

MORFOMETRIA DO RELEVO E A SUA RELAÇÃO COM A OCORRÊNCIA DE FEIÇÕES EROSIVAS LINEARES EM SETOR DE CUESTA

Relief morphometry and the relationship with the occurrence of linear erosion features in the sectors of the cuesta

Higor Lourenzoni Bonzanini

Doutorando no Programa de Pós-graduação em Geografia na Universidade Estadual Paulista -UNESP, Brasil

higor.bonzanini@unesp.br

Cenira Maria Lupinacci

Professora Titular no Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental na Universidade Estadual Paulista -UNESP, Brasil

cenira.lupinacci@unesp.br

Estêvão Botura Stefanuto

Pesquisador de Pós-Doutorado no Departamento de Geografia da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Brasil

ebs@unicamp.br

Recebido: 25/06/2025

Aceito: 26/01/2026

Resumo

O relevo de *Cuestas* pode favorecer a ocorrência de processos erosivos. Os mapas morfométricos constituem uma ferramenta que auxilia na compreensão da dinâmica de feições erosivas lineares ao apontar os terrenos mais frágeis naturalmente. Diante disso, o objetivo deste artigo é analisar a ocorrência de feições erosivas lineares em relação à morfometria do relevo em área cuestiforme, localizada no centro do estado de São Paulo. Para isso, foram elaboradas cartas de declividade, de dissecação e de energia do relevo. Para a obtenção das feições erosivas lineares, foram realizados mapeamentos das feições em três cenários (1988, 2010 e 2022), a fim de analisar sua ocorrência em momentos históricos distintos. Após a realização da correlação de Pearson, constatou-se que a declividade apresenta fraca correlação com as formas erosivas, visto que, em áreas de altas declividades, como a estudada, não há condições pedológicas suficientes para o desenvolvimento dessas formas. As ravinas apresentam maior correlação com a dissecação vertical, pois se posicionam nas altas vertentes, diferentemente dos sulcos, que apresentam maior correlação com a dissecação horizontal, que demarca extensas vertentes, cujo escoamento potencializa essa feição. Por fim, há um aumento nos índices de correlação entre a energia do relevo e as feições lineares de maior magnitude.

Palavras-chave: Mapeamento morfométrico, Energia do Relevo, Correlação de Pearson.

Abstract

Cuesta relief can enhance the occurrence of erosive processes. Morphometric mapping constitutes an important analytical tool for understanding the dynamics of linear erosive

features, as it enables the identification of areas with greater natural fragility. In this context, this study aims to analyse the occurrence of linear erosive features in relation to relief morphometry in a cuesta landform area located in the central region of the state of São Paulo (Brazil). To achieve this, slope, dissection, and relief energy maps were produced. To identify linear erosive features, mappings were conducted for three years (1988, 2010, and 2022) to analyse their occurrence at distinct historical moments. After computing the Pearson correlation coefficient, it was found that slope shows a weak correlation with erosive forms, since areas with steep slopes, such as the one studied, do not allow sufficient pedological development to create such features. Ravines show a stronger correlation with vertical dissection, as they are located on steep slopes. Rills exhibit a greater correlation with horizontal dissection, which marks extensive slopes where surface runoff intensifies this feature. Lastly, the correlation indices associated with relief energy increase according to the magnitude of the linear erosive features.

Keywords: Morphometric mapping, relief energy, Pearson correlation.

1. INTRODUÇÃO

Conforme aponta o relatório da FAO – Food and Agriculture Organization (FAO, 2021), o Brasil apresenta grandes problemas frente a degradação dos solos em áreas agricultáveis, ligados a falta de conhecimento técnico e de investimentos adequados na gestão de áreas agrícolas, o que potencializa a geração de processos erosivos e a diminuição da fertilidade do solo. Não obstante, ao redor do mundo, a FAO aponta que 34% dos solos em área agricultável se encontram degradados, com o continente sul-americano contendo 153 milhões de hectares extremamente degradados.

Frente a este contexto, compreende-se que a ação antrópica, a partir do uso das áreas agrícolas sem respeitar os limites naturais, merece atenção. A remoção da cobertura vegetal para as atividades agropastoris, é fator determinante para acelerar os processos erosivos (Chuma *et al.*, 2021; Descroix *et al.*, 2008; FAO, 2015; Gashaw *et al.*, 2020; Internacional Soil Reference and Information Centre, 1992; Zhao *et al.*, 2022). Barreiro-Lostres *et al.* (2017) ratificam tal afirmação, demonstrando que os períodos de sedimentação mais significativa na Cordilheira Ibérica ($26\text{--}483\text{ T km ano}^{-1}$), remontam os séculos XV-XVI e XVIII-XIX, sendo resultado de grandes mudanças no uso da terra e processos de desmatamento. Ainda neste sentido, Descroix *et al.*, (2008), ao fazer uma revisão global da relação entre erosão e uso da terra, constatou que locais com atividades agropecuárias, em especial de pastagens, apresentam as maiores ocorrências de feições erosivas, principalmente quando associadas a uma declividade acentuada.

Desta forma, verifica-se que a análise da interação entre atividades antrópicas e dinâmicas erosivas é amplamente estudada. No entanto, entende-se como relevante o

conhecimento das características físicas dos terrenos, a fim de também evitar processos erosivos (Guerra; Marçal, 2006). De acordo, com Xiong e Leng (2024) ao realizarem uma projeção global sobre os processos de degradação ambiental até 2090, há uma propensão ao aumento de processos erosivos ao longo do globo, em especial para os países em desenvolvimento, como o Brasil, sendo que para desacelerar esse processo, os autores destacam a necessidade de maiores investimentos e estudos que identifiquem áreas vulneráveis, visando preservar terrenos naturalmente fragilizados (Xiong; Leng, 2024).

Nesse contexto, reconhece-se a análise morfométrica do relevo como uma importante ferramenta de análise, que fornece as características geométricas dos terrenos, destacando potenciais fragilidades naturais. Nesse sentido, trabalhos como de Zacharias *et al.* (2005), de Gomes *et al.*, (2016) e de Passarella, Ladeira e Liesenberg (2015), evidenciam a importância da morfometria para compreender as relações espaciais que levam a ocorrência de feições erosivas.

Zacharias *et al.* (2005), em seu estudo na região de Rio Claro (SP), destaca a importância da morfometria do relevo, constituindo-se em uma importante ferramenta para a interpretação da paisagem geomorfológica, sendo esta fundamental para a compreensão das dinâmicas naturais e da relação humana com a natureza. Medeiros *et al.*, (2017), ao estudarem a morfometria do relevo e de sua influência na geração de processos erosivos, destacaram que há grande influência da declividade no potencial erosivo. Já Zanatta *et al.* (2019) aponta vertentes côncavas com declividade de 15 ÷ 47% e ≥47% como de maior potencial para o desenvolvimento de voçorocas, enquanto ravinas podem também ocorrer em declives mais suaves (≤2% e 2÷5%) e em área de alta vertente. Destaca-se também o comprimento da rampa como fator que confere uma maior energia potencial à erosão ao dinamizar o escoamento superficial, levando à desagregação e ao transporte de materiais (Guerra; Mendonça 2004; Bertoni; Lombardi Neto, 2008; Nunes; Castro, 2023). Ainda, aponta-se a energia do relevo como variável cujo estudo pode contribuir com o planejamento do uso da terra em áreas rurais, evitando ou mitigando a degradação do solo (Leite; Rosa, 2012; Medeiros *et al.*, 2017; Rodrigues; Leite, 2021).

Portanto, a morfometria do relevo é variável importante para o desencadeamento de processos erosivos, sendo mais relevante em determinadas condições de relevo. Assim, a área de estudo compreende um setor típico do compartimento geomorfológico das Cuestas Arenito-Basálticas da porção central do estado de São Paulo. Neste contexto,

nota-se que a grande declividade, inerente a natureza desta feição de relevo, pode potencializar a ocorrência de processos erosivos, ao atribuir energia ao sistema, conforme apontam Stefanuto *et al.*, (2022) e Nunes; Castro, (2023), principalmente em áreas antropizadas. Ainda, o Mapa de Erosão do Estado de São Paulo (Kertzman *et al.*, 1995), aponta que as áreas do estado com a ocorrência do relevo cuestiforme se encontram nas categorias de “áreas extremamente suscetíveis a ravinas e voçorocas” ou em “áreas muito suscetíveis a ravinas e voçorocas”, evidenciando a fragilidade natural do relevo nestas regiões.

Desta maneira, o objetivo deste artigo é avaliar a morfometria do relevo de Cuesta e sua interação com os processos erosivos que geram feições erosivas lineares.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Localizada no interior do estado de São Paulo, a área de estudo se posiciona nos municípios de Itirapina e Corumbataí, abarcando parte da rodovia SP-310. Caracteriza-se como uma área de nascentes, por estar localizada na alta bacia do Rio Cabeça (Figura 1).

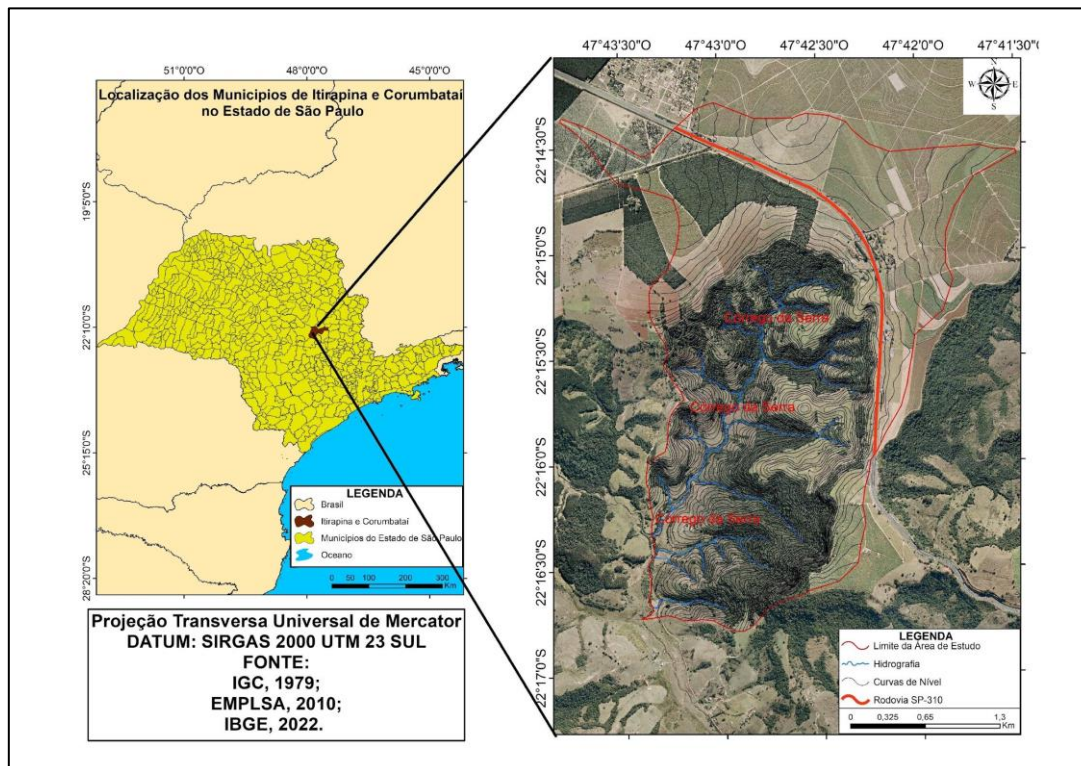


Figura 1 - Localização da alta bacia do Rio Cabeça (SP).

Fonte: Autores.

A classificação do relevo do estado de São Paulo desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1981), caracteriza a área de estudo como de contato entre as Cuestas Arenítico-Basálticas e a Depressão Periférica Paulista, zona do Médio Tietê (IPT, 1981). No que se refere ao arcabouço geológico, a área de estudo se insere na Bacia Sedimentar do Paraná, caracterizada pela presença das formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral (Perinotto; Lino, 2010).

Quanto aos solos, de acordo com o mapeamento de Koffler *et al.* (1992), são encontradas cinco classes, a saber: Latossolos Vermelho-Amarelos da Unidade Coqueiro, Nitossolos Vermelhos, Latossolos Vermelhos unidade Ribeirão Preto, Neossolos Litólicos Eutróficos e Argissolos Vermelho-Amarelos da unidade Serrinha (Koffler *et al.*, 1992).

A região está inserida, conforme classificação climática de Monteiro (1973), sob a influência dominante de massas equatoriais e tropicais, se caracterizando como clima tropical, com períodos úmidos no verão e primavera e com período seco entre as estações de inverno e outono. A temperatura média anual gira em torno de 20,9°C, e a pluviosidade média anual em torno de 1.638mm. O mês de janeiro se caracteriza como o de maior pluviosidade, com médias de 300mm, enquanto o mês de julho, com uma média de 32mm, se constitui como o mês de menor pluviosidade (Clima-Data, 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo proposto, foram elaboradas as cartas de declividade, dissecação vertical, dissecação horizontal e de energia do relevo, que contemplam a análise morfométrica, além do mapeamento das feições erosivas lineares. Os mapeamentos foram elaborados no *software* ArcGis em escala de 1:10.000, utilizando-se como base cartográfica (curvas de nível e hidrografia) os mapeamentos topográficos realizados pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do estado de São Paulo – IGC (1979), disponíveis de forma online e gratuita pela plataforma DATAGEO. Por fim, para auxiliar na discussão dos dados, as variáveis elencadas foram submetidas a análise por meio do Coeficiente de Correlação de Pearson.

3.1. Carta de declividade

Importante ferramenta de análise dos terrenos, a carta de declividade mostra a inclinação destes, o que evidencia os setores de maior fragilidade, permitindo identificar

as áreas com maior potencialidade ao desenvolvimento dos processos erosivos (De Biasi, 1992).

O mapeamento da declividade foi realizado de forma automática no *software* ArcGis, por meio da ferramenta *Slope – 3D Analyst tool*, utilizando as curvas de nível extraídas dos mapeamentos topográficos realizados pelo IGC (1979). As classes de declividade foram estabelecidas a partir da obra de De Biasi (1970), considerando ainda as características dos terrenos da área de estudo, a saber: <2%, 3 -I 5%, 6% -I 12%, 13% -I 30%, 31% -I 47% e >47%.

3.2. Dissecação Vertical

Permitindo a identificação das áreas com maior potencial ao risco e ocorrência de processos gravitacionais, a carta de dissecação vertical expõe a diferença altimétrica entre o fundo de vale e aos divisores de cada sub-bacia, levando em consideração os valores das curvas de nível, destacando assim os setores com maior grau de entalhamento dos vales (Cunha, 2001; Gomes *et al.*, 2016; Zanatta, 2018).

Desta maneira, para a elaboração desta carta foi utilizado como base a proposta original de Spiridonov (1981), sendo adaptada para o meio digital, conforme orientações de Ferreira et al (2015). Foram definidas 6 classes de dissecação vertical, conforme os apontamentos de Spiridonov (1981), através da equidistância entre as curvas de nível, a saber: ≤10m, 10-20m, 20-30m, 30-40m, 40-50m e ≥50m.

3.3. Dissecação horizontal

Da mesma maneira que a carta de dissecação vertical, a carta de dissecação horizontal foi elaborada com base na proposta metodológica desenvolvida por Spiridonov (1981), que foi adaptada ao meio digital, conforme orientações de Ferreira et al (2014). A carta de dissecação horizontal possui grande importância para a identificação de localidades com concentração de cursos d'água e de nascentes, ao medir a distância em linha reta entre a linha de cumeada e o fundo de vale de cada sub-bacia, indicando setores com maior potencial natural a atuação da dinâmica erosiva fluvial (Bonzanini; Lupinacci; Stefanuto, 2022).

As classes foram elaboradas conforme a proposta de Spiridonov (1981), iniciando-se do mínimo mapeável de acordo com a escala (1mm = 10 metros) e dobrando-se os

valores para cada classe seguinte, a saber: $\leq 10\text{m}$, 11-20m, 21-40m, 41-80m, 81-160m, 161-320m e $>321\text{m}$.

3.4. Carta de energia do relevo

A carta de energia do relevo destaca os setores com maior potencialidade ao desenvolvimento de processos denudativos e de ocorrência de movimentos de massa (Cunha; Machado, 2012). Para a elaboração desta carta foi utilizada como base a proposta original desenvolvida por Mendes (1993), e a adaptação para o *software* ArcGis desenvolvida por Zanatta e Ferreira (2015). Assim, para a elaboração da carta, utiliza-se como base as três cartas morfométricas: declividade, dissecação vertical e de dissecação horizontal.

Desta forma, utilizando a linguagem de programação em *Python* no *software* ArcGis, as três cartas foram unidas, gerando a energia do relevo (Mendes, 1993; Zanatta; Ferreira, 2015). As diferentes classes de cada uma das cartas são avaliadas e combinadas, gerando classes de energia do relevo (Quadro 1).

Quadro 1: Combinação de classes para o estabelecimento da energia do relevo.

CLASSES DE ENERGIA DO RELEVO	DECLIVIDADE (%)	COMBINAÇÃO	DISSECAÇÃO HORIZONTAL (M)	COMBINAÇÃO	DISSECAÇÃO VERTICAL
Muito forte	$\geq 47\%$	Ou	$\leq 10\text{ m}$	-	-
Forte	31 – 47%	Ou	11 – 20m	Ou	$\geq 50\text{ m}$
Medianamente forte	13 – 30%	Ou	21 – 40m	Ou	40 – 50m
Média	6 – 12%	Ou	41 – 80m 81 – 160m	Ou Ou	30 – 40m 20 – 30m
Fraca	3 – 5%	Ou	161 – 320m	Ou	10 – 20m
Muito Fraca	$\leq 2\%$	Ou	$\geq 321\text{ m}$	Ou	$\leq 10\text{ m}$

Fonte: Autores.

Para a combinação de cada classe, foram consideradas as características geomorfológicas da área de estudo, seguindo a proposta de Mendes (1993) e de Bonzanini, Lupinacci e Stefanuto (2022), a saber:

- Muito fraca: Contempla os setores de menor declividade, com as menores classes de dissecação vertical e horizontal;

- Fraca: Demarca as localidades com pouco declive, baixa dissecação vertical e horizontal;

- Média: Destaca os terrenos com intensidades intermediárias de dissecação vertical e dissecação horizontal;
- Medianamente Forte: Indica áreas com declividade limite para a mecanização da agricultura, com potencial de intensificação dos processos morfogenéticos, pela intensificação da declividade, dissecação vertical e dissecação horizontal.
- Forte: Localidades de declividade elevada, com a dissecação vertical em sua classe mais alta e de dissecação horizontal em sua penúltima classe de intensidade. Ainda, constitui-se em setores além do limite para a mecanização agrícola.
- Muito Forte: Constitui-se em setores além do limite de declive para o loteamento urbano. Possui declividades muito intensas, com mais de 47% de inclinação do terreno, encontradas principalmente no *front* cuneiforme ou em áreas com a dissecação horizontal em sua classe mais elevada, próximas as confluências de rios da bacia.

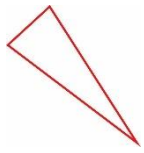
3.5. Mapeamento de feições erosivas lineares

Para a realização dos mapeamentos das feições erosivas lineares, foi usado como base as propostas de Tricart (1965) e de Verstappen e Zuidam (1975). Desta maneira, foram mapeados os sulcos erosivos, as ravinas e as voçorocas, em três cenários diferentes (1988, 2010 e 2022).

Para isso, a partir da fotointerpretação de imagens orbitais e fotografias aéreas (Base S.A., 1988; EMPLASA, 2010; Google Earth, 2022), as simbologias utilizadas para cada feição foram criadas e traçadas no *software* ArcGis, seguindo a proposta original de Tricart (1965) e de Verstappen e Zuidam (1975), conforme pode ser observado pelo quadro 2.

Quadro 2: Simbologias para o mapeamento das feições erosivas lineares.

ELEMENTO/FORMA	SÍMBOLO	FONTE	CHAVE DE IDENTIFICAÇÃO (2022)
Sulco		Verstappen e Zuidam (1975)	

Ravina		Tricart (1965)	
Voçoroca		Tricart (1965)	

Fonte: Autores.

3.6. Tratamento dos dados: Feições erosivas lineares por classe morfométrica

Aos sulcos erosivos, que foram mapeados através de *shapefile* em formato de linha, foi adicionado um buffer de 5 cm de entorno, obtendo-se assim a área desta forma. O buffer no entorno dos sulcos erosivos com 5 cm se justifica pela escala de mapeamento realizada, uma vez que em escala de 1:10.000, não seria possível a delimitação das áreas reais ocupadas por um sulco erosivo. Já as ravinas e voçorocas, foram mapeadas como polígono, considerando o limite da forma erosiva destacado pelos taludes. Após esses procedimentos, através da ferramenta *Clip*, os polígonos das classes de dissecação vertical e horizontal, de declividade e de energia do relevo foram recortadas a partir da área das formas erosivas. O procedimento foi realizado para cada cenário mapeado (1988, 2010 e 2022), visando obter a área que cada feição erosiva ocupa em cada classe morfométrica.

Posteriormente, os dados de área ocupada por cada feição erosiva linear por classe de morfometria foi submetida ao Coeficiente de Correlação de Pearson (Zanatta, 2018), disponibilizado pela ferramenta CORREL do Microsoft Excel. Cada variável morfométrica (Matriz 1) foi correlacionada individualmente com a área ocupada (m²) por sulcos erosivos e ravinas (Matriz 2) com a extensão dos taludes erosivos das voçorocas (em metros- Matriz 2), conforme a Tabela 1. Essa correlação varia de -1,0 a +1,0, sendo que valores positivos indicam uma relação linear direta, isto é, quando uma variável aumenta a outra também aumenta, enquanto valores negativos apontam uma relação linear inversamente proporcional, ou seja, quando uma variável aumenta a outra diminui.

Tabela 1: Matriz empregada para obtenção da correlação de Pearson.

Matriz 1					Matriz 2				
Dissecação vertical					Energia do Relevo				
Classes	Número Classe DV	Sulco	Ravina	Voçoroca	Classes	Número Classe ER	Sulco	Ravina	Voçoroca
Até 10m	1,00	27,00	0,00	859,00	Muito fraca	1,00	14,00	0,00	0,00
10-20m	2,00	74,00	7,00	1244,00	Fraca	2,00	84,00	1,00	0,00
20-30m	3,00	58,00	14,00	601,00	Média	3,00	71,00	2,00	80,00
30-40m	4,00	60,00	12,00	358,00	Medianamente forte	4,00	105,00	17,00	502,00
40-50m	5,00	55,00	14,00	172,00	Forte	5,00	252,00	50,00	1707,00
Maior que 50m	6,00	326,00	40,00	280,00	Muito forte	6,00	74,00	17,00	1221,60
Dissecação horizontal					Declividade				
Classes	Número Classe DH	Sulco	Ravina	Voçoroca	Classes	Número Classe DC	Sulco	Ravina	Voçoroca
Até 10m	1,00	0,00	0,00	0,00	(até 2%)	1,00	16,00	0,00	0,00
11-20m	2,00	0,00	0,00	0,00	(2 – 5%)	2,50	83,00	2,00	0,00
21 -40m	4,00	5,00	0,00	14,00	(5 – 10%)	5,00	66,00	3,00	97,00
41-80m	8,00	24,00	1,00	160,00	(10 – 15%)	7,50	62,00	16,00	490,00
81-160m	16,00	95,00	9,00	1443,90	15 – 30%	15,00	306,00	47,00	1622,50
161-320m	32,00	201,00	41,00	1175,70	30 – 47%	23,50	55,00	14,00	959,00
Maior que 321m	64,00	275,00	35,00	717,00	Maior que 47%	50,00	12,00	4,00	339,50

Legenda: DV – Dissecação Vertical; DH – Dissecação Horizontal; ER – Energia do Relevo; e DC – Declividade. **Fonte:** Autores.

4. RESULTADOS

A carta de declividade (Figura 3A) destaca o *front*, demarcado por classes de declividade variando entre 15% e mais de 47%. O compartimento do reverso, no setor norte da área, possui declividades amenas, com predominância de classes de até 5%, com alguns setores chegando ao máximo de 10% de inclinação. Para a área total da bacia, destacam-se as classes 15-30% de declividade, ocupando 28,7% da bacia; a classe 2-5%, ocupando 26,7%; e a classe 30-47% de declividade, ocupando 15,3% da área total da bacia.

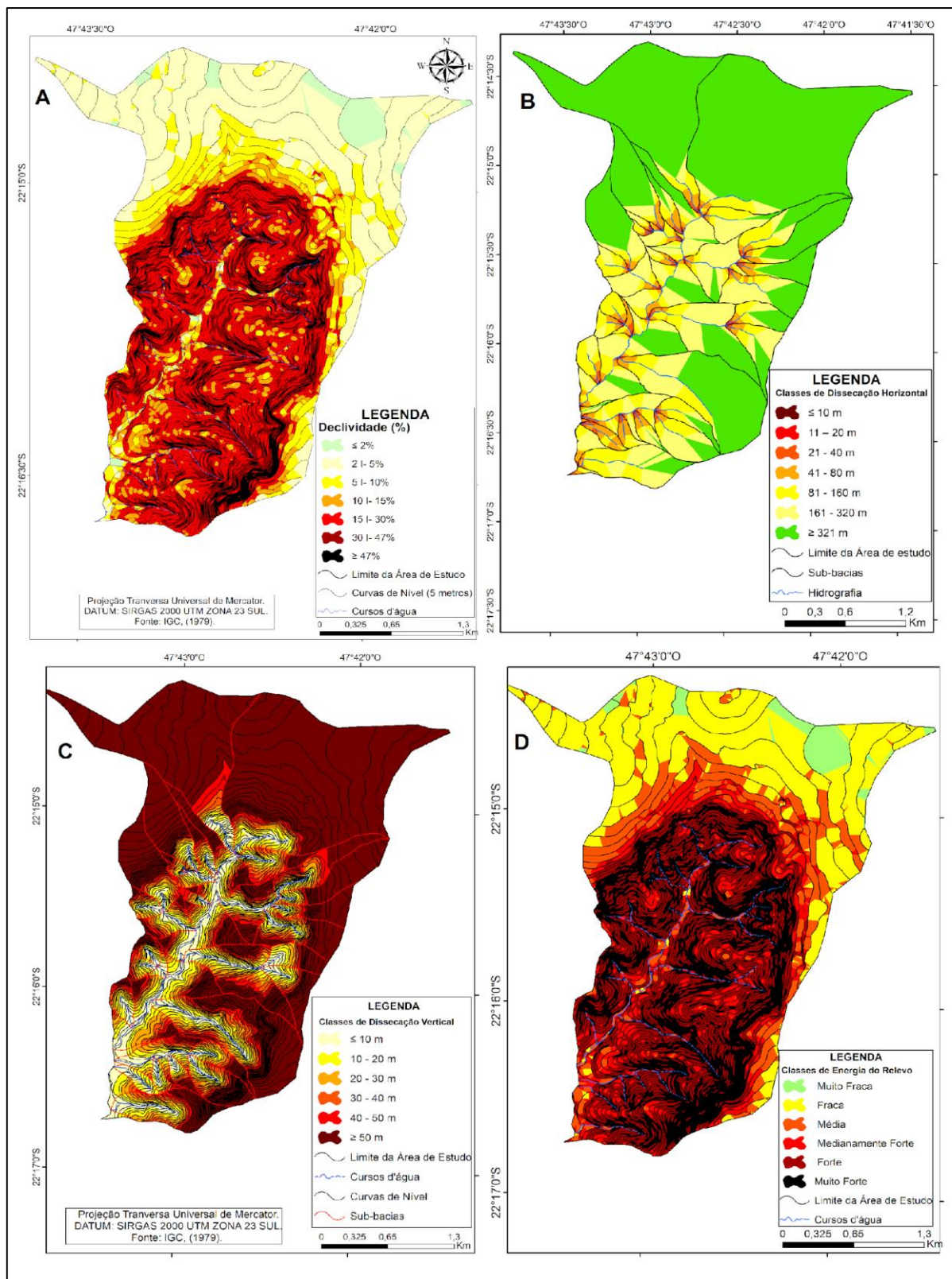


Figura 3 - Em A: Carta de declividade; em B: Carta de dissecação horizontal; em C: Carta de dissecação vertical; em D: Carta de energia do relevo.

Fonte: Autores.

A dissecação horizontal (Figuras 3B) destaca a frequência dos cursos fluviais, apontando os setores a jusante destes, principalmente nas áreas de confluência. Indica também porções significativas das sub-bacias com interflúvios extensos, os quais

caracterizam o reverso cuestiforme. Já a dissecação vertical (Figura 3C) evidencia a presença de inúmeros cursos fluviais que possuem suas nascentes próximas ao *front* do relevo cuestiforme, indicando que grande parte das sub-bacias apresentam em seu alto curso classes de dissecação superiores a 50 metros, dado que comprova dinâmica de dissecação intensa.

Em relação a energia do relevo (Figura 3D), ocorre o predomínio de classes de média energia nos setores de fundos de vale. Já nas áreas de reverso, predominam as classes de menor intensidade de energia do relevo. Com isso, as classes que ocupam maior área na bacia são as de energia fraca (26%), forte (31%) e muito forte (19,2%).

Já sobre as feições erosivas lineares (Figuras 4, 5 e 6), constatou-se uma diminuição de ravinas e de voçoroca, com um crescimento de sulcos erosivos entre os cenários de 1988 e de 2022. Foram mapeados em 1988, 157 sulcos erosivos, 43 ravinas e 26.193m² de área de voçorocamento. Já para o cenário de 2010, foram mapeados 248 sulcos, 24 ravinas e 2.431m² de voçoroca, enquanto para 2022 foram mapeados 195 sulcos, 19 ravinas e 6.752m² de voçoroca.

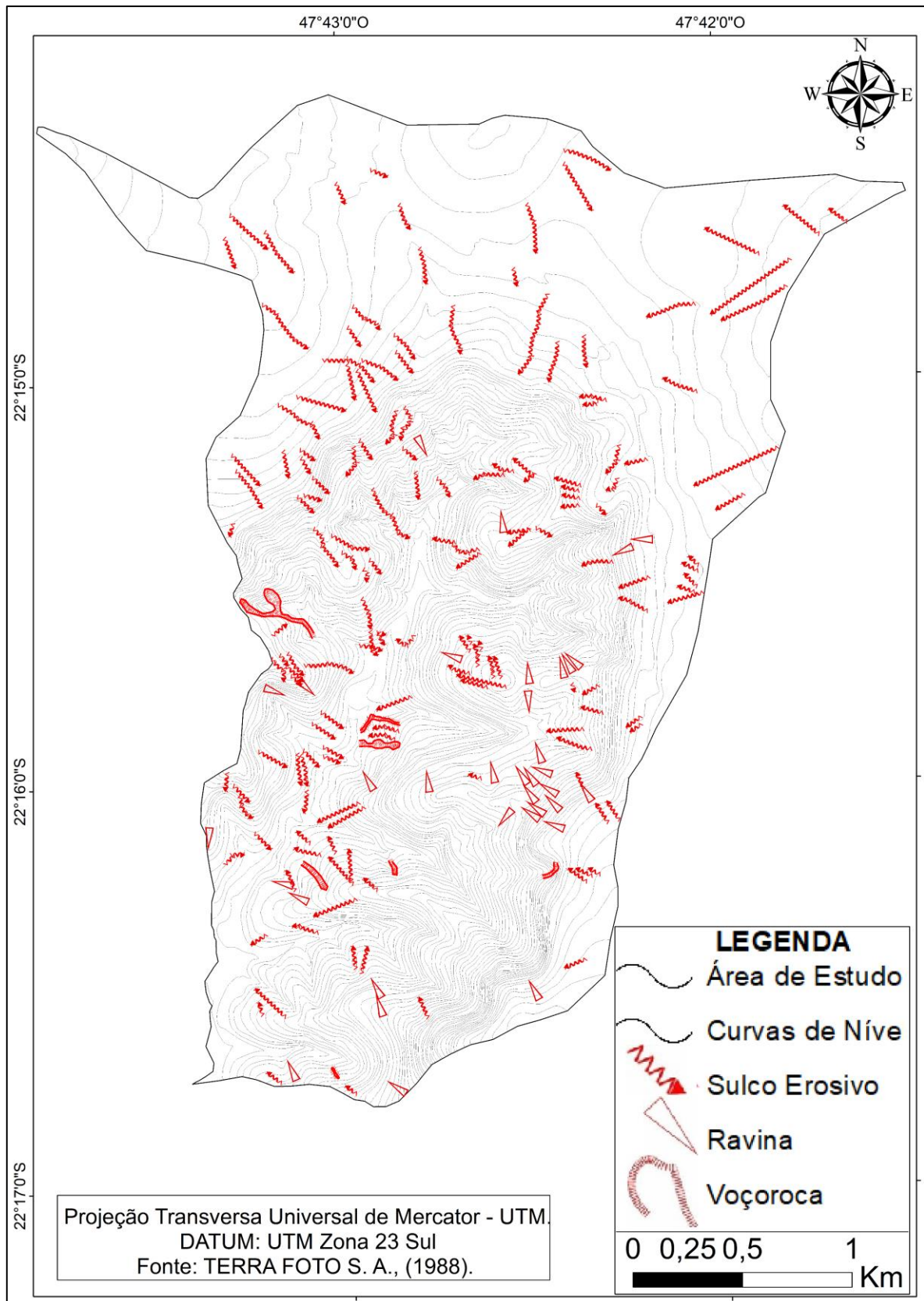


Figura 4 – Mapeamento de feições erosivas lineares no cenário de 1988.

Fonte: Autores.

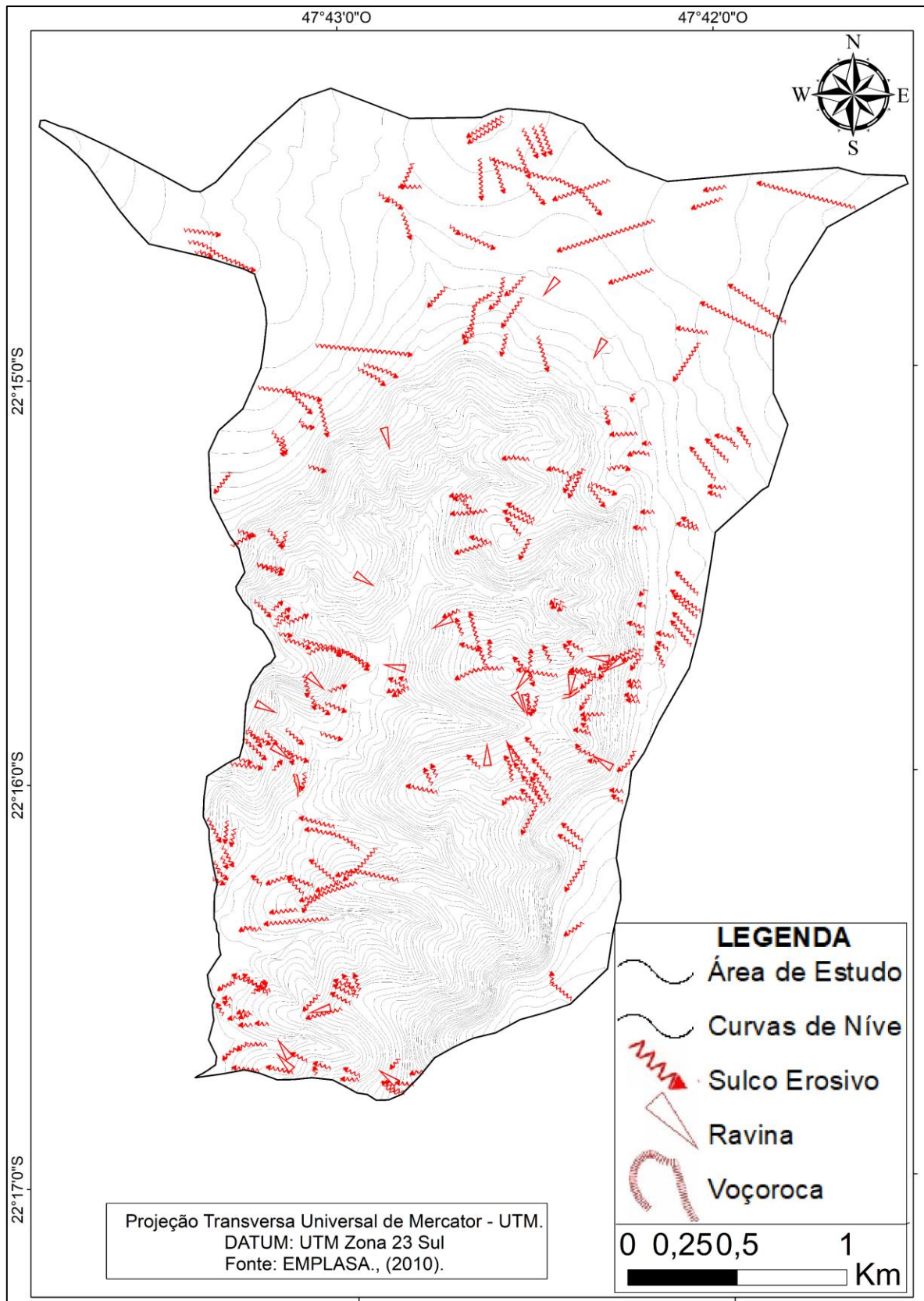


Figura 5 – Mapeamento de feições erosivas lineares no cenário de 2010.

Fonte: Autores.

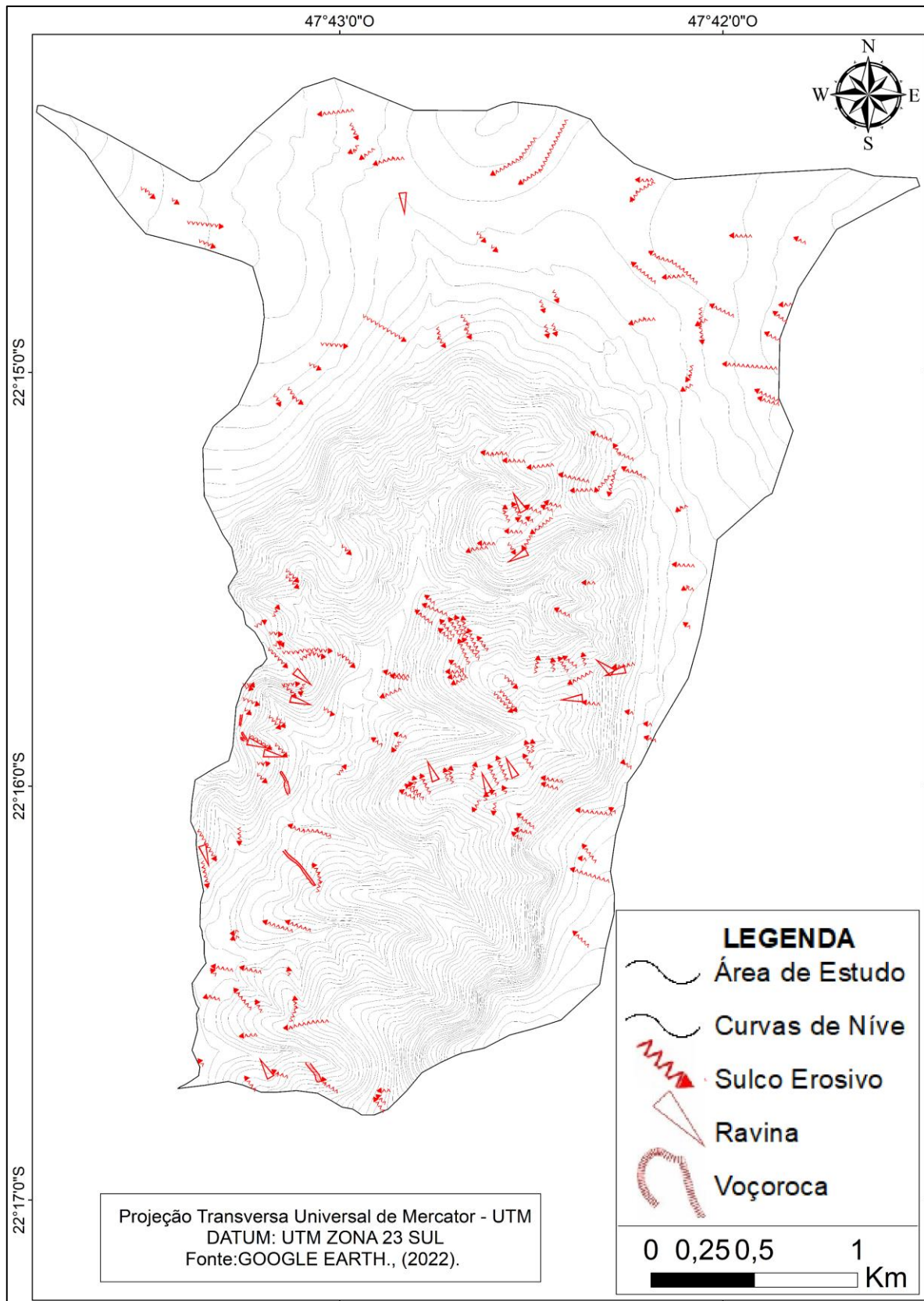


Figura 6 – Mapeamento de feições erosivas lineares no cenário de 2022.

Fonte: Autores.

Por fim, a partir da correlação entre as feições erosivas lineares e os dados morfométricos (Quadro 3), verificou-se relevância estatística acima de 0,5 na maioria das interações. A dissecação vertical foi a única variável a apresentar dados proporcionais e inversamente proporcionais. Os proporcionais foram representados pelas correlações positivas dos sulcos erosivos (0,689) e das ravinas (0,861), e os inversamente proporcionais pela correlação com as voçorocas (-0,836). Já a dissecação horizontal apresentou amplitude nos dados de correlação, variando de moderada (0,526 – voçoroca) a extremamente forte (0,972 – sulcos erosivos), sendo tal variação acompanhada pelo aumento da correlação a partir da redução da magnitude da feição erosiva linear. A declividade foi a única variável morfométrica a apresentar aleatoriedade nos dados do ponto de vista estatístico, representada por correlações fracas. Por fim, a energia do relevo, assim como a dissecação horizontal, evidenciou amplitude nos dados de correlação (de 0,557 a 0,862); verificou-se que a energia do relevo forte e muito forte contribui para ocorrência de voçorocas.

Quadro 3: Correlação das feições erosivas lineares com a morfometria do relevo.

FEIÇÃO EROSIVA/VARIÁVEL	DISSECAÇÃO VERTICAL	DISSECAÇÃO HORIZONTAL	DECLIVIDADE	ENERGIA DO RELEVO
Sulco erosivo	0,689	0,972	-0,139	0,557
Ravina	0,861	0,868	0,052	0,692
Voçoroca	-0,836	0,526	0,250	0,862
LEGENDA				
Correlação POSITIVA ou NEGATIVA	Frac	Moderada	Forte	Extremamente forte
		Moderada	Forte	Extremamente forte

Fonte: Elaborado pelos autores.

5. DISCUSSÃO

Analisar a ocorrência de feições erosivas lineares por meio da morfometria do relevo é uma ferramenta primordial para o planejamento ambiental (Passarella; Ladeira; Liesenberg, 2015; Medeiros *et al.*, 2017). A análise se faz ainda mais necessária em localidades com a presença de relevos escarpados e com intenso uso da terra, como o

caso da região das Cuestas Basálticas no interior do estado de São Paulo (Xiong; Leng, 2024; Camara; Calderalli, 2016).

Os setores de Cuesta apresentam significativa dissecação vertical devido a capacidade de entalhamento de rios que agem sob elevada energia gravitacional (Bonzanini; Lupinacci; Stefanuto, 2022). Estes são classificados como anaclinais, e atuam a partir de erosão remontante de cabeceira, dinâmica importante para a evolução do relevo de Cuesta e que pode desencadear anfiteatros de erosão, os quais, em etapas iniciais e a partir da respectiva escala de análise empregada (1:10.000), são demarcados por taludes erosivos de voçorocas (Penteado, 1978). Com isso, a forte dinâmica inversamente proporcional entre as voçorocas e a dissecação vertical (Quadro 3) se justifica, pois, setores de Cuesta sob influência de clima quente e úmido, apresentam cursos d'água e feições de grande magnitude que se coadunam na evolução da paisagem. Tal dado corrobora, em partes, com os apontamentos de Bonzanini, Lupinacci e Stefanuto (2022), os quais identificaram feições erosivas lineares mais proeminentes nos setores de baixa vertente da Cuesta de Botucatu (SP), fato também verificado por Chaplot *et al.* (2005), que identificaram feições erosivas lineares em setores de transição de média para baixa vertente em relevo declivoso no norte do Laos.

Já as ravinas e os sulcos erosivos apresentam correlação positiva com a variável dissecação vertical, fato que indica oposição à dinâmica registrada em relação às voçorocas, uma vez que as classes de maior dissecação se encontram em zonas de alta vertente. Tais setores são marcados pelo uso da terra agrícola, fato que corrobora com trabalhos que apontam tais práticas como relevantes para ocorrência e evolução de sulcos erosivos e ravinas (Stefanuto; Lupinacci, 2017; Fushimi; Nunes, 2019; Stefanuto; Lupinacci, 2023).

Já a significativa correlação positiva entre a dissecação horizontal e as feições erosivas lineares é esperada. As vertentes extensas registradas pela Carta de Dissecação Horizontal (Figura 3) apresentam condições para adição de volume ao fluxo superficial, fato que é associado pela bibliografia à dinamização de processos de vertente como a feições erosivas lineares (Mathias, 2016; Stefanuto; Lupinacci, 2020). Em contraponto, algumas pesquisas realizadas em setores de relevo menos movimentado, apontam significativa ocorrência de feições erosivas (voçorocas) em zonas com dissecação horizontal inferior a 40 m (Thomazini, 2018), fato que se contrapõe os dados aqui apresentados. No entanto, destaca-se que devido ao *front* cuestiforme, algumas vertentes localizadas no alto curso apresentam ruptura topográfica em sua extensão, fato que pode

dinamizar o potencial erosivo do fluxo superficial mencionado (Stefanuto *et al.* 2022), algo que será reforçado e discutido mais adiante a partir dos dados de energia do relevo.

A correlação nula identificada entre a declividade e as feições erosivas lineares pode ser explicada pela maior parte das classes de declividade elevadas estarem localizadas em áreas com cobertura arbórea, ou seja, inviabilizando o mapeamento destas feições a partir de fotointerpretação. Pela Figura 7, observa-se que a ocorrência de vegetação de porte florestal nas áreas de maior declive, próximas ao front cuestiforme, é predominante, justificando a baixa identificação destas feições na localidade. Ainda, além de apresentar a vegetação florestal bem preservada, em alguns casos podem ocorrer rochas expostas, com ausência de material pedológico devido à alta declividade, ou solos incipientes, como os Neossolos Litólicos (Oliveira; Prado, 1986), o que dificulta a formação deste tipo de feição.

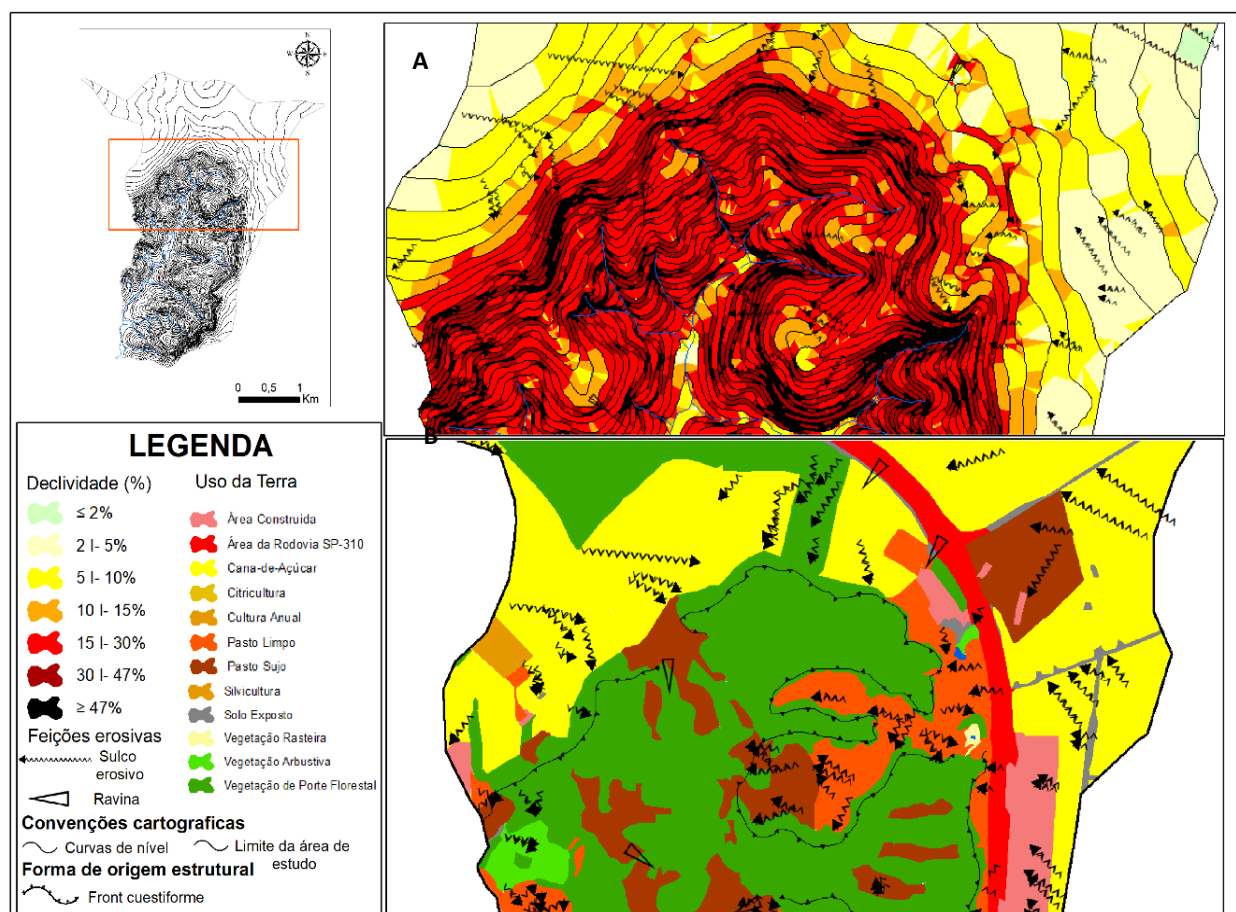


Figura 7 - Em A: Feições erosivas lineares sob a declividade do terreno. Em B: Feições erosivas sob o mapeamento de uso da terra (2010).

Fonte: Autores.

Em relação a energia do relevo, a correlação com as feições erosivas revela que quanto maior a magnitude da feição erosiva, maior será a correlação com a energia do

relevo. A mesma relação foi observada por Medeiros *et al.*, (2017), que observaram que há relação entre a intensidade da energia do relevo com a propensão à geração de feições erosivas.

De forma geral para a energia do relevo, em ambiente de cuesta, a ocorrência das feições erosivas lineares nas classes intermediárias vai de encontro com as características naturais da área de estudo, tendo em vista que as áreas de maior declividade não apresentam desenvolvimento pedológico ou estão recobertas por vegetação arbórea. Assim, a correlação encontrada para as feições erosivas lineares e a energia do relevo corresponde ao que se espera como resultado desta interação. Conforme apontam Bonzanini, Lupinacci e Stefanuto (2022) e Chaplot *et al.*, 2005, as áreas de maior energia não estão necessariamente onde ocorrem a maioria das feições erosivas, visto que estas áreas podem trabalhar como dissipadoras de energia ao longo das bacias e das vertentes, criando uma relação de vizinhança. Isso é verificado neste trabalho, uma vez que as áreas de maior energia do relevo, presentes no *front* cuestiforme (Figura 3D), atuam como dissipadoras de energia, criando uma concentração de feições erosivas lineares em áreas de baixa e média vertente, incluindo áreas de patamares estruturais mais baixas que o *front*. Ainda, é justamente nestas localidades que ocorre o uso da terra mais intenso, devido a declividade mais amena, criando condições ideais para a ocorrência das feições erosivas lineares (Bonzanini; Lupinacci, 2024).

Nesse sentido, Zhao, *et al.*, (2023) e Zhang *et al.*, (2023), a partir da análise histórica do uso da terra e de sua relação com as feições erosivas, em área de relevo declivoso na China, destacam as áreas de pastagens e de cultivo agrícola como as de maiores propensões a geração de feições erosivas lineares. Também Paganotto *et al.* (2023), destacam a expansão de culturas agrícolas temporárias em zonas de elevada energia do relevo como fator que pode acarretar a degradação dos solos, impulsionada pela ausência de métodos conservacionistas de cultivo, e que, indica a necessidade de medidas que visem a geoconservação destes ambientes. Assim, a área de estudo deste artigo possui padrões de uso da terra inadequados frente a realidade da morfometria local, se tratando de um problema frequentemente relatado a nível global e que merece atenção para promover o uso adequado das terras.

6. CONCLUSÃO

A dissecação vertical aponta que setores de *Cuesta* sob influência de clima quente e úmido, apresentam cursos d'água e feições de grande magnitude que se coadunam na

evolução da paisagem, fato que se expressa por anfiteatros de erosão, os quais, em etapas iniciais e a partir da respectiva escala de análise empregada (1:10.000), são demarcados por taludes erosivos de voçorocas. Já as ravinas e os sulcos erosivos apresentam correlação positiva com a variável dissecação vertical, fato que indica oposição à dinâmica registrada em relação às voçorocas e que pode estar associado ao uso agrícola significativo registrado nas zonas de alta vertente. Já a dissecação horizontal destaca-se pela indicação de vertentes extensas, as quais criam condições para intenso escoamento superficial, validada por correlações positivas significativas entre as variáveis morfométricas e as feições erosivas lineares. Ainda sobre a dissecação horizontal, vale ressaltar a possível influência do *front* da Cuesta, uma vez que o mesmo pode agregar energia aos fluxos superficiais mencionados. Por fim, a declividade foi a variável morfométrica com menor relevância estatística, fato justificado pelos setores com elevada declividade apresentarem pedogênese demarcada por solos rasos e recobertos por vegetação arbórea, que não propiciam condições para o aprofundamento das feições erosivas lineares.

Por fim, sobre a energia do relevo, produto síntese das demais variáveis morfométricas, analisa-se a correlação com as feições erosivas como esperada, uma vez a linearidade numérica entre os tipos de feições e a respectiva variável revela que quanto maior a magnitude da feição erosiva, maior será a correlação com a energia do relevo. Tal dado ratifica o entendimento de que as variáveis morfométricas do terreno têm influência mais significativa em voçorocas, e que sulcos erosivos e ravinas podem receber interferência de outras variáveis, como o uso e ocupação da terra.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo financiamento da bolsa de mestrado que tornou possível a realização deste trabalho e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo financiamento do projeto 2024/07876-3.

REFERÊNCIAS

BARREIRO-LOSTRES, F.; MORENO, A.; GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P.; GIRALT, S.; NADAL-ROMERO, E.; VALERO-GARCÉS, B. Erosion in Mediterranean mountain landscapes during the last millennium: a quantitative approach based on lake sediment sequences (Iberian Range, Spain). **Catena**, v. 149, p. 782–798, 2017.

BONZANINI, H. L. **O uso adequado das terras em área de relevo cuestiforme na alta bacia do Rio Cabeça (SP)**. 2024. 178 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2024.

BONZANINI, H.L.; LUPINACCI, C. M.; STEFANUTO, E. B. A Erosão Linear e Sua Relação com a Morfometria do Relevo na Alta Bacia do Rio Capivara – Botucatu (SP). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 15, n. 4, p.1947-1964, 2022.

CHAPLOT, V., CAODOU LE BROZEC, E., SILVERA, N.; VALENTIN, C. Spatial and temporal assessment of linear erosion in catchments under sloping lands of Northern Laos. **Catena**, n. 63, p. 167-184, 2005.

CHUMA, G. B.; MONDO, J. M.; NDEKO, A. B.; MAGAMAARHAHAMA, Y.; BAGULA, E. M.; BLAISE, M.; VALÉRIE, M.; JACQUES, K.; KARUME, K.; MUSHAGALUSA, G. N. Forest cover affects gully expansion at the tropical watershed scale: Case study of Luzinzi in Easter DR. Congo. **Forest and people**, n. 4, p. 100083, 2021.

CLIMATE-DATA. **Clima Itirapina**. 2023. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/itirapina-34775/>. Acesso em: 12 mar. 2023.

CUNHA, C. M. L. **A cartografia do relevo no contexto da gestão ambiental**. 2001. 128 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

DE BIASI, M. Cartas de declividade: confecção e utilização. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 2,1970.

DE BIASI, M. A carta clinográfica: Os métodos de representação e sua confecção. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 6, p. 45-60, 1992.

DESCROIX, L.; BARRIOS, J. L. G.; VIRAMONTES, D.; POULENARD, J.; ANAYA, E.; ESTEVES, M.; ESTRADA, J. Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: Their respective roles and the scale effect. **Catena**, n. 72, p. 325-339, 2008.

EMPLASA - EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. **Ortofotos do Estado de São Paulo 2010/2011**. São Paulo: EMLASA, 2010/2011. Escala: 1:25.000.

FERREIRA, M. V., TINÓS, T. M., PINTON, L. G., CUNHA, C. M. L. da. A Dissecação Horizontal como Parâmetro Morfométrico para Avaliação do Relevo: proposta de técnica digital automática. **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 15, n. 4, p. 585-600, 2014.

FERREIRA, M. V.; TINÓS, T. M.; PINTON, L. G.; LUPINACCI, C. M. A cartografia da dissecação vertical para avaliação do relevo: proposta de técnica automática. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 6, n. 67, p.1231-1245, 2015.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIATION OF THE UNITED NATIOS. **Status of the Word's Soil Resources**. Roma: FAO, 2015.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIATION OF THE UNITED NATIOS. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 – Systems at breaking point**. Roma: FAO, 2021.

FUSHIMI, M.; NUNES, J. O. R. Fragilidade ambiental dos solos à erosão linear em setores de pastagem: estudo de caso em parte dos municípios de Presidente Prudente, Marabá Paulista e Presidente Epitácio, região extremo oeste do estado de São Paulo. **Terra Livre**, v. 1, n. 52, p. 662-694, 2019.

GASHAW, T.; WORQLUL, W. A.; DILE, Y. T.; ADDISU, S.; BANTIDER, A.; ZELEKE, G. Evaluating potential impacts of land management practices on soil erosion in the Gilgel Abay watershed upper Blue Nile basin. **Heliyon**, v. 6, n. 8, p. 1-13, 2020.

GOMES, W. M.; MIGUEL, A. E. S.; PINTO, A. L. Análise da dissecação horizontal e vertical da bacia hidrográfica do córrego Moeda, Três Lagoas/MS. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 03, p. 112-123, 2016.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia ambiental**. Rio de Janeiro: Brertand Brasil, 2006. 192p.

ISRIC - INTERNACIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE. **Bi-annual report 1991/1992**. Wageningen, 1992.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha municipal**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774>. Acesso em: 10 set. 2024.

IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapeamento sistemático do estado de São Paulo**. São Paulo: IGC, 1979. Escala 1:10.000.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo, IPT, 1981.

KERTZMAN, F.F.; OLIVEIRA, A. M. S.; SALOMÃO, F. X.; GOUVEIA, M. I. F. Mapa da erosão do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. esp. 1, p. 31-36, 1995.

KOFFLER, N. F.; *et. al.* **Solos da bacia do Rio Corumbataí**. Rio Claro: Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1992.

LEITE, E. F.; ROSA, R. Mapeamento Geomorfológico: A carta de Energia do Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Formiga - TO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 268-284, 2012.

MATHIAS, D. T. **Contribuição Metodológica para o Diagnóstico da Dinâmica Erosiva Linear e seu Prognóstico Evolutivo visando subsidiar Projetos de Recuperação**. 2016. 178 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016.

MEDEIROS, R. B.; PINTO, A. L.; SÃO MIGUEL, A. E.; GOMES, W. M. Morfometria do relevo da bacia hidrográfica do córrego moeda, Três Lagoas/MS. **Revista formação (online)**, v. 1, n. 24, p. 204-223, 2017.

MENDES, I. A. **A dinâmica erosiva do escoamento pluvial na bacia do Córrego Lafon – Araçatuba – SP**. 1993. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

NUNES, E. D.; CASTRO, S. S. de. Análise multiescalar aplicada à avaliação de erosão hídrica linear para área tropical subúmida situada na região Sudoeste do estado de Goiás – Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. esp. 1, p. 1-25, 2023.

MONTEIRO, C. A. F. **A dinâmica climática e as chuvas no estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de atlas**. USP, São Paulo, 1973. 130p.

OLIVEIRA, J. B. de; PRADO, H. do. **Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de São Carlos – II Memorial Descritivo**. Boletim Técnico n.º 98. Campinas: Instituto Agrônomo, 1984.

PAGANOTTO, V. D.; ALVES, E. A. C.; TRENTIN, G.; SIMON, A. L. H. Dinâmica dos usos da terra em áreas de elevada energia do relevo: subsídios à geoconservação da cachoeira do Arco-íris (RS-BRASIL). **Caminhos de Geografia**, v. 24, n. 92, p. 23-43, 2023.

PASSARELLA, S.; LADEIRA, F. S. B.; LIESENBERG, V. Morfometria da bacia do rio São João, MG: Uma proposta de entendimento dos limites e da dinâmica das superfícies erosivas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.17, n. 2, p. 241-252, 2016.

PENTEADO, M. M. **Fundamentos de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 1978. 175p.
PERINOTTO, J. A.; LINO, I. C. Mapa Geológico da Bacia do Rio Corumbataí. In: GARCIA, G.J.; ANTONELLO, S. L.; MAGALHÃES, M. G. M. **Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. Rio Claro, Centro de Análise e Planejamento Ambiental, IGCE, UNESP, 2010.

RODRIGUES, L. P.; LEITE, E. F. Análise da Energia do Relevo e do Uso e Cobertura da Terra na Bacia Hidrográfica do córrego Acôgo, MS. **Terr@Plural**, v. 15, p.1-25, 2021.

SPIRIDONOV, A. I. **Principios de la Metodologia de las investigaciones de Campo y el Mapeo Geomorfológico**. Havana: Universidad Habana, 1981. 650p.

STEFANUTO, E.B.; LUPINACCI, C. M. Análise da Dinâmica Erosiva Presente no Setor Cuestiforme de Analândia (SP). In: XII ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM GEOGRAFIA, 12., 2017, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ENANPEGE, 2017. p. 11625-11636.

STEFANUTO, E.B.; LUPINACCI, C. M. Análise dos fluxos superficiais em relevo de Cuesta e sua interação com feições erosivas lineares. **Revista de Geografia (RECIFE)**, v. 37, p. 363, 2020.

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M.; CARVALHO, F.; FRANCOS, M.; UBEDA, X. An evaluation of erosion in cuesta relief: São Paulo State, Brazil. **Geomorphology**, v. 398, 2022.

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M. Análise da dinâmica do talude erosivo de um sistema em voçorocamento: causas e processos. **Raega**, v. 58, p. 118-141, 2023.

THOMAZINI, L. S. **Proposta metodológica de orientação à expansão urbana sob o viés geomorfológico: o caso da bacia do córrego Pau D'alto, Bauru (SP)**. 2018. 158 f. Tese (Doutorado em Geografia) –Estadual Paulista, Rio Claro, 2018.

TRICART, J. **Principes et méthodes de lageomorphologie**. Paris: Masson ET C éditeurs; 1965.

VERSTAPPEN, F. A. S.; ZUIDAN, R. A. V. **ITC System of geomorphological survey**. Enschede: International Institute for Aerial Surveyland Earth Sciences; 1975.

ZHANG, S.; GUO, M.; LIU, X.; CHEN, Z.; ZHANG, X.; XU, J.; HAN, X. Historical Evolution of gully erosion and its response to land use change during 1968-2108 in the Mollisol region of Northeast China. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 12, n. 6, p. 1-15, 2023.

ZHAO, J.; WANG, Z.; DONG, Y.; YANG, Z.; GOVERS, G. How soil erosion and runoff are related to land use topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China. **Science of the Total Enviroment**, v. 802, p. 149665, 2022.

ZHAO, W.; CHENG, Y.; JIAN, J.; JIAO, J.; CHENG, C.; LI, J.; CHEN, T. Water erosion changes on the Qinghai-Tibet Plateau and its response to climate variability and human activities during 1982-2015. **Catena**, v. 229, p. 1-14, 2023.

ZACHARIAS, A. A., FREITAS, M. I. C.; SANCHEZ, M. C. O uso da cartografia digital na elaboração de cartas morfométricas do relevo: Uma proposta metodológica. **Geografia**, v. 30, p. 37-57, 2005.

ZANATTA, F. A. S.; LUPINACCI, C. M.; BOIN, M. N. Dinâmica erosiva linear: estudo de caso em área rural no oeste paulista. **Geografia**, v. 44, p. 273–294, 2019.

Recebido: 25/06/2025

Aceito: 26/01/2026