

Mapeamento de Processos Erosivos e Depositionais Utilizando Modelagem Matemática: Simulações na Bacia do Córrego Alto Espreado (SP)

Mapping of Erosive and Depositional Processes Using Mathematical Modeling: Simulations in the Córrego Alto Espreado Basin (SP)

Evandro Danielⁱ
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil

Bianca Carvalho Vieiraⁱⁱ
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil

Tiago D. Martinsⁱⁱⁱ
Universidade Federal de São Paulo
São Paulo, Brasil

Carlos Valdir de Menezes Bateira^{iv}
Universidade do Porto
Porto, Portugal

José Eduardo Bonini^v
Universidade de São Paulo
São Paulo, Brasil

Resumo: Os modelos matemáticos possuem potencial para estimar e constatar áreas suscetíveis a processos erosivos. O SIMWE (*Simulated Water Erosion*) considera as propriedades hidrológicas e do solo, simula a erosão, o transporte e a deposição pelo fluxo superficial. O objetivo principal deste artigo foi avaliar a dinâmica das taxas de erosão e

ⁱ Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas. evandrogeo@usp.br.
<https://orcid.org/0000-0001-7802-1715>.

ⁱⁱ Professora Associada do Depto. de Geografia. biancav@usp.br.
<https://orcid.org/0000-0001-7060-2830>.

ⁱⁱⁱ Professor Adjunto do Instituto das Cidades. td.martins@unifesp.br.
<https://orcid.org/0000-0002-1213-1441>.

^{iv} Professor Associado da Faculdade de Letras. Integrante do grupo RISKam – Avaliação e Gestão de Perigosidade e Risco Ambiental do Centro de Estudos Geográficos – CEG. carlosbateira@gmail.com.
<https://orcid.org/0000-0002-5039-6053>

^v Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física. jose.bonini@usp.br.
<https://orcid.org/0000-0001-6047-0141>

deposição a partir da aplicação do modelo SIMWE na bacia do Alto Espraiado, São Pedro (SP), que apresenta expressivas feições erosivas laminares e lineares. Foram analisados a influência dos parâmetros utilizados na geração de quatro cenários, o mapeamento das feições erosivas numa perspectiva histórica e a validação com o Índice Potencial de Erosão. O produto apresentou maior área associada à deposição, entre 65% e 77%, e à erosão, entre 23% e 36%. O registro de parte significativa das feições erosivas é expresso espacialmente por “caminhos ou rotas” dos fluxos superficiais. O SIMWE demonstrou resultados satisfatórios para identificar setores erosivos e deposicionais, sendo uma importante ferramenta para o diagnóstico e prognóstico de áreas complexas, marcadas pela dinâmica desses processos.

Palavras Chaves: Modelagem; SIMWE; Erosão; Deposição.

Abstract: Mathematical models have the potential to estimate and identify prone areas to erosional processes. SIMWE (Simulated Water Erosion) model considers hydrological and soil properties, simulates erosion, transport, and deposition by surface flow. This research aimed to evaluate the dynamics of erosion and deposition rates through the application of the SIMWE in the Alto Espraiado basin, São Pedro (SP), which presents significant laminar and linear erosional features. The influence of the parameters applied in the generation of four scenarios, as well the mapping of erosion features from a historical perspective and the validation with the Erosion Potential Index were analyzed. The results presented a greater area associated with deposition, between 65% and 77%, and erosion between 23% and 36%. The record of a significant part of the erosion features is spatially represented by “paths or routes” of surface flows. SIMWE demonstrated satisfactory results for identifying erosive and depositional sectors, being an important tool for the diagnosis and prognosis of complex areas, where such process is recurrent.

Keywords: Modeling; SIMWE; Erosion; Deposition.

Introdução

As investigações das causas dos processos erosivos podem ser realizadas a partir da avaliação conjunta de distintos parâmetros, como os geológicos, pedológicos, climáticos, morfológicos, morfométricos e antrópicos (TORRI, 1996; BRAIMOH e VLEK, 2007; BRADY e WEIL, 2013), que podem remeter a abordagens determinísticas, com o emprego de modelos matemáticos, facilitado pelos avanços tecnológicos (CONOSCENTI *et al.* 2014).

A quantidade significativa de perda de solo no Brasil evidencia a necessidade do avanço nas pesquisas, a partir de diferentes métodos, a exemplo dos modelos matemáticos, uma alternativa com potencial para prever e quantificar a erosão, visto que contribui com a definição de áreas suscetíveis (PEREIRA, 2014). Um exemplo são os modelos de erosão e transporte de sedimentos, projetados para incluir a descrição probabilística da hidrologia, as características físicas da bacia hidrográfica e a estrutura estocástica das propriedades do solo (AKSOY e KAVVAS, 2005). Tal situação está associada com a entrada de dados mais precisos e de maior detalhe, essenciais para a construção e a

implementação de modelos mais dinâmicos que refletem os processos geomorfológicos (GROHMANN *et al.*, 2011; DYMOND e VALE, 2018).

Dentre os modelos de avaliação da erosão, a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) é uma das mais conhecidas e utilizadas, e originou uma série de outros modelos de base empírica, tais como a RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) e a MUSLE (*Modification Universal Soil Loss Equation*) (WISCHMEIER e SMITH, 1978; LEITE, 2009; PEREIRA, 2014; DANTAS *et al.*, 2015; ABDO e SALLOUM, 2017).

Um outro exemplo é o WEPP (*Water Erosion Prediction Project*), de Flanagan e Nearing (1995), que determina as taxas de erosão e deposição de sedimentos a partir de equações relacionadas à infiltração, física do solo, hidráulica, mecânica da erosão e fisiologia vegetal (PEREIRA, 2014). Trabalhos têm aplicado o WEPP em ambiente SIG (GeoWEPP) (FLANAGAN *et al.*, 2007), que, por sua vez, supera as limitações do WEPP, na medida em que permite o processamento de dados digitais como o MDE, ortofotos, levantamentos de solos, uso do solo e dados de agricultura de precisão (ARNOLD e ALLEN, 1996; MACHADO *et al.*, 2003).

Também destaca-se o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), de Arnold e Allen (1996), dada a disponibilidade de dados geoespaciais, climáticos, pedológicos e uso da terra. Assim sendo, trata-se de uma ferramenta desenvolvida para caracterizar o manuseio do solo sobre os escoamentos superficial e subterrâneo, produção de sedimentos, carga de poluentes e qualidade da água em longo período de tempo (ARNOLD e ALLEN, 1996; CARVALHO, 2014; SILVA, 2015). Já o TOPMODEL (*Topography Based Hydrological Model*), de Beven e Kirkby (1979), parte do pressuposto de que a topografia e as características do solo possuem controle determinante sobre o escoamento, com produtos finais associados à vazão do rio e à distribuição espacial da umidade no sistema (zonas saturadas e áreas secas) ao longo do tempo (VARELLA e CAMPANA, 2000; SANTOS, 2001).

De forma geral, a execução dos modelos de erosão se dá em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, por meio de comandos (entradas e saídas), *script*/roteiro e operações. O SIMWE é um modelo dinâmico de base física, projetado por Mitas e Mitasova (1998), capaz de simular a erosão, o transporte e a deposição por fluxo superficial. Seus parâmetros de entrada consistem no modelo WEPP, que define as condições iniciais do processo de erosão/deposição e possibilita ser aplicado em condições complexas do terreno, solo e tipo de cobertura (MITAS e MITASOVA, 1998; KOCO, 2011). Neste sentido, este estudo teve como objetivo principal avaliar a dinâmica das taxas de erosão e deposição a partir da aplicação do modelo SIMWE em uma bacia hidrográfica com expressivas feições erosivas laminares e lineares.

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Alto Espreado, selecionada para o emprego do modelo SIMWE e análise das feições erosivas e da deposição, possui densidade e representatividade erosiva (Figura 1) com registros de processos erosivos lineares e laminares observados *in loco*, os quais já haviam sido reconhecidos em trabalhos anteriores (DANIEL e VIEIRA, 2015; DANIEL *et al.*, 2021a; DANIEL *et al.*, 2021b).

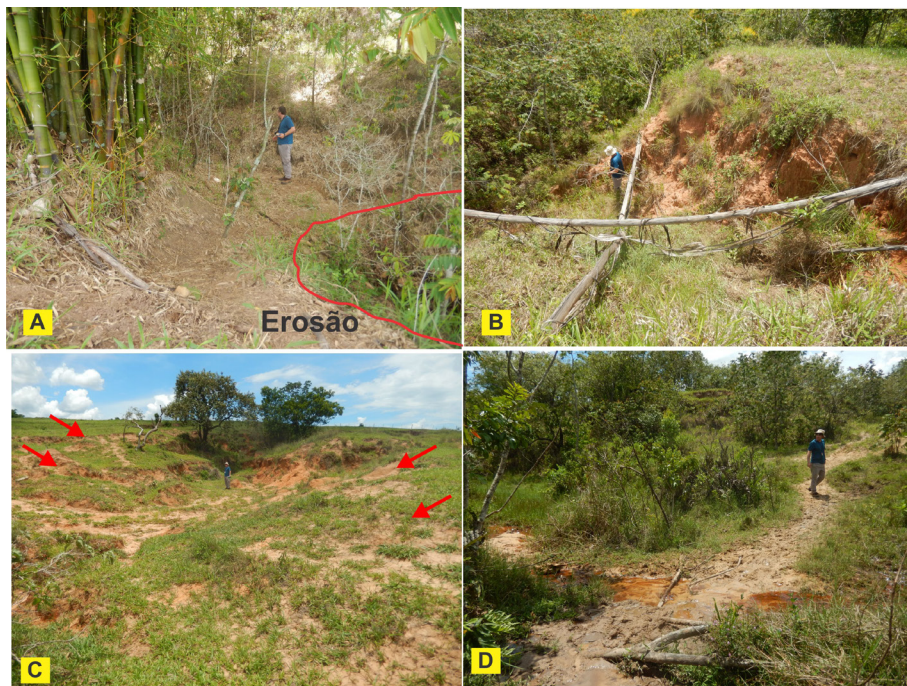


Figura 1 – Registros de processos erosivos na bacia do Alto Espreado, São Pedro (SP).

(A) Prática conservacionista com o plantio de bambu para conter a erosão remontante. (B) Feições erosivas lineares avançadas – voçorocas. (C) Feições erosivas intermediárias, sulcos erosivos e ravinas (em destaque – seta vermelha). (D) Registro de afluente assoreado.

Fotos: Autores (2023).

A bacia tem cerca de 2km² (Figura 2) e está situada ao norte do município de São Pedro (SP). Seu canal principal tem direção NW-SE com a foz no Ribeirão Araquá, afluente do rio Piracicaba, pertencente à unidade de gerenciamento de recursos hídricos do PCJ (Piracicaba/Capivari/Jundiá). Conforme Kertzman *et al.* (1995), o município está situado na classe de alta suscetibilidade à erosão e, portanto, trata-se de uma importante área piloto para simulação de taxas erosivas e deposicionais a partir de modelos matemáticos em bases físicas.

O substrato rochoso é constituído pela Formação Piramboia do Grupo São Bento (Triássico-Jurássica), pertencente à Bacia Sedimentar do Paraná, borda oriental, que ocupa vasta área da Depressão Periférica Paulista, com espessura máxima de 300m (DIAS FERREIRA, 1997; FURQUIM, 2002). Os solos são marcados pela presença de horizonte subsuperficial arenoso e espesso, oriundo de rochas arenosas com horizonte profundo, características do Neossolo Quartzarênico (SANCHEZ, 1971; KAWAKUBO *et al.*, 2006).

Destaca-se a influência do relevo de *Cuesta* nas oscilações térmicas e pluviométricas, com alterações nos deslocamentos das massas de ar, chuvas mais abundantes nos rebordos escarpados e no seu reverso (SANCHEZ, 1971; FACINCANI, 1995). Conforme a classificação de Köppen, predomina em São Pedro (SP) o tipo CWa, clima mesotérmico (verão quente e úmido com inverno seco), tropical de altitude, pluviosidade média anual entre 1200 mm a 1370 mm, sendo os meses de novembro a março com os maiores acumulados (140 a 200mm) e os meses de julho e agosto os mais secos, não ultrapassando 30mm (SILVA, 1977; SANTORO, 1991; FERREIRA, 2008). Ressalta-se que o período mais quente registrou temperatura entre 22°C e 27°C (outubro a março) e o período mais frio (abril a setembro) entre 16°C e 19°C (CONTI, 1971).

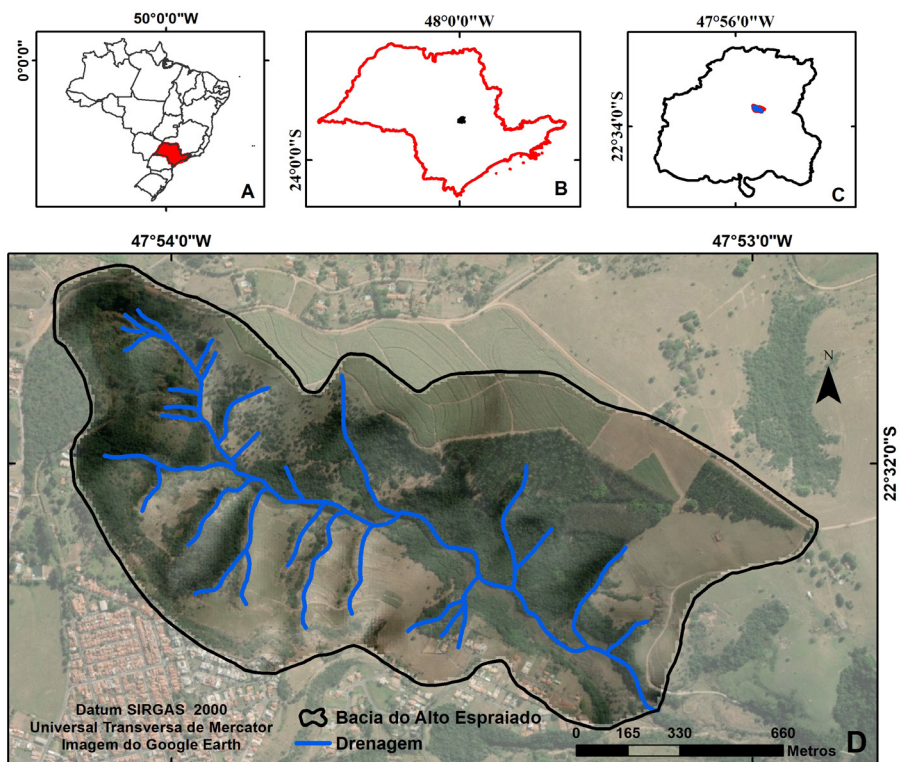


Figura 2 – (A) O estado de São Paulo no território brasileiro. (B) Posição do município de São Pedro no estado de São Paulo. (C) Bacia do Alto Espraído no município de São Pedro. (D) Bacia do Alto Espraído.

Fonte: Autores (2023).

Materiais e Métodos

Modelo SIMWE

O modelo SIMWE está estruturado em dois módulos (Figura 3): “fluxos hidrológicos superficiais”, que simula o escoamento superficial com base nas variáveis espaciais de precipitação e de solos; e o segundo “fluxo de sedimentos”, que estima a erosão do solo, o transporte e a deposição de sedimentos originados pelo fluxo de água (NETELER; MITASOVA, 2008). Sua operação se deu por meio do programa SIG GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) (GRASS, 2017). As execuções se apoiam em um Modelo Digital de Elevação (MDE), que, ao representar continuamente a variação altimétrica de uma área, possibilita a simulação espacial dos fluxos de água e sedimentos (MITAS; MITASOVA, 1998) a partir dos valores da precipitação, rugosidade do terreno, taxa de infiltração/escoamento superficial, tensão de cisalhamento, capacidade de desprendimento e transporte de partículas e permeabilidade do solo.

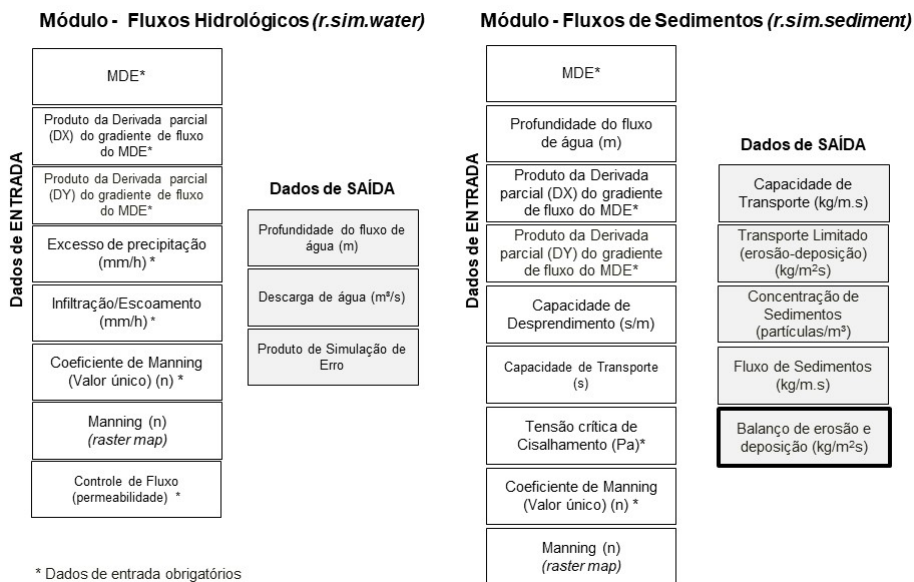


Figura 3 – Estrutura dos módulos “fluxo hidrológico superficial” e “fluxo de sedimentos” do SIMWE.

Fonte: Adaptado de Fernandes (2014).

Dados de Elevação

O Modelo Digital de Elevação foi gerado a partir das curvas de nível disponíveis na carta topográfica São Pedro I (SF-23-Y-A-IV-1-NO-B), escala 1:10.000 (TERRA FOTO,

1979). Para a construção do MDE adotou-se a ferramenta *topo to raster*, que se baseia na proposta de Hutchinson (1988). Como etapas de processamento foram aplicadas as ferramentas *Sinks* e o *Fill* para o preenchimento dos vazios e correções (MARK, 1988; TARBOTON *et al.*, 1991). A resolução espacial adotada é de 10 metros, tendo sido definida a partir da proposição de Hengl (2006), conhecida como complexidade do relevo.

A partir do MDE foram extraídos parâmetros morfométricos do relevo (declividade, aspecto e as derivadas parciais dx e dy do campo de elevação), utilizados para o cálculo do escoamento superficial, da direção e da magnitude do fluxo de água. Para análise dos aspectos morfométricos e a relação com a dinâmica das feições erosivas e deposicionais foram geradas as cartas de declividade (Figura 4) e curvatura (Figura 5).

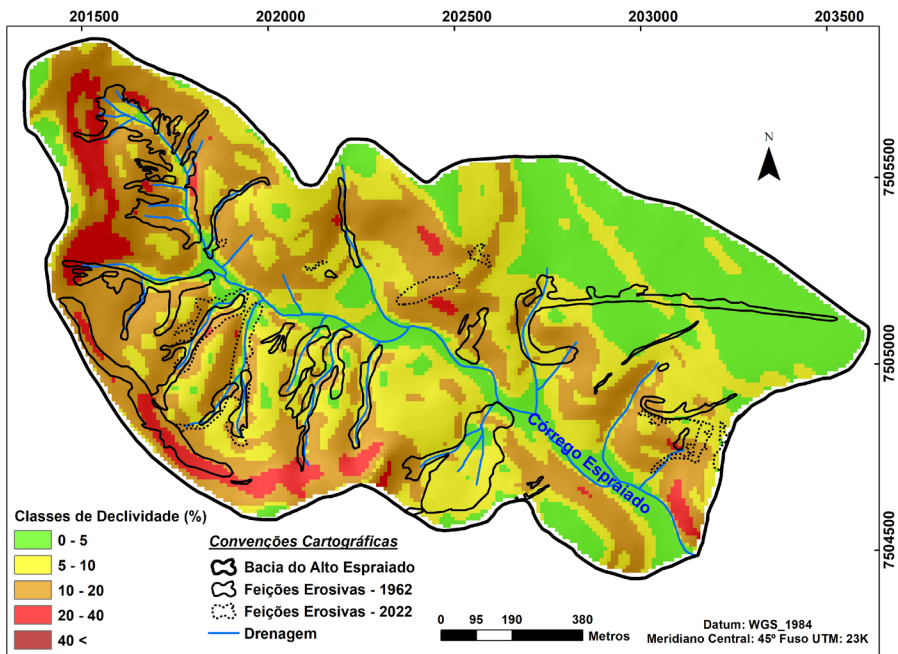


Figura 4 – Carta de Declividade da bacia do Alto Espraiado com a sobreposição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos pretos) e 2022 (polígonos em preto tracejado).

Fonte: Autores (2023).

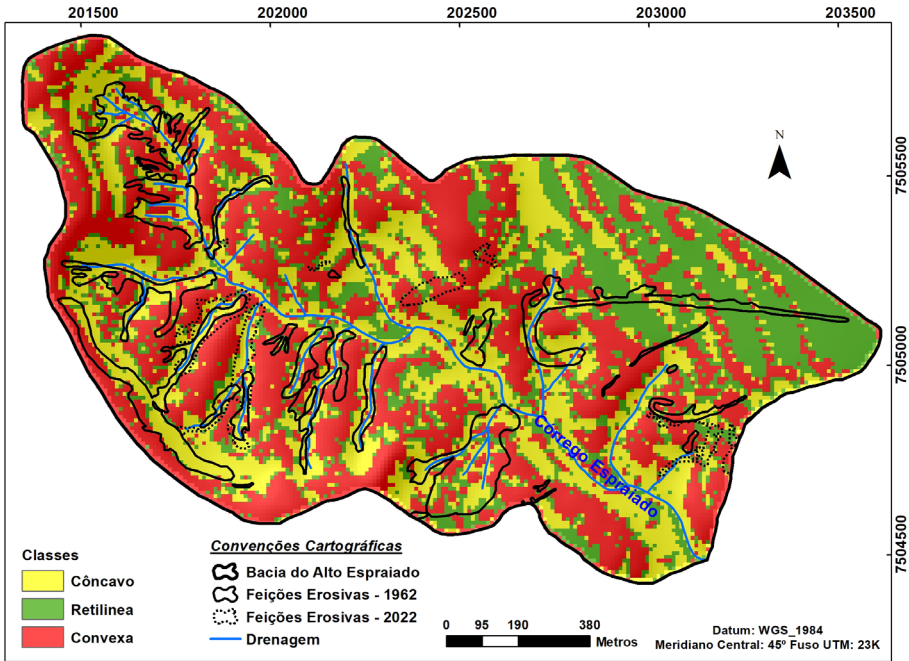


Figura 5 – Carta de Curvatura da bacia do Alto Espraiado com a sobreposição das feições erosivas mapeadas nos cenários de 1962 (polígonos pretos) e 2022 (polígonos em preto tracejado).

Fonte: Autores (2023).

Características Pedológicas e Pluviométricas

A partir de trabalhos e estudos prévios conduzidos na área de estudo e adjacências, a bacia analisada constitui-se pelo Neossolo Litólico e Gleissolo, Neossolo Quartzarênico, Neossolo Flúvico mais Gleissolo ao longo do canal principal e o Latossolo Vermelho que está situado a montante (FURQUIM, 2002). Também consta a presença de materiais inconsolidados, os quais constituem-se as seguintes classes: Solo Residual, Solo Saprolítico, Rocha Muito Alterada e Pouco Alterada, Materiais Retrabalhados e Solos Aluvionares (YAMANOUTH, 2003).

Os dados pluviométricos foram obtidos a partir de medições diárias das estações pluviométricas, do Balanço Hídrico elaborado pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) e estudos na região de São Pedro (SP). Destacam-se os dados de excedente hídrico que variaram entre 1mm e 207mm, com os meses de julho e agosto mais secos e os meses de dezembro a fevereiro com maiores volumes de chuvas.

Foram consideradas as precipitações com volume igual ou superior a 10mm, classificadas como erosivas conforme os trabalhos de Cassol *et al.* (2007); Almeida (2009);

Santos *et al.* (2010); Almeida *et al.* (2012), e Silva *et al.* (2022). Tais mensurações, durante o período de 1942 a 2022, demonstraram 28 registros acima de 80mm, em alguns casos superiores a 120mm.

Parâmetros de Entrada e Simulação dos Cenários

A inserção e a seleção dos dados de entrada consistiram na construção de cenários que serviram para analisar a estrutura do modelo SIMWE e suas ferramentas, calibrar e identificar a sensibilidade dos parâmetros, assim como o *layout* dos produtos e a definição de cinco classes.

Foram selecionados quatro cenários (Tabela 1) com os melhores desempenhos (mais próximos da realidade da área de estudo), sobretudo, as condições e propriedades naturais (solo e chuva) e a relação com os processos de erosão e deposição, denominados de Cenário 1, Cenário 2, Cenário 3 e Cenário 4. Tais simulações a partir dos dados de entrada representam características naturais semelhantes às da realidade, das propriedades hidrológicas e dos solos e, portanto, condições propícias para a análise da eficiência do modelo e da sensibilidade dos parâmetros considerados, que são: taxa de excesso de precipitação (mm/h), coeficiente de Manning (n), taxa de infiltração (mm/h), permeabilidade (cm/s), coeficiente da capacidade de desprendimento (s/m), coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos (s) e tensão de cisalhamento (Pa), que contribuíram para identificar os setores com suscetibilidade erosiva e deposicional.

Neste sentido, o Cenário 1 teve como objetivo simular condições propícias para a formação de processos erosivos, com a inserção de 190mm/h para a taxa de excesso de precipitação. Como forma de criar condições para o fluxo subsuperficial considerou-se para o coeficiente de Manning o valor de $0.035n$, associado aos solos arenosos, assim como os maiores valores levantados para as taxas de infiltração (12 mm/h), permeabilidade (0.0048 cm/s), coeficientes da capacidade de desprendimento (0.7 s/m) e transporte de sedimentos (0.6 s), além da baixa resistência do solo com valor nulo (0) para a tensão cisalhante.

O Cenário 2 manteve os mesmos dados do módulo fluxo de água e os valores padrões do manual do SIMWE de Mitas e Mitasova (1998) para o módulo fluxo de sedimentos. O Cenário 3 considerou o maior valor ($0,079n$) para o coeficiente de Manning, menores valores para a taxa de infiltração (4mm/h) e permeabilidade (0.00024 cm/s) e valores nulos (0) para os parâmetros do módulo fluxo de sedimentos. O Cenário 4 difere do anterior ao considerar um valor nulo (0) para o coeficiente de Manning e os mesmos valores para os demais parâmetros.

Tabela 1 – Parâmetros e Dados de Entrada para Simulação dos Cenários.

Módulo	<i>r.sim.water</i> (Fluxo Hidrológico Superficial)				<i>r.sim.sediment</i> (Fluxo de Sedimentos)		
	Parâmetro	Taxa de excesso de precipitação (mm/h)	Coefficiente de Manning (n)	Taxa de infiltração (mm/h)	Permeabilidade (cm/s)	Coefficiente capacidade de desprendimento (s/m)	Coefficiente capacidade de transporte de sedimentos (s)
Cenário 1	190	0.035 (solo exposto)	12	0.0048	0.7	0.6	Valor Nulo (0)
Cenário 2	190	0.035 (solo exposto)	12	0.0048	0.001	0.001	0.5
Cenário 3	190	0,079 (Pastagem)	4	0.00024	Valor Nulo (0)	Valor Nulo (0)	Valor Nulo (0)
Cenário 4	190	Valor Nulo (0)	4	0.00024	Valor Nulo (0)	Valor Nulo (0)	Valor Nulo (0)

Fonte dos dados: Rodrigues (1982); Santoro (1991); Santoro e Fulfaro (1996); Silva (1999); Gomes (2002); Ferreira (2004); Mingoti (2012); CIIAGRO (2022).

Feições Erosivas em São Pedro/SP

Para analisar o desempenho dos quatro cenários testados, adotou-se um inventário das feições erosivas (Figura 6) construído a partir de estudos anteriores de Daniel e Vieira (2015) e Daniel *et al.* (2021a) que mapearam as feições erosivas em séries temporais distintas (1962, 1972, 2006 e 2013). O inventário resultou da combinação das feições erosivas de 1962, que apresenta o maior volume de feições, e uma atualização de 2022, em que foram utilizados os mesmos critérios anteriores (sombreamento, solo exposto, entalhamento do relevo, fissuras no solo e declividade acentuada).

Ressalta-se que as feições erosivas mapeadas possuem tamanho variados de 300m² até 48.000m², com profundidade de 6m até 21,50m, formatos retilíneos ou constituídas pela união de diversas ramificações, além da presença de processos subsuperficiais e registros de *piping* (DANIEL e VIEIRA, 2015; DANIEL *et al.*, 2021a).

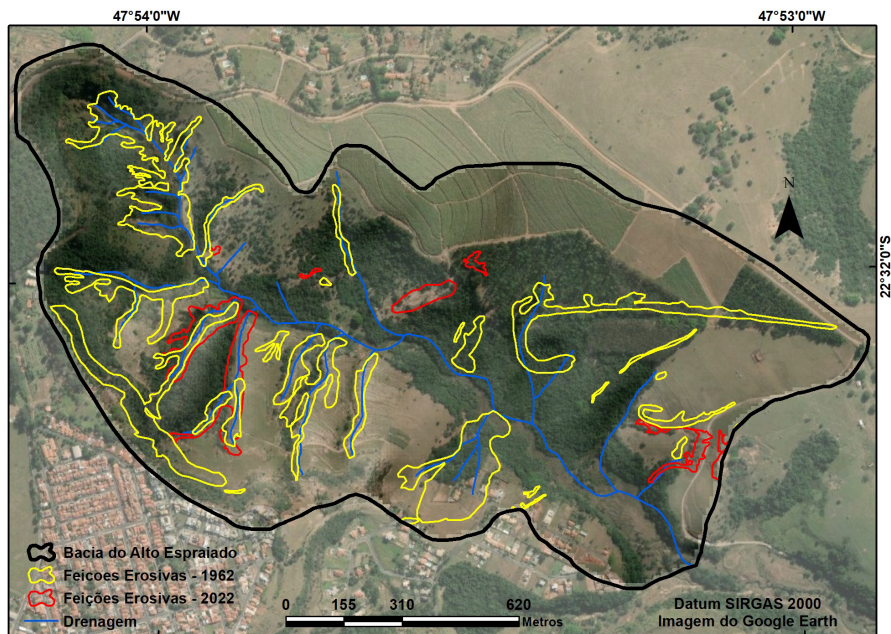


Figura 6 – Mapa das Feições Erosivas, com destaque os polígonos amarelos (Cenário de 1962) e os vermelhos (Cenário de 2022).

Adaptado de: Daniel e Vieira (2015).

Validação dos Cenários

Para fins de avaliação e identificação do melhor dos quatro cenários, adotou-se a proposta de Gao (1993), que permite identificar o percentual das classes que ocorrem no interior de cada feição dados pelo modelo SIMWE. Esse percentual foi denominado no trabalho em tela como Potencial de Erosão (PE), e permitiu quantificar se as células resultantes da aplicação/simulação dos quatro cenários do SIMWE coincidem com as feições erosivas e se essas células foram classificadas como erosivas ou deposicionais. Tal índice consiste na razão entre o número de células de cada classe afetada pelas feições erosivas e o total de células dessa mesma classe.

Resultados e Discussões

O SIMWE identificou a predominância dos processos de deposição entre 64% e 77% e taxas de erosão entre 23% e 36% da área. Tais resultados demonstram que a distribuição de sedimentos é maior que a perda de solo. Os cenários estudados (Figura 7) apresentaram registros numéricos distintos de erosão e deposição, porém, semelhantes na distribuição espacial. Grande parte das áreas suscetíveis (valores positivos) que registraram processos de erosão estão localizadas em áreas circundantes do canal principal

(Figura 8), dos afluentes e também das drenagens intermitentes, principalmente na média e baixa encosta. Tais setores suscetíveis podem estar associados à convergência de fluxos, pois embora a bacia possua 43% de encostas com curvatura convexa, 33% côncavas e 24% retilíneas, grande parte das feições erosivas situa-se em encostas côncavas, com aproximadamente 53%. Schanz e Montgomery (2016) analisaram processos erosivos a partir do mapeamento da superfície dos vales, datação dos estratos com radiocarbono e da comparação entre a largura e a área de drenagem constituída por basaltos e rochas sedimentares em duas bacias situadas nos EUA. Os autores identificaram que os vales em ambiente sedimentar são mais largos, côncavos e mais suscetíveis em relação aos leitos rochosos basálticos, resistentes, mais estreitos, com menores declividades e menor número de concavidades.

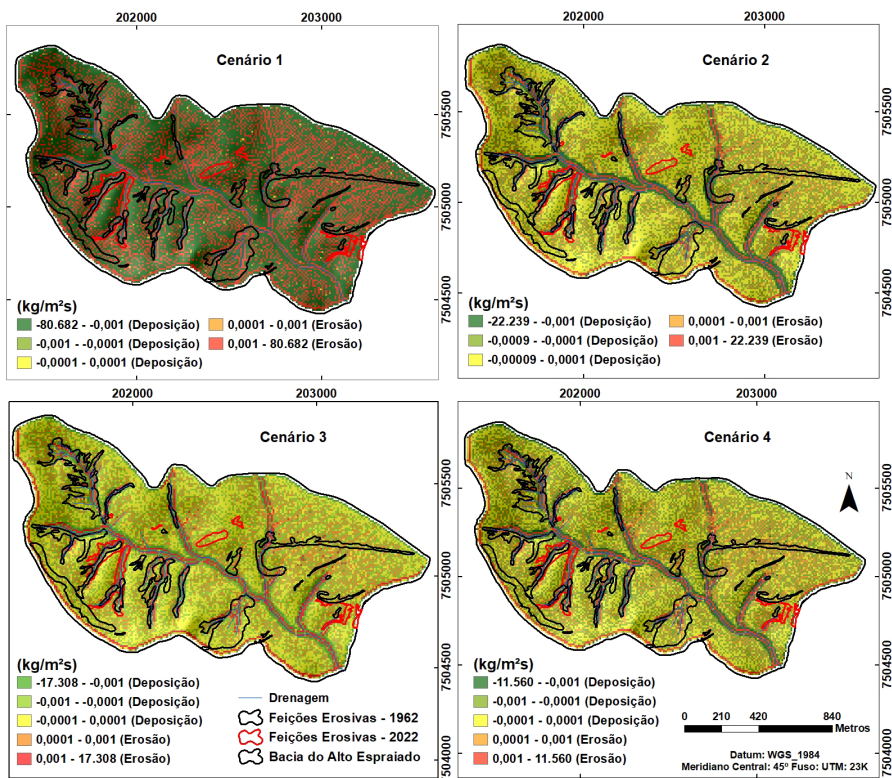


Figura 7 – Espacialização do balanço de erosão e deposição com as feições erosivas (1962 e 2022) sobrepostas para os quatro cenários.

Fonte: Autores (2023).

Os parâmetros do módulo fluxo de sedimentos que estão associados aos coeficientes de capacidade de desprendimento e de transporte de sedimentos, coeficiente de Manning e tensão de cisalhamento apresentaram influência sobre os resultados, com o

aumento da área associada à deposição e a diminuição de setores constituídos por erosão. Warren (1998), a partir do emprego do SIMWE numa bacia experimental da Alemanha, observou que a rugosidade possui grande influência para a redução de áreas suscetíveis, pois, após ter colocado cobertura de grama em locais com maior risco de erosão e comparado com o solo exposto, constatou a diminuição e até a eliminação de material sedimentar, com a perda de solo apenas em canais efêmeros e o registro de erosões ao longo das margens das áreas gramadas. Ebling *et al.* (2021) estudaram os impactos hidrológicos associados ao coeficiente de rugosidade, condutividade hidráulica, fluxo de sedimentos, concentração e produção de sedimentos a partir do emprego do modelo LISSEM (*Limburg Soil Erosion*) e do índice NSE numa bacia sob pressão do plantio de eucaliptos e pastagens. Tal estudo identificou que a rugosidade e a tensão crítica do solo possuem controle direto sobre a erosão, onde os setores de pastagens apresentaram a maior variação entre o aumento e a redução da vazão, da umidade inicial do solo e da produção de sedimentos.

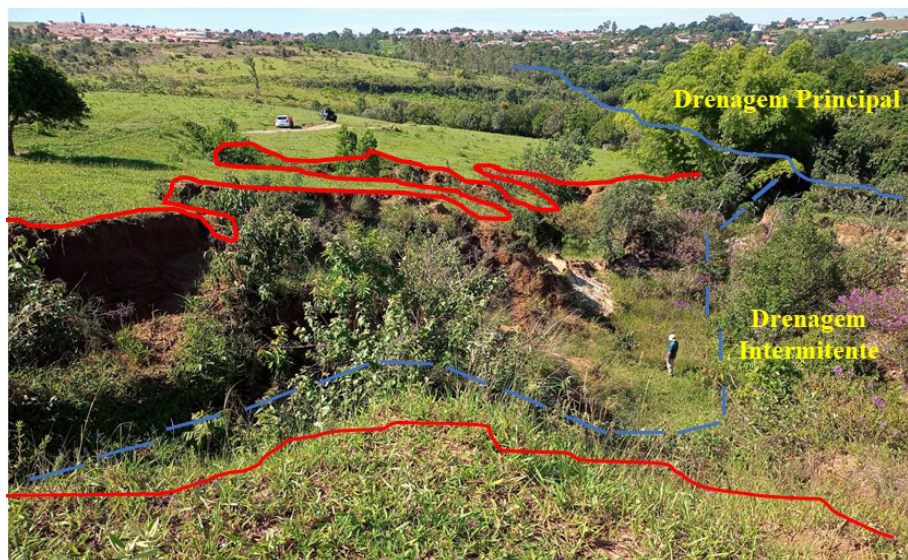


Figura 8 – Feição erosiva (delimitada em vermelho) identificada pelo modelo SIMWE e validada *in loco*. Situada em curvatura cônica, com a presença de canais intermitentes (em azul tracejado) no seu interior.

Foto: Autores (2023).

A bacia do Alto Espreado constitui-se por quatro grupos de solos: Neossolo Litólico (55%), Neossolo Quartzarênico (33%), Latossolo Vermelho (3%) e Neossolo Flúvico (9%) (FURQUIM, 2002). Grande parte das feições erosivas, cerca de 87%, situa-se em Neossolo Litólico e 9% em Neossolo Quartzarênico. Conforme Furquim (2002), o Neossolo Litólico possui alta concentração de argila, pouca profundidade, baixa infiltração e maior capacidade de retenção de água, enquanto o Neossolo Quartzarênico apresenta-

-se mais arenoso, mais espesso, com maior capacidade de infiltração e baixa retenção de água. Rodrigues (1982) e Santoro (1991) também verificaram alta intensidade de fluxos superficiais e subsuperficiais e a presença de ravinas e voçorocas em setores constituídos por Neossolo Litólico e Quartzarênico. Tais classes hidrologicamente podem gerar maior saturação em períodos chuvosos, sobretudo aumento da capacidade erosiva (YAMANOUTH, 2003; SANTANA *et al.*, 2007).

Os setores mais suscetíveis (maior registro de feições erosivas) também estão associados à declividade com ~ 40% das feições erosivas situadas no intervalo 5 – 10% e ~ 41% em 10 – 20%. Ebhuoma *et al.* (2022) mapearam as áreas suscetíveis e aplicaram o modelo AHP (*Analytic Hierarchy Process*) em duas comunidades da bacia hidrográfica de Thukela/África do Sul, os quais identificaram a influência da declividade e da precipitação na formação dos processos erosivos, com 21% e 14% da área associados, respectivamente, à alta suscetibilidade e muito alto risco, resultados estes satisfatórios e validados com precisão de 85%. Melo e Santos (2020), a partir do uso do SWAT na bacia do Paraná/Brasil, mensuraram a produção de sedimentos (entre 16,35 – 31,86 ton/ha), o escoamento superficial (entre 384 – 573 mm/ano) e observaram que tais resultados eram decorrentes da declividade e da precipitação.

Também se destaca a influência do uso do solo nos setores diagnosticados como suscetíveis pelo modelo SIMWE, como também a presença dos materiais inconsolidados (YAMANOUTH, 2003), pois 36% das feições erosivas estão concentradas na rocha sã, seguido de 30% em material retrabalhado e 19% em solo residual. Daniel e Vieira (2015) e Daniel *et al.* (2021a) analisaram, numa perspectiva histórica, as implicações do uso do solo e a distribuição das feições erosivas na bacia do córrego Espreado/SP, por meio de fotointerpretação, método estatístico e trabalho de campo. Tais estudos identificaram relação entre os processos erosivos e o uso do solo, sobretudo, as classes de solo exposto e pastagens como as mais suscetíveis, assim como a curvatura côncava e declividade entre 20% e 40%.

Chen e Wang (2022) avaliaram as práticas de conservação de solo e da água com o apoio do SIMWE, em que quantificaram as taxas de infiltração e da rugosidade da superfície no nordeste da China. Os autores observaram que os terraços em nível ou retenção afetam o curso natural do fluxo e, sobretudo, a distribuição espacial da erosão do solo e a produção de sedimentos; as faixas de vegetação apresentaram eficácia limitada no controle do curso de escoamento, embora tenham desempenhado um papel significativo na retenção de sedimentos. De acordo com os autores, práticas conservacionistas melhoraram a capacidade de retenção do escoamento superficial, dado o aumento da rugosidade da superfície. Gutiérrez *et al.* (2009), em estudos realizados no sudoeste da Espanha, verificaram, a partir de fotografias aéreas e em diferentes anos, entre 1945 e 2006, que a evolução dos processos erosivos está associada ao manejo do solo, áreas cultivadas e pastagem. Mathias *et al.* (2018), por meio de ensaios de infiltração, da aplicação da função de Horton e do coeficiente de Pearson numa bacia em São Pedro (SP), identificaram, nos setores tecnogênicos, maior taxa de infiltração e alta concentração de areia fina, corroborado pelo coeficiente no valor de 0,94 e a presença de terraços que condicionam a infiltração e reduzem o fluxo superficial.

Os maiores valores de erosão se destacam pelas “linhas preferenciais, rotas ou caminhos” dados pelo SIMWE que registrou no Cenário 1 cerca de ~ 81.000 kg/m²s, seguido

pelo Cenário 2 com $\sim 22.000 \text{ kg/m}^2\text{s}$, pelo Cenário 3 com $\sim 17.000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e por fim o Cenário 4 com $\sim 11.500 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Tal redução dos valores pode estar associada a presença da tensão de cisalhamento para o Cenário 2 e valores nulos do coeficiente de Manning e dos demais parâmetros do módulo fluxo de sedimentos para os Cenários 3 e 4.

Pijl *et al.* (2020) e Pijl *et al.* (2021), utilizando o SIMWE e a RUSLE em uma área sob cultivo de uva no norte da Itália, detectaram linhas preferenciais de fluxos superficiais e de sedimentos. Resultados associados às danificações dos terraços e alterações na dinâmica hidrológica devido à presença de estradas e tipos de uso. Straffellini *et al.* (2022), a partir do emprego do SIMWE, assim como da amostragem de sedimentos, de registros de campo e simulação de eventos de chuvas, quantificaram o volume de sedimentos transportados pelo escoamento superficial e destacaram que a espacialização e a identificação das linhas preferenciais do fluxo erosivo possibilitaram, além da compreensão destes processos, a implementação do manejo do uso da terra para redução da erosão. Mathias *et al.* (2020) também descobriram rotas do fluxo superficial em áreas caracterizadas por ações antrópicas e presença de feições erosivas numa determinada bacia do interior do estado de São Paulo/SP. Os autores constataram a influência do terraço tecnogênico para a formação do percurso preferencial dos fluxos superficiais e a aceleração dos processos erosivos, por meio da carta de fluxo concentrado, da modelagem/ algoritmo *Multiple Flow*, da delimitação dos setores de dispersão e concentração de fluxos e do cálculo das células com tendência de concentração de fluxos.

O Cenário 1, que registrou o maior valor de erosão, $\sim 81.000 \text{ kg/m}^2\text{s}$, também apresentou a maior área associada à erosão (36%). Os resultados em questão podem estar relacionados à taxa máxima de infiltração (12 mm/h), ao excesso de precipitação (190 mm/h), ao coeficiente de Manning – 0,35n (típico de solo exposto ou solos arenosos) e ao dado nulo atribuído para a tensão cisalhante do solo. Mitasova *et al.* (1997) e Warren (1998) explicam que a maior força cisalhante dos fluxos hidrológicos permite um aumento da dimensão da erosão, pois a água com maior carga de sedimentos em suspensão tem menor potência para transportar sedimentos e força inferior para aumentar a magnitude das taxas de erosão. Em relação ao índice de PE (Figura 9) este cenário obteve valores em suas classes que variaram entre 8,50% e 17%. Resultados inferiores em relação aos demais cenários, situação que pode estar associada à menor suscetibilidade em ocorrer novas feições erosivas.

Carvalho (2019) identificou e validou ravinas por meio do SIMWE numa bacia com práticas agrícolas em Portugal. O estudo analisou um evento de grande magnitude e considerou a sobreposição das feições modeladas e as identificadas *in loco* e, concluiu que os valores positivos estão associados às feições erosivas registradas em campo. Koco (2011), em uma bacia na Eslováquia, identificou áreas com potencial de formação de ravinas com o auxílio do SIMWE. O autor quantificou o fluxo superficial, analisou a direção e o volume de água/tempo e considerou como parâmetros de entrada o MDE, o coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos e desprendimento, a taxa de excesso de precipitação, a taxa de infiltração, o coeficiente de Manning e a tensão de cisalhamento. Tal trabalho concluiu que os produtos de erosão e deposição demonstraram a formação e o desenvolvimento de ravinas semelhantes à realidade, além de representar a concentração de fluxo próximo ao fundo da bacia.

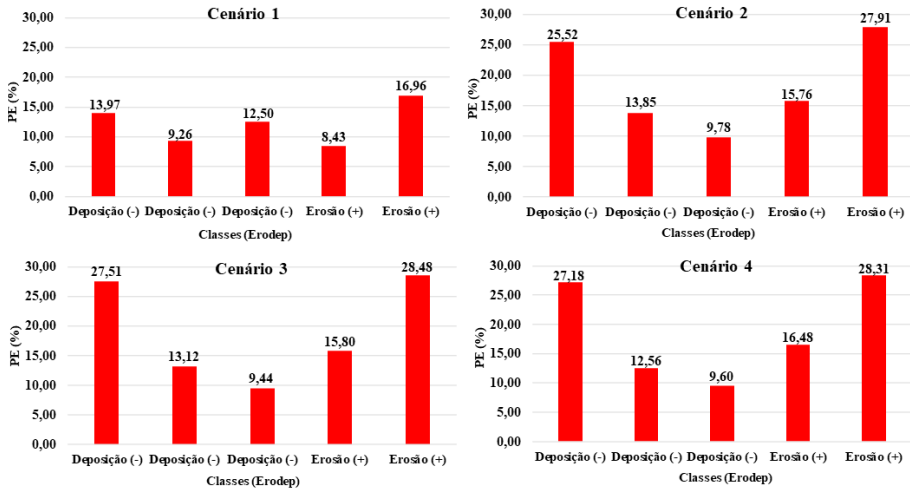


Figura 9 – Potencial de Erosão de acordo com as classes do balanço da erosão e deposição para os quatro cenários.

Daniel *et al.* (2021b), numa tentativa de análise do modelo SIMWE, simularam seis cenários de erosão/ deposição na bacia do Alto Espraiado, com valores distintos de intensidade pluviométrica, taxa de excesso de precipitação, taxa de infiltração, tensão de cisalhamento e coeficiente de Manning. Os produtos apontaram que a maior parte da área está associada à deposição (valores negativos), sendo que a erosão (valores positivos) está localizada nas margens das drenagens e curvaturas côncavas, justamente onde estão situadas as feições erosivas e também os maiores valores dos fluxos de sedimentos e hidrológicos superficiais. Ferreira *et al.* (2021) diagnosticaram precipitações erosivas a partir de experimentos, aliados ao emprego do WEPP (base do SIMWE), no sul de Minas Gerais/Brasil. Os resultados demonstram que 57,3% dos eventos monitorados foram classificados como erosivos, sobretudo as quatro maiores magnitudes, que totalizam 47,2% da erosividade anual.

O cenário 2 do presente estudo registrou PE maior que o Cenário 1, entre ~ 9,80% e ~ 28%, portanto, maior é a suscetibilidade à ocorrência de novas feições erosivas. Neste cenário, observou-se que ~ 77% da área da bacia está associada à deposição e ~ 23% à erosão (menor em todos os cenários). Este predomínio da deposição, provavelmente, está relacionado à tensão crítica do solo que era nulo no cenário anterior e para este cenário considerou 0,5pa, valor superior à tensão do fluxo de água. Tal situação provocou a redução do desprendimento do solo e a extensão espacial da erosão, facilitada pela redução dos valores do coeficiente da capacidade de desprendimento de 0,7 (s/m) para 0.001 (s/m) e do coeficiente da capacidade de transporte de sedimentos de 0,6 (s) para 0.001 (s). Fernandes *et al.* (2016) avaliaram a suscetibilidade erosiva através da aplicação do SIMWE e da relação com o inventário das formas erosivas e relataram que a menor coesão do terreno e a atuação do fluxo subsuperficial contribuirão para a expansão deposicional, mesmo com a presença de pequenas feições erosivas.

Os cenários 3 e 4 apresentaram situações semelhantes ao cenário 2 em relação a distribuição espacial das classes de erosão e deposição, assim como os valores de PE que oscilaram entre ~ 9,50% e 28,50%, embora ambos os cenários tenham registrado valores distintos de erosão. Tais observações podem estar relacionadas à influência do maior valor do coeficiente de Manning (0,79n) que representam condições de pastagens, como também os valores nulos para os parâmetros do módulo fluxo de sedimentos e a redução da taxa de infiltração (4 mm/h) e permeabilidade (0.00024 cm/s). Pijl *et al.* (2022) estudaram os impactos da Conservação do Solo e da Água (SWC) em cultivo de uva, com terraços e sem terraços, dados topográficos e o emprego do SIMWE e identificaram que o coeficiente de Manning (implantação do terraço) influenciou o fluxo e a distribuição homogênea do escoamento e de sedimentos.

A sobreposição das feições erosivas com os produtos possibilitou analisar a distribuição das feições erosivas mapeadas com as classes de erosão e deposição. Destaca-se que o cenário 1 obteve o melhor desempenho, pois cerca de ~ 40% das feições erosivas mapeadas estão localizadas nos setores com registros de valores positivos (erosão), os quais foram também indicados como suscetíveis pelo modelo SIMWE e ~ 60% estão nas classes que registraram valores negativos (deposição). Para os demais cenários que apresentaram maiores valores de PE observou-se que entre ~31% e ~35% das feições erosivas estão situadas nas classes erosivas e o restante nas classes deposicionais.

Com o trabalho de campo, verificou-se a ocorrência de processos erosivos nos setores modelados como deposicionais. Tal resultado pode estar relacionado com fatores não identificados pelo modelo, como por exemplo, a presença de canais intermitentes ou pela influência da dinâmica do uso do solo (Figura 10). Conforme apontam Daniel *et al.* (2021a), a área apresenta as seguintes classes de uso: pastagem, solo exposto, áreas submetidas a medidas conservacionistas (ex: reflorestamento e terraços), áreas em que são desenvolvidas atividades agrícolas (ex: cana de açúcar) e econômicas como a silvicultura, além da prática de terraplanagem destinado a implementação de loteamentos.

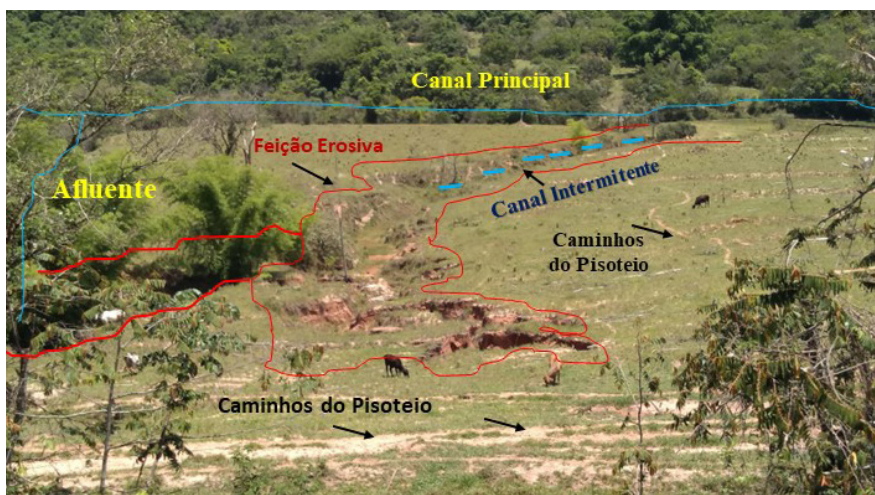


Figura 10 – Registro da prática de pastagem em área circundante da feição erosiva.

Fonte: Autores (2023).

Os trabalhos de Fernandes *et al.* (2015) e Fernandes *et al.* (2017) realizados com o emprego do SIWME também constataram a existência de processos erosivos em setores de deposição, pelo fato de que a bacia estudada possui intensas alterações da morfologia original decorrentes das atividades agrícolas (construção de patamares e terraços), ausência da vegetação, além de circunstâncias também não diagnosticadas pelo SIMWE e que possivelmente influenciaram os resultados.

Conclusões

Os quatro cenários simulados pelo SIMWE registraram a predominância dos processos de deposição, entre 64% e 77%, e a erosão entre 23% e 36%, portanto, a distribuição de sedimentos é maior que a perda de solo. A realização do trabalho de campo demonstrou que alguns fatores (ex: existência de canais intermitentes, dinâmica do uso do solo) não foram identificados pelo SIMWE e, que, provavelmente interferiram na identificação das áreas suscetíveis associadas aos processos erosivos.

Os parâmetros do módulo fluxo de sedimentos: tensão de cisalhamento, coeficiente de manning, coeficientes da capacidade de transporte de sedimentos e desprendimento apresentaram maior sensibilidade nos produtos balanço da erosão e deposição, visto que reduziram os valores das classes erosivas e da área associada à erosão.

As áreas suscetíveis (maiores valores positivos) que obtiveram registros de feições erosivas, estão localizadas em áreas circundantes das drenagens, setores côncavos, declividades entre 10 % e 40%, Neossolos Litólicos e Quartzarênicos, representadas pelo SIMWE por meio de “linhas preferenciais, rotas ou caminhos” dos fluxos superficiais. A validação a partir do PE demonstrou índices semelhantes (entre ~ 9,50% e ~28,50%) para os Cenários 2, 3 e 4 e maiores que o Cenário 1 entre ~8,50% e ~17,00%, o qual possui maiores valores das classes erosivas e menor suscetibilidade à ocorrência de novas feições erosivas, enquanto os demais cenários valores inferiores das classes erosivas e maior suscetibilidade a novas feições. Por fim, o modelo SIMWE mostrou capacidade significativa para identificar áreas erosivas e pode ser uma importante ferramenta para avaliação, diagnóstico e prognóstico de áreas suscetíveis em paisagens complexas.

Referências Bibliográficas

ABDO, H.; SALLOUM, J. Mapping the soil loss in Marqya basin: Syria using RUSLE model in GIS and RS techniques. *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 3, p. 1-10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6424-0>

AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, v. 64, n. 2-3, p. 247-271, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.008>

ALMEIDA, C. O. S. *Erosividade das chuvas no estado de Mato Grosso*. 2009. 83f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

_____; AMORIM, R. S. S.; ELTS, F. L. V. ; COUTOR, E. G.; JORDANI, S. A. Erosividade da chuva em municípios do Mato Grosso: distribuição sazonal e correlações com dados pluviométricos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 2, p. 142-152, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000200003>

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, v. 176, n. 1-4, p. 57-77, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02782-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02782-3)

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>

BRADY, N. C; WEIL, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 790 p.

BRAIMOH, A. K.; VLEK, P. L. G. Impact of land use on soil resources. In: BRAIMOH, A. K.; VLEK, P. L. G. (orgs.). *Land use and soil resources*, p. 1-8. Springer: Sweden, 2007.

CARVALHO, F. H. *Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro*. 2014. 154f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CARVALHO, J. P. D. S. *Modelação de ravinas pelo SIMWE e validação com recurso a MDE de elevada resolução. Região Demarcada do Douro, Quinta do Bonfim*. 2019. 50f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território) – Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Portugal, 2019.

CASSOL, E. A.; MARTINS, D.; ELTZ, F. L. F.; LIMA, V. S.; BUENO, A. C. Erosividade e padrões hidrológicos das chuvas de Ijuí (RS) no período de 1963 a 1993. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 15, n. 3, p. 220-231, 2007.

CHEN, Z. M.; WANG, B. Paths of soil erosion controlled by typical soil and water conservation practices based on the SIMWE model: A case study of the Tongshuang watershed. *The Journal of Applied Ecology*, v. 33, n. 3, p. 703-710, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202203.016>

CIIAGRO. Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. Balanço Hídrico Semanal do Município de São Pedro (SP). Período de 08/07/2002 a 31/10/2019. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Listagens/BH/LBalancoHidricoLocal.asp>. Acesso em: 14 Jan. 2023.

CONOSCENTI, C.; ANGILERI, S.; CAPPADONIA, C.; ROTIGLIANO, E.; AGNESI, V.; MARKER, M. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic re-

gression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, v. 204, p. 399-411, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021>

CONTI, J.B. Condições climáticas da região de águas de São Pedro (SP). *Caderno de Ciências da Terra*, Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, n. 11, 1971. 15p.

DANIEL, E.; VIEIRA, B. C. A evolução das feições erosivas na bacia do córrego Espreado, São Pedro (SP). *Boletim Goiano de Geografia* (online), v. 35, n. 2. p. 339-359, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v35i2.37435>

_____; _____. MARTIN, T. D. Implicações do uso do solo na ocorrência de feições erosivas em São Pedro (SP). *Derbyana*, n. 42, e751, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.14295/derb.v42.751>

_____; _____. Análise dos processos erosivos e deposicionais utilizando o modelo SIMWE (Simulated of Water Erosion). *Revista do Departamento de Geografia*, v. 41, e185794, p. 1-15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.185794>

DANTAS, J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. M.; VIANNA, C. G. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. *Geociências*, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.

DIAS FERREIRA, R. P. *Solos e morfogênese em São Pedro (SP)*. 1997. 157f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Departamento de Geografia, FFLCH, USP, São Paulo, 1997.

DYMOND, J. R.; VALE, S. S. An event-based model of soil erosion and sediment transport at the catchment scale. *Geomorphology*, v. 318, p. 240-249, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.06.019>

EBHUOMA, O.; GEBRESLASIE, M.; NGETAR, N. S.; PHINZI, K.; BHATTACHARJEE, S. Soil Erosion Vulnerability Mapping in Selected Rural Communities of uThukela Catchment, South Africa, Using the Analytic Hierarchy Process. *Earth Systems and Environment*, n. 6, p. 851-864, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00308-y>

EBLING, E. D.; REICHERT, J. M.; PELAEZ, J. J. Z.; RODRIGUES, M. F.; VALENTE, M. L.; CAVALCANTE, R. B. L.; REGGIANI, P.; SRINIVASAN, R. Event-based hydrology and sedimentation in paired watersheds under commercial eucalyptus and grasslands in the Brazilian Pampa biome. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 9, n. 2, p. 180-194, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.008>

FACINCANI, E. M. Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento das boçorocas da região de São Pedro/SP: proposta de reabilitação e aspectos jurídico-institucionais

correlatos. 1995. 124f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1995.

FERNANDES, J. F. C. *Modelação de processos erosivos no Alto Douro Vinhateiro: o caso de estudo da Quinta de S. Luiz*. 2014. 135f. Dissertação – Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Portugal, 2014.

_____; BATEIRA, C.; LAURA, S.; OLIVEIRA, A.; FARIA, A.; HERMENEGILDO, C.; TEIXEIRA, M.; MOURA, R.; GONÇALVES, J. Aplicação do modelo SIMWE na definição de áreas suscetíveis à erosão linear: estudo de caso na região demarcada do Douro (RDD). *VII Congresso Nacional de Geomorfologia*, p. 247-254, 2015.

_____; _____.; SOARES, L.; FARIA, A.; MOURA, R.; GONÇALVES, J. SIMWE model application on susceptibility analysis to linear erosion: a case study in Alto Douro wine region. *Geophysical Research Abstracts*, v. 18, EGU2016-12969, 2016.

_____; _____.; _____.; _____.; OLIVEIRA, A.; HERMENEGILDO, C.; MOURA, R.; GONÇALVES, J. *Catena*. SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. *Catena*, v. 153, p. 39-49, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.034>

FERREIRA, M. D. *Análise da evolução dos processos erosivos acelerados em áreas urbanas e das técnicas de controle e recuperação, córrego do Tucum, São Pedro (SP)*. 2004. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

_____. *Proposta de índice para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas*. 2008. 454f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Área de Concentração de Geotecnia, Universidade de São Paulo, 2008.

FERREIRA, A. M.; SILVA, A. M.; PASSOS, P. C.; VALENTINO, C. R.; GONÇALVES, F. A.; MENEZES, P. H. B. J. Estimativa da erosão hídrica do solo pelo modelo Water Erosion Prediction Project na Sub-Bacia do Córrego do Gigante, sul de Minas Gerais. *Eng Sanit Ambient*, v. 26, n. 3, p. 471-483, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1413-415220190216>

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. USDA – Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. *NSERL Report N° 10, National Soil Erosion Research Laboratory*, West Lafayette, Indiana, 1995.

_____.; GILLEY, J. E.; FRANTI, T. G. Water erosion prediction project (Wepp): development history, model capabilities, and future enhancements. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. v. 50, n. 5, p. 1603-1612, 2007.

FURQUIM, S. A. C. *Interações entre modelo e solo no transecto do Espreado – São Pedro/SP*. 2002. 183f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.8.2002.tde-01082005-105035>

GAO, J. Identification of topographic settings conducive to landsliding from dem in Nelson county, Virginia, U.S.A. *Earth Surface Process Landforms*, v. 18, p. 579-591, 1993.

GOMES, D. M. *Mapeamento Geotécnico para análise das feições erosivas concentradas na bacia do ribeirão do Meio, São Pedro (SP), na escala 1:20.000*. 2002. 268f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GRASS. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2. Open Source Geospatial Foundation*, 2017.

GROHMANN, C. H.; SMITH, M. J.; RICCOMINI, C. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 49, n. 4, p. 1200-1213, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2053546>

GUTIÉRREZ, A. G.; SCHNABEL, S.; CONTADOR, F. L. Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. *Land Degradation & Development*, v. 20, n. 5, p. 535-550, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.931>

HENGL, T. Finding the right pixel size. *Computers and Geosciences*, v. 32, n. 9, p. 1283-1298, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>

HUTCHINSON, M. F. *Calculation of hydrologically sound digital elevation models*. Paper Presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney, Austrália, p. 117-133, 1988.

KAWAKUBO, F. S.; OLIVEIRA, D.; MORATO, R. G. Contribuição da análise de superfície de tendência para caracterização morfológica de uma topossequência situada na região de São Pedro (SP). *Geografia*, v. 31, n. 3, p. 571-585, 2006.

KERTZMAN, F. F.; OLIVEIRA, A. M.; SALOMÃO, F. X.; GOUVEIRA, M. I. F. Mapa de erosão do estado de São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, n. 16 (Especial), 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/0100-929X.19950008>

KOCO, S. Simulation of gully erosion using the SIMWE model and GIS. *Landform Analysis*, v. 17, p. 81-86, 2011.

LEITE, A. P. P. *Aplicação de Metodologias para o cálculo de erosão (USLE E WEPP) em uma sub-bacia hidrográfica do rio Cobres*. 2009. 170f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica) – Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2009.

MACHADO, C. C.; GARCIA, A. R.; SILVA, E.; MACHADO, A. Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) modificado em relação a medições experimentais. *Revista Árvore*, v. 27, n. 3, p. 295-300, 2003.

MARK, D. M. Network Models in Geomorphology. In: ANDERSON, M. G. (org.). *Modeling Geomorphological Systems*. Nova York: John Wiley, 1988. p. 73-97.

MATHIAS, D. T.; LUPINACCI, C. M.; MORUZZI, R. B. Distribuição das taxas de infiltração em áreas afetadas por processos erosivos acelerados e recobertas por materiais antropogênicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 5, p. 923-931, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018167570>

_____; NUNES, J. O. R. A dinâmica geotecnogênica em áreas periurbanas: município de São Pedro (SP). *Geosul*, v. 34, n. 70, p. 484-498, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2019v34n70p484>

_____; LUPINACCI, C. M.; RODRIGUES NUNES, J. O. Identificação dos fluxos de escoamento superficial em área de relevo tecnogênico a partir do uso de modelos hidrológicos em SIG. *Sociedade e Natureza*, n. 32; p. 820-831, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-49431>

MELO, O. A. G.; SANTOS, M. I. O modelo hidrológico SWAT aplicada a análise da produção de sedimentos da bacia do rio Ivaí/PR. *Estudos Geográficos*, v. 18, p. 1-19, 2020.

MINGOTI, R. *Efeitos da espacialização da cobertura florestal e da profundidade dos solos na produção de água de uma bacia hidrográfica*. 2012. 171f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MITAS, L.; MITASOVA, H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water resources research*, v. 34, n. 3, p. 505-516, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/97WR03347>

MITASOVA, H.; MITAS, L.; BROWN, W. M.; JOHNSTON, D. GIS tools for erosion/deposition modeling and multidimensional visualization – Part V: Impact of transport capacity and terrain structures on erosion simulations. Illinois: Geographic Modeling and Systems Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign. 1997.

NETELER, M.; MITASOVA, H. *Open Source Gisa Grass Gis Approach*. Third Edition. The International Series in Engineering and Computer Science. Nova York: Springer, v. 773, 406p., 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13658816.2010.512275>

PEREIRA, J. S. *Avaliação das perdas de solos por erosão laminar na área de influência da UHE Amador Aguiar I*. 2014. 167f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geografia, Universidade de Uberlândia, 2014.

PIJL, A.; QUARELLA, E.; VOGEL, T. A.; D'AGOSTINO, V. ; TAROLLI, P. Remote sensing vs. field-based monitoring of agricultural terrace degradation. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.09.001>

_____; REUTER, L. E. H.; QUARELLA, E.; VOGEL, T. A.; TAROLLI, P. GIS-based soil erosion modelling under various steep-slope vineyard practices. *Catena*, v. 193, 104604, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104604>

PIJL, A.; WANG, W.; STRAFFELINI, E.; TAROLLI, P. Soil and water conservation in terraced and non-terraced cultivations: an extensive comparison of 50 vineyards. *Land Degrad Dev*, v. 33, p. 596-610, 2022. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/ldr.4170>

RODRIGUES, J. E. *Estudos dos fenômenos erosivos acelerados, boçorocas*. 1982. 162f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

SANCHEZ, M. C. Contribuição ao conhecimento das bases naturais dos municípios de São Pedro e Charqueada (SP). *Notícia Geomorfológica*, v. 11, p. 21-22, 1971.

SANTANA, N. M. P. ; CASTRO, S. S.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. Chuvas, erosividade, erodibilidade, uso do solo e suas relações com focos erosivos lineares na alta bacia do rio Araguaia. *Sociedade & Natureza*, v. 19, n. 2, p. 103-121, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1982-45132007000200007>

SANTORO, J. *Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro (SP): estudo da fenomenologia, com ênfase geotécnica*. 1991. 140f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Análise Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1991.

_____; FULFARO, V. J. Estudos Geotécnicos em Boçoroca na Cidade de São Pedro, São Paulo (SP). *Revista Instituto Geológico*, v. 17, n. 1/2, p. 55-62, 1996. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19960003>

SANTOS, I. *Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do rio Pequeno, São José dos Pinhais (PR)*. 2001. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, 2001.

SANTOS, G. G.; NORI, P. G.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas a erosão hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícolas e Ambiental*, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.

SCHANZ, S. A.; MONTGOMERY, D. R. Lithologic controls on valley width and strath terrace formation. *Geomorphology*, v. 258, p. 58-68, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.015>

SILVA, L. C. F. *Fotointerpretação de redes de drenagem de dois solos do município de São Pedro (SP)*. 1977. 114f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1977.

SILVA, A. M. *Aplicações de técnicas de geoprocessamento no estudo das relações entre os processos erosivos e sedimentológicos de bacia hidrográfica*. 1999. 269f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

_____. *Modelagem hidrológica e das perdas de solo: suas relações com as formas de relevo e uso do solo na bacia do rio Taperoá/PB*. 2015. 103f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

SILVA, R. K.; RIBEIRO, G. N.; FRANCISCO, P. R. N.; MEDEIRO, P. C.; SILVA, A. M.; ROCHA, L. C. A. Mapeamento e análise da erosividade da chuva na sub-bacia do Alto Paraíba (Paraíba). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 10, n. 2, p. 13-25, 2022.

STRAFFELINI, E.; PIJL, A.; OTTO, S.; MARCHESINI, E.; PITACCO, A.; TAROLLI, P. A high-resolution physical modelling approach to assess runoff and soil erosion in vineyards under different soil managements. *Soil and Tillage Research*, v. 222, 105418, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105418>

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, v. 5, p. 81-100, 1991. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/hyp.3360050107>

TERRA FOTO, S. A. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Economia e Planejamento, Plano Cartográfico do Estado de São Paulo. Carta Topográfica, Escala 1:10.000, São Pedro I (SF-23-Y-A-IV-1-NO-B), 1979.

TORRI, D. Slope, aspect and surface storage. In: AGASSI, M. (org.). *Soil erosion, conservation e rehabilitation*. Israel: Ministry of Agriculture Emek-Hefer. Cap. 5, p. 77-106, 1996.

VARELLA, R. F.; CAMPANA, N. Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TopModel. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5.; n. 4; p. 121-139, 2000.

Evandro Daniel, Bianca Carvalho Vieira, Tiago D. Martins, Carlos Valdir de Menezes Bateira e José Eduardo Bonini

WARREN, S. D. Digital Terrain Modeling and Distributed Soil Erosion Simulation/ Measurement for Minimizing Environmental Impacts of Military Training. *US Army Corps of Engineers – Construction Engineering Research Laboratories*, 48, 1998.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington, DC: USDA (Agriculture handbook, 537), 1978.

YAMANOUTH, G. R. B. *Avaliação dos processos erosivos e das técnicas de controle e reabilitação – bacia do córrego do Espraiado – São Pedro (SP)*. 2003. 177f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2016.tde-11042016-161906>

Recebido em: 28/04/2023. Aceito em: 12/09/2023.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, através do Projeto 870227/1997 e do Processo 167550/2017-9, pela bolsa de estudo, o Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo (USP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). À Prefeitura de São Pedro (SP), aos proprietários rurais do município e a Dra. Joana Filipa Costa Fernandes. Também expressam seus agradecimentos aos Editores e Revisores da *Revista Espaço Aberto* pelas críticas e sugestões.