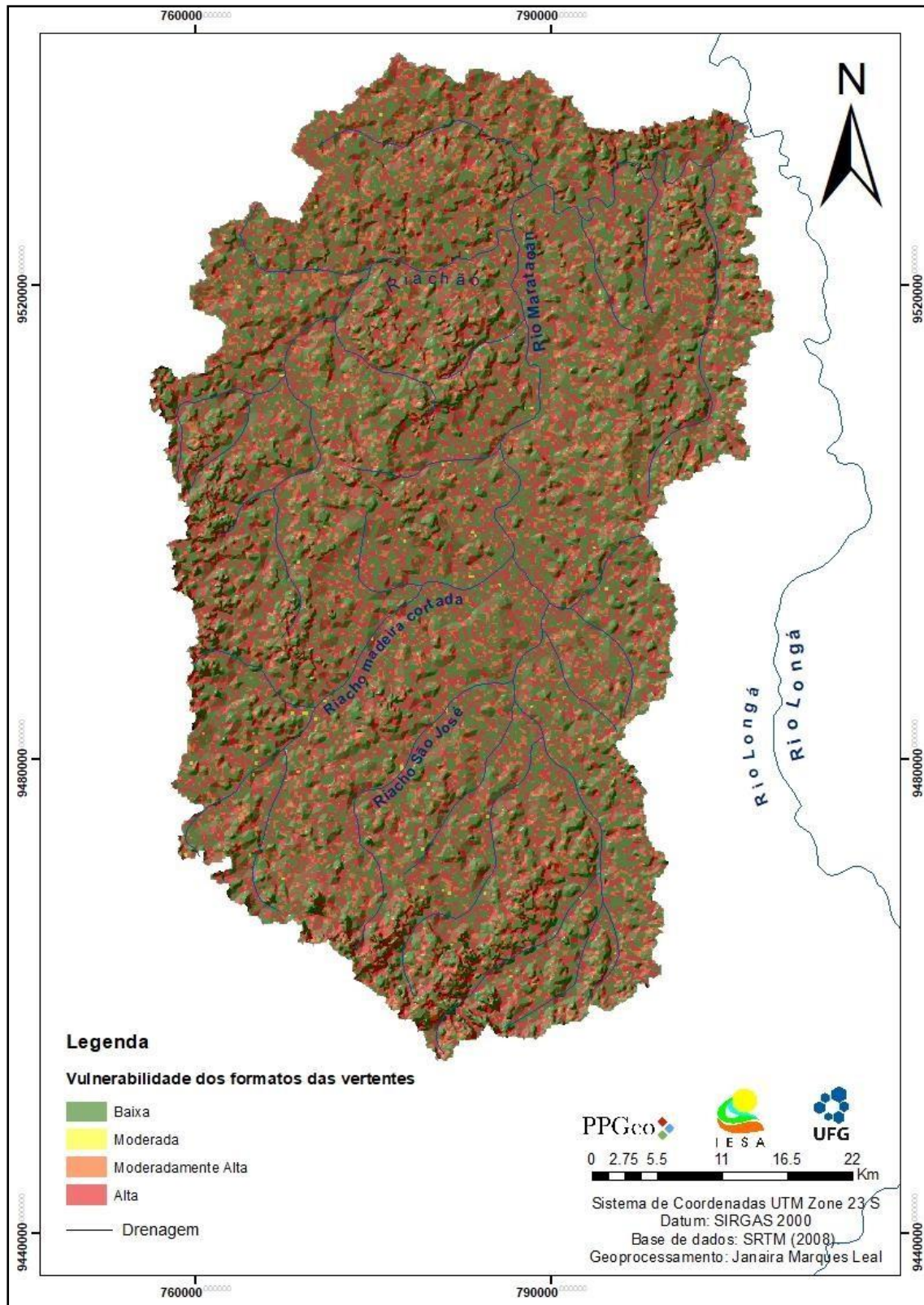
Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Assim, compreende-se que as dinâmicas e intensidades dos processos erosivos estão diretamente ligados às formas do terreno e as formas das vertentes, e que devem ser levados em consideração tanto a análise da intensidade da água, quanto do direcionamento dos fluxos de escoamento da mesma, podendo assim, serem correlacionados aos processos erosivos e as formas das vertentes para que se realize um estudo de uma determinada área.

Considerando as dinâmicas e intensidades dos processos erosivos diretamente

ligados as formas das vertentes o mapa da Figura 56 apresenta a adequação às classes de vulnerabilidade à perda de solos para a área de estudo.

Figura 56 - Classes de vulnerabilidade dos formatos das vertentes da bacia hidrográficada rio Marataoan



4.1.4 Erosividade da Chuva

No que concerne à análise da vulnerabilidade do fator clima, ela foi realizada com base na erosividade da chuva. Considerando os valores mínimos e máximos obtidos do índice de erosividade anual dos postos pluviométricos, foram estabelecidas 5 classes, exibidas na Tabela 24.

Tabela 24 - Intervalos e classes de Erosividade das chuvas (R) com respectivas áreas em porcentagens, para a Bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí.

Intervalos de R (MJ.mm/ha.h.ano)	Classes atribuídas	Área (km ²)	%
10.044,00 a 10.150,8	Muito baixa	1.580,0	52,87
10.150,81 a 10.257,6	Baixa	624,3	20,89
10.257,61 a 10.364,4	Média	384,8	12,88
10.364,41 a 10.471,2	Alta	245,3	9,21
10.471,21 a 10.578,1	Muito alta	124,0	4,15

Pesquisa direta (2023). Organização: Janaira Marques Leal (2024).

De acordo com os dados de erosividade coletados nos postos pluviométricos existentes no entorno da BHRM, observou-se que apenas 13,36% da área total está submetida às chuvas com alto potencial erosivo do escoamento das águas superficiais, enquanto a maior parte (quase 74%) apresenta baixa ou muito baixa erosividade.

A partir da análise da Tabela 25, pode-se afirmar que o posto com menor valor de erosividade foi o de Piripiri, com 9.530,9 Mj.mm/ha.h.ano, e o de maior valor foi o de Esperantina, que apresentou 11.016,9 Mj.mm/ha.h.ano. O período de maior erosividade das chuvas ocorre nos meses de janeiro a abril, que concentram a maior parte das precipitações do ano. É importante salientar que, resguardas as devidas diferenças em relação aos diferentes recortes espaciais, base de dados e série-históricas, os valores de erosividade calculados neste trabalho são semelhantes aos encontrados em Silva et al. (2016), para a sub-bacia do alto curso do rio Longá, cuja maior concentração de erosividade deu-se nos meses de novembro a abril. Os resultados de Pinheiro (2011) corroboram os dados destacados acima, pois em seu estudo os maiores valores de “r” foram encontrados entre fevereiro e maio.

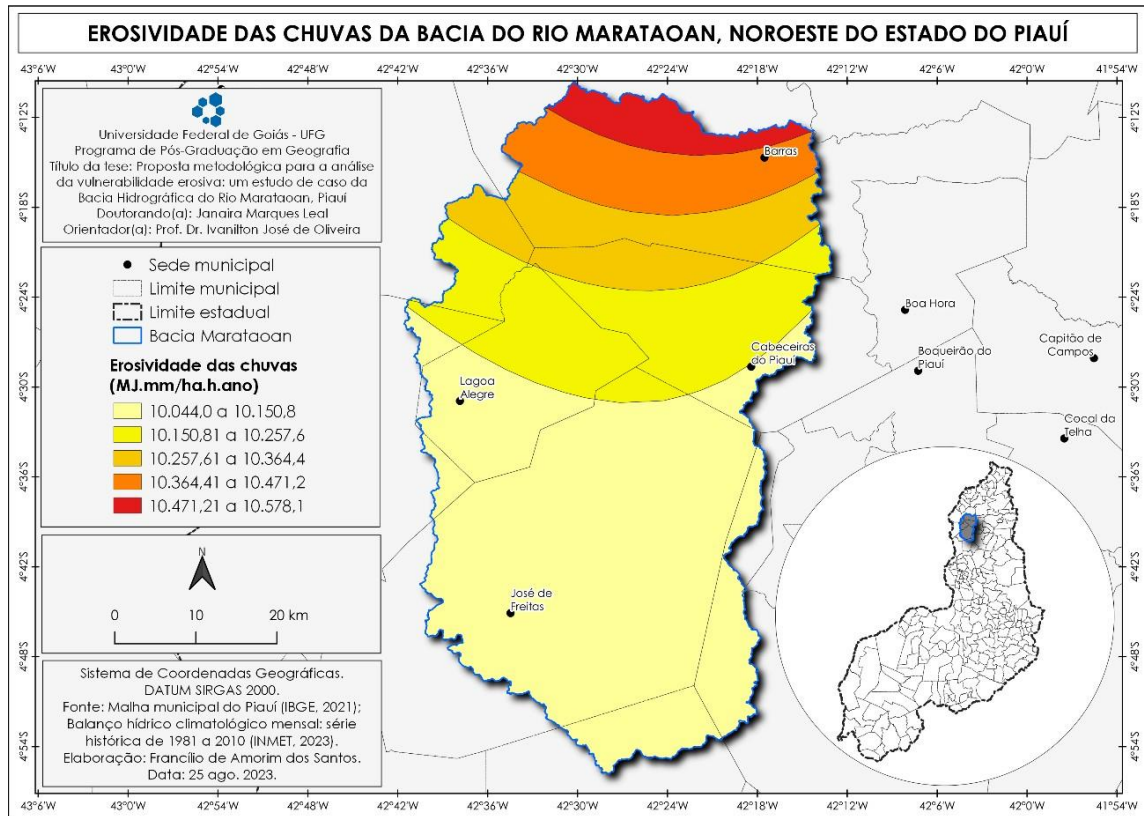
Tabela 25 - Erosividade das chuvas (R) mensal/anual dos postos pluviométricos do entorno da bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí.

Postos pluviométricos	Erosividade Mensal (Mj.mm/ha.h.ano)												Índice anual de Erosividade (Mj.mm/ha.h.ano)
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
Caxias	1.386,3	1.639,7	2.907,4	2.179,8	672,8	64,4	21,8	13,9	10,1	39,9	98,3	563,7	9.598,6
Esperantina	1.202,3	1.831,5	2.936,8	2.901,2	1.321,3	265,2	79,0	14,5	13,0	24,0	65,0	362,6	11.016,9
Piripiri	1.242,2	1.711,3	2.692,1	2.523,3	815,7	130,9	36,4	9,8	7,3	28,5	45,7	287,1	9.530,9
Teresina	1.565,1	1.771,5	2.995,2	2.246,9	570,5	57,3	21,5	10,9	18,2	48,2	169,9	629,1	10.104,9

Fonte: Pesquisa direta. Leal (Org.), 2024.

Cabe destacar que a **Figura 57** apresenta a espacialização dos valores de Erosividade da BHRM, no qual observa-se que tais valores são crescentes de sul para norte.

Figura 57 - Erosividade das chuvas (R) da Bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí



A Figura 57 mostra a distribuição das classes de erosividade na área, deixando evidente que o posto pluviométrico de Esperantina exerce forte influência na distribuição do alto índice de erosividade nessa área, podendo ser observado tal influência pelos altos níveis de precipitação, em relação à área considerada, refletindo, assim no maior potencial erosivo da chuva. A ocorrência conjunta de chuvas com erosividade elevada e solos frágeis desprotegidos, fornecem condições básicas para o desencadeamento de processos erosivos.

4.1.5 Uso e cobertura do solo

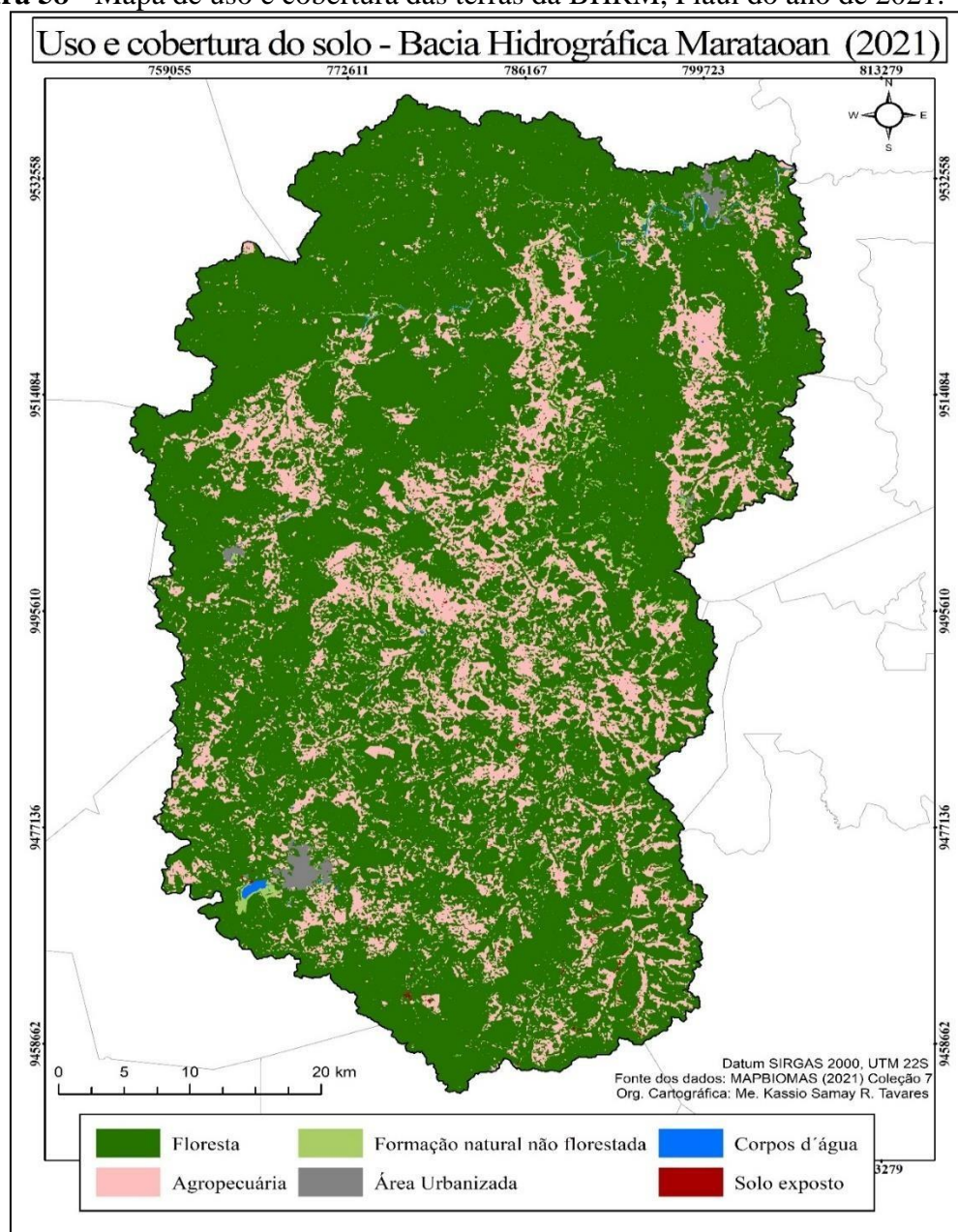
As diversas formas de uso e cobertura do solo classifica-se como parâmetro fundamental para a consecução de modelamentos com vistas identificação de áreas vulneráveis.

A avaliação da capacidade de uso do solo é uma importante ferramenta,

utilizável não só para o planejamento e uso das terras, mas também pode ser empregada para a avaliação e definição de escala sustentável da produção agrícola (PEREIRA; TÔSTO, 2012).

Analisando o mapeamento de uso e cobertura do solo na bacia (apresentado pela Figura 58) no ano de 2021, verificou-se que, naquele ano, a classe Floresta (presença de cerrado denso e caatinga arbustiva) apresentava uma área de 2.327,29 km², o que correspondia a 77,89% da área total da bacia hidrográfica do rio Marataoan. O restante da área, 1.206,93 km² (66,98%) eram ocupadas pelas classes temáticas agropecuária com 592,19 km², formação natural não florestal (43,15 km²), solo exposto (4,42 km²), área urbanizada (16,43 km²) e corpos d'água (4,42 km²) da área total estudada (Tabela 26).

Figura 58 - Mapa de uso e cobertura das terras da BHRM, Piauí do ano de 2021.



Quadro 13 - Pontos de validação de uso e cobertura do solo

Número do ponto	Latitude	Longitude	Altitude (m)
P01	4° 50' 34,3" S	42° 34' 21,6" W	202
P02	4° 51' 29,3" S	42° 31' 38,4" W	230
P03	4° 49' 01,8" S	42° 50' 26,9" W	147
P04	4° 43' 08,1" S	42° 22' 02,8" W	97
P05	4° 31' 45,0" S	42° 21' 00,1" W	107
P06	4° 20' 26,0" S	42° 47' 29,0" W	113
P07	4° 12' 55,0" S	42° 47' 38,0" W	106
P08	4° 15' 45,1" S	42° 18' 31,8" W	112

A classe temática Floresta apresenta no ano analisado uma redução de aproximadamente 31% de sua área, compreendendo numa diminuição de 180,90 km² de área, quando comparamos os dados analisados dos anos de 1973 e de 2011. No intervalo de tempo citado, há uma tendência ao desmatamento e supressão da vegetação mais densa, em consequência da incorporação de terras por práticas agropecuárias e a introdução de pastagem e lavouras temporárias. O mosaico apresentado pela Figura 59, demonstra algumas formas de uso e cobertura do solo da BHRM.

Figura 59 - Imagens de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí

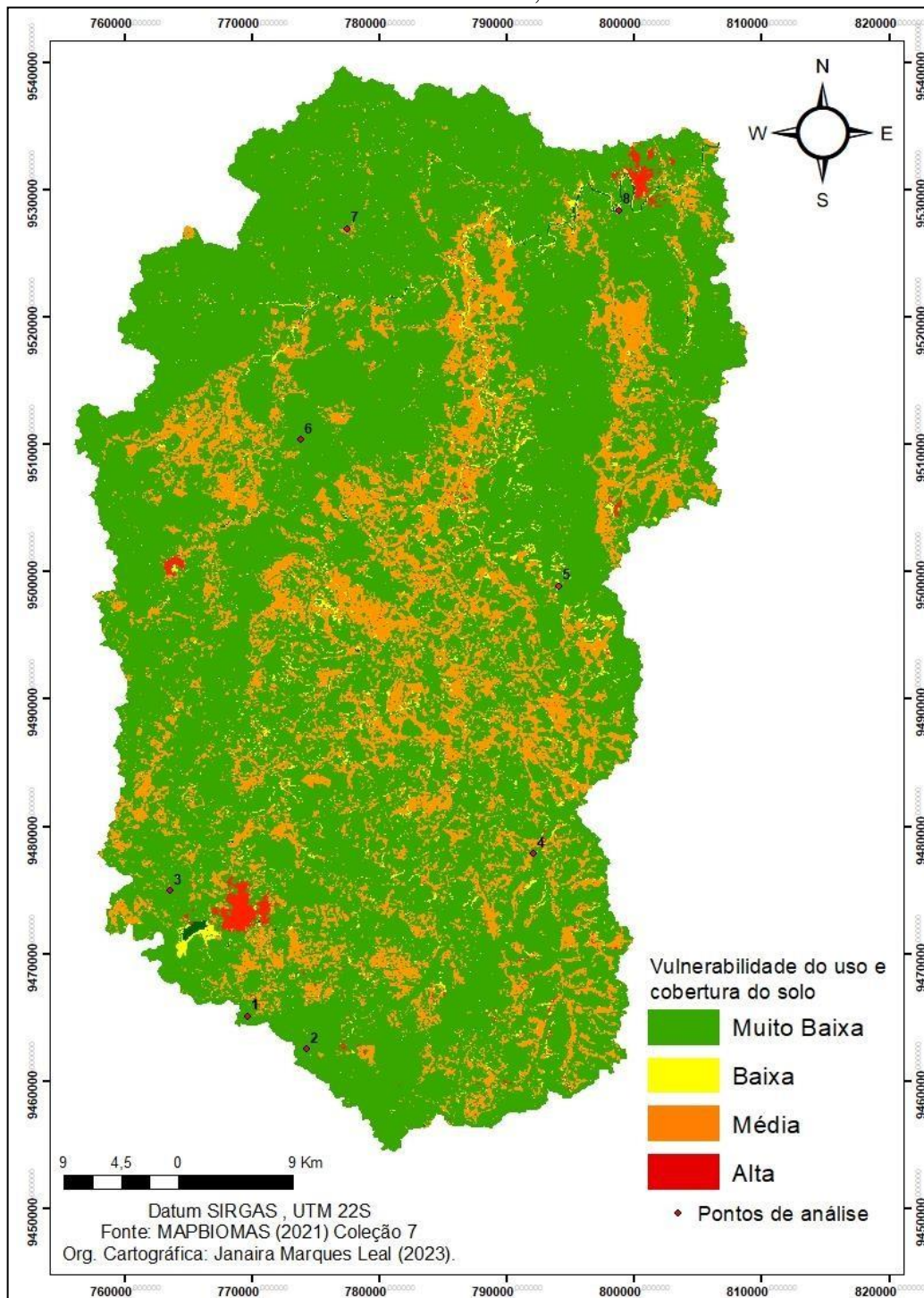


Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Ao observar o mosaico da Figura 59, é possível perceber a existência da utilização dos solos para o desenvolvimento de atividades econômicas como a pecuária (59a); áreas de cultivo da cultura de eucalipto para a produção de celulose para fábricas locais (59b); áreas com presença de extração de areia voltados para o uso na construção civil (59c); Na Figura (59e) é possível constatar grandes áreas de solo exposto que a bacia apresenta. Vale ressaltar que tais áreas têm predominância na parte centro-leste da área de estudo, devido à questões voltadas tanto ao uso inadequado dessas áreas, como por questões de escassez de chuvas. Já na Figura (59d e 59f) é possível notar a forte

urbanização da bacia próximas ao canal principal, sobretudo nas cidades de José de Freitas e Barras. O mapa da Figura 60 apresenta o grau de vulnerabilidade do parâmetro uso e cobertura do solo.

Figura 60 - Mapa de vulnerabilidade do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí.

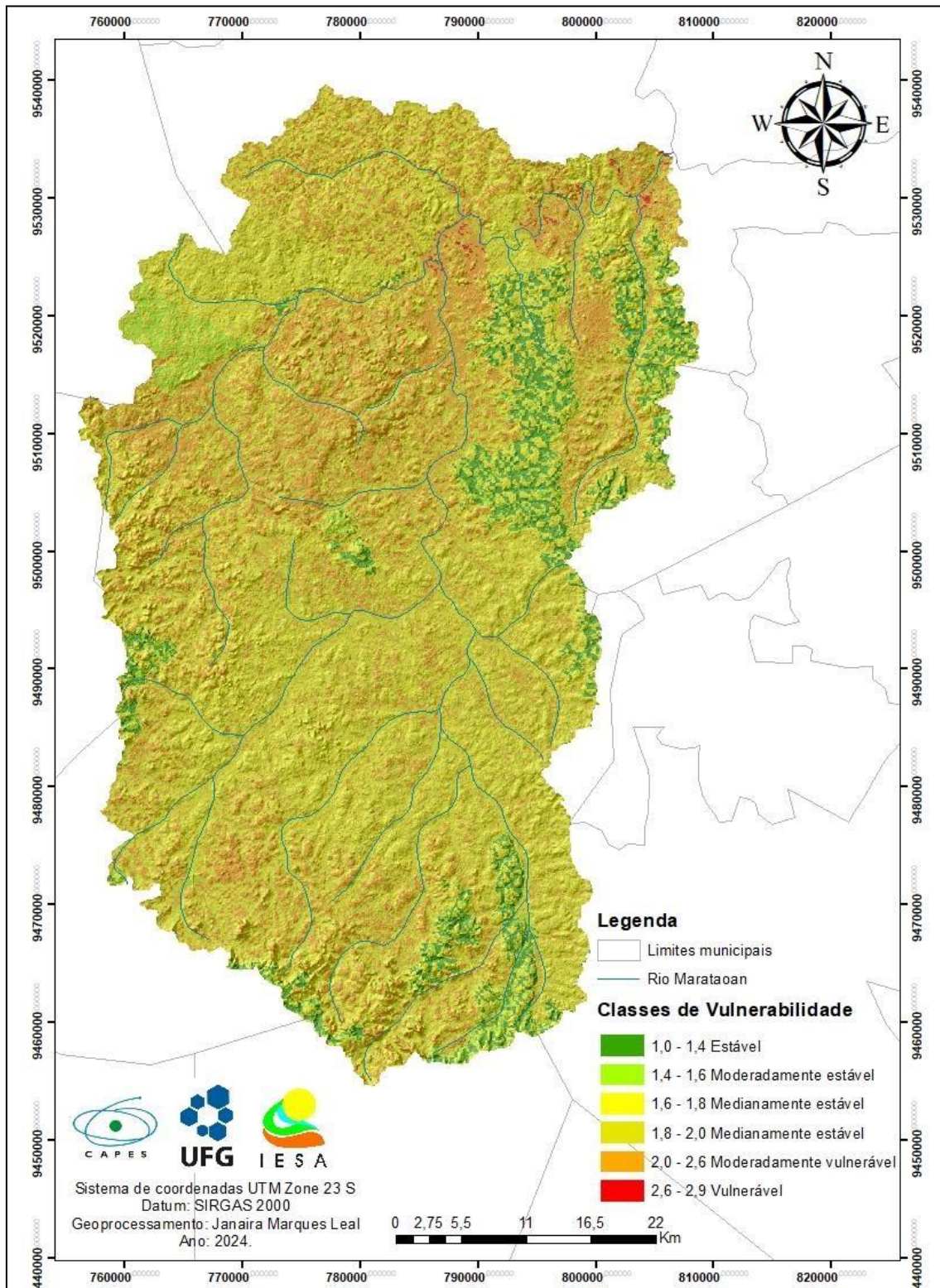


A Figura 61 apresenta a síntese do presente trabalho, identificando a distribuição espacial dos diferentes níveis de vulnerabilidade ambiental para a bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí, a partir da aplicação da metodologia de Crepani et al. (2001),

considerando os indicadores anteriormente abordados e suas citadas adaptações.

Para que se pudesse chegar aos resultados aqui apresentados, realizou-se a álgebra de mapas para as variáveis descritas, sendo possível, a partir disso, a espacialização das áreas mais e menos vulneráveis aos processos erosivos do solo. Dessa forma, constatou-se que 5,9% da área apresenta-se inserida na classe estável; 2,2% são moderadamente estáveis; 67% são medianamente estáveis; 24,5% encontram-se inseridos na classe moderadamente vulnerável; e apenas 0,15% são vulneráveis.

Figura 61 - Mapa de vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí



A classe “Vulnerável” apresenta-se com predominância na porção norte da área de estudo, caracterizando-se como a área que mais apresenta sinais de altos índices de ambientes vulneráveis. Todos os indicadores contribuíram para o resultado da presente

classe de vulnerabilidade nessa área, com altos valores, sobretudo, os valores de Erosividade, que indicam uma área com um volume de chuvas bastante elevado e intensa atividade pecuária. É importante destacar também, que a presente classe está inserida em uma área de intensa urbanização, o que pode resultar também em altos valores de vulnerabilidade (Figura 62).

Figura 62 - Área ao norte da BHRM, associada a classe vulnerável.



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

A classe “moderadamente estável” encontra-se distribuída em manchas em praticamente toda a bacia hidrográfica estudada, no qual esta classe resulta do equilíbrio entre os indicadores que apresentam índices mais baixos e outros apresentando índices mais altos apresentando características de menor vulnerabilidade ao ambiente.

A classe “Medianamente Estável” apresenta cerca de 67% da área total da área, se destacando da presença de áreas mais planas da BHRM. Ao analisar essas áreas, foi possível observar a presença de rampas curtas e suaves, exibindo um encaixamento somente nas áreas próximas aos corpos hídricos, ou seja, confirmando a aptidão de processos erosivos laminares, devido à dispersão do escoamento superficial (FIGURA 63).

Figura 63 - Área próxima ao leito do rio Marataoan no município de Barras, Piauí.



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

As classes “Moderadamente vulnerável” e “Vulnerável” também ficaram evidenciadas, sendo representadas por 24,6% da área da BHRM. Essa representatividade foi observada em áreas que apresentaram a predominância da forma de relevo Retilíneo-Planar, Retilíneo-Divergente, Convexo-Planar e Convexo-Divergente, que, ao se apresentar em conjunto com a classe quatro do HAND (fator de maior vulnerabilidade a processos erosivos, pois é caracterizados por áreas de topo), traz um alto destaque para a vulnerabilidade ambiental. Sendo assim, existe a probabilidade de ocorrer processos erosivos laminares (Figura 64).

Figura 64 - Área com presença de erosão laminar na BHRM, Piauí.



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

É importante destacar que tais áreas possuem características de dispersão de fluxo, ou seja, estão propensas a eventos erosivos laminares e ao levar em consideração a cobertura vegetativa pode ter impactos minimizados. No contexto da classificação do HAND, essa classe está vinculada a áreas com declividades suficientes para permitir o escoamento das águas superficiais, constituído por solos de textura arenosa ou textura média, como o Neossolo Quartzarênico e Latossolo de textura média.

As áreas “Estáveis” são formadas por ambientes de vulnerabilidade baixa associadas às áreas com solos bem desenvolvidos e uma elevada presença de vegetação mediana à baixa. Vale salientar que apesar de apresentar baixa vulnerabilidade, essas áreas necessitam de monitoramento por parte do poder público, através de projetos que visem uma boa relação entre sociedade e natureza. Essas áreas estão diretamente ligadas às formas Retilíneo-Convergente, Convexo-Convergente e Côncavo-convergente, podendo assim, existir a probabilidade de ocorrer processos erosivos lineares, devido ao fato de serem áreas de concentração de fluxo (Figura 65).

Figura 65 - Área associada a classe estável da BHRM, Piauí.



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2020.

Com isso, percebe-se que ao se levar em consideração as formas de relevo e o HAND, os dados ratificam a justificativa da análise da vulnerabilidade ambiental, promovendo assim, uma análise das características de concentração e dispersão do fluxo, bem como juntamente a dissecação e áreas de encostas de vertentes para promover uma análise significativa para a área de estudo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa buscou apresentar uma proposta metodológica de mapeamento da vulnerabilidade natural à perda de solos que fosse alternativa à de Crepani et. al (2001), a partir da substituição dos índices “dissecação do relevo” e “amplitude altimétrica”.

Para a demonstração dos resultados supracitados na presente pesquisa, realizou-se a média aritmética proposta pela metodologia de Crepani et. al (2001), na qual os valores são somados e em seguida divididos pela quantidade de parâmetros existentes.

A princípio, defendeu-se que a aplicação da referida média aritmética poderia apresentar uma suavização de áreas mais vulneráveis em função da presença de áreas menos vulneráveis. Assim, aplicou-se uma outra forma de realizar a equação matemática, ao invés da divisão, que se realizasse apenas a soma. Porém os resultados não condiziam com a forma de avaliação ou realidade da área de estudo. Neste sentido, conclui-se que apenas a divisão é a forma adequada para a realização de trabalhos dessa natureza.

O que se propôs como a adaptação (dissecação/amplitude por HAND/formas de relevo) apresentam graus mais elevados de precisão na caracterização de dos processos de constituição dos ambientes, tendo em vista que integra informações de subsuperficial, resistência mecânica a erosão e se mostra eficaz na caracterização de zonas mais instáveis à instalação e/ou evolução de processos erosivos no terreno.

Os resultados sobre os fluxos relacionados com a forma do terreno corroboraram com a identificação de áreas sujeitas aos processos erosivos lineares e laminares, que, juntamente ao algoritmo HAND, em associação com o método proposto por Salomão, Canil e Rodrigues (2012), identificaram, sobretudo, as áreas com presença de erosão laminar na BHRM.

Com relação aos objetivos alcançados pela presente pesquisa apresenta-se a realização da caracterização dos aspectos físico-ambientais da bacia hidrografia do rio Marataoan, por meio dos critérios fotointerpretativos utilizados (geologia, geomorfologia, pedologia, aspectos econômicos, vegetacionais e hidrográficos, climáticos e de uso das terras), que subsidiaram o produto final desta pesquisa.

Realizou-se a análise da dissecação vertical da área de estudo por meio da aplicação do algoritmo HAND, no qual observou-se a classe que se destaca na área é a moderada, com 40,9% de sua área total, estando assim, bastante suscetível aos processos de formação de ravinas e pouco suscetíveis a voçorocas, associados à solos muito erodíveis, no qual processos de ravinamento se desenvolvem em função da

ocupação do solo a partir de pequena concentração das águas de escoamento superficial. A BHRM apresentou ainda destaque pra classe de baixa e moderadamente alta vulnerabilidade, com 36,3% e 22,1%, respectivamente.

No que concerne a utilização das Curvaturas Vertical e Horizontal na análise do escoamento dos fluxos de águas e sua relação com a intensidade da erosão pluvial, este mostrou-se de forma favorável na avaliação da vulnerabilidade à perda de solos a partir das formas do terreno. Assim, com relação ao mapeamento da vulnerabilidade das formas de relevo, apresentaram destaque na BHRM as áreas de baixa e alta vulnerabilidade, sendo 51,3% e 35,5% da área total, respectivamente.

As porções que apresentam uma vulnerabilidade medianamente estável, o que se destaca na área de estudo (67%), são condicionadas às curvaturas de relevo e a classificação proposta pelo HAND. Observa-se que essas áreas demonstram uma dissipação dos fluxos de água, bem drenadas e com elevadas permeabilidades até grandes profundidades, facilitando a rápida infiltração da água da chuva.

Assim sendo, entende-se que as áreas que apresentaram maiores índices de vulnerabilidade ambiental demandam a elaboração de ações mitigadoras perante a apropriação e uso da natureza pela sociedade, possibilitando um desenvolvimento socioeconômico em bases sustentáveis.

Logo, o que fica em evidência é que ao implementar as curvaturas (formas de relevo) e a dissecação das vertentes, as classes de vulnerabilidade ambiental, apresentaram melhor espacialização em seus resultados, uma vez que é notória a relação existente entre as formas de relevo e os processos erosivos.

A adaptação e aplicação da metodologia de Crepani et al. (2001) para a análise da vulnerabilidade ambiental atrelado a processos erosivos e a formas de relevo, com as complementações propostas neste estudo, e a eficácia da metodologia comprovada em campo, sugere a aplicação da mesma em outras áreas do Estado do Piauí, inclusive com condições ambientais distintas do município em questão. Também cabe salientar a necessidade de efetuar os testes de resolução de curvaturas e do limiar do HAND, pois são necessárias adequações para as especificidades de cada área. Os resultados obtidos a partir de uma perspectiva integrada, base dos estudos de Geografia física, buscam contribuir com ações que possam promover o planejamento territorial para fins de sustentabilidade da bacia hidrográfica do rio Marataoan, Piauí.

As revisões bibliográficas realizadas para composição do presente trabalho foram indispensáveis para o conhecimento sobre a vulnerabilidade e os problemas ambientais identificados na área de pesquisa. Essas revisões associadas ao trabalho de

campo e o emprego de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento utilizando-se o SIG, potencializaram o desenvolvimento do trabalho e são tidas como fundamentais para o alcance dos objetivos propostos, haja vista, que a área-objeto é ampla, dificultando e tornando bastante complicado um trabalho a campo analisando minuciosamente todos os municípios abrangidos pela bacia.

Esse diagnóstico apontando as implicações ambientais da bacia serve como subsídio para o poder público, em específico o comitê de bacia hidrográfica do rio Marataoan, tomar uma ação no sentido de conservar esse recurso natural tão essencial a vida. As populações dos municípios abrangidos pela bacia, por sua vez, não estão eximidas da conservação e devem em conjunto com os governantes de cada município se aliarem em defesa da conservação e proteção da BHRM.

O estudo da vulnerabilidade ambiental é de suma importância para o planejamento e gestão da BHRM, no entanto, sugere-se o estudo sobre a vulnerabilidade socioambiental da bacia, pois os indicadores sociais que são utilizados para produzir um mapa de vulnerabilidade social são importantes, pois a resiliência de uma população é substancial no enfrentamento de implicações ambientais. Desta forma, para trabalhos futuros, a partir da integração entre o mapa de vulnerabilidade ambiental e social pode-se realizar um estudo mais acurado das relações antrópicas e o ambiente na perspectiva da vulnerabilidade.

Vale destacar que a presença de uma base cartográfica mais detalhada para o estudo da bacia hidrográfica em questão seria fundamental para melhorar os resultados obtidos no presente trabalho.

Não obstante, acredita-se ainda que os resultados obtidos na presente pesquisa possam ampliar o arcabouço de conhecimento geográfico acerca do Estado do Piauí, especialmente dos municípios da bacia hidrográfica do rio Marataoan no estado do Piauí.

5 REFERÊNCIAS

- ABREU, A. A. **A Teoria Geomorfológica e sua Edificação: Análise Crítica**. Revista Brasileira de Geomorfologia, 4 (2): 51-67, 2003.
- BARBOSA, G. R., **Contribuição metodológica para mapeamento de fragilidade ambiental para áreas urbanas: estudo de caso da bacia do ribeirão Anicuns no município de Goiânia**. Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pela Universidade Federal de Goiás – UFG, 2020.
- BAPTISTA, João Gabriel. **Geografia Física do Piauí**. 2ª edição. Teresina: COMEPI, 1981.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. *Icone*, 6ª ed. São Paulo, 355 p., 2008.
- BERTALANFFY, L.V. **Teoria Geral dos Sistemas**. Rio de Janeiro: Vozes, [2008 (1901)].
- BERTRAND, R. B. **Paysage et Geographie Física Globale**. In: *Revue Geographique des pyrénées et du Sud-ouest*. 39(3): 49-72. Toulouse França. 1968.
- BERTALANFFY, Ludwig von. **Teoria Geral dos Sistemas**. Tradução de Francisco M. Guimarães. Petrópolis: Vozes, 1973.
- BERTRAND, G. **Paisagem e geografia física global: um esboço metodológico**. Revista IGEOG/USP, São Paulo: USP, n. 13, 1971. Caderno de ciências da terra.
- BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física global: esboço metodológico. Cruz, Olga (trad.) **Cadernos de Ciências da Terra**. São Paulo: USP-IGEOG, nº 43), 1972.
- BIGARELLA, J.J.; MAZUCHOWSKI, J.Z. **Visão integradora da problemática da erosão**. Paraná: Associação de Defesa e Educação Ambiental e Associação Brasileira de Geologia e Engenharia, 1985.
- BIGARELLA, J. J. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis: UFSC, 2003. v. 3.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 2ª. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, v. 3, 2007.
- BLOOM, A. L. **Superfície da terra**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.
- BISPO, P.C., ALMEIDA, C.M, VALERIANO, M.M, MEDEIROS, J.S, CREPANI, E., **Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial**. Revista Geociências 30, 467- 478, 2011.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N.M; MELO, M.T.S. (Orgs). **Processos erosivos no centro- oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC. 464 p., 2006.
- CARDOSO, T. **Homenagem a Jean Tricart (1920-2003)**. Revista Brasileira de Geomorfologia, Uberlândia: UFU, ano 4, n. 2, p. 101-102 set. 2003.
- CARVALHO, R. C. de; KAVISKI, E. **Modelo de Auxílio a Tomada de Decisões em Processos de Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 14, n. 4, p. 17-27, 2009.

CAVALCANTI, L. C. S. **Cartografia de Paisagens: Fundamentos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CAVALCANTI, L. C. S. **Cartografia de paisagens: fundamentos**. 2 ed. rev. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

CONCEIÇÃO, P.C., AMADO, T. J. C., MIELNICZUK, J., SPAGNOLLO, E. **Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Minas Gerais, v.29, n.5, p.777-788, 2005. Disponível: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/jSVckWPjwshTvmPKYDfdv9x/?lang=pt#>. Acesso em 19 jun. 2023.

CHAGAS, C. S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. Viçosa, p. 223, 2006.

CLAVAL, P. **A geografia cultural**. Florianópolis: UFSC, 1999.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Ministério de Minas e Energia. **Mapa Geológico do Estado do Piauí**. 2ª Versão. Teresina, 2004.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Ministério de Minas e Energia. **Mapas estaduais de geodiversidade: Piauí**. Rio de Janeiro: CPRM. 2006. Documento cartográfico em arquivo vetorial. Disponível em <http://geobank.sa.cprm.gov.br>. Acesso em janeiro de 2014.

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.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

CHRISTOFOLETTI, A., **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec, 1979.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. Edgard Blücher, São Paulo, SP, p. 188, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A., **Perspectivas da Geografia**. São Paulo/SP: Difel, 1985. 317 p.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CHRISTOFOLETTI, A., **Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos e planejamento**. In Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos. Org. GUERRA, A. J. T; CUNHA, S. B. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil. 6º edição.2005.

CHORLEY, R. J. **Directions in Geography**. London. Methuen, 1973.

DALRYMPLE, J.B.; BLONG, R.J.; CONACHER, A. J. **hypothetical nine unit landsurface model**. Geomorphology, v. 12, p. 60–76, 1968.

- DURÃES, M. F.; DE MELLO, C. R. **Distribuição espacial da erosão potencial e atual do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, MG.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 21, n. 4, p. 677–685, 2016.
- EMBRAPA. **Atlas Climatológico do Piauí**, 2004.
- ERHART, H. A. **Teoria bio-resistastica e os problemas biogeográficos e paleobiológicos.** Campinas Notícias de Geomorfologia, 1962.
- EVANS, I. S., **General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology**, Chorley, R. J. (ed), Harper & Row, Publishers, New York, USA, pp.: 17-90, 1972.
- FAGUNDES, M. G., **Estudo comparativo da variação de escala na fragilidade ambiental e vulnerabilidade natural do solo na bacia hidrográfica do rio Jundiá.** Dissertação de mestrado apresentada ao departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – FFLCH, da Universidade de São Paulo – USP, 2011.
- FAO (Food and Agriculture Organization). **The State of Food Insecurity in the World 2015.** Food and Agriculture Organization Publications, Rome. 2015.
- FENDRICH, R. et al. **Drenagem e Controle da Erosão Urbana.** 4º Ed. Curitiba: Champagnat, p. 32, 1997.
- FLORENZANO, Tereza Gallotti (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- GUERASIMOV, I. **Problemas Metodológicos de la Ecologizacion de la Ciência Contemporânea.** Editora Pr ed. Moscou: 1980.
- HORTON, R. E. **Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrographical approach to quantitative morphology.** Geological Society of America Bulletin, v.56, n.2, p.275-370, 1945. Disponível em: . Acesso em novembro de 2014.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia.** 2ª edição. Rio de Janeiro, 2007.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2013). Banco de dados. **Cidades.** Disponível em www.cidades.ibge.gov.br Acesso em 14 Dez 2020.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de dados. **Censo 2010.** 2013. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em 22 Dez 2020.
- LIMA, I. M. de M. F. Elementos naturais da paisagem. In: ARAÚJO, José Luís Lopes. (Coord.). **Atlas escolar do Piauí: geo-histórico e cultural.** João Pessoa: Grafset, 2006. p 39- 77.
- LIMA, I. M. de M. F. **Caracterização geomorfológica da bacia do rio Poti.** Rio de Janeiro. Instituto de Geociências da UFRJ, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 1982.
- LORANDI, R.; CANÇADO, C. J. Parâmetros físicos para gerenciamento de bacias hidrográficas. In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. (ed.). **Conceitos de Bacias**

Hidrográficas: Teorias e Aplicações. Ilhéus: Editus, 2002.

LOHAR, T., BALASUBRAMANI, K., BHATT, B., **Site suitability analysis for establishing soil and water conservation structures using Geoinformatics - A case study of Chinnar watershed, Tamil Nadu, India.** Journal of Geomatics. Vol 12 No. 2 October 2018.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Piracicaba, 2002. 166 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

MATEO RODRIGUEZ, J. **Geografia das paisagens, geocologia e planejamento Ambiental** (entrevista). Formação, Presidente Prudente, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Vol. 1, n. 10. p. 7-27. 2003.

MESCERJAKOV, J. P. **Les concepts de morphostructure et de morphoesculture: un nouvel instrument de l’analyse géomorphologique.** *Annales de Géographie.* [s.l: s.n.].

MONTEIRO C. A., **Geossistema:** a história de uma procura, São Paulo. Contexto, 2001.

MENDONÇA, F. **Geografia socioambiental.** *Terra Livre*, AGB, São Paulo, n.16, p.139-158, 1º semestre/2001.

NUNES, J. O. R.; SUERTEGARAY, D. M. A. **A Natureza da Geografia Física na Geografia.** São Paulo: Terra Livre - AGB – Associação dos Geógrafos Brasileiros. N. 17, p.11– 24.2º semestre/2001.

PASSOS, M. M. **A Raia Divisória:** geossistema, paisagem e eco-história. Maringá: Eduem, 2006.

PAULA, A. P. Paes de. Mauricio Tragtenberg: contribuições de um marxista anarquizante para os estudos organizacionais críticos. In: *Revista de Administração Pública.* v.42, n.5, 2008.

PENCK, W. **Morphological analysis of land forms: a contribution of physical geology.** Macmillan ed. Londres: 1953, 1953.

PENTEADO, M. M., **Fundamentos de geomorfologia.** Rio de Janeiro Editor: IBGE, 1980.

PIRES, E. G.; BORMA, L. D. S. **Utilização do modelo HAND para o mapeamento de bacias hidrográficas em ambiente de Cerrado.** Anais XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, v. 1, 2013.

PRADHAN, B., Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *Advances in Space Research* 45, 1244-1256, 2010.

PROJETO RADAM BRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais.** Vols.2 e. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1973.

REGO, F. A. **Barras, Histórias e Saudades**. Teresina: EDUFPI: 2007.

RIÁBCHICOV, A.M. Estructura y Dinámica de La Esfera Geográfica: Su desarrollo natural y transformación por el hombre. Traducido del Ruso para Español por Isabel Alvarez Moran. Editorial MIR. Moscou. 1976.

RIBEIRO JUNIOR, M. C., **Diagnóstico geoambiental no entorno da barragem no bairro Boa Vista, Em Barras – PI**. Revista do Plano Nacional de Formação de Professores da Educação Básica./ Universidade Federal do Piauí, Teresina, v. 4, n. 2, p.97-113 jul./dez. 2016.

RODRIGUEZ, J. M.; SILVA, E. V.; CAVALCANTI, A. P. B.; **Geoecologia das paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental**. 2 ed. Fortaleza: Edições UFC, 2004. 222 p.

ROMÃO, P. DE A. **Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - Região de Goiania (GO)**. p. 166, 2006.

SANTOS, R. F., CARVALHAIS, H. B., PIRES, F. 1997. Planejamento Ambiental e Sistemas de Informações Geográficas. Caderno de Informações Georreferenciadas – CIG. Volume 1 - Número 2 - Artigo 2, FEC/UNICAMP.

SILVA NETO, J.C.A., **Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno**. Revista Geografia 22, 5-25, 2013.

RÊGO, Lucélia Fernanda do; VALLADARES, Gustavo Souza; AQUINO, Renê Pedro de; COELHO, Ricardo Marques; COELHO, Michell Francisco da Cunha; CABRAL, Léya Jéssyka Rodrigues Silva. **Teor de Carbono Orgânico nos Horizontes Superficiais de Solos do Sertão Central do Ceará**. XXIV Congresso brasileiro de ciência do solo. Florianópolis, SC. 2013.

ROSS, J. L. S. **Análise Empírica Da Fragilidade Dos Ambientes Naturais Antropizados**. Geography Department, University of Sao Paulo, 1994.

ROSS, J. L. S., **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. 7 ed. (Coleção Repensando a Geografia). São Paulo: Contexto, 2003.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina de textos. 2006. 208p.

RUHE, R. V.; WALKER, P. H. Hillslope models and soil formation. **Transactions of the 9th Congress of the International Soil Science Society**, n. Adelaide: International Soil Science Society, p. 551- 560, 1968.

RUHE, R. V. **Geomorphology - Geomorphic Process and Surficial Geology**. Houghton Mifflin Company, Boston, 246 p., 1975.

SANTOS, B. de S. **A Crítica da Razão Indolente**. São Paulo: Cortez, 2001. Pág. 55-117.

SANTOS, R.F. dos. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de textos, 2004.

SANTOS, J. O. **Fragilidade e Riscos Socioambientais em Fortaleza – CE:**

contribuições ao ordenamento territorial. 2011. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo - USP, São Paulo – SP.

SAUER, O. **A morfologia da paisagem.** In: CORRÊA; ROZENDAHL (Orgs.). Paisagem tempo e cultura, Rio de Janeiro: EdUERJ, 1998.

SCHMIDT, J.; DIKAU, R. **Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models** – semantics, methods, future needs Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models - semantics , methods , future needs. *EartGIS for Earth Surface Systems*, p. 153–174, 1999.

SOCHAVA, V.B. **O estudo de geossistemas.** In: Métodos em questão. São Paulo, 1977.

SOCHAVA, V.B. **Por uma teoria de classificação de geossistemas da vida terrestre.** São Paulo: Instituto de Geografia USP, 1978.

SOPCHAKI, C. H.; SAMPAIO, T. V. M. **Estudo de metodologias para identificação de formas de vertentes na bacia do rio curralinho – região metropolitana de Curitiba/PR.** *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

SOUZA, M. J. N. **Compartimentação Geoambiental do Ceará.** In: SILVA, José Borzacchiello da; *et. al.* (org.). Ceará: um novo olhar geográfico. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, 2005. p. 127-140.

SOUZA JUNIOR, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W. de; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VELEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C. F.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. **Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine.** *Remote Sensing*, v. 12, n.17, p. 2735, Sept. 2020.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais.** Tese. *Acta Radiologica. Oncology Radiation Therapy Physics and Biology*, v. 21, n. 1, p. 39–43, 1982.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais.** [s.l: s.n.]. v. 53.

SUERTEGARAY, D. M. A. Espaço Geográfico Uno e Múltiplo. In: SUERTEGARAY, D. M. A; BASSO, L. A; VERDUM, R. (Orgs.). Ambiente e Lugar no Urbano - a Grande Porto Alegre. Porto Alegre: **Editora da Universidade**, 2000, p. 13-34.

SUERTEGARAY, D.M.A. **Espaço geográfico uno e múltiplo.** Barcelona: Revista Geografia y Ciências Sociales. n.93. 2001.

TAVARES, K. S. R.; OLIVEIRA, Ivanilton José de. **BASES TEÓRICO-CONCEITUAIS DAS PROPOSTAS METODOLÓGICAS DE MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE E FRAGILIDADE AMBIENTAL.** *Revista Internacional*

de Direito Ambiental, v. 13, p. 43-54, 2021.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, SUPREN, 1977. 97 p.

TROPPMAIR, H.; GALINA, M. H. Geossistemas. **Mercator**: Revista de Geografia da UFC, v. 05, n. 10, 2006.

TROLL, C. **A paisagem geográfica e sua investigação**. In: Espaço e cultura. Rio de Janeiro: UERJ, NEPEC, n.2. jun. [1997 (1950)].

TROEH, F. R., Landform equations fitted to contour maps. *American Journal of Science*, 263: 616-627, 1965.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 2, p. 195–199, 2003.

VALERIANO, M. D. M. **Topodata**: Guia Para Utilização De Dados. **Inpe**, v. 8, p. 73, 2008.

VALERIANO, M. DE M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539–546, 2003.

VICENTE, L.E.; PEREZ FILHO, A. Abordagem Sistêmica e Geografia. **Geografia**. Rio Claro: v. 28, n. 3, p. 345-362, set./dez., 2003.

WOOD, J. D. **The geomorphological characterisation of digital elevation models**. PhD Thesis, University of Leicester, UK. n. March, p. 193, 1996.

ZACHARIAS, A. A. **A representação gráfica das unidades de paisagem no Zoneamento Ambiental**: um estudo de caso no município de Ourinhos – SP. Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em e Geografia da Universidade Estadual Paulista – UNESP. Rio Claro, São Paulo, 2006. 209 p.

ZACHAR, D. **Soil erosion**. Amsterdam; New York: Elsevier Scientific. (Série Developments in Soil Science, 10), 1982.