

## ANÁLISE DE KNICKPOINTS E MÉTRICAS DE GRADIENTE FLUVIAL NA BACIA DO RIO DAS MORTES (MG)

Raissa Eduarda da Silva Archanjo<sup>1</sup>  
Ronaldo Luiz Mincato<sup>2</sup>  
Felipe Gomes Rubira<sup>3</sup>

### INTRODUÇÃO

O aprimoramento de técnicas de análise espacial, como geoprocessamento e sensoriamento remoto, ganhou importância nas últimas décadas devido à automatização da avaliação de dados morfométricos em ambiente computacional. Esse avanço resultou em investigações mais eficientes e precisas, permitindo o aperfeiçoamento de antigos índices, o desenvolvimento de novas metodologias integradas aos sistemas de informações geográficas e a criação de novos *softwares* de alto desempenho baseados em *machine learning* e linguagens de programação como *Python*, *JavaScript*, *R* e *MATLAB*. Essas inovações ampliaram as possibilidades de sobreposição de dados em análises geoespaciais (Schwanghart; Kuhn, 2010; Kirby; Whipple, 2012; Schawanghart, Molkenhain; Scherler, 2021).

Nesse contexto, esta pesquisa objetiva analisar *knickpoints* e métricas de gradiente fluvial na rede de drenagem da bacia do rio das mortes (MG), para compreender a dinâmica morfológica da área e investigar a influência das características geológicas e tectônicas na formação e evolução do relevo fluvial. A área de estudo está relacionada à transição entre a borda sul do cráton do São Francisco com os cinturões móveis neoproterozoicos associados à Faixa Brasília e Faixa Ribeira. Como parte da metodologia, foram utilizados os seguintes índices/parâmetros: (1) *stream length gradient index (SL)*; (2) *normalized channel steepness index ( $k_{sn}$ )*; e (3) densidade de *knickpoints*.

### METODOLOGIA

#### ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio das Mortes, localizada na mesorregião dos Campos das Vertentes, é uma sub-bacia do rio Grande (MG) e atua como quádruplo divisor de drenagem de importantes bacias de rios do sudeste brasileiro: Grande, São Francisco, Doce e Paraíba do Sul (Figura 1B). A geologia regional está associada à transição entre a borda sul do cráton do São

---

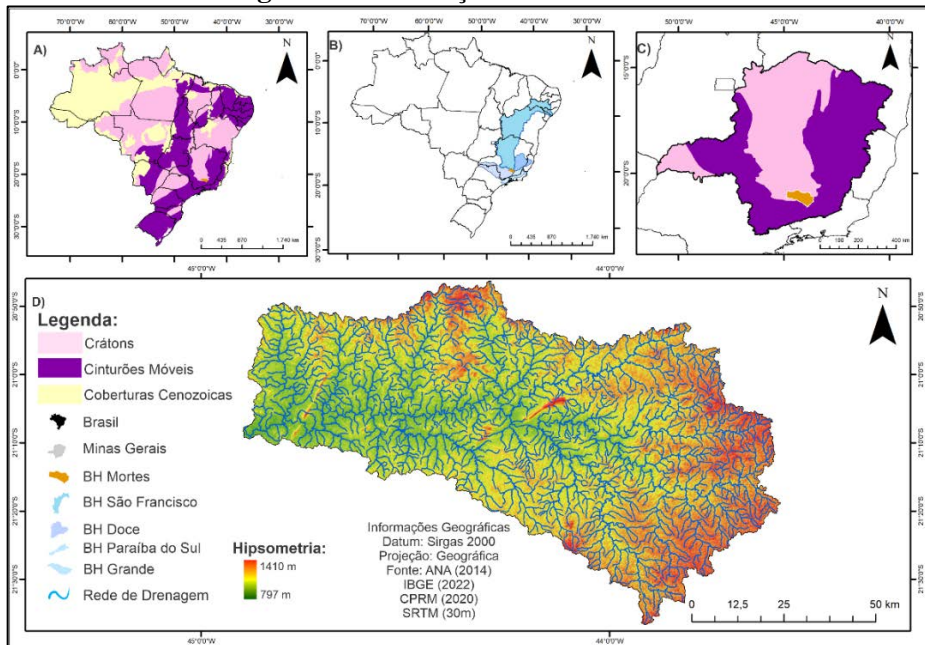
<sup>1</sup>Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, [raissa.archanjo@sou.unifal-mg.edu.br](mailto:raissa.archanjo@sou.unifal-mg.edu.br);

<sup>2</sup> Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato, Instituto de Ciências da Natureza - ICN, Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, [ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br](mailto:ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br);

<sup>3</sup> Professor orientador: Prof. Dr. Felipe Gomes Rubira, Instituto de Ciências da Natureza - ICN, Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, [felipe.rubira@unifal-mg.edu.br](mailto:felipe.rubira@unifal-mg.edu.br).

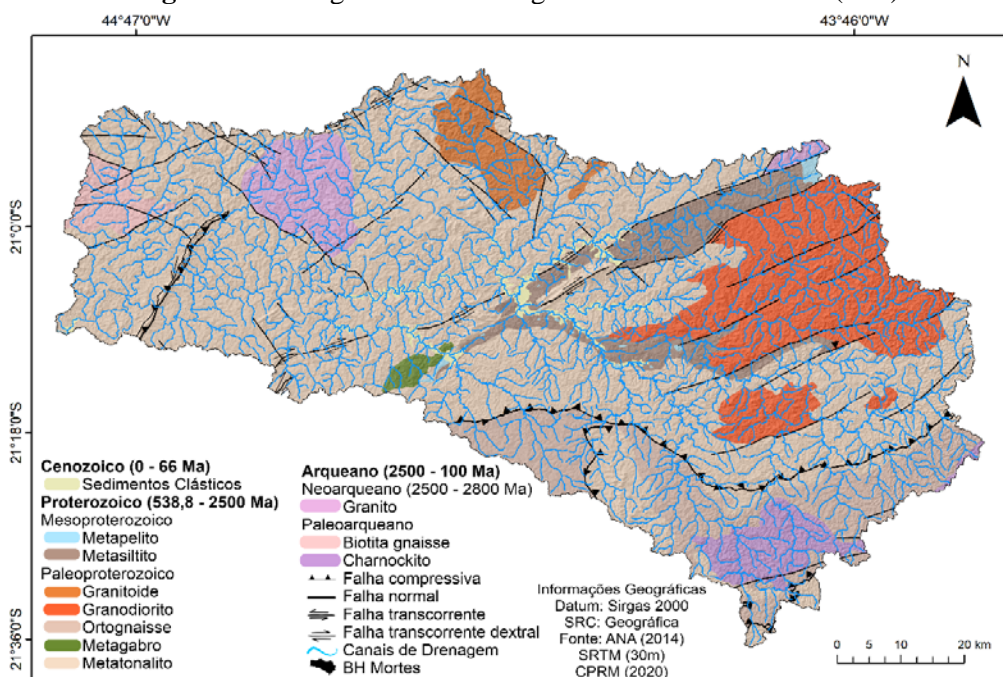
Francisco e os cinturões móveis neoproterozoicos (Figura 1C), ligados à Faixa Brasília e à Faixa Ribeira. Esse contexto regional está relacionado a episódios de colisão vinculados à formação do supercontinente Gondwana, conhecidos como Orogenia Neoproterozoica Brasileiro-Pan-Africana (Wit et al., 2008).

**Figura 1:** Localização da área de estudo



A área abrange terrenos do paleoarqueano até o mesoproterozóico, marcados por uma variedade de rochas ígneas plutônicas e metamórficas de alto e baixo grau, como granito, gnaise, charnockito, metagabro, metapelito e metassiltito (Figura 2), além de depósitos cenozoicos em áreas de leitos aluviais (Silva et al., 2020).

**Figura 2:** Geologia da bacia hidrográfica do rio das Mortes (MG)



No neoproterozoico, a orogênese Brasileira afetou a borda sul do cráton do São Francisco, resultando da formação do supercontinente Gondwana (Hasui, 2010). Esse evento tectônico ocasionou dobramentos, falhamentos e metamorfismo devido à colisão de blocos crustais, dando origem ao cinturão móvel denominado Faixa Brasília (Hasui, 2010). Posteriormente, durante o cretáceo, o processo de fragmentação do Gondwana se iniciou, provocando a abertura de bacias oceânicas e a separação de continentes por meio de rifteamentos e afundamento de blocos, os quais originaram a Faixa Ribeira (Hasui, 2010).

## MATERIAIS

Foram adquiridas: (i) bases de dados matriciais gratuitas, como Modelo Digital de Elevação (MDE) de 30m da *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, extraído da plataforma *United States Geological Survey* (USGS, 2023); (ii) *shapefile* das curvas de nível das cartas topográficas de Barbacena, Senhora dos Remédios, Tiradentes, São João del Rei, Nazareno e Lavras, na escala de 1:50.000, fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); (iii) *shapefile da* base hidrográfica Ottocodificada da bacia do rio Grande na escala de 1:50.000. e 1:100.000, fornecidas pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2014).

## MÉTODOS

O índice  $SL$  foi utilizado apenas no canal principal, extraído da base hidrográfica da ANA (2014), e sobreposto ao perfil longitudinal, derivado das curvas de nível de 20 metros das cartas topográficas. Os valores do índice  $SL$  foram calculados conforme a metodologia de Hack (1973) e Seeber e Gornitz (1983), dividindo a relação entre a declividade e a distância total do canal principal com a de cada trecho fluvial, segmentado pela equidistância das curvas de nível.

O  $k_{sn}$  foi calculado para toda rede de drenagem e sobreposto aos perfis longitudinais extraídos do MDE, utilizando-se *scripts* do pacote de ferramentas *topotoolbox 2* hospedadas no *software* MATLAB 2021a (Schawanghart; Scherler, 2014). Primeiro, os ruídos do MDE foram eliminados usando a função ‘*Constrained Regularized Smoothing*’. Em seguida, a rede de drenagem foi extraída com base em uma área de contribuição mínima de 500 pixels e na remoção dos canais de 1ª ordem menores que 10 km. Posteriormente, o *índice de concavidade* ( $\theta$ ) comum foi calculado utilizando a função *slopearea* ( $\theta = 0,45$ ), e os valores de  $k_{sn}$  foram agregados, plotados e suavizados em segmentos de fluxo por meio das funções ‘ $k_{sn}$ ’, ‘*STREAMObj2mapstruct*’ e ‘*STREAMObj/smooth*’.

Para a elaboração dos perfis longitudinais, identificação dos *knickpoints* e mensuração de suas magnitudes, foram utilizadas as funções ‘*plotdz*’, ‘*knickpoint finder*’ e ‘*point pattern*’.

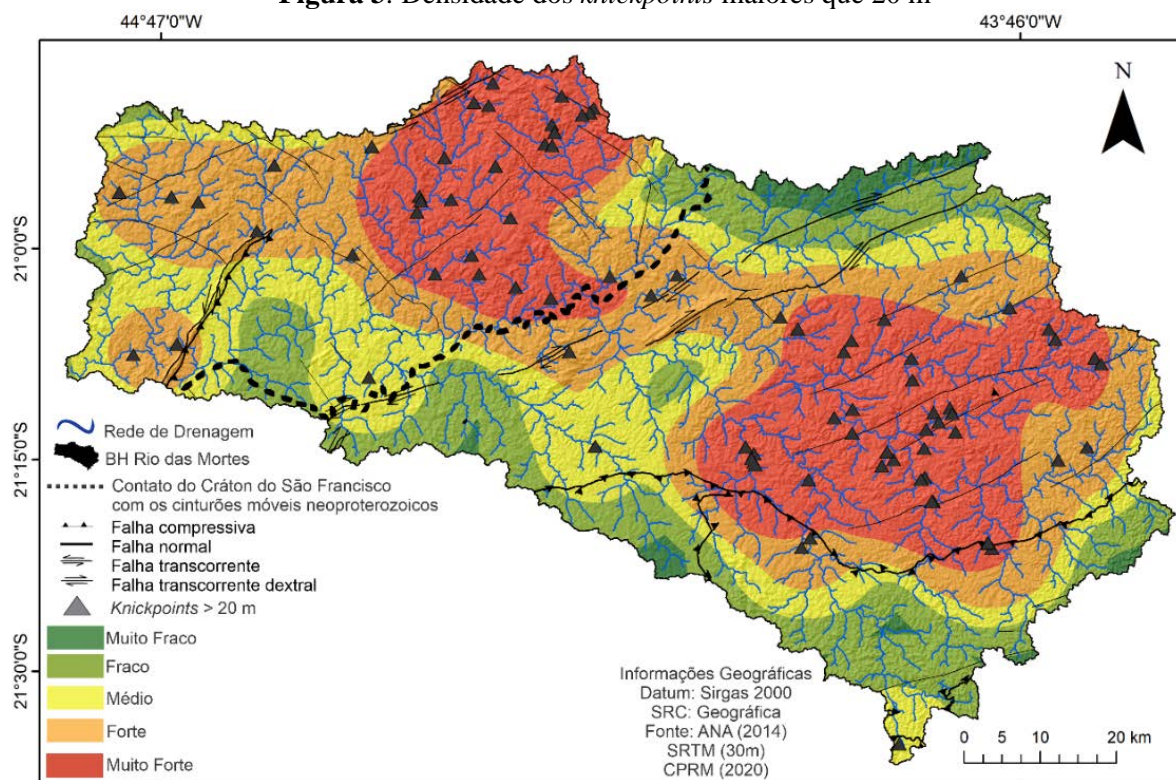


on stream networks’, respectivamente (Schawanghart; Scherler, 2014). Em seguida, os dados foram exportados no formato “*shapefile*” e manipulados no ArcGIS 10.8.1, onde o mapa de densidade de *knickpoints* foi elaborado por meio da função ‘*Kernel Density*’. Finalmente, os *knickpoints* maiores que 20 m foram sobrepostos aos perfis longitudinais e à bacia hidrográfica, permitindo a análise da distribuição e da influência das características geológicas e tectônicas na formação e evolução do relevo fluvial.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

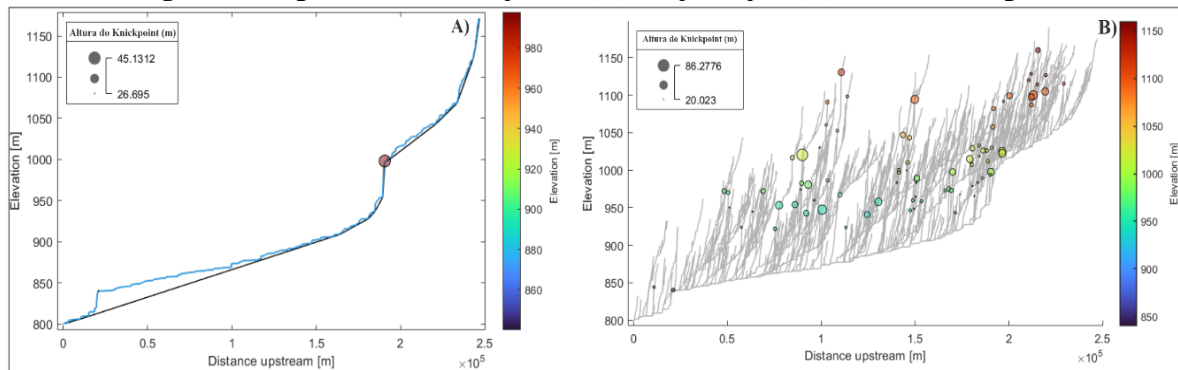
Foram identificados 82 *knickpoints* com altura superior a 20 m. A densidade de *knickpoints* revela a influência de fatores estruturais, concentrando-se na transição dos domínios morfoestruturais, falhas e contatos litológicos, especialmente em áreas com litologias desenvolvidas no paleoproterozoico, nos contatos entre granodiorito, ortogneisse e granito (Figuras 2 e 3).

**Figura 3:** Densidade dos *knickpoints* maiores que 20 m



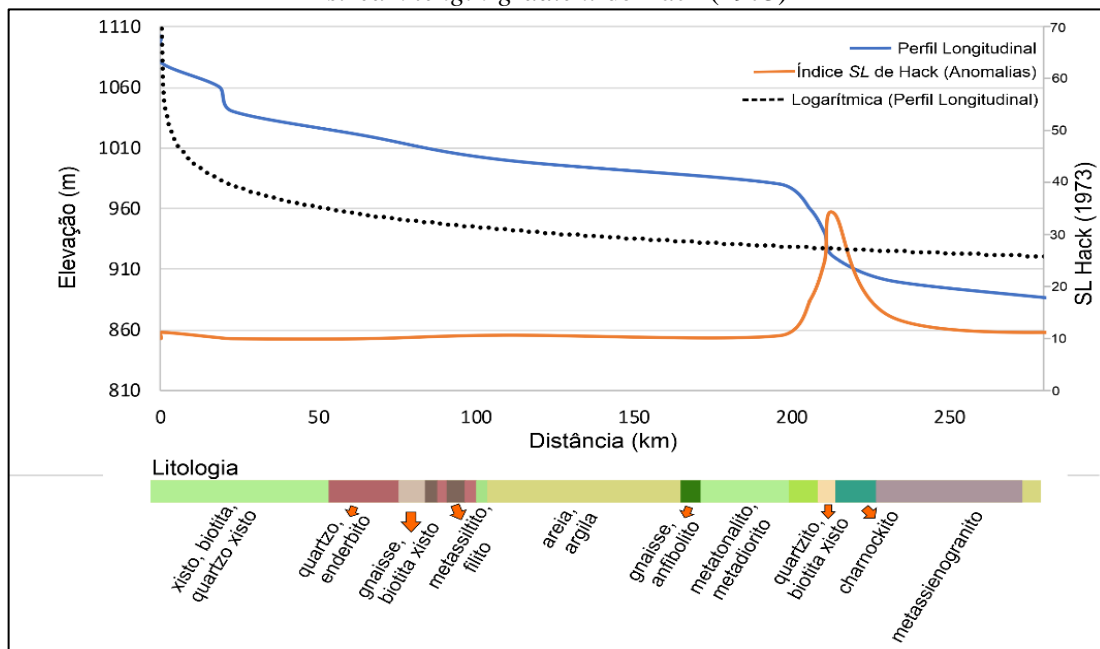
Os perfis longitudinais compostos evidenciaram o reajuste dos rios devido à antiga orogênese neoproterozoica. As maiores magnitudes são observadas nos tributários adjacentes ao rio principal, localizados entre 1000 a 1150 m de altura (Figura 4). A análise dos *knickpoints* revelou semelhanças entre áreas cratônicas e cinturões móveis, oferecendo *insights* sobre a dinâmica morfológica (Figuras 3 e 4).

Figura 4. Magnitude dos knickpoints. (A) rio principal; (B) rede de drenagem



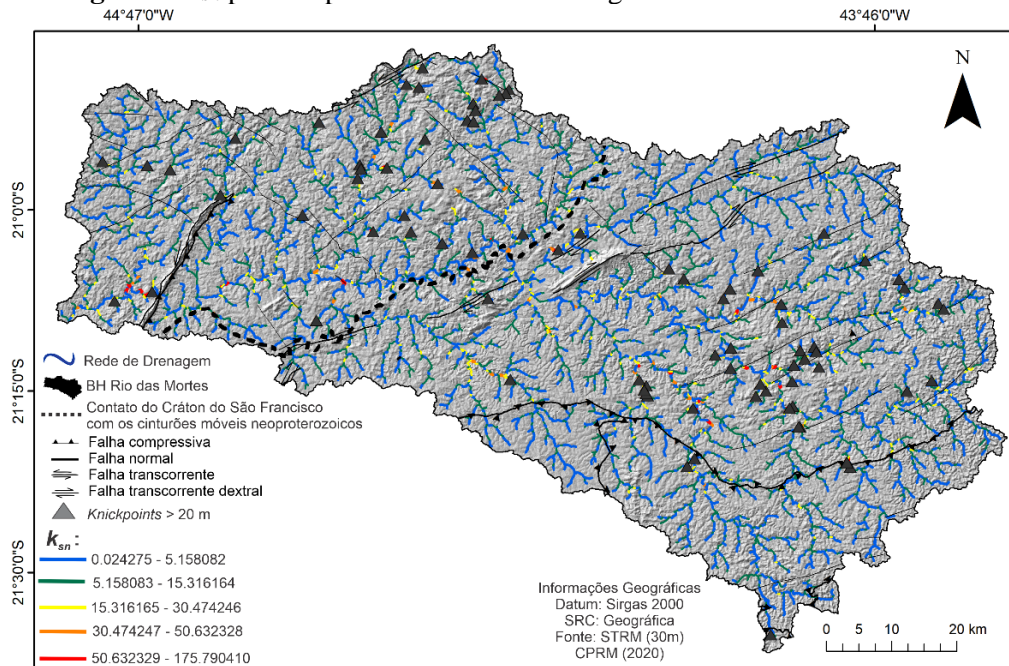
A evolução do canal em regiões cratônicas é mais gradual do que em áreas tectonicamente ativas. Embora possam ter ocorrido eventos tectônicos significativos no passado, a influência tectônica atual é geralmente menor (Allen; Armitage, 2011). Isso resulta em condições mais estáveis para os sistemas fluviais, com menos ajustes morfológicos frequentes semelhantes ao padrão observado na área, onde apenas dois *knickpoints* de baixa magnitude no canal principal foram identificados pelo índice *SL* (Figuras 5). Essas mudanças no declive representam desajustes nos quais o rio reage a variações das rochas e a estruturas falhadas derivadas de antigos eventos tectônicos (Phillips et al., 2010; Silva et al., 2021).

Figura 5. Perfil longitudinal do rio das Mortes evidenciando as anomalias, litologia e valores do *stream length-gradient* de Hack (1973)



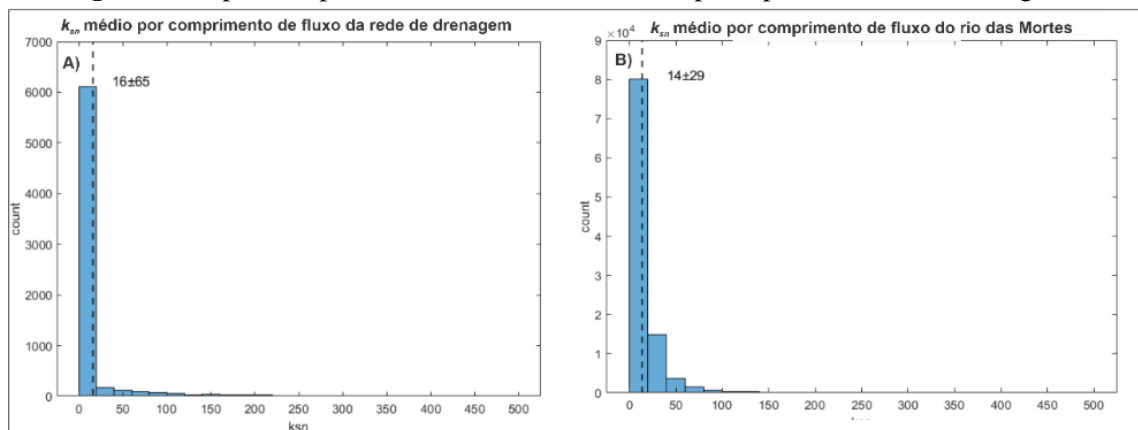
A análise do  $k_{sn}$  revela maior potência fluvial em áreas pós-grandes rupturas de declives, evidenciando zonas de incisão relacionadas às principais morfoestruturas da bacia, com erosão no leito rochoso. Os maiores valores  $k_{sn}$  estão associados a zonas de cisalhamento, variações litológicas com resistências diferenciais à erosão e aos maiores *knickpoints* mapeados (Figuras 2 e 6).

**Figura 6:**  $k_{sn}$  por comprimento fluxo da drenagem da bacia do rio das Mortes



Em termos gerais, as baixas taxas de incisão são indicadas pelo  $k_{sn}$  médio por comprimento do fluxo da drenagem ( $16 \pm 65 \text{ m}^{0.9}$ ) e do canal principal ( $14 \pm 29 \text{ m}^{0.9}$ ). Trechos com valores de  $k_{sn}$  superiores a  $100 \text{ m}^{0.9}$  foram identificados. Entretanto, é notável a maior recorrência de pixels com baixos valores ( $0$  a  $15 \text{ m}^{0.9}$ ). Observou-se que mais de 6.000 pixels da drenagem apresentaram valores de  $k_{sn}$  quase nulos, enquanto apenas 1.000 pixels variaram de  $20$  a  $210 \text{ m}^{0.9}$ , reforçando a constatação de reduzido *stream power* na área (Figura 7).

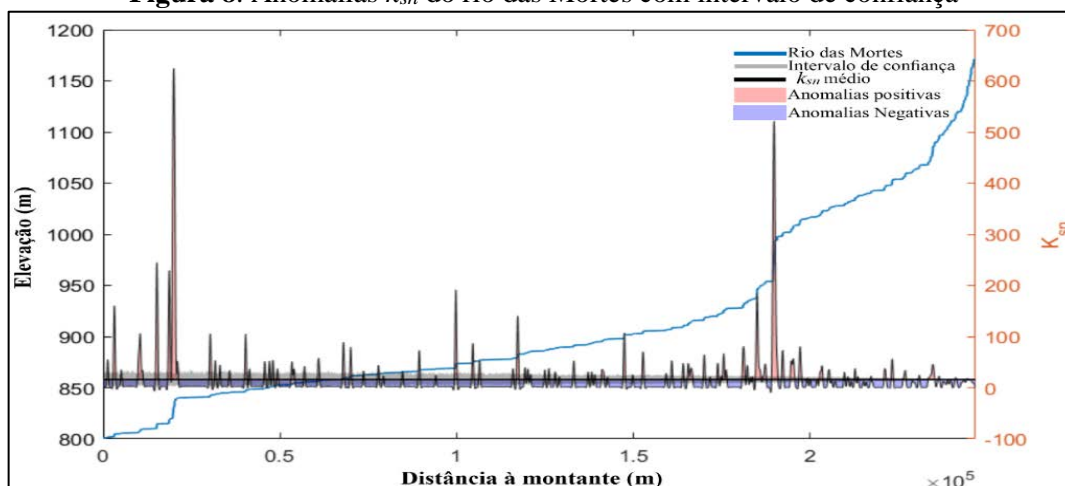
**Figura 7.**  $k_{sn}$  por comprimento médio de fluxo do rio principal e da rede de drenagem.



A partir do cálculo do  $k_{sn}$  médio, foi elaborado o gráfico das anomalias do rio das Mortes com intervalo de confiança de 90% sobre as anomalias positivas e negativas (Figura 8). Observou-se boa aceitação ao longo de todo o trajeto do rio, o que valida o modelo de *stream power* desenvolvido para a drenagem, já que a maioria dos picos permanecem fora dos limites associados aos erros. As anomalias positivas, coincidentes com os principais *knickpoints* mapeados, estão relacionadas aos picos de  $k_{sn}$  de estruturas que interceptam o canal principal.



**Figura 8.** Anomalias  $k_{SN}$  do rio das Mortes com intervalo de confiança



Além das deformações tectônicas, a exposição de rochas com resistências diferenciais à erosão é determinante na evolução do perfil longitudinal. A literatura sustenta que diferentes tipos de rochas respondem de maneira única à erosão, influenciando a configuração do canal (Cook et al., 2009). Para Schumm (1956), as variações atuam como pontos de desequilíbrio e desencadeiam reajustes morfológicos para restabelecer a harmonia no sistema fluvial.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que padrões transientes são observados na evolução de antigos orógenos em margens passivas em resposta a deformações passadas. A análise das métricas de quantificação fluvial proporcionou uma compreensão abrangente da dinâmica geomorfológica da bacia. A interação entre o Cráton do São Francisco e os cinturões móveis foi responsável por moldar a geologia local e impactar a dinâmica fluvial, contribuindo para a heterogeneidade morfológica observada. Os *knickpoints* e as métricas de gradiente fluvial apresentaram correlação estrutural, estando associados a falhas e contatos litológicos com resistência diferenciada à erosão.

## AGRADECIMENTOS

Externamos nossos agradecimentos à FAPEMIG e CAPES, pelo fomento financeiro para participação coletiva em eventos, pesquisa de Iniciação Científica e Mestrado da autora principal.

## REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Base Hidrográfica Ottocodificada da Bacia do Rio Grande**. 2014. 2020. Escalas 1:50000 e 1:100000. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b13fa102-148d-4c4a-b7cd02f23027e5c1>. Acesso em: 10 mai. 2024.

ALLEN, P. A.; ARMITAGE, J. J. Cratonic Basins. **Tectonics Of Sedimentary Basins**, [S.L.], p. 602-620, 30 dez. 2011.

COOK, K. *Let al.* Rapid incision of the Colorado River in Glen Canyon – insights from channel profiles, local incision rates, and modeling of lithologic controls. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.L.], v. 34, n. 7, p. 994-1010, 23 mar. 2009.

HACK J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **J. Res. U.S. Geol. Survey**, v.1, n.4, p.421-429, 1973.

HASUI, Y. A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. **Geociências**, São Paulo, Unesp, v. 29, p. 141-169, 2010.

KIRBY, E.; WHIPPLE, K. X. Expression of active tectonics in erosional landscapes. **Journal Of Structural Geology**, [S.L.], v. 44, p. 54-75, nov. 2012.

WIT. J. M. *et al.* **West Gondwana**: pre-cenozoic correlations across the south atlantic region. 6. ed. London: Geological Society Pub House; Illustrated Edição, 2008. 422 p.

PHILLIPS, J. D. *et al.* Origin and interpretation of knickpoints in the Big South Fork River basin, Kentucky–Tennessee. **Geomorphology**, [S.L.], v. 114, n. 3, p. 188-198, jan. 2010.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, [S.L.], v. 67, n. 5, p. 597, 1956.

SCHWANGHART, W.; KUHN, N. J. TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 25, n. 6, p. 770-781, jun. 2010.

SCHWANGHART, W.; MOLKENTHIN, C.; SCHERLER, D. A systematic approach and software for the analysis of point patterns on river networks. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.L.], v. 46, n. 9, p. 1847-1862, 5 maio 2021.

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. Short Communication: topotoolbox 2-matlab-based software for topographic analysis and modeling in earth surface sciences. **Earth Surface Dynamics**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1-7, 15 jan. 2014. Copernicus GmbH.

SEEBER, L; GORNITZ, V. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. **Tectonophysics**, [S.L.], v. 92, n. 4, p. 335-367, mar. 1983. Elsevier BV.

SILVA, M. A.; PINTO, C. P.; PINHEIRO, M. A. P.; MARINHO, M. S.; LOMBELLO, J. C.; PINHO, J. M. M. P.; GOULART, L. E. A.; MAGALHÃES, J. R. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. CPRM, 2020. Escala 1:1.000.000 Available in: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/21828?show=full>. Access at: 22 feb. 2023.

SILVA, B. A. D. *et al.* Lithostructural and tectonic determinants in the geomorphic evolution of the Basalt Plateau – Southern Brazil. **Journal Of South American Earth Sciences**, [S.L.], v. 110, p. 103-351, out. 2021.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **EarthExplorer**. 2023. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 21 nov. 2023