

DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DO RELEVO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE IMAGENS TOPODATA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MARATAOAN, PIAUÍ, BRASIL

Janaira Marques Leal

Doutora em Geografia pelo Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, Goiás, Brasil¹

jnrmleal@gmail.com.br

Ivanilton José de Oliveira

Professor Doutor do Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Goiás – UFG/IESA/PPGEO, Goiânia, Goiás, Brasil

oliveira@ufg.com.br

Cláudia Maria Sabóia de Aquino

Professora Doutora do Programa de Pós-graduação e Geografia, Universidade Federal do Piauí – UFPI/PPGEO, Teresina, Piauí, Brasil

cmsaboia@gmail.com.br

RESUMO: O presente estudo propõe apresentar as variáveis de relevo como forma de estipular graus de vulnerabilidade do relevo a partir do uso de imagens Topodata. Essas variáveis se dão a partir do processamento de dados em Sistema de Informação Geográfica (SIG), no qual, é possível estipular uma escala de vulnerabilidade para as variáveis do relevo à perda de solos, avaliando-se as características morfológicas das curvaturas vertical e horizontal das vertentes, das formas do terreno e declividade. Observou-se a partir da presente pesquisa, que os processos erosivos estão diretamente ligados às formas do relevo, tanto na análise do direcionamento do fluxo de escoamento de água convergente, planar e divergente; quanto na análise do formato do perfil de suas vertentes: côncavo, retilíneo e convexo. É importante salientar que a utilização das curvaturas (formas de relevo), as classes de vulnerabilidade apresentaram melhores resultados para a área de estudo em questão.

Palavras-chave: Vulnerabilidade; Variáveis de relevo; Curvatura; Imagens Topodata.

DETERMINATION OF RELIEF VARIABLES FROM THE USE OF TOPODATA IMAGENS DATA FROM THE MARATAOAN RIVER HYDROGRAPHIC BASIN, PIAUÍ, BRAZIL

ABSTRACT: The present study proposes to present the relief variables as a way to stipulate degrees of relief vulnerability from the use of Topodata images. These variables are based on data processing in the Geographic Information System (GIS), in which it is possible to stipulate a vulnerability scale for the relief variables to soil loss, evaluating the morphological characteristics of the vertical and horizontal curvatures slopes, landforms and slope. It was observed from the present research, that the erosive processes are directly linked to the forms of the relief, both in the analysis of the direction of the flow of flow of convergent, planar and divergent water; and in the analysis of the shape of the profile of its slopes: concave, rectilinear and convex. It is important to point out that the use of curvatures (relief forms), vulnerability classes showed better results for the study area in question.

Keywords: Vulnerability; Relief variables; Curvature; Topodata Images.

DETERMINACIÓN DE VARIABLES DE RELIEVE MEDIANTE IMÁGENES TOPODATA DE LA CUENCA HIDROGRAFICA DEL RÍO MARATAOAN, PIAUÍ, BRASIL

RESUMEN: El presente estudio propone presentar las variables del relieve como una forma de estipular grados de vulnerabilidad del relieve a partir del uso de imágenes Topodata. Estas variables se basan en el procesamiento de datos en el Sistema de Información Geográfica (SIG), en el que es posible estipular una escala de vulnerabilidad de las variables del relieve a la pérdida de suelo, evaluando las características morfológicas de las curvaturas verticales y horizontales, pendientes, accidentes geográficos y pendiente. Se observó a partir de la presente investigación, que los procesos erosivos están directamente ligados a las formas del relieve, tanto en el análisis de la dirección del flujo de agua convergente, plana y divergente; y en el análisis de la forma del perfil de sus taludes: côncavo, rectilíneo y convexo. Es importante señalar que el uso de curvaturas (formas de relieve), clases de vulnerabilidad mostró mejores resultados para el área de estudio en cuestión.

Palabras llave: Vulnerabilidad; Variables de relieve; Curvatura; Imágenes de topodatos.

¹ Avenida dos expedicionários, 241, Bairro recanto das Palmeiras, 64045-605, Teresina, Piauí, Brasil.

Introdução

Conhecer a topografia de uma região é importante para análises geológicas e geomorfológicas aplicadas nos projetos que lidam com questões relacionadas à organização, planejamento e gestão do espaço geográfico, seja ele urbano ou rural, a fim de identificar as potencialidades de uma determinada área e planejar as ações sobre esse território, evitando diversos problemas estruturais de cunho ambiental ou social.

Entende-se que os avanços no campo da informática potencializam o emprego de técnicas digitais para obtenção de dados topográficos obtidos por sensores orbitais, que favorecem a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) que contém informação sobre a superfície terrestre, assim, a utilização desses modelos possibilita o estudo de uns determinados fenômenos, uma vez que é possível extrair inúmeras informações a partir de sua modelagem.

Sabe-se que as relações estabelecidas entre sociedade e natureza, principalmente após a sociedade progressivamente intervir de forma mais intensa na apropriação dos recursos naturais, vem se transformando em preocupação, em função das diversas formas de uso desenfreado dos sistemas naturais que ultrapassam a capacidade de suporte de determinados ambientes. Guerra (1997) corrobora com essa ideia, ao afirmar que a degradação ambiental resulta da ação do homem sobre o meio, sem respeitar os limites impostos pela natureza, e que dentre as formas de degradação ambiental está a do solo, sendo a erosão o tipo mais frequente.

É nesse contexto de transformações refletidas no meio ambiente que o papel da tecnologia se apresenta. Muitos desses problemas podem ser diagnosticados por meio das imagens obtidas por sensores remotos, que contribuem na identificação, mensuração, avaliação e monitoramento dos diferentes usos do espaço terrestre, com destaque para os impactos causados às paisagens, sejam eles naturais ou associados à ação antrópica.

Bloom (1970) destaca que uma paisagem é normalmente composta de pequenos elementos de encosta, cada um deles reagindo de modo particular ao efeito local do intemperismo, escorregamento e erosão.

Portanto, no que tange às transformações ocorridas em um determinado ambiente, a análise da vulnerabilidade se apresenta como uma ferramenta eficiente de verificação da sua fragilidade frente a sua apropriação, uma vez que a vulnerabilidade da paisagem à perda de solos é entendida como as rupturas desencadeadas pela atuação da sociedade na natureza, caracterizando-se assim, uma nova forma de organização dos fenômenos e dinâmicas nas formas espaciais que se materializam na paisagem (SILVA NETO, 2013, p. 5).

Neste íterim, a presente pesquisa tem como objetivo de estabelecer as variáveis do relevo na bacia hidrográfica do rio Marataoan, no estado do Piauí, a partir do processamento de dados em Sistema de Informação Geográfica e definir uma escala de vulnerabilidade para as variáveis do relevo à perda de solos, avaliando-se as características morfológicas das curvaturas vertical e horizontal das vertentes, das formas do terreno e da declividade.

A aplicação dos parâmetros justifica-se com base no fato de que a influência do relevo no processo de erosão é consequência da sua morfologia e dos aspectos descritivos do terreno de sua forma e feição.

A relevância dos índices geomorfométricos para análise dos processos erosivos

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 de acordo com o mesmo relatório, as principais causas dessa degradação estão relacionadas aos processos erosivos, em especial os oriundos da ação da água.

Assim, é através 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. Consequentemente, o planejamento ambiental se torna mais eficaz, e a resposta disto é a melhoria da qualidade de vida da população que se encontra nessas áreas.

A análise da vulnerabilidade à perda de solos é influenciada diretamente pela geomorfologia do ambiente estudado, uma vez os parâmetros morfométricos influenciam de maneira marcante nos processos ecodinâmicos que ocorrem nas vertentes. Neste sentido, a declividade e as curvaturas se apresentam como fatores importantes a serem analisados no processo de identificação dos processos erosivos.

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 que escoam na superfície e mais rapidamente a energia potencial das águas são transformadas em energia cinética, ocasionando assim processos erosivos no local e, consequentemente, modificações a jusante (CREPANI et al., 2001).

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, pode ocorrer o desenvolvimento dos solos (pedogênese) por meio de fluxo com componente vertical ou perpendicular (infiltração da água), ou pode se dar 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).

Sabe-se que a ação antrópica tem aumentado a velocidade desses processos erosivos, acarretando em implicações como a perda de solos superficiais, denominada em alguns casos 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) concordam que o desequilíbrio, em geral desencadeado pela ação do homem, costuma estar relacionado ao uso inadequado do solo, por meio do desmatamento, crescimento urbano desordenado, obras de grande porte (fabricas, barragens), entre outros.

Os processos erosivos são classificados com base na forma de escoamento superficial das águas da chuva, sendo eles denominados de processos laminares e processos lineares, obtendo um caráter de escoamento de superfície, enquanto os escoamentos subterrâneos apresentam-se como movimentos de água na forma de infiltração ou percolação.

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; BURCH, 1986). O risco 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 ravinas (PENTEADO, 1980).

Esses processos erosivos são uma das principais causas do esgotamento das terras, podendo estes fatores serem critérios que proporcionem elevados níveis de inutilização de áreas diversas (TUCCI; BERTONI, 2003).

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.

Relacionados a essa questão, tem-se os componentes topográficos, que precisam ser analisados conjuntamente à utilização antrópica intensa do meio, pois podem intensificar os processos erosivos são intensificados e afetar, desta forma, as classes de vulnerabilidade à perda de solos. Por isso é de extrema importância compreender de que forma isso ocorre.

Segundo Schmidt e Dikau (1999), a geomorfometria é definida como a caracterização numérica de formas topográficas, a qual sugere a necessidade de técnicas e modelos de classificação associados a um ambiente que possuam um potencial de gerar seus índices. Os referidos autores ainda explanam que os desenvolvimentos tecnológicos e de sensoriamento remoto subsidiaram vultosos avanços nas análises geomorfológicas, através do acréscimo tecnológico no uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e dos Modelos Digitais de Elevação (MDE).

É importante deixar em evidência que os índices geomorfológicos podem ser diferentes em cada ponto de uma superfície morfométrica de acordo com suas características genéticas, conforme afirma Evans (1972). O autor citado ainda destaca que existe uma segunda classe de índice, como o cumprimento da trajetória de fluxo, o qual descreve como as características da vertente e do 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 Dylík (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”.

Nesse contexto, Bigarella et al. (2007) retrabalham o conceito de vertente com outras palavras, associando-o aos processos relacionados à sua gênese. Assim, os autores supracitados descrevem 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.

Neste íterim, 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. O citado autor destaca ainda 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.

Portanto, compreende-se que o campo de análises e modelagem espacial está cada vez mais desafiador, sendo necessário constantemente do desenvolvimento de novas tecnologias e teorias, de identificação de processos e procedimentos importantes que vislumbrem uma análise cada vez mais aprofundada dos processos erosivos.

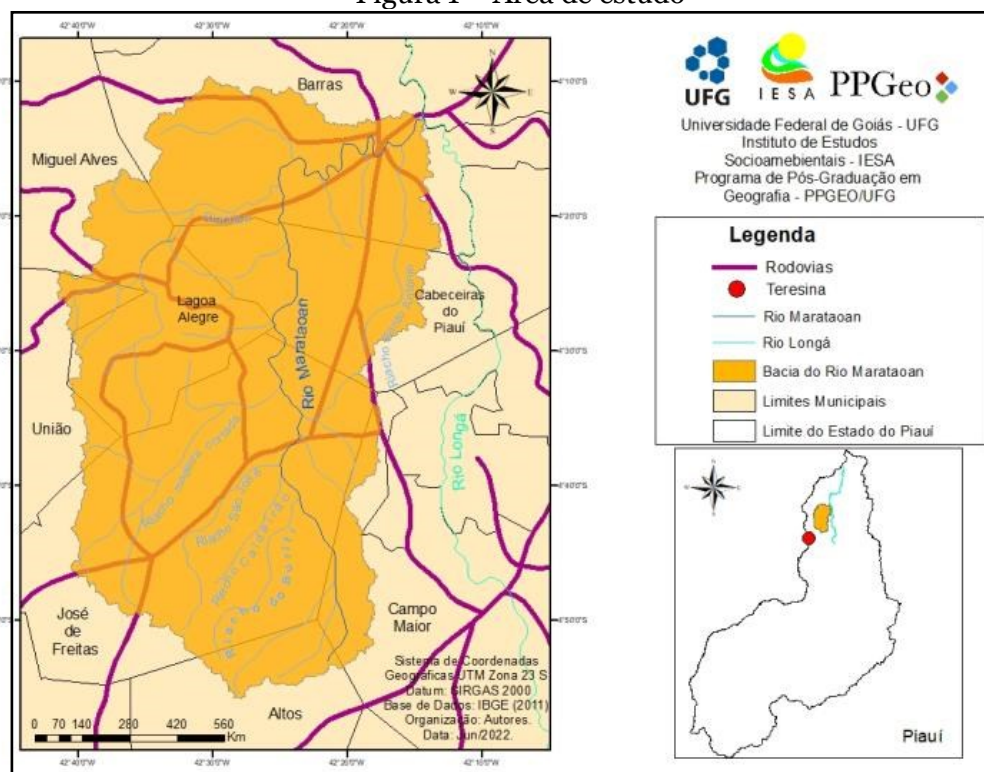
Material e métodos

Área de estudo

O recorte espacial utilizado para a realização da presente pesquisa encontra-se inserido no médio/baixo curso da bacia hidrográfica do rio Longá, identificada como bacia do rio

Marataoan (Figura 1), que corresponde a 2.987,9 km² de extensão do total da bacia do rio Longá.

Figura 1 – Área de estudo



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Quanto às características de declividade, a área de estudo apresenta grande parte de seu território inserido na classe muito baixa e baixa, sugerindo uma vulnerabilidade baixa a muito baixa de acordo com as proposições de Crepani et al. (2001).

Os aspectos geomorfológicos da área são as feições físicas da superfície esculpidas pelos agentes da dinâmica externa terrestre no decorrer do tempo geológico e que têm grande influência no atual clima da região, onde se destaca os Tabuleiros do Parnaíba, Baixada de Campo Maior e Patamares do Parnaíba (IBGE, 2014).

Sobre os aspectos vegetacionais, é importante ressaltar que na bacia do rio Marataoan há predomínio de uma vegetação de transição, com espécies dos biomas Cerrado e Caatinga (RADAMBRASIL, 1973).

Procedimentos Técnico-Operacionais

Os procedimentos técnico-operacionais são fundamentais para o alcance do objetivo traçado na pesquisa em questão. O processamento dos dados SRTM-TOPODATA, retrabalhados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que resultaram nos mapas temáticos, foram elaborados com a utilização do sistema de informações geográficas (SIG) ArcGIS (ESRI), versão 10.3. Em ambiente SIG foi delimitada a bacia hidrográfica do rio Marataoan, e extraída a rede de drenagem, bem como foram elaborados os Modelos Digitais de Elevação (MDE), necessários para obtenção do mapa de declividades e dos modelos de curvaturas da área de estudo.

Para análise multicritério foi utilizada como referência a proposta de Crepani et al. (2001), que atribui 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).

Revisão bibliográfica

Na primeira etapa do trabalho foram realizadas leituras sobre o tema em questão que poderiam subsidiar o desenvolvimento da pesquisa, como artigos científicos, dissertações, teses e trabalhos como Silva Neto, (2013); Fitz (2009); Florenzano (2007); Guerra (2014); Ross (2006); Botelho (2005) na qual visa o Planejamento Ambiental em Microbacia Hidrográfica; Bloom (1970); e Valeriano (2008).

Mapa de declividade

A determinação das classes de declividade baseou-se no Modelo Digital de Elevação (MDE), que foi obtido através 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. Neste sentido, as classes de declividade de acordo com Lohar, Balasubramani e Bhatt (2018), são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – 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 produzido através do processamento de imagens SRTM, obtidas do Banco de Dados Topodata/INPE e tratadas no Software ArcGIS 10.3, com a reprojeção para o sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) fuso 23 S. 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 para curvatura vertical as classes côncavas, retilíneas e convexas; e para curvatura horizontal, as classes convergente, planar e divergente.

O processo de implementação do plano de informações correlacionado à Forma do Terreno derivou da combinação das curvaturas Vertical e Horizontal, realizado por meio do procedimento de álgebra de mapas no SIG.

Para o cálculo da curvatura, utilizou-se o ArcGIS 10.3 conforme estabelecido por McCoy & Johnston (2002), com base em uma equação quadrática (Equação 1).

$$Z = Ax^2y + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad \text{Equação (1)}$$

A curvatura é representada em uma equação derivada de segunda ordem, com o intuito de obter-se uma representação média das formas de relevo. Após o alcance do resultado de cada pixel para aquisição dos valores das curvaturas, é possível chegar às respectivas curvaturas horizontais e verticais do relevo. Para este resultado, deve-se relacionar células vizinhas, conforme demonstra a Equação 5.

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

Ao serem combinadas as classes de curvatura vertical (côncavo, retilíneo ou convexo) e horizontal (convergente, planar ou divergente), obtêm-se as diferentes formas do terreno. Propondo valores para cada curvatura, a somatória desses valores simula uma determinada forma, conforme indicado na Tabela 2 os valores atribuídos para análise das formas de relevo.

Tabela 2 – Índices estipulados para cada curvatura para representar os tipos de formas de relevo

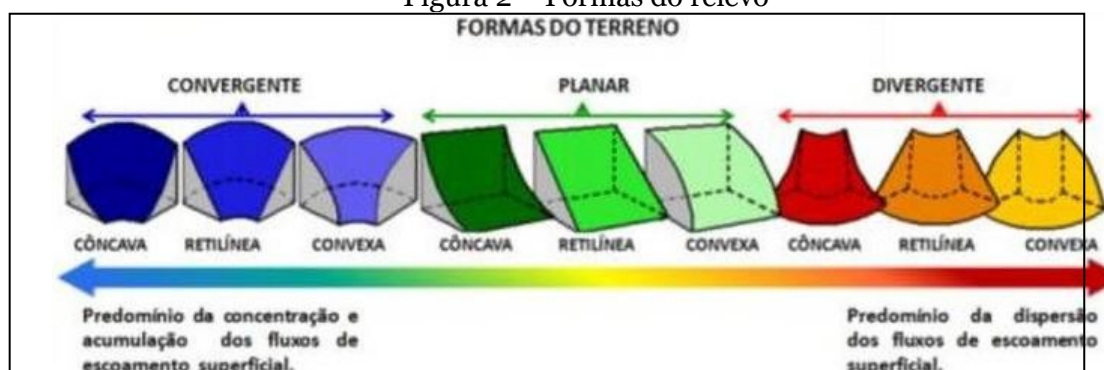
	Convergente	Planar	Divergente
Côncavo	11	12	13
Retilíneo	21	22	23
Convexo	31	32	33

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 2.

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 (Figura 2), realizado na tabela de atributos do software ArcGIS, a partir da ferramenta de edição.

Figura 2 – Formas do relevo



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

O Quadro 1 apresenta as classes de vulnerabilidade para o parâmetro curvatura, seguindo como adaptação da metodologia de Crepani et al. (2001) a partir da atribuição de valores para cada tipo de vertente.

Quadro 1 – Classes de formato das vertentes e vulnerabilidade à perda de solos de acordo com a concentração de fluxos de escoamento superficial

Curvatura Horizontal	Curvatura Vertical	Forma do Terreno	Sigla	Valor para a vulnerabilidade
Convergente	Côncavo	Côncavo-convergente	cc-cg	3,0
	Retilíneo	Retilíneo-convergente	rt-cg	3,0
	Convexo	Convexo-convergente	cv-cg	2,5
Planar	Côncavo	Côncavo-planar	cc-pl	2,0
	Retilíneo	Retilíneo-planar	rt-pl	1,0
	Convexo	Convexo-planar	cv-pl	1,0
Divergente	Côncavo	Côncavo-divergente	cc-dg	1,0
	Retilíneo	Retilíneo-divergente	rt-dg	2,0
	Convexo	Convexo-divergente	cv-dg	1,0

Resultados e discussão

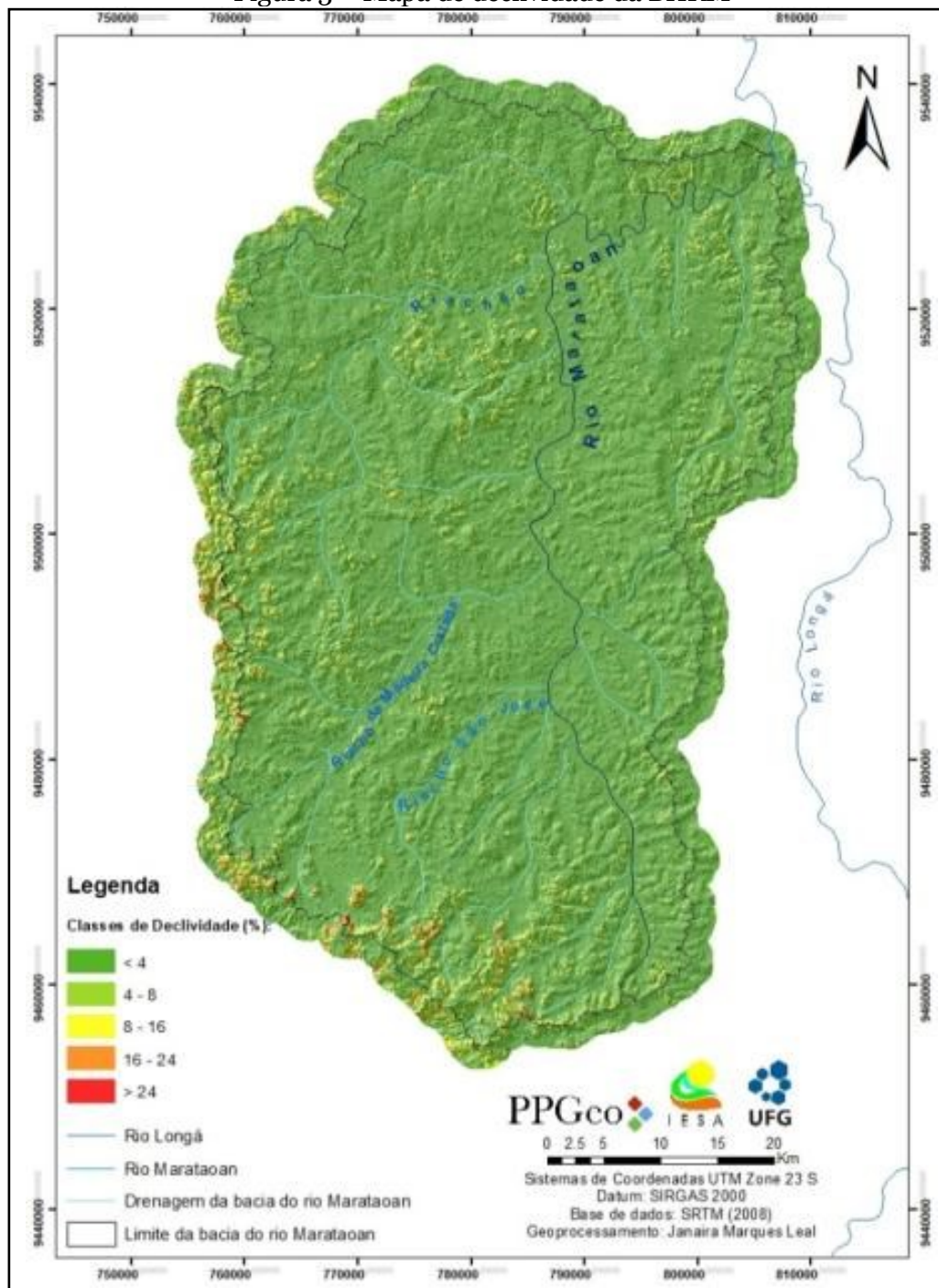
As análises dos dados topográficos do terreno fornecem variáveis importantes na avaliação da vulnerabilidade à perda de solos em bacias hidrográficas.

No que diz respeito à declividade, o relevo da BHRM é caracterizado por predomínio de valores baixos (Figura 3). A área de estudo apresenta 85,2% de sua área na classe associada a relevo plano, com declives menores que 4%. A segunda classe que mais se destaca na área é a do relevo do tipo suave ondulado, com declividade variando entre 4 e 8%, correspondente a 10,3% da área da bacia. As demais classes representam 2,2% para declives entre 8 e 16 (ondulado); e 16 a 24 (fortemente ondulado) 0,3%, somando apenas 2,5% da área total.

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

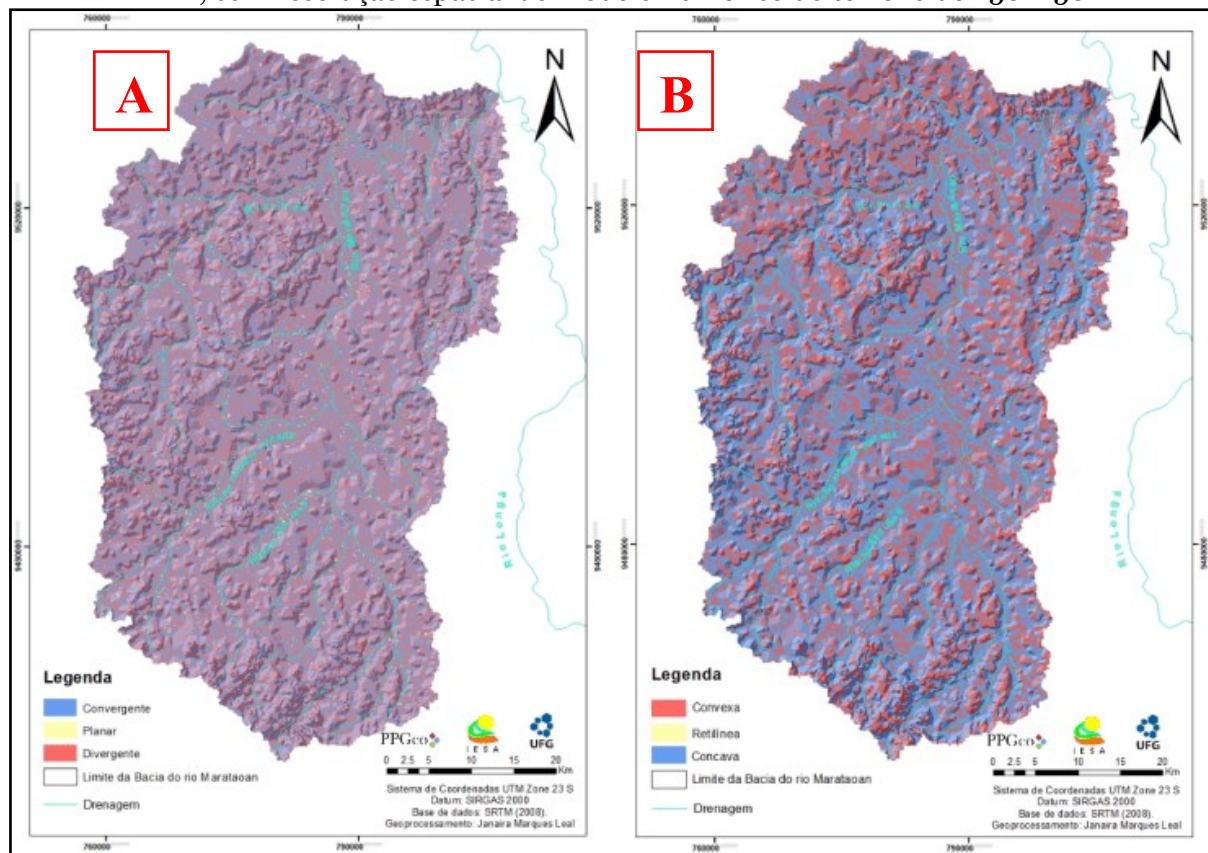
Neste íterim, foram gerados mapas das curvaturas em diferentes resoluções espaciais, sendo estas de 50x50 m, 100x100 m e 250x250 m, para que se pudesse realizar uma análise observando como se comportavam os processos erosivos e de deposição de sedimentos nas vertentes em cada um deles.

Figura 3 – Mapa de declividade da BHRM



Em função de a área de estudo apresentar, predominantemente, 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 4A e 4B.

Figura 4 – Mapas de curvatura horizontal (A) e curvatura vertical (B) das vertentes da BHRM, com resolução espacial do modelo numérico do terreno de 250x250 m



Para a BHRM verificou-se uma predominância da classe Convexa, correspondendo a aproximadamente 52,2% da área total da bacia, o que em valores absolutos equivale a 1.5596 km². Em seguida, a outra classe de destaque se apresenta como Côncavo, no qual essa classe ocupa uma área de aproximadamente 1.398,3 Km², algo correspondente a 46,5% da área total da bacia. Por último, tem-se a classe Retilínea, na qual se apresenta como a de menor expressão espacial na área estudada, abrangendo uma área de aproximadamente 38,8 Km², o que corresponde a aproximadamente 1,1% da extensão territorial da BHRM.

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 com curvatura côncava, em azul no mapa da Figura 5B, indicam a forma contínua de representação dos canais fluviais, corroborando a reflexão de Romão (2006) acerca da descontinuidade na vertente dos corpos hídricos presentes em mapeamentos em resoluções menores. Tais áreas também se apresentam com predomínio de acumulo de sedimentos.

As áreas com curvatura convexa, destacadas na cor vermelho, denotam o predomínio de escoamento superficial. E, por sua vez, a curvatura retilínea foi observada em menores proporções, 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, 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 curvaturas côncavas indicam uma menor capacidade na ação de retirada dos sedimentos de um determinado local, ao passo que as curvaturas convexas apresentam um acentuado poder de erosão. E as

retilíneas, por fim, apresentam valores de declividade similares em todos os pontos da vertente e são entendidas como transicionais entre as classes côncavas e convexas.

A Figura 5A, a seguir, apresenta exemplo de vertente encontrada na BHRM com características côncava; e a Figura 5B, uma vertente convexa.

Figura 5 – Exemplos de vertentes côncava (A) e convexa (B) no município de José de Freitas



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2021.

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.

As vertentes convergentes, que são caracterizadas pelo processo de concentração de fluxos abrangem 1.377,4 km², o que corresponde a cerca de 46,1% da área de estudo. As áreas com características de vertentes planar ocupam uma área de 143,4 Km², o equivalente à 4,8% da bacia. As vertentes divergentes totalizam uma extensão de 1.467,1 Km², representando as formas mais expressivas na área, com cerca de 49,1% da área total da BHRM.

Ao observar as formas de vertente em destaque no mapa da Figura 5A, constata-se que as curvaturas divergentes podem ser associadas aos processos erosivos laminares, uma vez que essa geometria tende à distribuição dos fluxos de água, com menor capacidade de transporte das partículas do solo. Já as curvaturas convergentes tendem ao transporte de partículas maiores de solo. A partir na análise do mapa da Figura 5A entende-se que a BHRM apresenta um certo equilíbrio entre curvaturas divergentes e convergentes, sendo assim, a resolução de 250x250 m se mostrando como eficaz no mapeamento da bacia.

Por demonstrar as características de concentração ou dispersão dos fluxos de água, a curvatura horizontal constitui-se em atributo do relevo importante na interpretação de áreas suscetíveis à ação erosiva linear na vertente.

As Figuras 6A e 6B permitem observar áreas com potenciais ações divergente e convergente de fluxo de água.

Figura 6 – Áreas propensas à dispersão de fluxo (divergente) no município de Cabeceiras do Piauí (A); e áreas propensas a receber sedimento pelo fluxo de água (convergente), no município de Barras (B).



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2021.

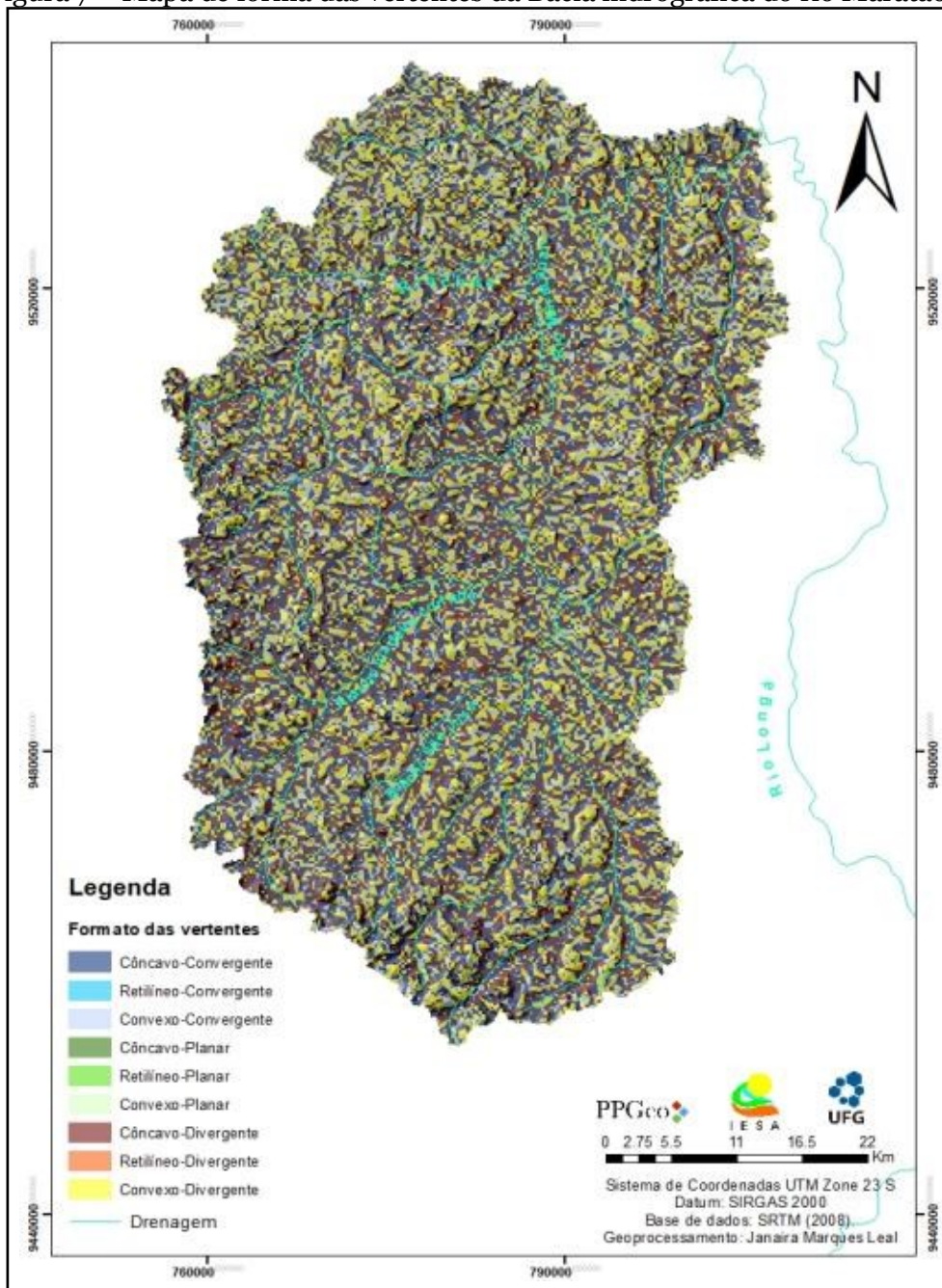
Ao término da etapa de análise das curvaturas separadamente, realizou-se a confecção do mapa de forma das vertentes, o qual resulta da combinação entre as curvaturas vertical e horizontal. Como produto final da associação da curvatura vertical (côncavo, retilíneo e convexo) com a curvatura horizontal (convergente, planar e divergente), foram estabelecidas nove classes distintas para as formas do terreno (Quadro 2 e Figura 7).

Quadro 2 – Forma 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: Adaptado de Valeriano (2008).

Figura 7 – Mapa de forma das vertentes da Bacia hidrográfica do rio Marataoan



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

Observa-se que as formas de vertentes mais vulneráveis a perdas de solos são as classes cuja geometria condiciona a maior concentração e acúmulo de escoamento superficial.

Neste sentido, as vertentes identificadas como côncavo–convergente e retilíneo–convergente foram classificadas como “alta vulnerabilidade erosiva”, e as côncavo–planar e

convexo–convergente, como “moderada” e “moderadamente alta”, respectivamente, por serem áreas de concentração de fluxo correspondem às classes mais fortemente suscetíveis aos processos erosivos mais intensos. Durães e De Mello (2016) explicam que os processos erosivos lineares estão vinculados às formas de erosão causadas por escoamento superficial concentrado. Sobre isso, Zachar (1982) destaca que esses processos de erosão se desenvolvem em linhas de talvegue ou nos cursos de drenagem de primeira ordem, resultando no entalhamento vertical do terreno, no rebaixamento das vertentes laterais e no alargamento do vale da drenagem. As classes de “alta”, “moderada” e “moderadamente alta” vulnerabilidade à perda de solos representam quase metade da área da BHRM.

Observou-se que 0,01% da BHRM apresentou vertentes na forma Retilíneo-Planar, no qual esse tipo de forma corresponde a uma classe intermediária entre as vertentes convergentes e divergentes. Classificou-se essa classe como “Baixa” vulnerabilidade aos processos de escoamento superficial.

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 6A). A forma retilíneo–planar foi classificada como de “moderada” vulnerabilidade e as formas convexo–divergente, convexa–planar e côncava–divergente, foram classificadas como “baixa” vulnerabilidade aos processos erosivos superficiais.

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. A classe “baixa” vulnerabilidade destaca-se na área da BHRM, ocupando pouco mais de 51% da área total da bacia.

Assim, percebe-se que a BHRM apresenta uma relação direta com os processos erosivos laminares, uma vez que a mesma apresenta predominância de escoamento difuso. Contudo, a área também apresenta certa intensidade de processos erosivos lineares, dada a dimensão do escoamento concentrado existente, fazendo com que ela apresente significativos pontos com processos erosivos a eles relacionados. As Figuras 8A e 8B apresentam exemplos desses processos erosivos.

Figura 8 – Exemplo de erosão laminar na BHRM no município de Cabeceiras do Piauí (A); e exemplo de erosão linear na BHRM no município de José de Freitas (B)



Fonte: Pesquisa de campo em dezembro de 2021.

Assim, compreende-se que as dinâmicas e intensidades dos processos erosivos estão diretamente ligadas às formas do terreno e suas vertentes, e que devem ser levados em

consideração tanto a análise da intensidade da água, quanto do direcionamento dos seus fluxos de escoamento, podendo assim, serem correlacionados aos processos erosivos e as formas das vertentes para que se realize um estudo de uma determinada área.

Considerações finais

Compreende-se que as variáveis analisadas deixam em evidência que os processos erosivos estão diretamente ligados às formas do relevo, tanto em relação ao formato do perfil de suas vertentes, quanto em relação ao direcionamento do fluxo de escoamento de água, sendo assim, essas variáveis são essenciais na análise do relevo.

Juntamente ao parâmetro de declividade atrelado à análise da vulnerabilidade, é possível observar que, ao implementar as curvaturas (formas de relevo), as classes de vulnerabilidade apresentaram melhores resultados para a área de estudo, dadas as suas características (de topografia aplainada).

As vertentes identificadas como côncavo–convergente e retilíneo–convergente foram classificadas como “alta vulnerabilidade erosiva”, e as côncavo–planar e convexo–convergente, como “moderada” e “moderadamente alta”, respectivamente, por serem áreas de concentração de fluxo correspondem às classes mais fortemente suscetíveis aos processos erosivos mais intensos. As classes de “alta”, “moderada” e “moderadamente alta” vulnerabilidade à perda de solos representam quase metade da área da BHRM. 0,01% da BHRM apresentou vertentes na forma Retilíneo-Planar, no qual esse tipo de forma corresponde a uma classe intermediária entre as vertentes convergentes e divergentes, classificando-se como “Baixa” vulnerabilidade aos processos erosivos. A forma retilíneo–planar foi classificada como de “moderada” vulnerabilidade e as formas convexo–divergente, convexa–planar e côncava–divergente, foram classificadas como “baixa” vulnerabilidade aos processos erosivos superficiais. A classe “baixa” vulnerabilidade destaca-se na área da BHRM, ocupando pouco mais de 51% da área total da bacia.

É válido destacar que os resultados aqui apresentados devem revelar cartograficamente a dinâmica e morfologia estrutural do relevo, observando parâmetros importantes de configuração do mesmo e concluindo com a apresentação e correlação da dinâmica das formas presentes em todo o sistema ambiental considerado.

Neste sentido, a presente pesquisa ao analisar as variáveis para se determinar a vulnerabilidade do relevo da bacia hidrográfica do rio Marataoan, contribui de forma efetiva para caracterização da morfologia e estruturação local do mesmo, apontando fortemente para uma associação do formato das vertente aos processos erosivo, tendo como exemplo o fato das formas de vertentes mais vulneráveis a perdas de solos serem as classes cuja geometria condiciona a maior concentração e acúmulo de escoamento superficial.

É válido deixar em evidência Observa-se que as formas de vertentes mais vulneráveis a perdas de solos são as classes cuja geometria condiciona a maior concentração e acúmulo de escoamento superficial idêntica, que além de contribuir para o conhecimento das características físicas dessa região em específico, no estado do Piauí, a análise da bacia hidrográfica do rio Marataoan permitiu definir valores numéricos ao relevo, que poderão ser cruzados e analisados juntamente com outras características naturais ou antrópicas e serem replicados em regiões diversas.

Referências

ALBUQUERQUE, Adorea Rebelo da Cunha e VIEIRA, Antonio Fábio Sabbá Guimarães. **Erosão dos solos na Amazônia** / organização Antônio José Teixeira Guerra, Maria do Carmo Oliveira Jorge. – 1. Ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014.320 p.; il; 23 cm.

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.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** Icone, 6ª ed. São Paulo, 355 p., 2008.

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.

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

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.

FAO (Food and Agriculture Organization). **The State of Food Insecurity in the World 2015.** Food and Agriculture Organization Publications, Rome. 2015.

FENDRICH, R. Erosão Urbana. In: **Drenagem e Controle da Erosão Urbana.** Curitiba: Champagnot, 1997. 17-52p.

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: <http://www.geos.ed.ac.uk/homes/s0451705/horton_1945.pdf>. Acesso em novembro de 2020.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Banco de dados. Censo 2010. 2014. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em 22 Dez 2020.

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.

MOORE, Ian D., BURCH, Gordon J., **Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation.** First published: 01 September 1986 Editor: Will Horwath 5-Year Impact factor: 2.832 Impact factor:2.307 2020 Journal Citation Reports (Clarivate Analytics): 25/37 (Soil Science) Online ISSN:1435-0661.

McCoy, J. & Johnston, K. **Using ArcGis Spatial Analyst.** GIS/ESRI, New York, USA, p. 232, 2002.

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

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.

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

SILVA NETO, João Cândido André. **Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. Bacharel em Geografia.** Mestre em Geografia pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Doutorando em Geografia pela Universidade Estadual Paulista, Campus Presidente Prudente, Bolsista CNPq, 2013.

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. EarthGIS for Earth Surface Systems*, p. 153–174, 1999.
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.

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.

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.

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

Recebido em: 10/01/2023.

Aprovado para publicação em: 29/06/2023.