

Geoprocessamento como Ferramenta de Previsão de Ocorrência de Erosões Hídricas Lineares, a partir do Padrão de Concentração do escoamento Superficial, em Escala de Encosta

Ana Laura Pascucci de Oliveira

Mestranda, FEB/UNESP, Brasil
ana.pascucci@unesp.br

Graziele Ruas

Professora Doutora, FEB/UNESP, Brasil
graziele.ruas@unesp.br

Simone Andrea Furegatti

Professora Doutora, FEB/UNESP, Brasil
simone.furegatti@unesp.br

RESUMO

As erosões em áreas urbanas são influenciadas pela interação entre diversos fatores naturais e as ações antrópicas, como a urbanização intensa e ocupação descoordenada do espaço urbano, que podem desencadear e intensificar os processos erosivos. O presente estudo teve como objetivo a identificação dos padrões de escoamento superficial através de geoprocessamento, como ferramenta para previsão de ocorrência de erosões hídricas lineares, em uma encosta urbana na região de nascente do Córrego da Grama em Bauru, São Paulo. Foram avaliadas as características do relevo (curvaturas, declividade e orientação das vertentes) e a influência da ocupação urbana para compreensão geral dos eventos que acontecem na encosta. O levantamento das feições erosivas lineares existentes e a carta de Fluxo Concentrado foram sobrepostos para analisar a compatibilidade entre o padrão de escoamento superficial e os locais de ocorrência das feições. A análise dos resultados indicou que, em geral, as linhas de fluxo conduzem aos pontos de ocorrência das feições erosivas registradas.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão Linear. Urbano. Geoprocessamento.

1 INTRODUÇÃO

A erosão é um sério problema enfrentado na atualidade, principalmente devido ao aumento constante das áreas atingidas, resultado das novas formas de uso do solo. Além de ocasionar a perda de solos agricultáveis, provocar a deterioração de obras civis e de infraestruturas urbanas e rurais, o assoreamento de corpos d'água e outros efeitos capazes de causar impactos socioeconômicos e ambientais (KUHN et al., 2023). Como consequência dos processos de assoreamento, há o comprometimento da qualidade das águas superficiais, e crescimento da frequência e intensidade de enchentes e alterações eco-hidrológicas (FILHO; GOMES; JÚNIOR, 2021). Os processos erosivos ocorrem no meio físico e estão interrelacionados a diferentes fatores, como: o clima, o relevo, a vegetação, o uso e ocupação e a ação da água pluvial. O equilíbrio entre os atributos geoambientais, geotécnicos e antrópicos nesse sistema é frágil, de forma que qualquer interferência em um dos atributos provocará uma desestabilização da condição inicial, tendendo a um novo equilíbrio do meio. Como resposta ao desequilíbrio, o escoamento superficial pode ser fator de iniciação e de desenvolvimento do processo erosivo (WEI et al., 2022). Portanto, a identificação das rotas de fluxo de escoamento superficiais em vertentes caracterizadas por modificações antrópicas e suscetíveis a erosão constitui um procedimento de grande valia no diagnóstico da dinâmica e evolução dos processos erosivos lineares, principalmente ao combinar os fatores topográficos com as alterações da urbanização (MATHIAS *et al.*, 2020).

Segundo Coelho (2001, p. 95) “as rotas preferenciais dos fluxos superficiais ou subsuperficiais definem os mecanismos erosivo-deposicionais preponderantes”, sendo assim, o escoamento superficial constitui componente essencial para a análise dos processos geomorfológicos. A análise do direcionamento dos fluxos se estende a ambientes urbanizados onde estruturas de pequena escala, como as vias, calhas de ruas, estradas, valas de drenagem e bueiros controlam os padrões de drenagem da superfície, sendo essencial para compreensão, diagnóstico e solução de processos erosivos em áreas urbanas.

As mudanças na cobertura do solo, com a remoção da vegetação e implantação de superfícies impermeáveis, interferem na drenagem e no escoamento superficial. Como

consequência da impermeabilização há a diminuição da permeabilidade do solo, perda da biodiversidade, alteração da qualidade da água no escoamento superficial (SCALENGHE & MARSAM, 2008; MATOS *et al.*, 2015). As mudanças do meio físico em conjunto com a rápida urbanização sem planejamento alteram o uso e ocupação do solo, tornando os processos erosivos uma das problemáticas frequentes nos centros urbanos brasileiros.

No município de Bauru/SP, Cavaguti e Silva (1993) indicam como fatores precursores dos processos erosivos urbanos: o aumento e concentração do escoamento pela impermeabilização; ausência de sistema de drenagem adequado; traçado inapropriado das ruas e estradas; desmatamento; e, falta de infraestrutura dos núcleos habitacionais. Os fatores apontados pelos autores advêm da ausência de gestão territorial para promover o uso dos espaços de forma sustentável durante o processo de expansão urbana.

Na concepção moderna de gestão da extensão territorial, todo planejamento, ordenação ou monitoramento do espaço deve incorporar a análise dos diferentes componentes do ambiente, incluindo o meio físico-biótico, a ocupação humana, e a interdependência entre ambos. Devido à complexidade das análises, as ferramentas computacionais de geoprocessamento como os *softwares* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) - *Geographic Information System (GIS)* são essenciais para integração dos dados.

Nesse sentido, o objetivo da pesquisa foi avaliar o uso de SIG para previsão de ocorrência de erosões hídricas lineares à baixa vertente, a partir de modelo do padrão de concentração do escoamento superficial (rotas de fluxo), em uma encosta urbana do Município de Bauru/SP, integrando características do relevo (curvaturas, declividade e orientação das vertentes) e influência da ocupação urbana.

2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Bauru possui área de 667 km², está localizado no interior do Estado de São Paulo, e se situa no Planalto Arenítico-Basáltico do Estado de São Paulo, dentro da Bacia Sedimentar do Paraná, sobre a qual ocorreram derrames basálticos que, por sua vez, foram sobrepostos por coberturas sedimentares da Bacia Bauru (ALMEIDA, 1964). O solo de Bauru é majoritariamente constituído de areia fina argilosa, com mínima presença de silte, apresenta estrutura porosa, baixa coesão e compactação e, como consequência dessas características, apresenta alta colapsibilidade (CORGHI e GIACHETI *et al.*, 2006).

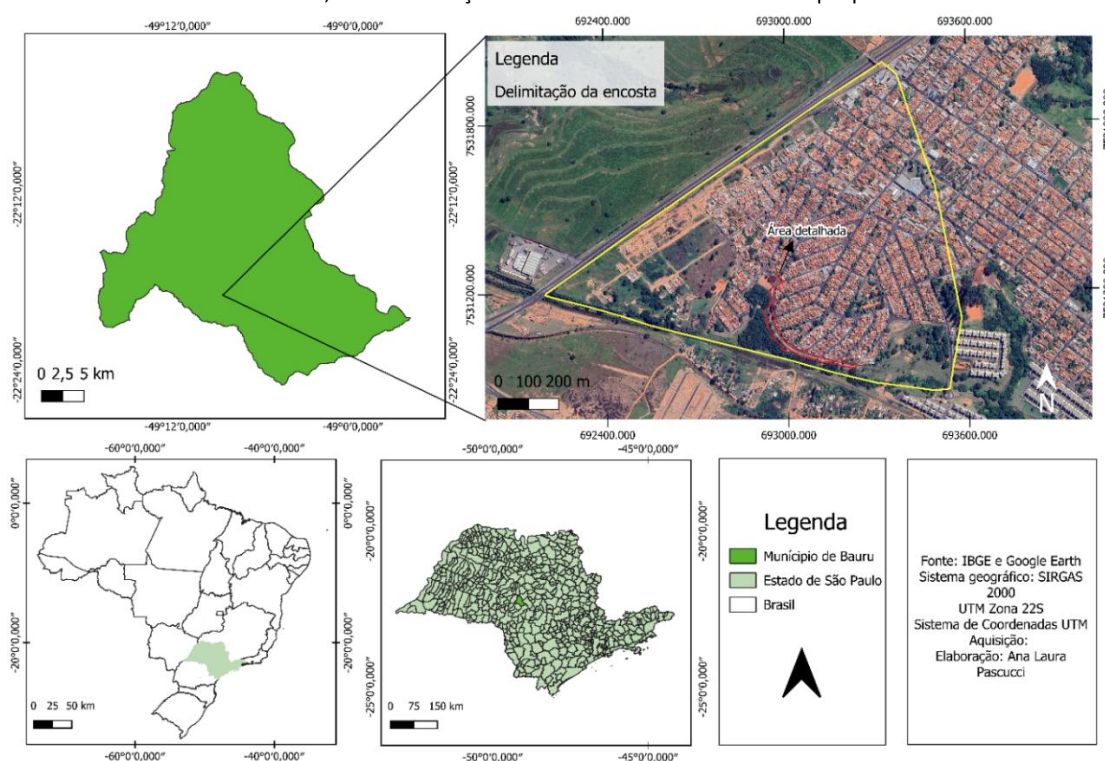
O relevo da região é levemente ondulado, com predomínio de colinas amplas e morrotes (DAEE, 2015a). Comumente, as formas de terreno da região apresentam cursos d'água que originam as cabeceiras de drenagem e canais preferenciais, os quais indicam possíveis rotas do fluxo superficial (ALMEIDA FILHO, 2000). A área estudada dentro do Município de Bauru está localizada entre as coordenadas UTM de longitude: 693423.71 E e 692911.79 E; e, entre as coordenadas de latitude 7530913.08 S e 7531789.50 S (Figura 1).

Na região foram realizados estudos sobre os processos erosivos e o escoamento superficial. Oliveira *et al.* (2022) analisaram a evolução temporal das feições adjacentes ao canal de drenagem e Souza *et al.* (2022) avaliaram os fatores de influência dos processos erosivos no local. Considerando os processos erosivos potencialmente originados por acúmulo

de escoamento superficial em área urbana de cabeceira de drenagem, definiu-se como área de estudo a encosta à esquerda do Núcleo Habitacional Edson Francisco da Silva - COHAB 16 (Figura 1).

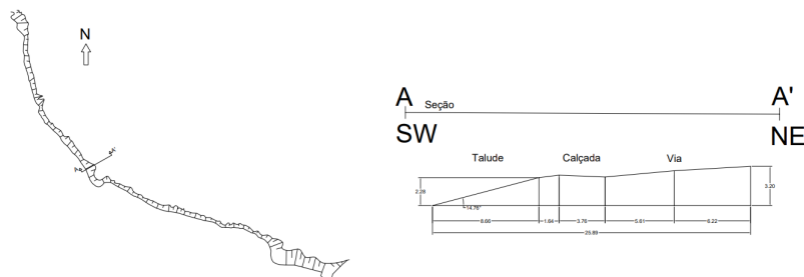
A encosta apresenta densa urbanização, com ruas asfaltadas e poucos lotes permeáveis, rede de drenagem implantada e relevo composto por colinas amplas, que se caracteriza por apresentar topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos, que permitem rápida infiltração (SHS, 2008). Na parcela mais baixa da vertente há um talude (Figura 2), onde ocorre o desenvolvimento das erosões na crista em nível, próximo da Rua Sebastião Joaquim Sampaio.

Figura 1 – Localização da área de estudo no Núcleo Habitacional Edson Francisco da Silva no município de Bauru no Estado de São Paulo – Brasil, com delimitação da encosta considerada e destaque para a área detalhada.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 2 – Croqui e corte esquemático do patamar.



Fonte: Autoria própria (2023).

3 METODOLOGIA

No presente estudo, foram utilizadas como base de dados as curvas de nível de arquivo *dwg* fornecidos pela Prefeitura Municipal de Bauru e levantamento planialtimétrico com Estação Total, feito ao longo da Rua Sebastião Joaquim Sampaio, incluindo o detalhamento do patamar entre o canal e a via pública e das feições erosivas lineares, constituindo uma área de detalhe da encosta (destaque na Figura 1). A área selecionada para ser detalhada foi a região de baixa vertente onde se concentra o fluxo, que provoca o desencadeamento das feições erosivas. A área de detalhe não inclui, portanto, as quadras com as divisões dos lotes.

Com a base de dados foram elaborados, *a priori*, o Modelo Digital de Elevação e, *a posteriori*, as cartas das variáveis geomorfométricas e as cartas de Águas Superficiais (Cartas de Direção de Drenagem e de Fluxo Concentrado).

Com a finalidade de sistematizar e orientar o estudo foi feito um levantamento da ocorrência e localização das feições erosivas lineares encontradas na encosta. As características da encosta foram registradas e analisadas em visitas técnicas, para compreensão do surgimento das feições e aspectos da encosta delimitada que influenciam na dinâmica dos processos erosivos. O levantamento foi realizado em duas visitas de campo, a primeira em julho de 2021 e a segunda em setembro de 2022. Na primeira visita foram identificadas 7 feições erosivas lineares ocorridas somente na baixa vertente, enquanto na segunda visita, um ano após, observou-se a ocorrência de mais 4 feições nas proximidades. Assim, o levantamento restringiu-se às feições adjacentes à Rua Sebastião Joaquim Sampaio, visto que podem ser diretamente associadas à ocupação urbana da encosta.

A partir da sobreposição das cartas elaboradas com o levantamento das feições erosivas lineares existentes foi analisada a relação entre a concentração de fluxo na baixa vertente e a ocorrência das atuais erosões.

3.1 Levantamento Planialtimétrico da Área Detalhada

A seleção dos pontos e a quantidade de dados amostrados apresentam relação direta com a qualidade do produto gerado de uma aplicação sobre o modelo. Para aplicações nas quais se necessita um grau maior de realismo, a quantidade de pontos amostrados, bem como a qualidade dos dados são determinantes. À medida que a quantidade de pontos representativos da superfície real aumenta, maior será o esforço computacional necessário para o armazenamento, recuperação e processamento dos pontos, até que se alcance um produto refinado. A representação detalhada do relevo nos modelos digitais assegura a compatibilidade do escoamento superficial, garantindo a consistência hidrológica e a avaliação criteriosa dos fenômenos erosivos (TAROLLI, 2014).

Assim, para garantir a consistência do padrão de concentração, foi realizado o levantamento da área detalhada. Com o uso de uma Estação Total *Stonex R25*, foram registrados os dados altimétricos em uma malha aproximada de 2 em 2 metros. O levantamento foi feito em uma área de detalhe de 9457m², constituindo aproximadamente 1% da área total da encosta estudada que é de 893315m². Em virtude da necessidade de capturar

os dados altimétricos pontualmente, o levantamento planialtimétrico se mostrou inviável de ser realizado para as regiões além da área detalhada, devido à morosidade do processo.

As cartas de águas superficiais geradas, portanto, desconsideram a existência dos lotes com construções e das vias asfaltadas, que geram caminhos diferentes para as águas, e não apresentam o refinamento obtido na área detalhada. Tal fato influencia somente na distribuição da água encosta acima, mas ainda permite uma análise geral do comportamento do relevo e não compromete o percurso das águas à baixa vertente, visto que a destinação final do fluxo é determinada pelo micro relevo da área detalhada.

3.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Os modelos digitais e cartas produtos, por serem representações reducionistas do meio real em interface computacional com a inserção de bancos de dados, dependem das combinações e associações das informações por meio de operações geométricas e topológicas. Para representar o relevo através do Modelo Digital de Elevação, deve-se definir a malha para descrever matematicamente o terreno, conforme objetivo de uso dos dados e da maneira como os dados serão empregados na estrutura do modelo (Moore *et al.*, 1991).

No presente trabalho, empregou-se o interpolador *Triangulated Irregular Network (TIN)*, que apresenta malhas formadas por triangulação para áreas caracterizadas por modificações de relevo e de uso e ocupação, resultantes de intervenções antrópicas. As vantagens do modelo de triangulação, em relação aos demais, se relacionam à relevância para os movimentos gravitacionais e, especialmente, para aplicações hidrológicas (SZYPULA, 2017).

Como resultado do processo de interpolação no *software QGIS*, foram gerados dois Modelos Digitais de Elevação, um somente utilizando os dados de curvas de nível (encosta total) e outro combinando as curvas de nível com o levantamento planialtimétrico (encosta total, contendo a área detalhada). Para facilitar a visualização e entendimento do modelo, foi atribuída a banda simples falsa-cor nos dois MDE gerados.

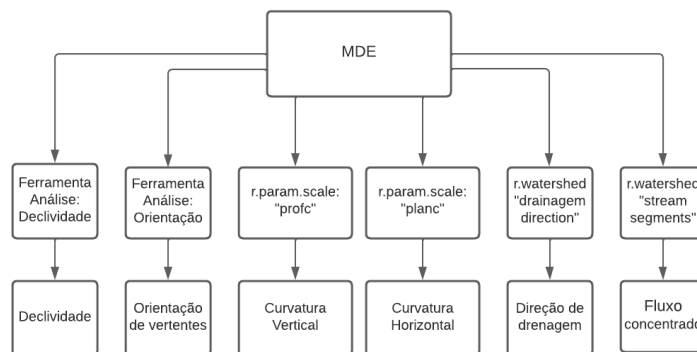
3.3 Geração das Cartas de Variáveis Geomorfométricas e de Águas Superficiais

Após as etapas de aquisição dos dados amostrais e da escolha do modelo matemático (*TIN*), foram geradas as cartas derivadas do MDE para análise da geomorfologia (Cartas de Declividade, Curvatura Horizontal, Curvatura Vertical e Orientação de Vertentes) e as cartas de Águas Superficiais (Cartas de Direção de Drenagem e de Fluxo Concentrado).

Atualmente, os programas SIG apresentam módulos específicos para extração das variáveis geomorfométricas e de águas superficiais a partir do MDE. As vantagens da automação dos algoritmos em relação aos procedimentos manuais estão relacionadas a maior eficiência e credibilidade dos processos, além da reprodutibilidade dos resultados, a possibilidade de armazenamento e compartilhamento dos dados digitais.

As principais ferramentas utilizadas no *QGIS* para produzir as cartas geomorfométricas e de águas superficiais, a partir do Modelo Digital de Elevação, são apresentadas resumidamente no fluxograma da Figura 3.

Figura 3: Fluxograma do processo de geração das cartas geomorfométricas e de águas superficiais.



Fonte: Autorial Própria (2022).

3.4 Abordagem Adotada para Elaboração das Cartas de Águas Superficiais

Na literatura existem duas abordagens para elaboração de cartas de rede de drenagem formada pelas rotas de fluxo de escoamento superficial. A primeira emprega a aplicação de um filtro sobre o *raster* do Modelo Digital de Elevação (MDE). A abordagem envolve a avaliação local das cotas do modelo e identificação dos *pixels* côncavos e convexos como fluxo potencial e, também, os pontos de cume (PEUCKER; DOUGLAS, 1975). A principal restrição dessa abordagem consiste na técnica de detecção, que atua de forma localizada e gera segmentos de rede descontínuos, sendo uma aproximação da rede de drenagem que exige processamento posterior para geração de um padrão de drenagem conectada. Sendo assim, a abordagem é mais adequada para uma nomeação inicial em terrenos acidentados com cursos d'água bem recortados e divisórias nítidas (Band, 1986), o que dificulta a aplicação em área de ocupação urbana.

A segunda abordagem, proposta originalmente por O'Callaghan e Mark (1984), define a rede de drenagem a partir da derivação automática do caminho preferencial de escoamento superficial sobre o MDE. Além dos dados digitais obtidos pelo método de derivação serem gerados mais rapidamente e de forma menos subjetiva, essa abordagem têm a vantagem dos dados serem facilmente analisados em SIG. Considerando a abordagem de simulação, foram desenvolvidas variações de implementação, tais como as propostas por Jenson e Dominique (1988), Garbrecht e Martz (1992) e outras que as sucederam (PELLETIER, 2013; YUANZHI YAO et al., 2022). Embora existam distinções no método, essencialmente ocorrem etapas de processamento semelhantes.

O método básico para a determinação da direção do fluxo utiliza matrizes 3x3, onde cada célula tem oito vizinhos e o fluxo vai da célula central em direção à célula com menor valor de altitude, em caso de duas células vizinhas com a mesma altitude o algoritmo dá preferência às células que não estejam na diagonal gerando, assim, um fluxo de direção única (O'CALLAGHAN; MARK, 1984). No caso de mais de duas células adjacentes terem a mesma altitude, a direção será para a célula central (JENSON; DOMINGUE, 1988).

Optando-se, portanto, pela segunda abordagem, no presente trabalho foi utilizada a ferramenta *r.watershed* do catálogo GRASS do QGIS (Figura 3), empregando as informações do Modelo Digital e os parâmetros adotados. A ferramenta gerou as cartas de Direção de

Drenagem e de Fluxo Concentrado a partir da identificação do caminho preferencial do escoamento superficial entre cada célula do MDE e sua vizinhança.

3.5 Parâmetros na Elaboração das Cartas Geomorfométricas e de Águas Superficiais

Assim como ocorrem variações conforme a escolha da malha para a modelagem, podem ocorrer também variações na escolha dos parâmetros para obtenção de produtos derivados do MDE. No Quadro 1 são apresentados os parâmetros empregados no presente estudo na elaboração das cartas geomorfométricas, de direção de drenagem e de fluxo concentrado, com base na variação dos parâmetros e avaliação dos respectivos produtos gerados. Assim, foram considerados: classificação das declividades da EMBRAPA (1979); classificação das orientações, segundo Rovani e Cassol (2012); tamanho da janela de processamento (*r.param.scale*) igual a 45; e, tamanho mínimo exterior da bacia hidrográfica (*r.watershed*) igual a 50.

Quadro 1: Parâmetros adotados na elaboração das cartas geomorfométricas e de águas superficiais.

| Ferramenta QGIS | Parâmetro | Referências ou valores adotados |
|----------------------|---|---------------------------------|
| Declividade | Classificação das declividades | EMBRAPA (1979) |
| Orientação | Classificação das orientações de vertente | Rovani e Cassol (2012) |
| <i>r.param.scale</i> | Tamanho da janela de processamento | 45 |
| <i>r.watershed</i> | Tamanho mínimo exterior da bacia hidrográfica | 50 |

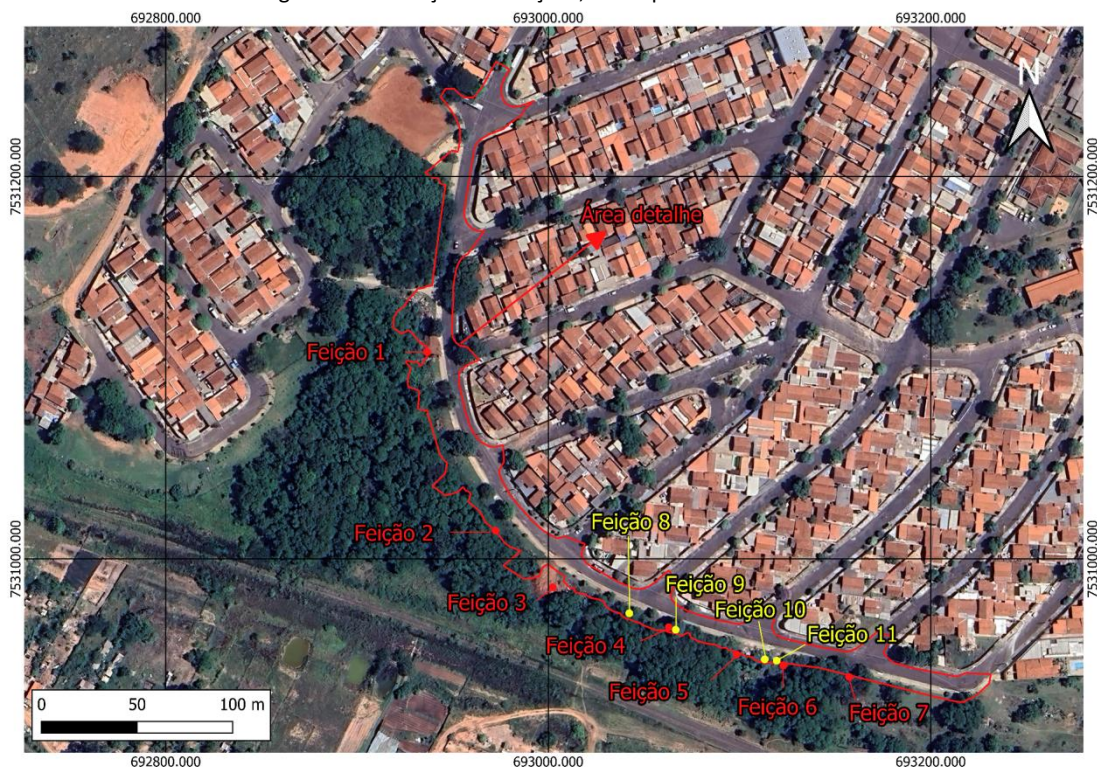
Fonte: Autoria Própria (2024).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A localização das feições erosivas lineares é apresentada na

Figura 4. As feições numeradas de 1 à 7, pontuadas na cor vermelha, são as identificadas na primeira visita, em julho de 2021, enquanto as numeradas de 8 à 11, na cor amarela, são as incisões mais recentes (setembro de 2022). As erosões designadas Feição 1, Feição 3, Feição 4, Feição 6 e Feição 7 foram observadas novamente no levantamento. As feições denominadas como Feição 2 e Feição 5 observadas previamente em visita não existiam mais. Para efeito de análise, porém, consideraram-se as 11 feições levantadas.

Figura 4: Localização das Feições, destaque da área detalhe.



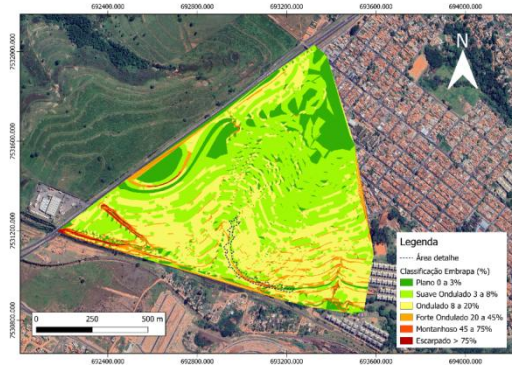
Fonte: Autoria própria (2022).

Foram executados os processamentos do modelo e das cartas, à princípio empregando somente as curvas de nível fornecidas pela Prefeitura (Modelo 1) e, em seguida, acrescentou-se os dados levantados para a área detalhada (Modelo 2). Comparativamente com o Modelo 1, o Modelo 2 apresentou maior declividade e maior diversificação quanto à direção e o sentido de maior inclinação da vertente, nas cartas de declividade e de orientação de vertentes. Na carta de fluxo concentrado do Modelo 1, o fluxo se comportou de forma mais difusa na área detalhada que no Modelo 2, não demonstrando exatamente onde poderia ocorrer feições. Com o detalhamento pode-se identificar a existência e distribuição das linhas de fluxo, que seguem uma trajetória centrífuga ao longo do comprimento da via. As linhas de fluxo geradas estão diretamente relacionadas à diversificação quanto à direção e sentido no mapa de orientação de vertente, indicando a importância do detalhamento para análise. No Modelo 2, a Rua Sebastião Joaquim Sampaio passou a atuar como receptora e distribuidora do escoamento, o que não ocorreu no Modelo 1.

Assim, as análises do presente estudo foram conduzidas considerando as cartas elaboradas a partir do Modelo 2, devido à relevância do detalhamento da região à baixa vertente para a compreensão do acúmulo de fluxo e dos processos erosivos locais. Ainda, no mapa de declividade nota-se que as declividades se acentuam quanto mais se aproximam da baixa vertente, tendo classificação “ondulada” (8 a 20%), enquanto na parte elevada da encosta prevalecem áreas com “ondulação suave” (3 a 8%) e pequenas partes planas (0 a 3%) (EMBRAPA, 2006), respectivas às vias pavimentadas (Figura 5). Alguns locais que apresentam forte ondulação (tom mais alaranjado na Figura 5) representam locais com feições erosivas e o próprio canal, próximos à rodovia (que constavam no arquivo da prefeitura utilizado). A área

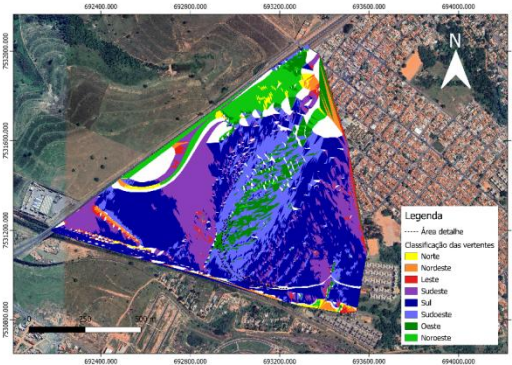
de detalhe apresentou regiões com maior declividade, com destaque para regiões montanhosas e até escarpadas, segundo classificação da Embrapa (2006).

Figura 5: Carta de declividade com os dados do levantamento (classificação Embrapa, 2006).



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 6: Carta de orientação de vertentes com os dados do levantamento.

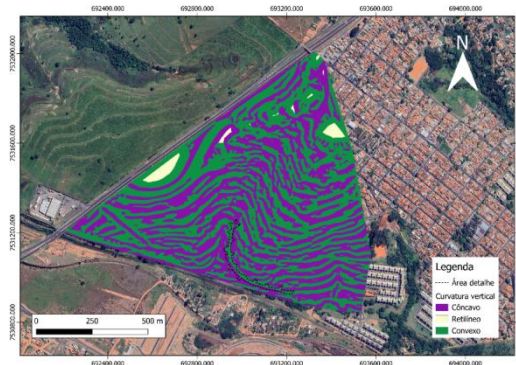


Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 6 observa-se que as linhas com maiores inclinações das vertentes na parte inferior da encosta estão voltadas para o Sul, com dispersão do fluxo diretamente à baixa vertente. As áreas com ausência de cor na carta representam as regiões planas, ou seja, sem orientação de vertente, que configuram os locais onde se originam os fluxos. Já na região central da encosta, a orientação das vertentes se direciona de um lado para sudeste e outro Oeste/Sudoeste, em direção à área detalhe.

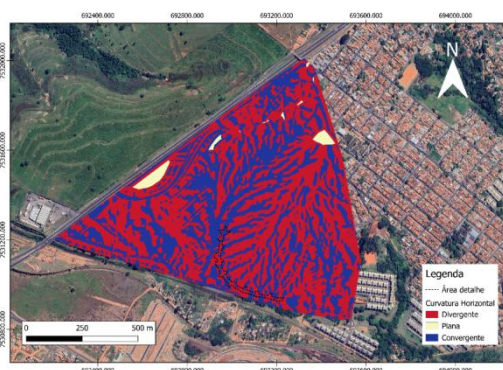
Na carta de curvatura vertical (

Figura 7: Carta de curvatura vertical com os dados do levantamento.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 8: Carta de curvatura horizontal com os dados do levantamento.



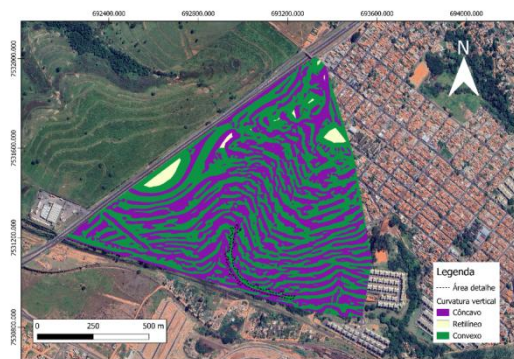
Fonte: Autoria própria (2022).

), se observam transições de classificação entre regiões convexas e côncavas, as quais foram quantificadas em aproximadamente 32% de curvatura côncava, 53% de curvatura convexa e 15% de curvatura retilínea.

Tanto na parcela mais alta da encosta como na área detalhada também se pode verificar a predominância de regiões convexas (correspondendo a 57% e 60% da área total, respectivamente), indicando áreas de divergência das águas. Quanto as regiões côncavas, com predisposição à convergência do fluxo, correspondem à 40% na parcela mais alta da encosta e 39% na área detalhe. As áreas de curvatura vertical retilínea representaram aproximadamente 3% da área total da alta vertente, enquanto na área detalhe, as áreas planas são inexistentes.

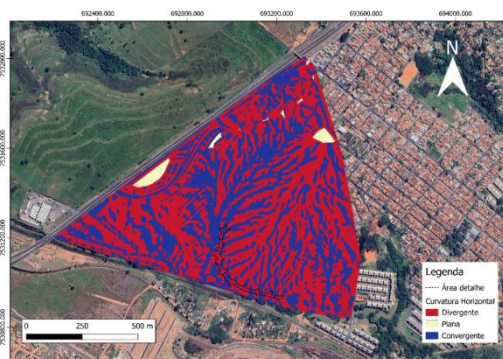
Considerando a área de detalhe, a via principal apresenta curvatura vertical predominantemente convexa, o que sugere uma distribuição do fluxo, que em conjunto com regiões de curvatura horizontal convergente representa certa concentração do escoamento em locais específicos na região de ocorrência dos processos erosivos. É importante ressaltar, porém, que os dados empregados não consideram o efeito do loteamento e das vias asfaltadas da região e ainda retratam uma feição próxima à rodovia (que foi recuperada).

Figura 7: Carta de curvatura vertical com os dados do levantamento.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 8: Carta de curvatura horizontal com os dados do levantamento.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na carta de curvatura horizontal (Figura 8) predominam áreas de curvatura horizontal divergente (representam 56% da área total da encosta), enquanto na região de alta vertente e na área detalhe a curvatura horizontal convergente é predominante (57% e 62%, respectivamente). Ao longo da área de detalhe nota-se que as parcelas com convergência se alternam com as áreas de divergência. Na parcela central da encosta, é possível identificar uma região preeminentemente convergente.

Na região central da encosta de curvatura horizontal predominantemente convergente (Figura 8), juntamente com a orientação das vertentes, que se direciona de um lado da encosta para Sudeste e outro para Oeste/Sudoeste, indicam uma convergência das linhas de fluxo em direção ao canal de drenagem e à Rua Sebastião J. Sampaio, que representa o eixo da área de detalhe.

As cartas de Direção de Drenagem (Figura 9), que indica a direção do escoamento superficial, e a de Fluxo Concentrado (Figura 10), que extrai a rede de drenagem, foram essenciais para análise do escoamento na Área de Detalhe. A carta de Direção de Drenagem (Figura 9) explicita os locais onde o fluxo diverge para direções diferentes e os pontos nos quais ocorre o acúmulo, que são demarcados na carta de Fluxo Concentrado (Figura 10).

Finalmente, a localização das feições erosivas lineares (

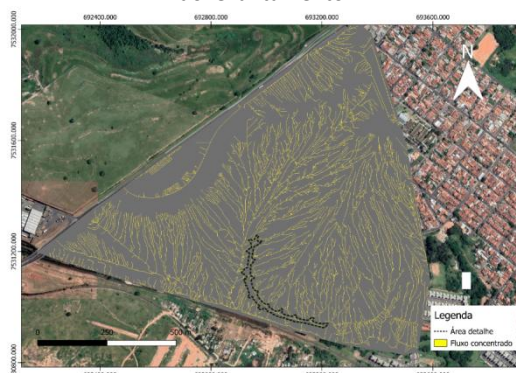
Figura 4) e a carta de Fluxo Concentrado (Figura 10) foram sobrepostas para analisar a compatibilidade entre o padrão de escoamento superficial e os locais de ocorrência das feições (Figura 11).

Figura 9: Carta de Direção de Drenagem com os dados do levantamento.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 10: Carta de Fluxo Concentrado com os dados do levantamento.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 11: Linhas de concentração de fluxo e localização das erosões.



Fonte: Autoria própria (2022).

A sobreposição das cartas indicou que nas feições denominadas Feição 1, Feição 2, Feição 3, Feição 4, Feição 6 e Feição 9 as linhas de fluxo conduzem aos pontos de ocorrência das feições erosivas registradas. Tal fato indica a implicação das formas de relevo (geomorfologia) e, principalmente, das características da via pavimentada na concentração do escoamento superficial em locais específicos da baixa vertente.

Quanto às feições designadas Feição 5, Feição 7, Feição 8, Feição 10 e Feição 11, as localizações não coincidiram com as linhas de fluxo. Uma justificativa para tal discordância seria as intervenções paliativas executadas com objetivo de recuperar a região. Como parte das intervenções houve movimentação de terra, o que modificou a rugosidade da superfície e, conseqüentemente, o fluxo pôde ser conduzido para trajetos alternativos, em geral nas

laterais, gerando novas linhas preferenciais de fluxo e a possibilidade de ocorrência de novas feições em outras localidades. Tal justificativa fica clara em relação à Feição 8.

Na área de detalhe, o aspecto da Rua Sebastião J. Sampaio analisada em escala de detalhe com o levantamento planialtimétrico foi fundamental para determinar os caminhos de menor resistência percorridos pela água, que se acumulam em pequenas depressões e ganham velocidade à medida que a lâmina d'água e a declividade do terreno aumentam.

Ainda, verificando a distribuição do fluxo na Figura 11, algumas linhas de fluxo concentrado são conduzidas da parte mais alta da encosta para a mais baixa, atravessando as quadras e transpondo os lotes. Na prática, porém, uma parte do volume de água de chuva de cada lote infiltra no próprio terreno e a outra parte é conduzida para o sistema de drenagem, não atravessando os lotes. Uma possibilidade para representar o comportamento real das águas, portanto, seria considerar os lotes como impermeáveis. Outra circunstância que promoveria alterações no modelo das linhas de fluxo é a da forma convexa das vias, que gera a distribuição das águas pluviais para as sarjetas de cada lado, dessa forma a concentração de fluxo ao longo da rua seria alterada. Para uma análise completa do comportamento do fluxo na encosta, portanto, seria necessária a correção do modelo por meio de levantamento mais detalhado, como o planialtimétrico realizado para a área de detalhe, ou adotando um GPS de precisão, ou, ainda, utilizando a técnica de escaneamento de superfície.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de contribuição estudada é altamente suscetível aos processos erosivos, devido às características pedológicas, relacionadas ao tipo de solo arenoso colapsível do município de Bauru e às características geomorfológicas da encosta.

Embora o terreno seja majoritariamente composto de curvaturas convexas e divergentes, a geomorfologia é composta por declividades maiores em direção à baixa vertente e a orientação de vertentes voltada para região central da encosta, onde se encontra uma área de curvatura convergente que concentra o fluxo em direção à Rua Sebastião Joaquim Sampaio.

Por outro lado, os locais de geomorfologia côncava-convergente do terreno, como na região de cabeceira da bacia, intensificam a compactação e aumentam a velocidade do escoamento superficial da área, tornando esses locais mais suscetíveis à formação de feições erosivas lineares.

A urbanização se mostrou, também, fator determinante na ocorrência de feições erosivas lineares, por contribuir com a concentração do fluxo em locais específicos, conforme a disposição e o aspecto dos arruamentos. Considerando que ainda existem áreas na encosta que estão em processo de ocupação, a expansão deve predispor novos processos erosivos.

A compatibilização entre o padrão de concentração de fluxo e a ocorrência e desenvolvimento de erosões hídricas lineares próximas ao canal de drenagem e ao longo do calçamento da Rua Sebastião Joaquim Sampaio realizada no estudo, indica a possibilidade de modelagem a partir da análise da concentração de fluxo por meio da ferramenta SIG, para previsão de ocorrência de feições erosivas lineares. Uma possibilidade de desdobramento da pesquisa, ainda sem contar com levantamento mais detalhado, seria refazer o modelo

considerando os lotes como impermeáveis e as respectivas saídas de águas pluviais dos lotes para as ruas.

O estudo possibilitou a percepção da necessidade de dispersão do fluxo ao longo do calçamento para solucionar a problemática das erosões existentes na região ou, como alternativa, dispersores de energia pontuais nos principais locais de concentração de fluxo, identificados. As intervenções paliativas executadas ao longo do tempo na região, somente deslocam a concentração de fluxo para novas linhas preferenciais e, assim, provocam novas feições erosivas.

6 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FILHO, G. Diagnóstico de processos erosivos lineares associados a eventos pluviosos no município de Bauru – SP. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia, 2001. **Anais do VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão**, Goiânia, 2001.
- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto de Geográfico e Geológico**, São Paulo, n. 41, p. 169-263, 1964.
- BAND, L. E. Analysis and representation of drainage basin structure with digital elevation data. **Proceedings of the Second International Conference on Spatial Data Handling**. Int. Geogr. Union Williamsville, NY, 1986. p. 437-450.
- BIGARELLA, J.J.; Becker, R.D.; Santos, G.F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.
- CASSETI, Valter. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005].
- CAVAGUTI, N.; SILVA, M.J.D. Desenvolvimento urbano, erosão e degradação dos recursos hídricos por assoreamento em Bauru – SP. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. **Anais X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Gramado, 1993.
- COELHO, M. C. N. Impactos ambientais em áreas urbanas: teorias, conceitos e métodos de pesquisa. In: GUERRA, Antônio. José. Teixeira. **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 19-45, 2001.
- CORGHI, F.; GIACHETI, H. Processos erosivos na Área Urbana de Bauru-SP. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO). **Anais de Trabalhos Completos**, Goiás/Goiânia, v. 1, p. 227, 2006.
- DAEE. 2015a. **Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP**. Relatório Final. DAEE/C3 Planejamento Consultoria e Projeto Ltda., São Paulo, 3 volumes.
- FILHO, G. S. A.; GOMES, C. L. R.; JÚNIOR, Z. H. EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE CASA BRANCA, SP. In: 9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável 2021. **Anais do Pluris 2021 Digital**. Bauru: UNESP, 2021, ID: 1065.
- GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. Comment on “A Combined Algorithm for Automated Drainage Network Extraction” by Jean Chorowicz et. al. **Water Resources Research**, vol.29, pp. 535-536, 1992.
- JENSON, S. AND DOMINGUE, J. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 54, 1593-1600, 1988.
- KUHN, C. E. S. *et al.* The record and trends of natural disasters caused by gullies in Brazil. **Environmental Earth Sciences**, Verlag GmbH/Germany, v. 82, n. 22, p. 524. 2023.
- MATHIAS, D. T.; LUPINACCI, C. M.; NUNES, J. O. R. Identificação dos fluxos de escoamento superficial em área de relevo tecnogênico a partir do uso de modelos hidrológicos em SIG. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 32, p. 820–831, 17. 2020.

MATOS, C., BENTO, R., & BENTES, I. Urban Land-Cover, Urbanization Type and Implications for Storm Water Quality: Vila Real as a Case Study. **J Hydrogeol Hydrol Eng**, 4(2), 2015.

MOORE, I. D. *et al.* Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, Chichester, Sussex, 5, 3-30, 1991.

O'CALLAGHAN, J.F. and MARK, D.M. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, Cambridge, Massachusetts, 28, 328-344, 1984.

OLIVEIRA, A. L. P. De; FRANCISCO, M. R.; FUREGATTI, S. A. Análise Temporal e Evolutiva das Erosões Lineares Hídricas Urbanas em Encosta Localizada na Região de Nascente do Córrego da Grama. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, Tupã, v. 10, p. 98-113, 2022.

PELLETIER, J. D. A robust, two-parameter method for the extraction of drainage networks from high-resolution digital elevation models (DEMs): Evaluation using synthetic and real-world DEMs. **Water Resources Research**, Washington, D.C. 49, 1-15p, 2013.

PEUCKER, T. K.; DOUGLAS, D. H. Detection of Surface-Specific Points by Local Parallel Processing of Discrete Terrain Elevation Data. **Computer Graphics and Image Processing**, Cambridge, Massachusetts, v. 4, n. 4, p. 375-387, 1975.

SALOMÃO, F.X.T. **Processos erosivos lineares em Bauru (SP) – regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural** – São Paulo, 1994. Tese (Doutorado em Geografia Física). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.

SCALENGHE, R., & MARSAN, F. A. The anthropogenic sealing of soils in urban areas. **Landscape and urban planning**, Amsterdã, 90(1-2), 1-10, 2009.

SHS – CONSULTORIA E PROJETOS DE ENGENHARIA S/S LTDA. **Diagnóstico Ambiental e dos Recursos Hídricos do Município de Bauru - SP**. Relatório final. 2008.

SOUZA, D. L. M. de, ROMERO, L. M., & FUREGATTI, S. A. (2022). Analysis of factors that influence the occurrence of erosive branches on the left margin of a urban gully in Bauru/SP: case of COHAB-16 / Análise de fatores que influenciam a ocorrência de ramificações erosivas à margem esquerda de uma boçoroca urbana em Bauru/SP: caso COHAB-16. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, 8(4), 26519-26535, 2022.

SOUZA, J. O. P.; ALMEIDA, J. D. M. Modelo digital de elevação e extração automática de drenagem: dados, métodos e precisão para estudos hidrológicos e geomorfológicos. **Boletim de Geografia**, UEM, Maringá, v. 32, p. 134-149, 2014.

SZYPUŁA B., 2017. Digital elevation models in geomorphology. [In]: Shukla D.P. (Ed.), **Hydro-Geomorphology – Models and Trends**. InTech, pp. 81-112.

TAROLLI P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. **Geomorphology**, Illinois, v.216, p.295-312, 2014.

VALERIANO, M. M. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. **In: Do Projeto de Produtividade em Pesquisa “Modelagem de dados topográficos SRTM”**, INPE-15318-RPQ/818, São José dos Campos, 75p, 2008.

WEI, Y. *et al.* Analysis of gully erosion susceptibility and spatial modelling using a GIS-based approach. **Geoderma**, Glasgow, Scotland, v. 420, p. 115869, 2022.

YUANZHI, Y.; XUN, S. & ZEKUN, W. An efficient multiple scanning order algorithm for accumulative least-cost surface calculation. **International Journal of Geographical Information Science**, Philadelphia, 36(8), p.1677-1695, 2022.