

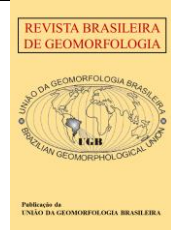


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, n° 2 (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i2.2320>



Artigo de Pesquisa

Morfometria e evolução de feições erosivas de grandes dimensões no Noroeste do Paraná

Morphometry and evolution of large erosive features in Northwest Paraná

Marianne Oliveira ¹, Leonardo José Cordeiro Santos ² José Guilherme Oliveira ³

- ¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geografia, Curitiba, Brasil. E-mail. marianne.oliveira@outlook.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9173-9104>
- ² Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geografia, Curitiba, Brasil. E-mail. santos.ufpr@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1165-6382>
- ³ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geografia, Curitiba, Brasil. E-mail. joseguilhermegeo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7504-2913>

Recebido: 22/11/2022; Aceito: 09/03/2022; Publicado: 06/06/2023

Resumo: A região noroeste do estado do Paraná apresenta feições erosivas de grande dimensão, relacionadas principalmente ao uso e ocupação atual do solo, entretanto, existem outras feições, com características distintas das atuais, associadas as condições climáticas presentes no Quaternário. Utilizando índices morfométricos (elevação, declividade, amplitude altimétrica e *Chi*) e evidências de campo buscou-se desenvolver um modelo de evolução espacial dessas feições erosivas localizadas sobre um divisor hidrográfico, situado entre as bacias do Ivaí e Paranapanema. Para isto foi necessário extrair a morfometria das feições, avaliar a estabilidade dos divisores por algoritmos aplicados a modelos digitais de elevação e caracterizar a rede de drenagem. Para responder aos objetivos utilizou-se os seguintes métodos e técnicas: aquisição de imagens de campo com RPA; caracterização da rede de drenagem por algoritmos matemáticos e desenvolvimento de um modelo evolutivo. Foram definidos quatro estágios de evolução para as feições; partindo da configuração atual da paisagem, passando pelos processos de ajuste fluvial a partir de capturas chegando ao estágio final, que seria a coalescência de todas as feições e formação de um agrupamento maior distinto do relevo da região.

Palavras-chave: feições erosivas; *Chi*; métricas de *Gilbert*; evolução do relevo.

Abstract: The northwest region of the State of Paraná is affected by large erosion features resulting from current soil use and occupation. However, these features also exhibit characteristics that suggest a relation to Quaternary climatic conditions. This study aims to develop a spatial evolution model for these erosion features located on a watershed between the Ivaí and Paranapanema basins using morphometric indices and field evidence. The study involves the extraction of morphometry, evaluation of divider stability, and characterization of the drainage network using mathematical algorithms. The methods used include field image acquisition with RPA, mathematical algorithms for drainage network characterization, and the development of an evolutionary model. The features are divided into four stages of evolution, beginning with the current landscape configuration, followed by the fluvial adjustment process by piracy, and culminating in the coalescence of all features into a distinct landscape. This study provides insight into the complex evolution of erosion features in the region, highlighting the importance of considering historical climatic conditions and natural processes in understanding current landscape configurations.

Keywords: erosive features; *Chi*; Gilbert metrics; landscape evolution.

1. Introdução

O estudo da gênese e evolução de processos erosivos lineares, sobretudo as ravinas e voçorocas, tem lugar de destaque nas pesquisas geomorfológicas nacional e internacional

O noroeste do estado do Paraná apesar de apresentar relevo com baixa declividade e dissecação (SANTOS et al. 2006), é conhecido pela presença de processos erosivos de grande magnitude, resultado principalmente do processo de ocupação empregado na região que não levou em consideração a existência de solos altamente suscetíveis a erosão hídrica (CASTRO; HERNANI, 2015).

Essas erosões deixam cicatrizes na paisagem e dependendo da escala podem ser visíveis em fotografias aéreas e imagens de radar. Quando se estabilizam, é comum o desenvolvimento no seu interior de vegetação, que ao longo do tempo pode recobrir toda a área da feição, tal como observado por Goulart e Santos (2014).

Bigarella e Mazuchowski (1985), relataram a existência de feições erosivas pontualmente na região noroeste do Paraná, com características e gênese que contrastam àquelas relacionadas ao uso e ocupação do solo atual. Foram interpretadas por esses autores como feições com gênese associada a condições climáticas distintas das atuais e com formação ocorrida durante o Quaternário.

Essa hipótese levantada pelos autores supracitados pode ser reforçada ao se observar as fotos obtidas a partir do primeiro levantamento aerofotogramétrico realizado para o estado do Paraná na década de 1950. Nessas fotos é possível identificar formas erosivas aparentemente estabilizadas e ainda recobertas com a vegetação natural característica da região, em contraste com o desmatamento no entorno das feições, o que indica a possibilidade dessas erosões terem surgido antes do processo de uso e ocupação da região, iniciado na década de 1950.

Após a publicação do trabalho de Bigarella e Mazuchowski (1985), várias pesquisas foram realizadas na região visando compreender as relações solo-relevo (por exemplo, NAKASHIMA, 1999; COUTO, 2015; FUMIYA *et al.*, 2016 e FUMIYA, 2017), entretanto, pouco se evoluiu sobre o estudo da gênese dessas feições de grande magnitude.

Goulart, Oliveira e Santos (2018), a partir da aplicação do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR), observaram que essas feições contrastam com as características morfológicas regionais. Segundo os autores, essas feições podem ser classificadas como anômalas ao relevo circundante, principalmente no que se refere a sua gênese.

Na região noroeste do Paraná, as várias feições encontradas se concentram entre as bacias hidrográficas do rio Ivaí e do rio Paranapanema. No que se refere a sua distribuição espacial, algumas encontram-se dispersas enquanto outras estão agrupadas. As feições agrupadas têm as suas cabeceiras situadas nas proximidades do divisor de águas que separa as referidas bacias hidrográficas. Essa configuração espacial permite levantar a hipótese de que uma retomada dos processos erosivos nessas feições promoverá aumento na sua área e, por se situarem próximas umas das outras, poderá gerar um processo de coalescência por captura fluvial.

Segundo Bishop (1995), os fatores que condicionam as capturas fluviais e que são utilizados na sua identificação são: climáticos, associados as mudanças climáticas, estruturais associados a litologia e a tectônica e morfológicos que definem o grau de inclinação, a alta energia da água e a capacidade em que os rios têm de erodir e transportar sedimentos.

Para identificar estes fatores, é utilizada a fotointerpretação, a partir dos dados de sensores remotos e de aeronaves remotamente pilotadas (RPA), análises computacionais para compreender a agressividade e inclinação dos rios, comprimento e baixo divisor, *knickpoints* e o nível de base dos rios a partir de perfis transversais e longitudinais dos rios e trabalho de campo, para validação das informações geradas em laboratório.

A hipótese de coalescência, levantada no presente trabalho, foi subsidiada pelos resultados da aplicação do ICR para a região por Goulart, Oliveira e Santos (2018). Segundo esses autores, as feições anômalas encontradas pontualmente na porção norte do rio Ivaí, já ocorreram também na porção sul, porém devido a taxa de denudação mais elevada neste setor (COUTO, 2015), houve uma coalescência dessas feições e a dissecação do relevo encontra-se em estágio mais avançado se comparada à porção norte.

Assim, com apoio de índices morfométricos e evidências de campo, o objetivo do artigo foi elaborar um modelo de evolução espacial dessas feições erosivas localizadas sobre um divisor de águas situado entre as bacias hidrográficas dos rios Ivaí e Paranapanema.

2. Localização e caracterização da área de estudo

A região de estudo se situa sobre formações sedimentares que integram a bacia Bauru (Cretáceo Superior). Fernandes (2004) aponta que o grupo Caiuá, integrante dessa bacia e característico da área de estudo, tem espessura em torno de 300 metros e se originou pela deposição do Deserto Caiuá (*sand sea*). As suas formações definem compartimentos distintos como: planícies e extradunas que caracterizam a formação Santo Anastácio, a área desértica central que representa a formação Rio Paraná e a zona periférica a formação Goioerê.

O relevo é caracterizado pelas subunidades morfoestruturais Planalto de Paranavaí e Planalto de Umuarama, que compõem o terceiro planalto paranaense, e pelas planícies fluviais (SANTOS et al., 2006).

Predominam os Latossolos e os Argissolos, os primeiros prevalecem nos topos das colinas amplas e divisores de água e o segundo no terço médio/inferior das vertentes, a partir do momento que a rede de drenagem se torna mais entalhada (CALEGARI, 2000; GASPARETTO et al., 2001; COUTO et al., 2018; OLIVEIRA; SANTOS; CALEGARI, 2020).

A região é marcada pelo predomínio dos climas Cfa e Cwa considerados como Subtropical Úmido. O Cfa se estende por toda a região noroeste, com temperatura do mês mais quente > 22º C e chuvas bem distribuídas, temperatura moderada e ausência de uma estação seca definida. As médias do inverno são < 16º C e ocorrem geadas nos meses de inverno (ITCG, 2008).

A vegetação mais expressiva que compunha a região noroeste do estado sobre o grupo Caiuá era a floresta estacional semidecidual, hoje restrita a algumas áreas, enquanto nos trechos próximos ao rio Ivaí e em seus afluentes, ocorre a formação de florestas com influência fluvial (VELOSO; GÓES-FILHO, 1982).

As três feições erosivas estudadas são as únicas com grandes dimensões, que se encontram agrupadas ao longo do divisor hidrográfico que separa as bacias dos rios Paranapanema e Ivaí (Figura 1). As outras encontradas na área de estudo se acham dispersas e localizadas no terço médio/inferior das vertentes. As características morfométricas das feições estudadas estão resumidas na Tabela 1.

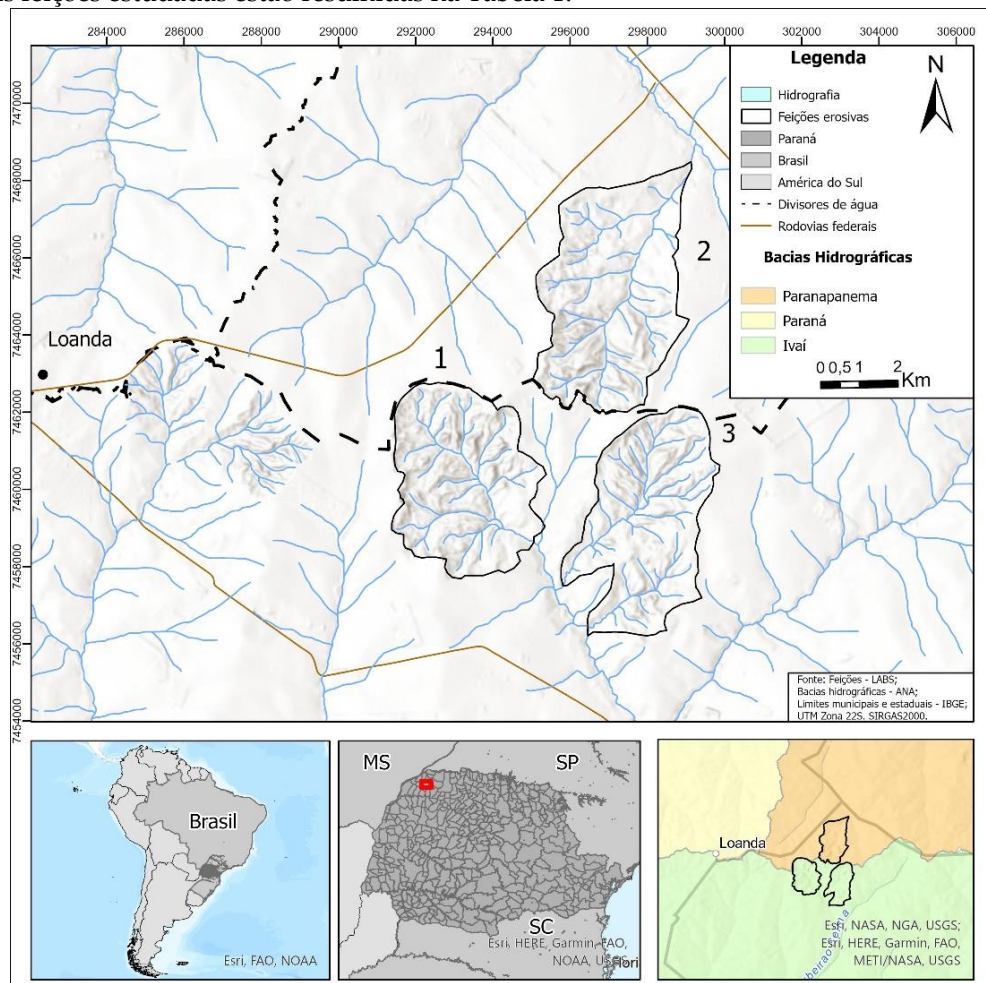


Figura 1. Localização das feições erosivas existentes na porção norte do rio Ivaí.

Tabela 1. Características morfométricas das feições erosivas

Feições erosivas	Dimensão	Nº de canais de 1º	Nº de canais de 2º	Bacia hidrográfica
1	15,2 km ²	22	6	Ivaí
2	18,6 km ²	32	9	Paranapanema
3	15,6 km ²	33	8	Ivaí

3. Materiais e Métodos

Para permitir a comparação dos resultados, as métricas utilizadas foram aplicadas principalmente nos canais de primeira ordem encontrados no interior das 3 feições e em áreas selecionadas no entorno do divisor.

As informações referentes as características dos canais de drenagem existentes no interior das feições erosivas foram obtidas por meio do cálculo do índice Chi (x), da estabilidade dos divisores e da identificação de *knickpoints*.

Para compreensão do comportamento dos canais, utilizou-se o índice Chi (X) (PERRON; ROYDEN, 2013; WILLET et al., 2014), a partir da ferramenta *topotoolbox* no *Matlab* (SCHWANGHART; KUHN, 2010; SCHWANGHART; SCHERLER, 2014). Este parâmetro consiste em calcular a condição do perfil de equilíbrio do rio em diferentes bacias hidrográficas a partir dos valores de anomalias Chi. Como foram comparadas feições erosivas opostas entre si, os resultados representam o estado de equilíbrio do perfil do rio.

O índice desenvolvido por Willet et al., (2014), propõe avaliar a estabilidade das cabeceiras de drenagem por meio de indicativos da morfologia de drenagem. Segundo esses autores, a altitude das cabeceiras pode indicar sua tendência de recuo, quando dois canais estão em altitudes diferentes o canal mais baixo provoca a erosão regressiva até capturar o rio em maiores altitudes. Quando os canais estão em desequilíbrio os processos atuantes podem avançar até as bacias vizinhas promovendo a expansão da drenagem.

Valores menores de Chi indicam a feição como agressora e conseqüentemente ganhará área ao longo do tempo, em contrapartida, maiores valores de Chi sugerem a feição como vítima, podendo perder área para outra, havendo assim um desequilíbrio e a possível ocorrência de rearranjo com a mudança de direção no fluxo dos canais. Quando os valores de Chi são semelhantes em ambos os lados do divisor de águas, pode se concluir que existe um relativo equilíbrio, sem mudança significativa em suas áreas.

A função Chi é utilizada para avaliar o estado de equilíbrio das cabeceiras dos canais que estão próximas aos divisores de drenagem. A partir de Chi foi desenvolvido o fator Chi (X) (PAIXÃO et al., 2020) que representa a agressividade das cabeceiras de drenagem em diferentes bacias localizadas num mesmo divisor (FORTE; WHIPPLE, 2018).

Essa função permitiu calcular os valores dos *pixels* de contribuição da rede de fluxo onde foram inferidos valores da contribuição no entorno do divisor de águas a partir de uma média espacial. Os valores de Chi (X) foram divididos pela média espacial das cabeceiras resultando em um mapa que quantifica a métrica ao longo do divisor.

A aplicação do Chi também apresenta diferentes respostas quando há ocorrência de tectonismo ou quando existe diferença no nível de base das bacias. Assim a aplicação de Chi (X) foi combinada com outros parâmetros que representam a geometria e a estabilidade dos divisores de drenagem e que complementaram a métrica Chi (WHIPPLE; DIBIASE e FORTE, 2017; FORTE; WHIPPLE, 2018).

Forte e Whipple (2018) combinam Chi com as métricas de Gilbert (1877) que são baseadas no princípio de que as encostas com características diferentes apresentam diferença em suas taxas erosivas. De modo geral os resultados Chi indicam a condição da rede de drenagem, quando há o desequilíbrio poderá ou não ter tendência a reorganização futura, enquanto as métricas de Gilbert são mais eficientes para avaliar o estado atual da rede de drenagem e do divisor, e indicar indícios de captura fluvial, pois seus parâmetros representam somente a condição atual, sendo eles: elevação, declividade e amplitude altimétrica (*elevation, gradient e relief*).

Ao longo de um único divisor alguns segmentos podem apresentar instabilidade ou tendência ao deslocamento. Para identificar a diferença dos segmentos do divisor gerou-se um gráfico único do divisor e em seguida dividiu-se em cinco seções para avaliar a estabilidade individualmente (Figura 2) e seus diferentes comportamentos.

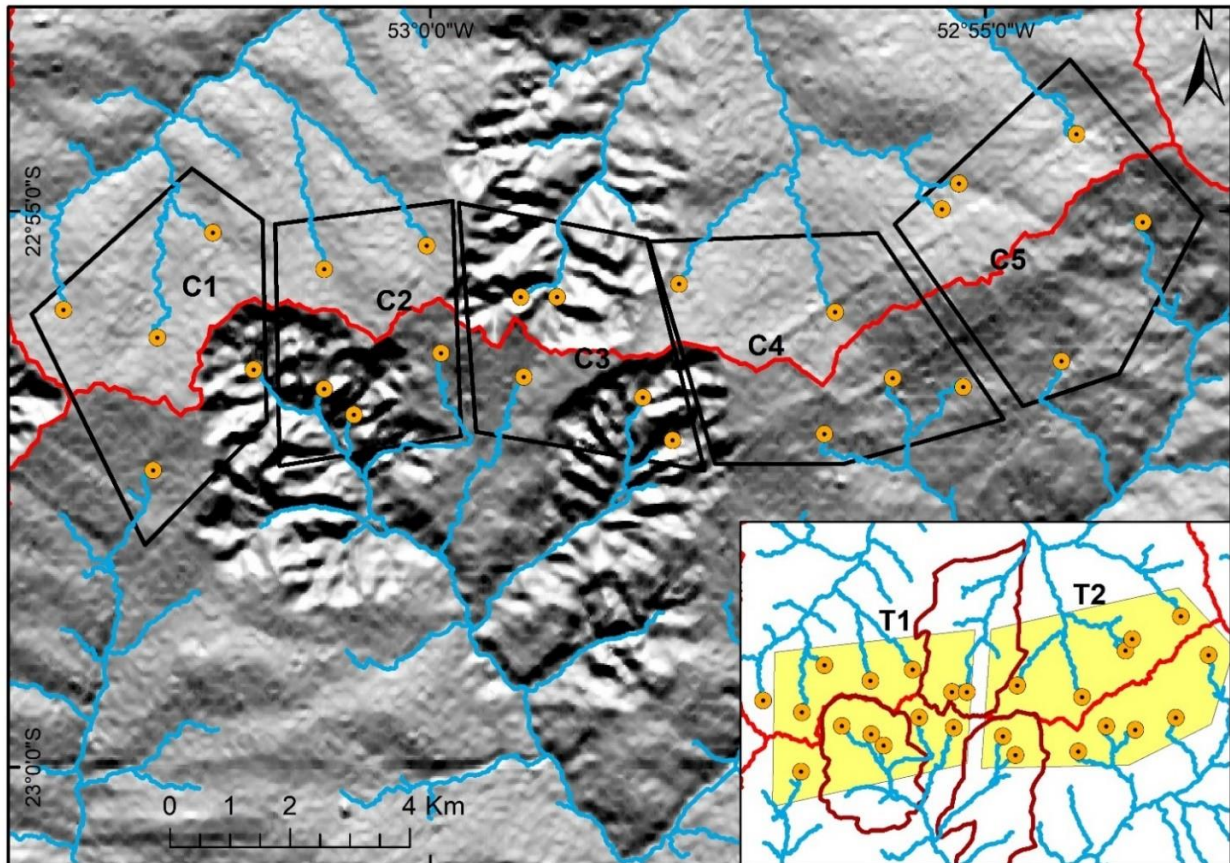


Figura 2. Localização dos canais e seções dos divisores.

Para as métricas de declividade e amplitude altimétrica, foram utilizados os valores médios no entorno das cabeceiras de drenagem. Para esse cálculo foi definido um raio de 500 pixels no entorno da cabeceira (FORTE; WHIPPLE, 2018). A declividade mede a inclinação, enquanto a amplitude altimétrica diz respeito a subtração dos valores máximos e mínimos que ocorrem acima da cabeceira até o limite do divisor.

As comparações das métricas resultaram na representação por cores e graficamente dos valores deltas (δ) para as quatro métricas. O delta (δ) representa a diferença entre o valor das amostras nas feições com o mesmo divisor. O valor pode ser medido para cada variável (elevação, declividade, amplitude altimétrica e *Chi*). Ao fixar a ordem da subtração para cada variável, foi possível identificar a estabilidade e a mobilidade de cada ponto da divisão. O gráfico possibilitou a visualização da sobreposição dos valores das amostras para as diferentes métricas por três métodos estatísticos: desvio padrão, erro padrão e *bootstrap* (intervalo de confiança de 95%).

O desvio padrão apresenta barras maiores e que provavelmente sobrepõem a linha de estabilidade do divisor, enquanto o erro padrão concentra seus resultados em um intervalo menor e se torna mais preciso quanto ao anterior. O intervalo de confiança realiza a reamostragem dos dados e resulta em um meio termo dos métodos anteriores (FORTE; WHIPPLE, 2018).

A partir do levantamento de campo e geração de índices, os resultados obtidos permitiram o desenvolvimento de um modelo preditivo para a evolução das feições, a partir dos processos atuantes sobre a área a longo prazo.

4. Resultados e Discussão

A figura 3 apresenta o conjunto geral das feições estudadas, enquanto em A, B e C se observa um melhor detalhamento das condições atuais dessas feições. A figura 3 (A) permite uma melhor visualização do divisor de águas existente entre as feições 2 e 3. Nota-se que o mesmo se encontra bastante degradado pelo atual uso da terra. Nas figuras 3 (B) e (C), são observadas áreas com presença de vegetação já fragmentada e com indícios de processos erosivos recentes na cabeceira da feição 2.

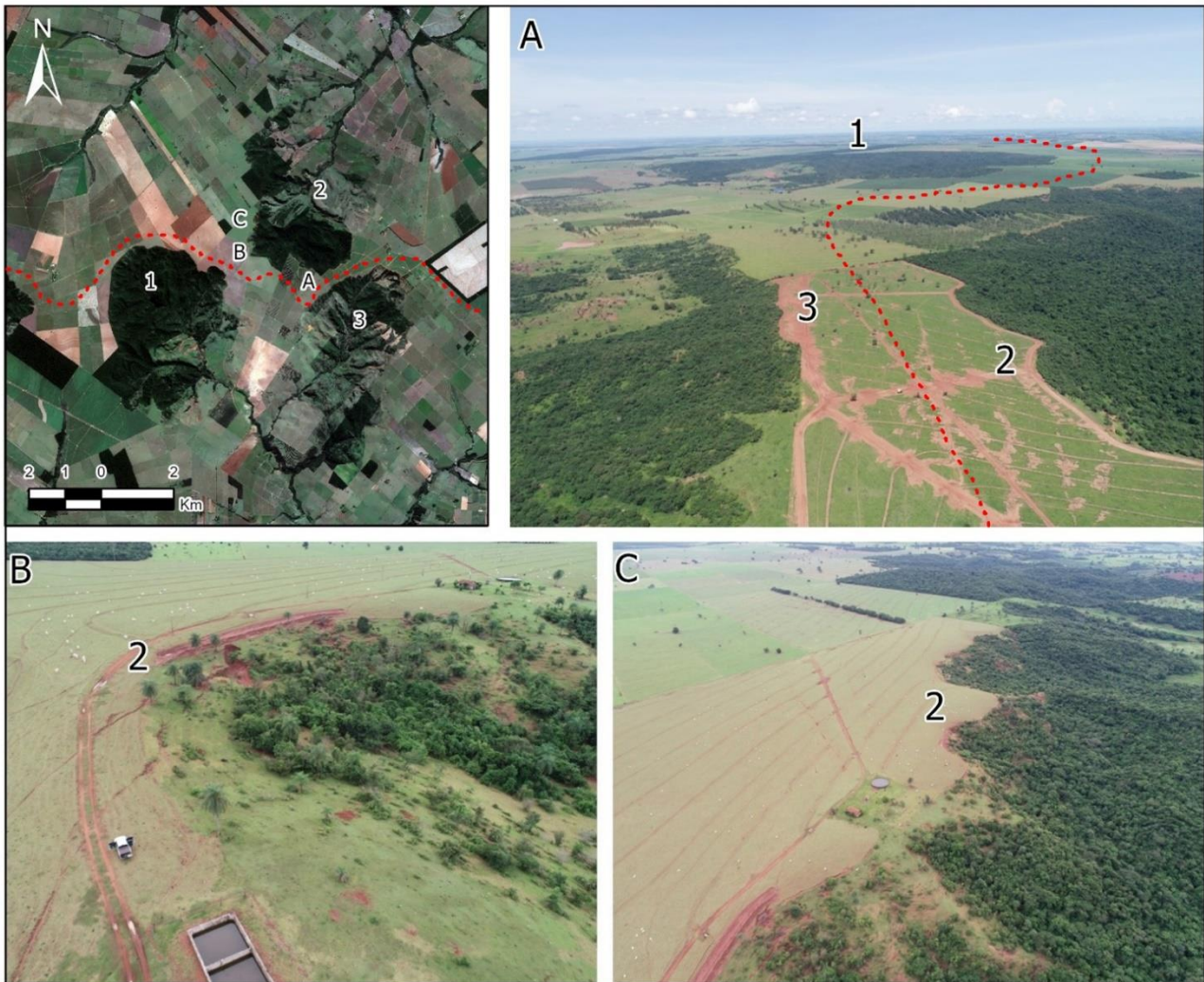


Figura 3. Imagens das feições obtidas por RPA. As linhas pontilhadas em vermelho indicam a posição do divisor de águas. Fonte: A autora, 2020.

Na figura 4 (A) é apresentado o mapa Chi dos canais de drenagem da área de estudo e do seu entorno. O índice mostrou que os canais existentes no interior da feição 2 têm maiores valores de Chi (vermelho) quando comparados aos canais das feições 1 e 3. Neste sentido, os valores obtidos indicam que os canais com menores valores de Chi da feição 1 avançariam em direção a feição 2, e conseqüentemente, ocorreria um deslocamento do divisor de águas entre as feições estudadas.

Na figura 4 (B), os valores determinados para o Chi (X) do divisor reforçam os resultados da métrica anterior. Estes atestam que a feição 2 será a vítima e as feições 1 e 3 as agressoras. Os maiores valores da imagem assinalam a presença de desequilíbrio nos segmentos do divisor, e que condicionam a feição como vítima e os menores valores para a feição agressora. Analisando os menores valores do fator Chi (Figura 4B) das feições 1 e 3, nota-se que os segmentos em que isto ocorre representam os pontos instáveis indicados pelas setas.

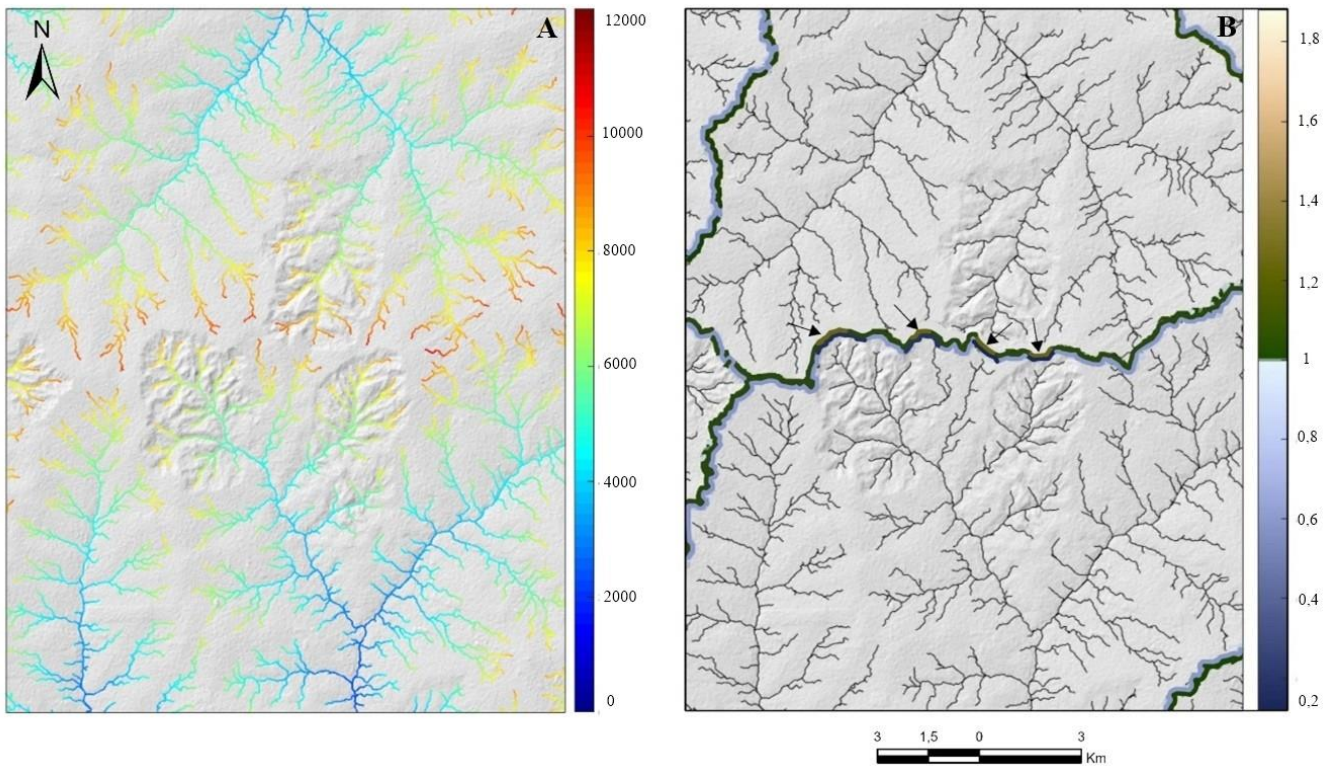


Figura 4. Representação dos valores chi, (A) os canais variam de cor azul (baixo) para vermelho (alto) para as bacias de estudo. (B) fator chi (X) para o divisor. Os valores mais baixos representam o lado do divisor agressor e valores mais altos o lado do divisor será vítima. As setas indicam as áreas mapeadas com drone pois apresentavam maior indício de erosão e na figura são os trechos com maior contraste nas cores da bacia agressiva.

Os resultados da aplicação das quatro métricas, são apresentadas na figura 5. Observa-se que os valores obtidos são contrastantes em ambas as porções do divisor, indicando que ele se encontra instável.

Os valores do índice Chi (figura 5), semelhante ao encontrado na figura 4a, indicam um deslocamento do divisor da bacia ao sul (altos valores) em direção ao norte (baixos valores) por meio da evolução das feições erosivas.

A elevação apresenta valores altos nas cabeceiras, caracterizando vertentes ao sul menores em relação ao norte. A declividade e a amplitude altimétrica local são elevadas, há um indicativo de ocorrência de erosão ou deslocamento do divisor, que avançaria a partir dos maiores valores em direção aos menores.

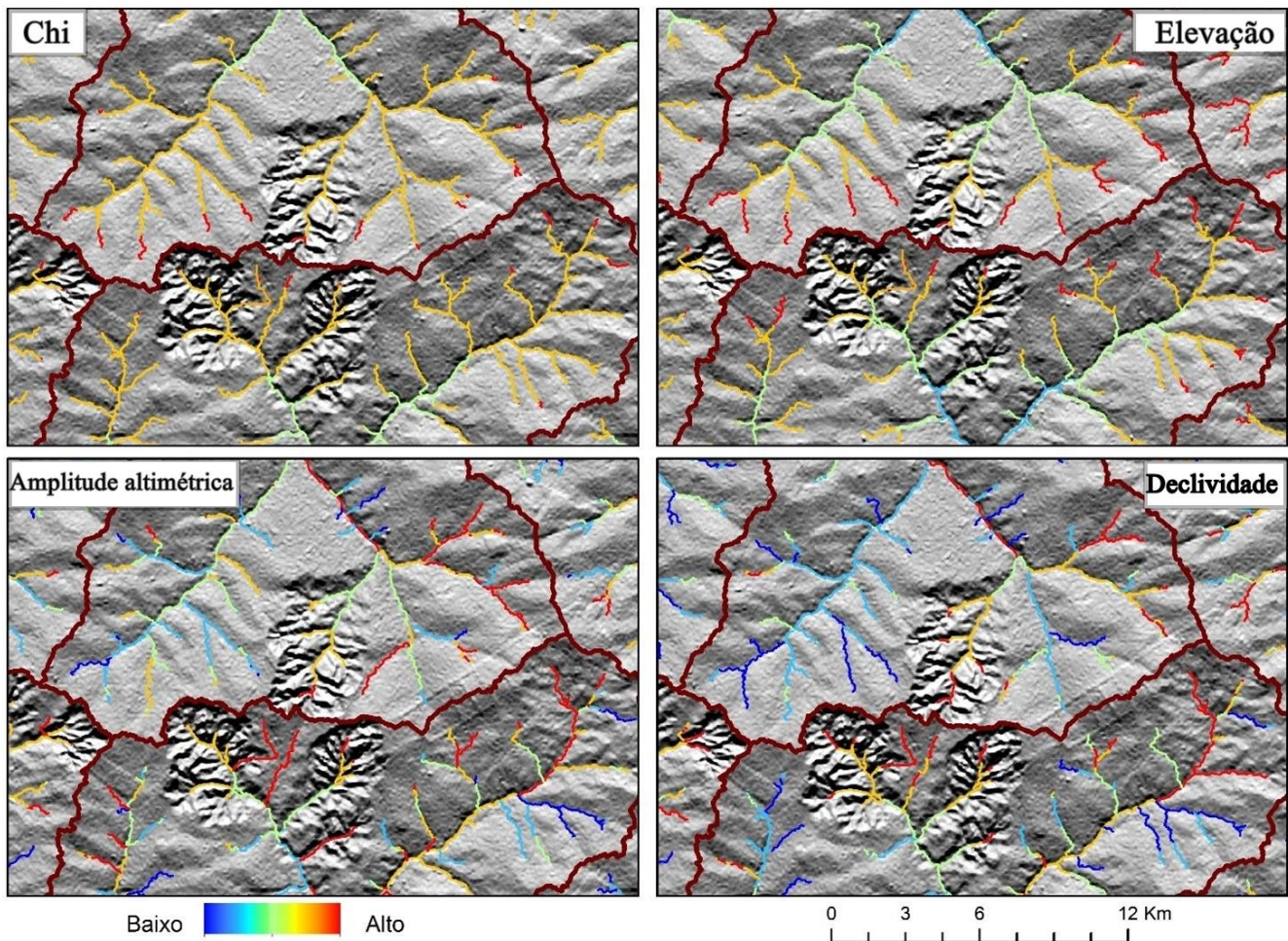


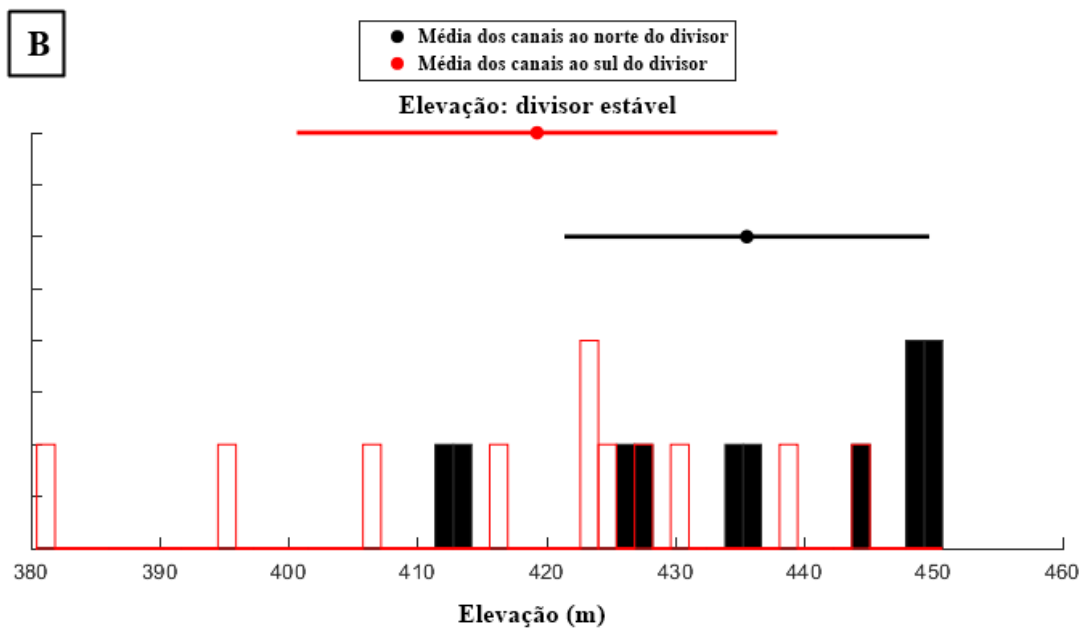
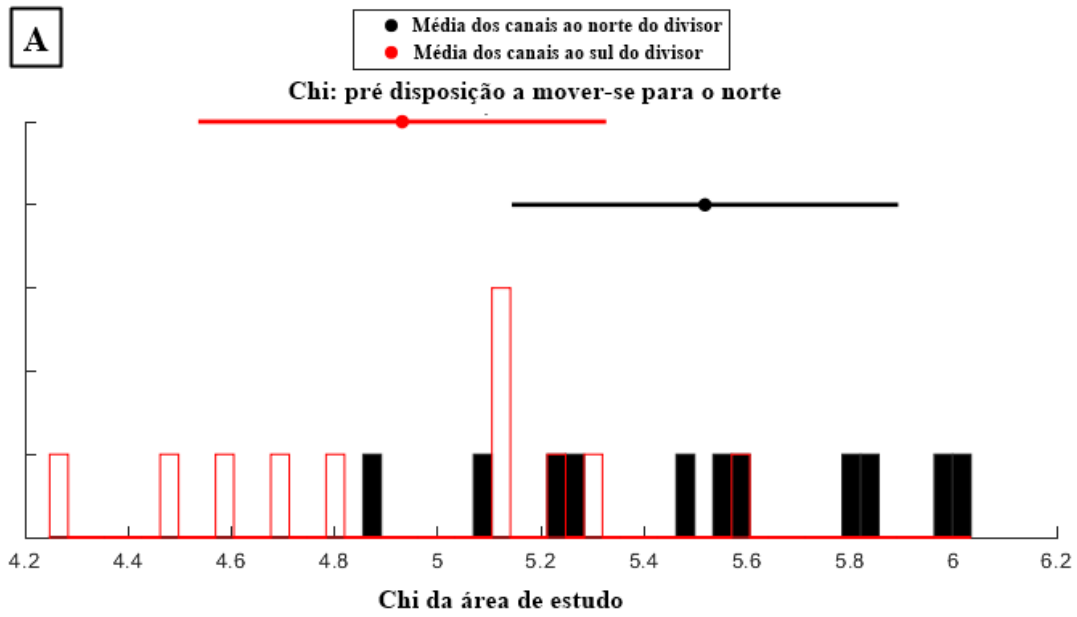
Figura 5. Índice chi e as métricas de Gilbert (elevação, amplitude altimétrica e declividade).

Na figura 6A (Chi) os valores da cabeceira sul são menores em relação ao norte, nesta configuração o desvio padrão das cabeceiras se mantem distinto, apontando pré-disposição de deslocamento na direção norte.

Na figura 6B (elevação), os maiores valores são visualizados nos canais do norte. Nos canais do sul os valores apresentam distribuição irregular, indicando que as cabeceiras variam nas elevações existentes na área de estudo.

Na figura 6C (amplitude altimétrica) a maior média é encontrada para o sul. Entretanto, os dados apresentam um elevado desvio padrão, que se expressa na sobreposição com a média encontrada para o norte.

Na figura 6D (declividade) os valores encontrados para os canais, em ambos os lados, são mais baixos, indicando menor variação da declividade dos canais. Em alguns segmentos do relevo podem ocorrer, maior declividade, mas são canais específicos em ambas as direções.



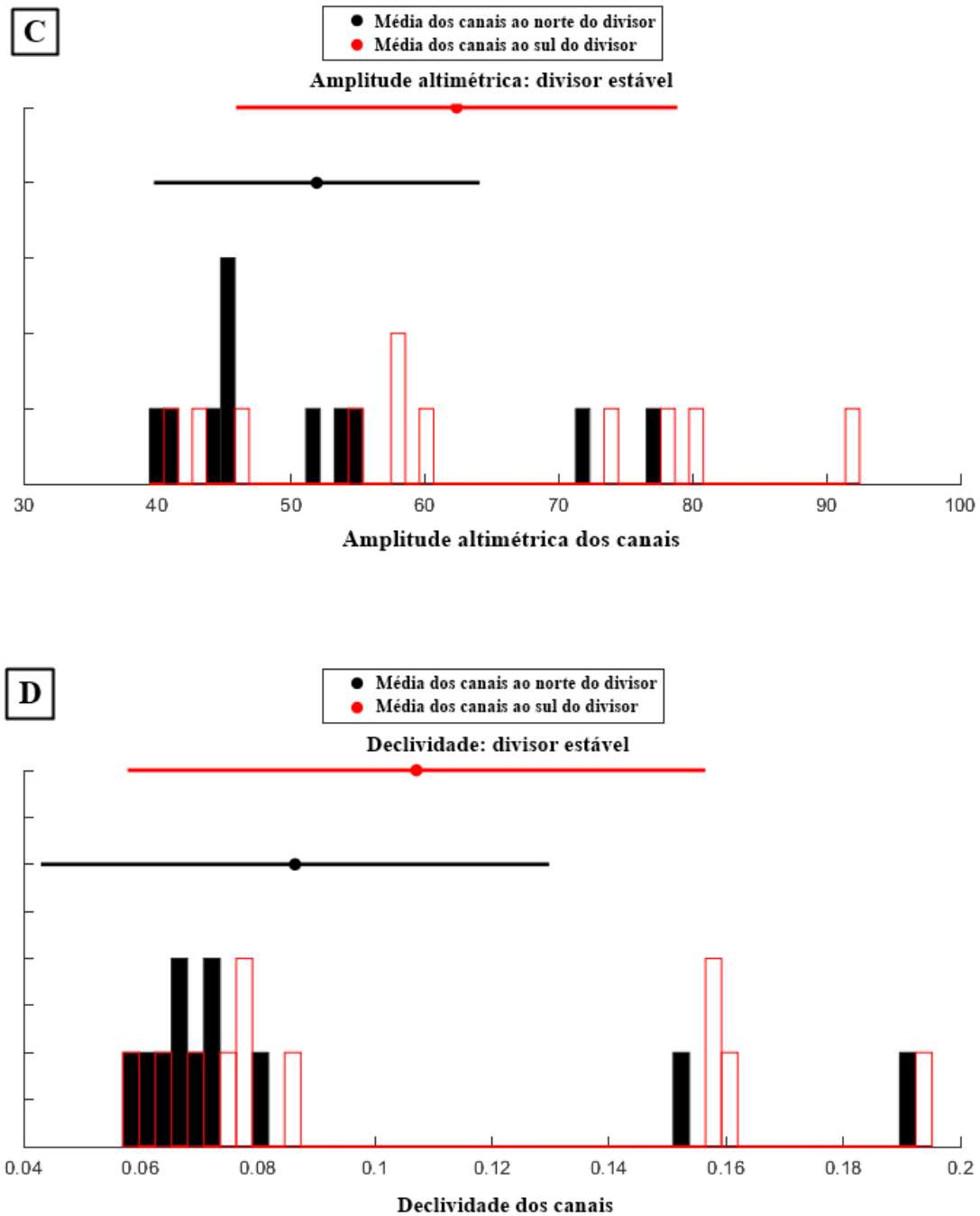


Figura 6. Histograma com o desvio e erro padrão das quatro métricas para ambos os lados dos divisores. Em preto as cabeceiras do norte e em vermelho as do sul.

Quando analisados os valores de maneira individual, à exceção do índice Chi, os resultados mostram uma linha do divisor estável, porém, autores como Forte e Whipple (2018) indicam a adição da análise *bootstrap* (intervalo de confiança) para obter uma maior confiabilidade dos dados. A observação do erro padrão e *bootstrap* apontam para uma tendência de deslocamento do divisor para o norte (Figura 7).

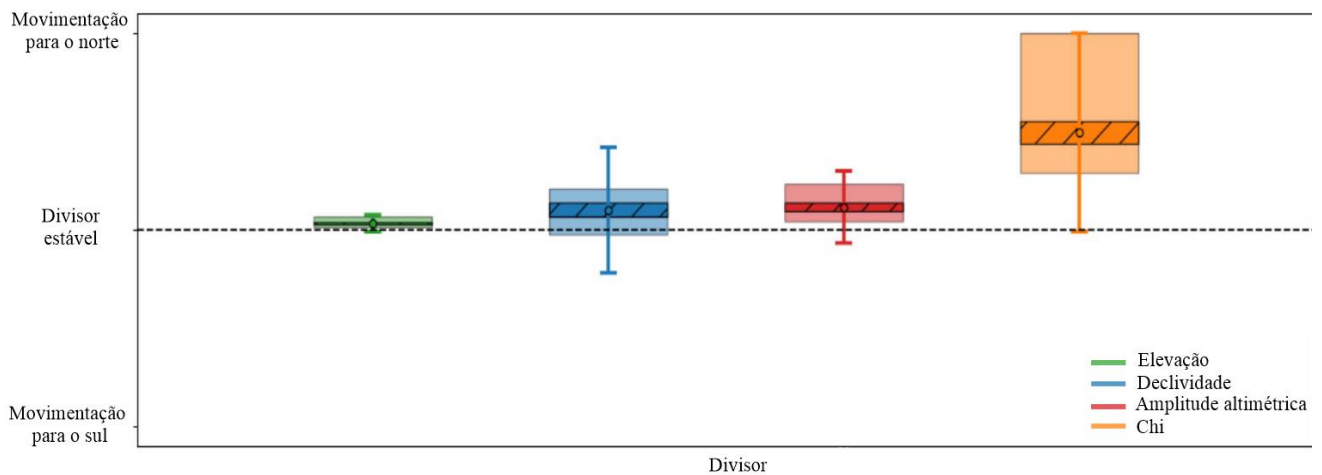


Figura 7. Gráfico com os valores de desvio padrão e erro médio padrão e *bootstrap* do divisor.

As seções que compõem o divisor estão representadas na figura 8. De modo geral, C1 e C4 apresentam distribuição semelhante das métricas. O desvio padrão de Chi não sobrepõe o divisor estável, indicando um possível deslocamento do divisor para norte em ambas as seções. O C2 apresenta Chi com maior delta, e os canais desse setor indicam sua movimentação também para norte, contudo, mais evidente.

A seção C3 apresenta delta semelhante para as métricas, com baixo desvio padrão, exceto para o *Chi*. Neste trecho o divisor se localiza entre as feições 2 e 3, com indícios de deslocamento no sentido sul, assim os canais existentes na feição 2 capturam os canais da feição 3.

Os resultados obtidos na seção C5 indicam estabilidade do divisor, com baixa variação de desvio padrão em todas as métricas, com exceção ao *Chi*. Essa ideia de estabilidade pode ser reforçada pela ausência de feições erosivas próximas ao divisor nessa seção.

Quando se observa o erro padrão para as amostras somente o delta da métrica elevação sobrepõe a linha do divisor estável na maioria dos segmentos, com exceção da amostra C2. As demais métricas se situam majoritariamente ao norte (C1, C2 e C3) sinalizando uma tendência de deslocamento do divisor nessa direção.

Para cálculo do *bootstrap* (intervalo de confiança), não foi possível a verificação estatística das 5 seções, pois o método necessita de uma maior amostragem para combinação entre si e obtenção dos valores. Desta maneira, as amostras foram divididas em dois segmentos para distribuir as cabeceiras ao longo do divisor (T1 e T2) o segmento T1 inclui C1, C2 e metade de C3, enquanto o T2 inclui a outra metade de C3, C4 e C5 na íntegra.

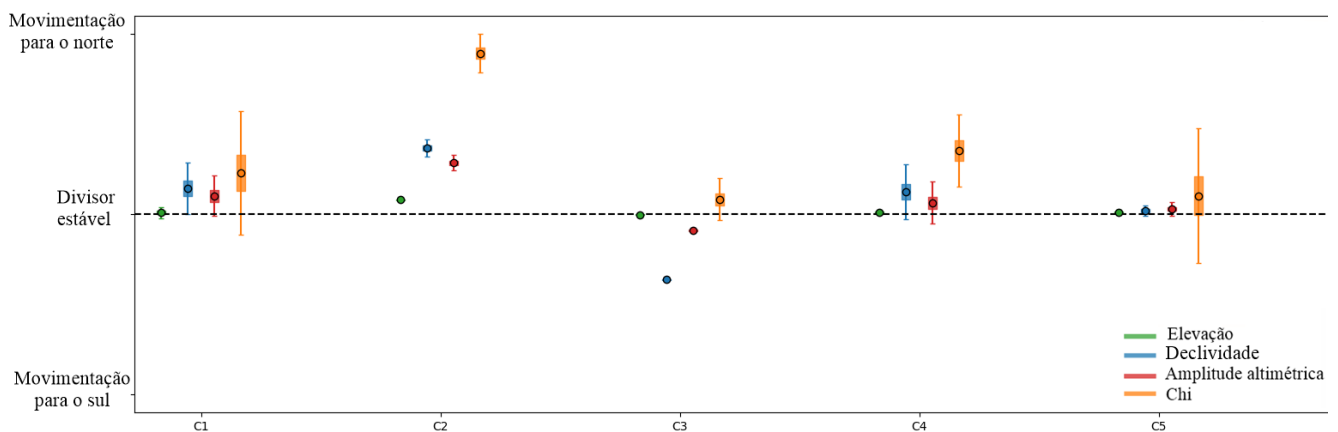


Figura 8. Gráfico com desvio padrão e erro médio padrão dos segmentos do divisor.

Os resultados apresentados na figura 9 reforçam as análises anteriores, ou seja, sobreposição da métrica elevação ao divisor estável em todos os setores, e uma pequena tendência de migração para o sul das métricas declividade e relevo em T1. Segundo o erro padrão e o *bootstrap* todos os outros valores indicam tendência de migração para o norte.

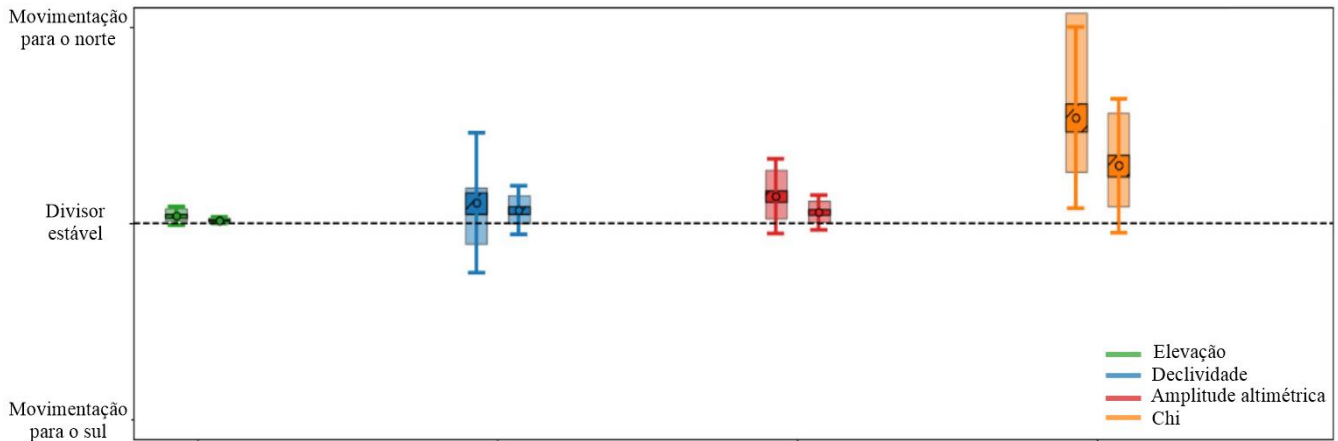


Figura 9. Gráfico do desvio padrão, erro padrão e bootstrap do divisor, dividido em dois segmentos T1 a esquerda e T2 a direita, respectivamente em cada variável do gráfico.

A análise dos valores do delta do desvio padrão para as 5 seções (C1 a C5) do divisor demonstra que todos ultrapassam a linha do divisor estável. Quando se utiliza o erro padrão e bootstrap (intervalo de confiança) estes indicam uma tendência a migração tanto nos valores totais do divisor quanto as seções (T1 e T2), figuras 6 e 9.

O delta de Chi tem maior contraste com as demais métricas. A elevação das seções é mais próxima do divisor estável e com menor valor de delta, enquanto amplitude altimétrica e declividade se distribuem de forma semelhante. Considerando o conjunto de resultados obtidos pelas métricas aplicadas, propõe-se um modelo evolutivo, em quatro estágios, que levaria a coalescência das três feições existentes na área do estudo (Figura 10).

O estágio atual da área de estudo, representado em I, condiz com as características levantadas a partir das imagens adquiridas em campo.

No estágio II ocorre a captura das drenagens da feição 2 em direção a feição 1. A partir desse estágio a área que antes drenava para a bacia do rio Paranapanema passará a drenar para a bacia do Ivaí. Esses indícios são sustentados pela presença de altos valores de Chi, elevação, gradiente e relevo.

No momento que o canal se ajustar e a forma da feição evoluir, os novos limites da feição 1 chegarão próximos ao divisor hidrográfico desta forma poderá haver uma união com a feição 3, pois esta apresenta indícios de erosão na sua borda exatamente sobre o divisor, como visto nos dados levantados com o drone.

No estágio III as feições 2 e 3 tendem a se unir, o avanço seria dado da feição 2 em direção a 3. Esse avanço ocorreria pelas condições atuais do divisor, sendo a menor distância entre as duas feições e com características semelhantes de declividade e drenagem, validadas em campo.

O levantamento com o drone, permitiu a observação de indícios de processos erosivos na borda da feição 2, como sulcos, ravinas e solapamentos de solo (Figura 3B), além disto o MDE mostra que as suas bordas se encontram em menores altitudes em relação a feição 3.

Uma característica importante observada nas métricas anteriores e em perfis longitudinais é que as cabeceiras de drenagem da feição 3 estão muito próximas ao divisor, enquanto na feição 2 ainda não, conforme os índices de Gilbert, onde as características do relevo são combinadas as informações dos canais. As cabeceiras da feição 2 estão distantes e em altitudes mais baixas que o divisor, as drenagens ainda têm área para erodir e maior energia para evoluir, enquanto 3 já chegou ao limite e estabilizou-se. Na análise em perfil nota-se maior gradiente em 2, e em 3 elevados valores de Chi e gradiente constante.

Independente da escala de tempo que levará para acontecer o estágio IV, o canal ao lado das feições poderá unir-se a feição 1 ou 2 antes de avançar para o estágio de coalescência das feições.

O estágio IV ilustra a fase final de evolução dessas feições, resultado da coalescência de parte delas, formando uma feição única. Essa, por sua vez, deverá apresentar bordas bem definidas e contrastantes com o relevo suave regional. Será um marco inicial da evolução do relevo no entorno que, no decorrer do tempo, passará a apresentar vertentes dissecadas, curtas e declivosas, conforme ocorre ao sul do rio Ivaí (GOULART, OLIVEIRA e SANTOS (2018).

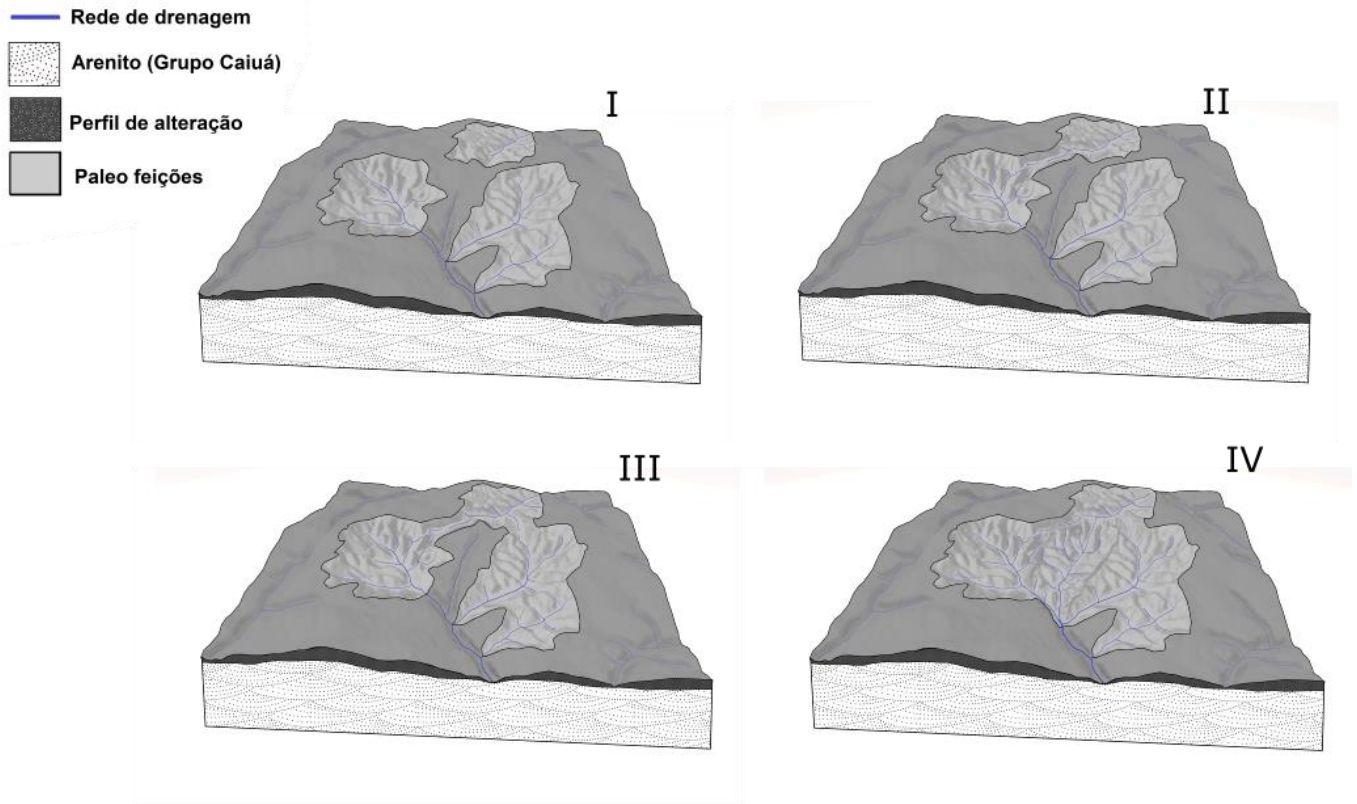


Figura 10. Proposta de modelo evolutivo das feições erosivas em 4 estágios.

Essas feições erosivas, pontualmente identificadas na região noroeste do Paraná, interpretadas por diversos autores como feições com gênese associada a condições climáticas distintas das atuais e formação ocorrida durante o Quaternário, ficaram estabilizadas até aproximadamente 1950, quando ocorreu o processo de desmatamento da região (KOHLHEPP, 2014). Esse desmatamento chegou até as bordas das feições erosivas, que começam a se desestabilizar, conforme as imagens obtidas pelos voos de drone.

Para chegar ao estágio IV, de acordo com todos os resultados das métricas de Chi, inferioridade Chi, métricas de Gilbert e os perfis longitudinais, o sul avançará em direção ao norte. A densidade de drenagem das nas porções norte e sul do rio Ivaí, é menor ($0,90 \text{ Km/Km}^2$) do que a densidade encontrada para as três feições erosivas estudadas ($2,95 \text{ Km/ Km}^2$).

A análise dos outliers realizada por Couto (2015), mostrou que as feições erosivas apresentam densidade de drenagem semelhante aos agrupamentos localizados ao sul, próximos ao divisor de águas entre as bacias do Ivaí e do Piquiri. Essa constatação reforça a ideia do modelo evolutivo apresentado, no que se refere a coalescência dessas feições e formação de agrupamentos maiores com características distintas do relevo da região.

A expansão das feições pela erosão remontante ocorreria associada a incisão da rede de drenagem e ao colapso das bordas ou erosão em subsuperfície (*piping*), que podem estar ligadas a expansão ou evolução da rede de drenagem (MAGALHÃES JUNIOR; BARROS, 2020). Esse processo promoveria uma mudança na configuração das feições e alteração na direção das drenagens existentes no seu interior.

A coalescência dessas feições erosivas pode ser interpretada como um rearranjo fluvial da rede de drenagem, correspondente à mudança do fluxo de um rio para outro, podendo ocasionar a fusão de sistemas fluviais, de

acordo com Harel, Mudd e Attal (2016). Neste sentido, a evolução dessas feições está associada fundamentalmente às mudanças que ocorrem na rede de drenagem e que afetam as taxas de erosão e os processos geomorfológicos na escala local.

Para a região noroeste do estado do Paraná, Couto et al. (2018) indicam que o principal mecanismo evolutivo da rede drenagem ocorre a partir da migração da cabeceira dos rios, as taxas de denudação da margem esquerda do rio Ivaí são mais elevadas e conseqüentemente as bacias hidrográficas estenderam suas áreas de drenagem por meio da pirataria fluvial. Ainda segundo esses autores, a quantidade de baixos divisores é maior na margem norte da bacia do Ivaí em comparação a margem sul. Os baixos divisores que são encontrados nas proximidades das feições erosivas são semelhantes aos visualizados na margem sul do rio Ivaí. A margem sul do rio Ivaí possui 60 Km de distância média entre os divisores frente a 34 Km na margem norte, em ambas as margens o indicativo é de evolução em direção as bordas, com os divisores avançando no sentido da bacia do Ivaí para as bacias adjacentes.

A reorganização da rede de drenagem aponta para um padrão de evolução de relevo onde feições erosivas existentes na paisagem como as discutidas neste artigo possuem um papel fundamental. A grande diferença das taxas de denudação obtidas nas feições erosivas em comparação à média das bacias hidrográficas da região (GOULART, 2020), indica que os processos são muito mais intensos no interior dessas feições em comparação ao seu entorno.

5. Conclusão

Especificamente para as feições erosivas estudadas, as taxas de denudação mensuradas por Goulart (2020) foram maiores na feição 3 e menores nas feições ao sul (feições 1 e 2). A feição 3 apresenta maior taxa de denudação, justificando sua maior área e comprimento, pois já passou por erosão remontante até chegar à borda do divisor e estabilizar-se, enquanto as feições 1 e 2 apresentam menores taxas de denudação e conseqüentemente menor área erodida. De acordo com o modelo proposto estas feições avançarão em direção a feição 3, pois, conforme os resultados das métricas, elas apresentam certo grau de instabilidade além da tendência ao deslocamento para norte.

O uso de algoritmos matemáticos para verificar a estabilidade de divisores apresenta informações significativas dos processos que ocorrem no relevo. Como a escala de tempo da evolução da rede de drenagem é diferente da evolução do relevo, as métricas (Elevação, declividade, amplitude altimétrica e *Chi*) devem ser combinadas e não avaliadas de modo independente.

Com o resultado do trabalho verificou-se a importância de avaliar as métricas (Elevação, declividade, amplitude altimétrica e *Chi*) em conjunto com dados de campo e de realizar testes estatísticos para confiabilidade dos resultados como o uso de teste-t que compararia os valores de distribuição das médias ou neste caso o intervalo de confiança que respondem estatisticamente além do desvio e erro padrão disponibilizado pelo método. Além de considerar essas métricas combinadas são necessárias outras análises da paisagem e índices morfométricos que foram empregados e serviram para apontar locais para futuras investigações.

Os resultados obtidos mostraram tendência de coalescência das feições após algumas fases, com o ajuste dos canais de maiores anomalias e mais elevados pelos canais já ajustados e mais baixos e com mais área para erodir até o divisor.

Isso resultaria na modificação do relevo da região, influenciando na ocorrência de uma nova configuração do relevo (mais dissecado). Ainda a partir das métricas, foi possível inferir que quando a bacia ao sul das feições 1 e 2 avançar em direção a norte da feição 3, ocorrerá uma reorganização da drenagem no interior das feições para que passem a drenar no sentido sul.

Soma-se a esses resultados, o emprego do ICR para a região (FUMIYA et al, 2016; GOULART; OLIVEIRA e SANTOS, 2018), que identificaram concentração das classes de alta e muita alta de rugosidade em determinadas áreas e que poderiam se relacionar a feições erosivas, semelhantes as estudadas, e que já coalesceram.

Por fim é possível afirmar que de acordo com as tendências das métricas e das análises do relevo haverá um deslocamento do divisor para o norte. O deslocamento dependerá de outros fatores ao longo do tempo, mas as métricas respondem adequadamente a migração de acordo com as características existentes nas vertentes, no divisor (presença e distância das cabeceiras de drenagem, largura do divisor, processos erosivos, gradiente e relevo local) e na observação da rede de drenagem.

Contribuições dos Autores: Concepção, OLIVEIRA, M. e SANTOS, L.J.C.; Metodologia, OLIVEIRA, M.; software, OLIVEIRA, M.; pesquisa, OLIVEIRA, M.; preparação de dados, OLIVEIRA, M; escrita do artigo, OLIVEIRA, M., SANTOS, L.J.C e OLIVEIRA, J.G.; revisão, SANTOS, L.J.C e OLIVEIRA, J.G; supervisão, SANTOS, L.J.C; Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: O trabalho foi desenvolvido com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado da primeira autora e de doutorado do terceiro autor.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referencias

1. BIGARELLA, J. J.; MAZZUCHOWSKI, J. Z. **Visão integrada da problemática da erosão**. Livro Guia do III Simpósio Nacional de Controle da Erosão. Maringá, 1985.
2. BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. **Progress in Physical Geography** 19, 4, p. 449-473. 1995.
3. CALEGARI, M. R. Distribuição da Cobertura Pedológica e o Relevo no Alto Vale do Ribeirão Água do São Francisco - Nova Esperança-PR. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
4. CASTRO, S. S.; HERNANI, L.C. **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade**. Brasília - DF: Embrapa, 2015. 367p. ISBN: 9788570355546.
5. COUTO, E. V. do. **Evolução denudacional de longo prazo e a relação solo-relevo no noroeste do Paraná**. 2015. 112f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.
6. COUTO, E. V. do.; SANTOS, L.J.C. dos.; SORDI, M.V. dos.; BOURLÈS, D.; BRAUCHER, R.; SALGADO, A.A.R.; LÉANNI, L.; FERREIRA, J.H.D. Changes of the base levels in the Ivaí and Paraná Rivers confluence zone (Southern Brazil): Denudational reflexes in the evolution of the upstream drainage network. **ZEITSCHRIFT FÜR GEOMORPHOLOGIE**, v. 62, p. 23-40, 2018.
7. FERNANDES, L. A. **Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1: 1.000. 000**. Boletim Paranaense de Geociências, 55. 2004.
8. FORTE, A.M., WHIPPLE K.X., Criteria and Tools for Determining Drainage Divide Stability, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 493, p.102-117. 2018.
9. FUMIYA, M. H. **Gênese dos Ferricretes e sua Relação com Transformações da Paisagem no Noroeste do Paraná**. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba, 2017.
10. FUMIYA, M. H.; SANTOS, L.J.C dos.; MANGUEIRA, C.G.; COUTO, E.V. do. Emprego do Índice de Concentração da Rugosidade para identificação de feições morfológicas associadas as crostas ferruginosas no Noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.17, n°3, p.465-480, 2016.
11. GASPARETTO, N.V.L.; NÓBREGA, M. T.; CARVALHO, A. A reorganização da cobertura pedológica no noroeste do Paraná– BR e as suas relações com o arenito Caiuá. *Anais Encontro de Geógrafos da América Latina*. **Anais...**2001. Disponível em: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal/>
12. GILBERT, G. K. The geology of the Henry Mountains. Washington, United States Geographical and Geological Survey, 1877.
13. GOULART, A.; SANTOS, L. (2014). Evolução temporal e espacial das paleovoçorocas presentes no município de Loanda/PR. **Revista Geonorte**, 5(21), 81-86.
14. GOULART, A. Á.; de OLIVEIRA, J. G.; SANTOS, L. J. C. Utilização do Índice de Concentração de Rugosidade para Identificação de Feições Erosivas na Região Noroeste do Estado do Paraná. In: **Anais do XII Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO)**, UGB. Crato/CE. 2018.

15. HAREL, M.A.; MUDD, S.M.; ATTAL, M. Global analysis of the stream power law parameters based on worldwide ¹⁰Be denudation rates. **Geomorphology**. 268 (2016) 184-196. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.05.035.
16. ITCG. **Mapa de clima**. 2008. <http://www.itcg.pr.gov.br/modules/conteudo.php?conteudo=47>. Acesso em 22 de junho de 2019.
17. KOHLHEPP, G. **Colonização agrária no Norte do Paraná: processos geoeconômicos e sociogeográficos de desenvolvimento de uma zona subtropical do Brasil sob a influência da plantação de café**. Maringá: EDUEM, 2014.
18. MAGALHÃES JUNIOR, A.P.; BARROS, L.F. de P. **Hidrogeomorfologia: formas, processos e registros sedimentares fluviais**. 1 ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2020.
19. NAKASHIMA, P. **Sistema Pedológico da região Noroeste do Estado do Paraná: Distribuição e subsídio para o controle da erosão**. 2000. 162f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
20. OLIVEIRA, J. G., SANTOS, L. J. C., CALEGARI, M. R. (2020). Relação solo-relevo em sistema pedológico argissolo-neossolo quartzarênico na região noroeste do estado do Paraná: caso de Amaporã. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 21(3).
21. PAIXÃO, R. W., SALGADO, A. A. R., FREITAS, M. M., & ALMEIDA, J. H. (2020). Possibilidade de endorreísmo e capturas fluviais na morfogênese da bacia do rio paraíba do sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia** v.21 n.4. DOI: 10.20502/rbg.v21i4.
22. PERRON, J.T. ROYDEN, L. An integral approach to bedrock river profile analysis **Earth Surf. Process. Landforms**, V. 38, pp. 570-576. 2013.
23. SANTOS, L. J. C. OKA-FIORI, C. CANALI, N.E. FIORI, A.P. SILVEIRA, C.T. SILVA, J.M.F da. ROSS, J.L.S. Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 7, n. 2. p. 03-11. 2006.
24. SCHWANGHART, W., KUHN, N. J. (2010): TopoToolbox: a set of Matlab functions for topographic analysis. **Environmental Modelling & Software**, 25, 770-781. [DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.12.002]
25. SCHWANGHART, W., SCHERLER, D., 2014. TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surface. Dynamic**. 2, 1–7. 2014.
26. VELOSO, H. P.; GÓES-FILHO, L. **Fitogeografia brasileira - classificação fisionômico-ecológica da vegetação neotropical**. Boletim Técnico do Projeto RADAMBRASIL, Série Vegetação, v.1, n.1, 1982.
27. WILLETT, S. D; MCCOY, S.W.; PERRON, J. T; GOREN, L; CHEN, C; **Dynamic Reorganization of River Basins**. Science 343. DOI: 10.1126/SCIENCE.1248765. 2014.
28. WHIPPLE, K.X.; DIBIASE, R.A.; FORTE, A.M.; (2017) .Preservation or piracy: diagnosing low-relief, high-elevation surface formation mechanisms. **Geology**.v.45,9194. DOI: 10.1130/G38490.1.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.