



INFLUÊNCIA DE FALHA INVERSA NA DINÂMICA FLUVIAL E NA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO DA BACIA DO RIO MACHADO

Rhian Silva Mendonça¹
Marcelo Augusto Ribeiro Pires²
Luisa Baptistella Zanete³
Sofia Soto Bonassa⁴
Isabella Oliveira Carvalho⁵
Raissa Eduarda da Silva Archanjo⁶
Ronaldo Luiz Mincato⁷
Felipe Gomes Rubira⁸

RESUMO

A erosão constitui um processo fundamental na evolução das paisagens, sendo influenciada por fatores tectônicos que condicionam a morfodinâmica das bacias hidrográficas. Este estudo analisa a influência de falhas inversas na dinâmica fluvial e na suscetibilidade à erosão da bacia do rio Machado, localizada no sul de Minas Gerais. A metodologia fundamenta-se na análise integrada da geologia e de parâmetros morfométricos para avaliar a relação entre a tectônica e padrões erosivos. Duas falhas inversas que interceptam a bacia foram analisadas em correlação com variações na declividade do relevo, densidade de lineamentos estruturais e métricas de gradiente fluvial, como o *normalized steepness index* (k_{sn}) e o *channel-hillslope integration* (χ). Adicionalmente, foram aplicados índices como densidade de drenagem (Dd), densidade hidrográfica (Dh) e fator de simetria topográfica transversa ($FSTT$). Os dados foram extraídos do MDE Copernicus GLO-30 (30 m). Os resultados demonstram que as falhas inversas exercem forte controle sobre a dinâmica fluvial e a suscetibilidade erosiva da bacia. Altos valores de Dh estão associados a áreas de maior declividade, especialmente nas escarpas controladas por falhas. A distribuição do Dd indica relevo fragmentado e um escoamento relativamente homogêneo entre os tributários. O $FSTT$ evidencia deslocamento do canal principal em direção ao eixo médio da bacia após a interseção com falhas inversas. A concentração de lineamentos nas proximidades dessas estruturas reforça o controle tectônico na dissecação do relevo. Perfis longitudinais e χ -plots revelam correlação entre k_{sn} e zonas de deformação do ciclo Brasileiro, evidenciando processos erosivos que rejuvenescem a topografia. Conclui-se que índices morfométricos, tradicionalmente empregados em estudos de evolução da paisagem, podem ser incorporados a modelagens ambientais voltadas à identificação da suscetibilidade à erosão em bacias hidrográficas.

¹ Graduando do Curso de Geografia (Bacharelado) da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, rhian.mendonca@sou.unifal-mg.edu.br;

² Graduando do Curso de Geografia (Licenciatura) da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, marcelo.pires@sou.unifal-mg.edu.br;

³ Graduanda do Curso de Geografia (Licenciatura) da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, luiza.zanete@sou.unifal-mg.edu.br;

⁴ Graduanda do Curso de Geografia (Bacharelado) da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, sofia.bonassa@sou.unifal-mg.edu.br;

⁵ Graduada pelo curso de Geografia (Bacharelado) da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, isabella.carvalho@sou.unifal-mg.edu.br;

⁶ Bacharel em Geografia e Mestranda em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, raissa.archanjo@sou.unifal-mg.edu.br;

⁷ Docente do Instituto Ciências da Natureza (ICN) da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, ronaldo.mincato@sou.unifal-mg.edu.br;

⁸ Professor Orientador: Doutor e Docente do Instituto Ciências da Natureza da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, felipe.rubira@sou.unifal-mg.edu.br;



INTRODUÇÃO

A organização e o comportamento das redes de drenagem em bacias hidrográficas são condicionados por controles tectônicos e litológicos, que influenciam o padrão da drenagem, a distribuição da energia fluvial a morfologia dos canais e a dissecação do relevo (Cruz et al., 2005; Reis et al., 2023). Nesse contexto, declividades acentuadas e anomalias topográficas podem refletir a atuação de estruturas geológicas como falhas e dobras, indicando zonas de instabilidade geomorfológica (Gaspar, 2010). Estruturas tectônicas antigas, como falhas reativadas, podem orientar o traçado fluvial, promover deslocamentos de canais e condicionar a modificação dos níveis de base (Cavalcante et al., 2020; Bowman et al., 2023).

Falhas inversas, em particular, estão associadas a movimentos compressivos e ao soerguimento de blocos, favorecendo o desenvolvimento de escarpas, rupturas na rede de drenagem e zonas de alta energia fluvial. A presença de rochas menos resistentes, em combinação com forte controle estrutural e climas tropicais, tende a intensificar os processos erosivos e a remodelar a morfologia do relevo (Stark et al., 2010; Zerfass; Chemale Junior, 2011). Essas transformações, por sua vez, resultam em mudanças nos padrões morfodinâmicos, influenciando diretamente a evolução das bacias hidrográficas (Rosgen, 1994; Snyder et al., 2000).

Compreender esses processos é fundamental para avaliar a suscetibilidade à erosão e identificar áreas críticas em termos de estabilidade do terreno. A morfologia e a organização dos canais são determinantes para o diagnóstico de áreas de risco e de degradação, além de refletirem a interação entre forçantes externas e respostas internas do sistema fluvial (Ross Schumm, 1977; Ross, 1990). Segundo Ross (1990), compreender os processos geomorfológicos é fundamental para uma gestão territorial eficaz.

Apesar da relevância desses elementos, a escassez de estudos geomorfológicos em planos de manejo e gestão hídrica tem limitado a eficácia das ações de mitigação de impactos ambientais. A aplicação de ferramentas quantitativas e geoespaciais tem ampliado a capacidade de identificar áreas suscetíveis à degradação e propor estratégias para conservação e recuperação de ecossistemas fluviais (Marçal et al., 2005). O fortalecimento de abordagens sistêmicas tem permitido diagnosticar com maior precisão a influência de processos exógenos e endógenos sobre a organização das drenagens e a evolução do relevo (Christofolletti, 1999; Mattos; Perez Filho, 2004).

Neste contexto, a bacia do rio Machado, localizada no sul de Minas Gerais, apresenta feições que indicam expressivo controle tectônico na rede de drenagem e nos processos erosivos. Diante disso, este estudo objetiva analisar a influência de falhas inversas na dinâmica fluvial e na suscetibilidade à erosão da bacia, com base em evidências morfoestruturais.

METODOLOGIA

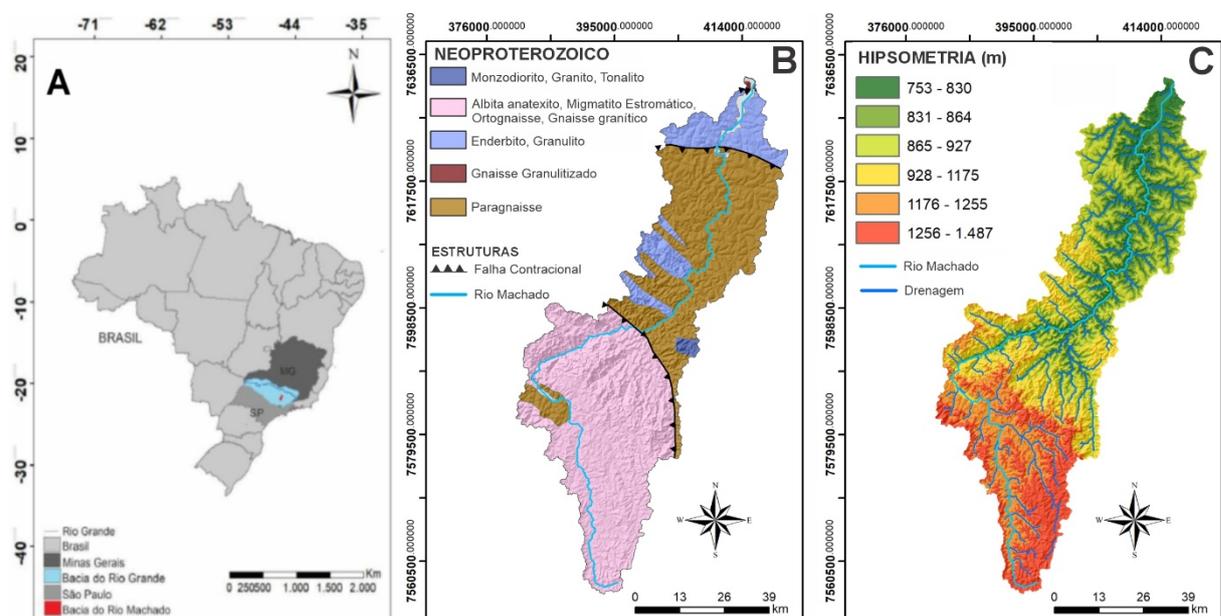
ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Machado localiza-se no sul de Minas Gerais, abrangendo 1.179,79 km², com cabeceiras no Planalto de São Pedro de Caldas e foz no reservatório da UHE de Furnas (Figura 1A). É uma sub-bacia do rio Sapucaí, integrante da bacia do rio Grande.

O embasamento geológico é formado por rochas neoproterozoicas de alto grau metamórfico, como gnaisses, paragnaisses, migmatitos e granulitos, além de granitos intrusivos (Figura 1B). Essas litologias são intensamente deformadas por estruturas compressivas, com falhas de empurrão orientadas preferencialmente segundo NW–SE a NNW–SSE e W-E, que controlam a compartimentação do relevo (Silva et al., 2020).

O relevo da bacia é moldado pelo Planalto de São Pedro de Caldas, com altitudes mais elevadas, seguido pelos Patamares de Varginha, em altitudes mais baixas (Figura 1C). Entre esses compartimentos, há escarpas planálticas com declividades acentuadas.

Figura 1: (A) localização da área; (B) mapa geológico; (C) hipsometria





MATERIAIS

Foram utilizados dados altimétricos, hidrológicos e geológicos para subsidiar a análise morfoestrutural da bacia do rio Machado. Todos os parâmetros morfométricos foram derivados do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus GLO-30, com resolução espacial de 30 metros, obtido por meio da plataforma *OpenTopography*. Complementarmente, empregaram-se arquivos vetoriais (*shapefiles*) da rede de drenagem, nas escalas 1:100.000 e 1:50.000, oriundos da base hidrográfica otocodificada da bacia do rio Grande, disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2014). Para a caracterização geológica, foi utilizado o *shapefile* geológico do Estado de Minas Gerais, na escala 1:1.000.000, fornecido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (Silva et al., 2020).

O tratamento e a análise dos dados foram realizados nos softwares ArcGIS 10.8, MATLAB 2021, Global Mapper 23, PCI Geomatica 2016 e RockWorks 16. A representação cartográfica final dos mapas temáticos, gráficos e diagramas foi realizada no CorelDRAW 2021, integrando os resultados das diferentes etapas do processamento espacial.

MÉTODOS

A metodologia adotada teve como objetivo identificar desequilíbrios nos perfis fluviais e a influência tectônica sobre a drenagem da bacia do rio Machado. Para isso, foram aplicadas métricas de gradiente fluvial, como os índices k_{sn} e χ (*chi*), além de indicadores complementares de simetria, assimetria, densidade hidrográfica e lineamentos estruturais.

EXTRAÇÃO DA DRENAGEM E GERAÇÃO DOS PERFIS LONGITUDINAIS

O MDE foi processado no ambiente MATLAB v.2021a, utilizando o pacote TopoToolbox 2 (Schwanghart; Scherler, 2014). Aplicou-se o algoritmo ‘*carve*’ para correção hidrológica, seguido da imposição de um declive mínimo de 0,0001 m com a função ‘*imposemin*’, a fim de eliminar depressões espúrias. A rede de drenagem foi extraída considerando uma área mínima de contribuição de 500 *pixels*, e os canais de primeira ordem com extensão inferior a 10 km foram removidos com a função ‘*removeshortstreams*’.

Os perfis longitudinais foram gerados com a função ‘*plotdz*’, e suavizados com o método *constrained regularized smoothing* (CRS), utilizando parâmetros de suavização $K = 5$ e $\tau = 0,5$. Essa suavização visou reduzir ruídos altimétricos preservando a morfologia geral dos perfis.



NORMALIZED STEEPNESS INDEX KSN E CHANNEL–HILLSLOPE INTEGRATION

O índice de declividade normalizada do canal (k_{sn}) foi aplicado para estimar a potência fluvial ao longo da rede de drenagem, conforme a equação:

$$k_{sn} = SA^{-\theta_{ref}}$$

Onde: S é o valor gradiente; A é área da bacia de drenagem a montante e θ é o índice de concavidade de referência (Kirby; Whipple, 2012).

A concavidade de referência foi estimada com base no método ‘*mnoptimvar*’, resultando em $mn = 0,5043$, valor utilizado nas etapas subsequentes de cálculo do k_{sn} e da transformação χ . Os valores de k_{sn} foram agregados em segmentos de 1000 m, a fim de reduzir oscilações pontuais. A transformação χ foi aplicada por meio da função ‘*chitransform*’, com base na métrica *channel–hillslope integration* (Perron; Royden, 2013).

ÍNDICES MORFOMÉTRICOS COMPLEMENTARES

Complementarmente, foram calculados os índices de simetria topográfica transversa ($FSTT$) e de assimetria da bacia de drenagem ($FABD$), com o intuito de avaliar evidências de basculamento tectônico e reorganização da rede hidrográfica (Hare; Gardner, 1985; Cox, 1994).

O $FSTT$ foi definido pela razão:

$$FSTT = \frac{Da}{Dd}$$

Sendo Da a distância média entre o canal principal e o eixo médio da bacia, e Dd a distância entre o eixo médio e o divisor mais próximo.

Por sua vez, $FABD$ foi determinado a partir da razão entre a área à direita do canal principal (Ar) e a área total da bacia (At):

$$FABD = 100 \cdot \frac{Ar}{At}$$

Também foram calculados os índices de densidade de drenagem (Dd) e densidade hidrográfica (Dh), a fim de caracterizar a rede fluvial e investigar possíveis condicionamentos litoestruturais. A Dd foi determinada pela razão entre o comprimento total dos canais (Lt) e a área da bacia (A), conforme Horton (1945):

$$Dd = \frac{Lt}{A}$$

A Dh foi obtida pela razão entre o número de canais (N) e a área da bacia (A), segundo Christofolletti (1969):

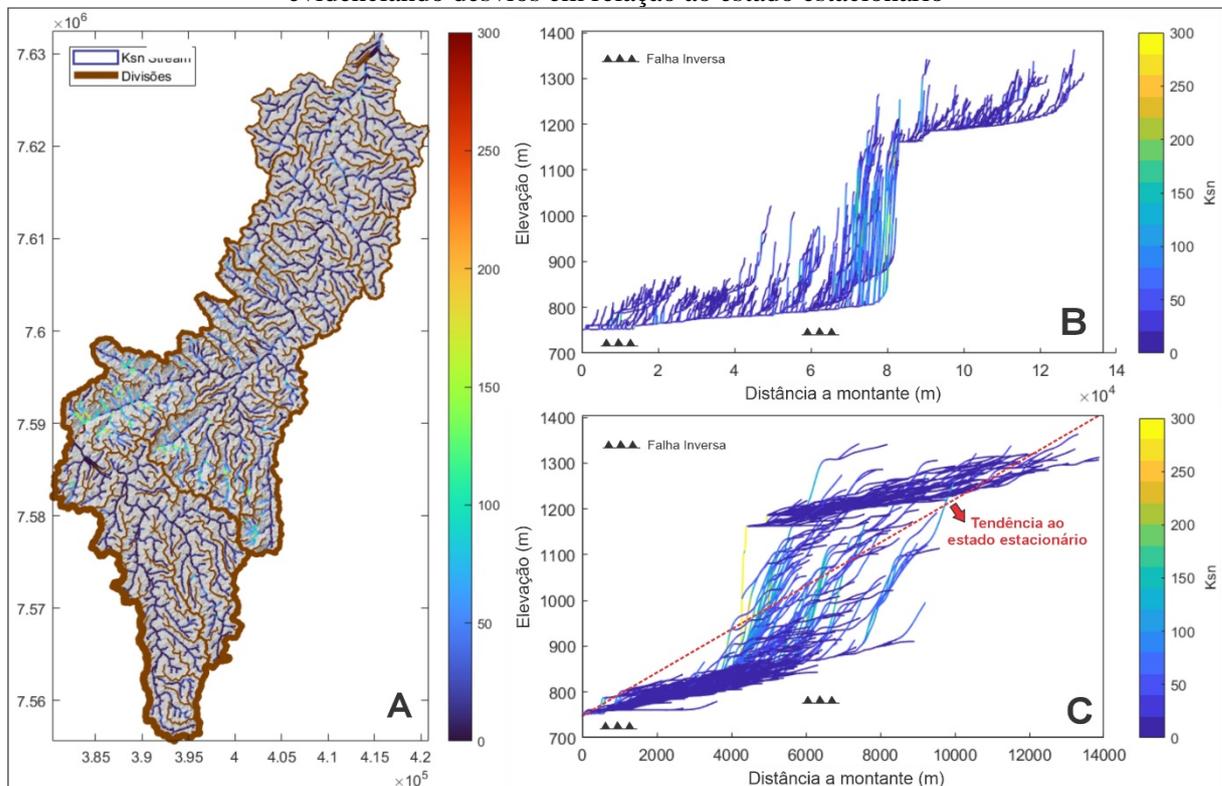
$$DH = \frac{N}{A}$$

Por fim, os lineamentos estruturais foram extraídos a partir de imagens *hillshade* multidirecionais geradas com o MDE. Os *shapefiles* resultantes foram processados nos softwares PCI Geomatica 2016 e no ArcGIS 10.8, sendo refinados manualmente para correção de duplicidades. A densidade de lineamentos foi calculada com a ferramenta ‘*Kernel Density*’, classificada por quantis. Posteriormente, as direções dos lineamentos foram analisadas em diagramas de rosetas gerados no software RockWorks 17, permitindo identificar as orientações predominantes e possíveis controles estruturais sobre a drenagem da bacia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciam o papel das falhas inversas no controle da dinâmica fluvial da bacia do rio Machado, influenciando o padrão da drenagem, a distribuição da energia fluvial e a dissecação do relevo, especialmente nas vertentes adjacentes às escarpas planálticas (Figura 2).

Figura 2: (A) Mapa em planta com a drenagem colorida por valores de k_{sn} sobreposta ao relevo sombreado; (B) Perfis longitudinais com coloração por k_{sn} ; (C) χ -plots (elevação versus χ), evidenciando desvios em relação ao estado estacionário



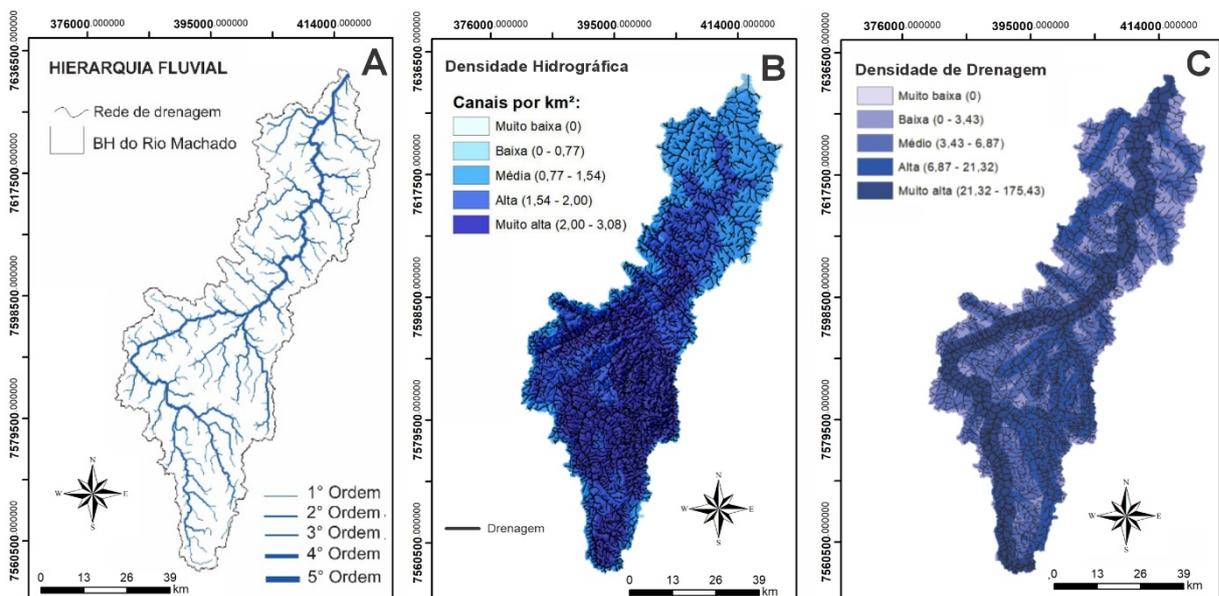
O mapa de valores do k_{sn} revela a concentração de trechos com alto gradiente nos canais próximos a zonas de falha, refletindo áreas de maior potência fluvial e rejuvenescimento

topográfico (Figura 2A). Nos perfis longitudinais (Figura 2B), essas áreas se associam a *knickpoints* abruptos e a aumentos locais de declividade que coincidem espacialmente com estruturas compressivas mapeadas.

Nos χ -plots (Figura 2C), observa-se a coexistência de trechos lineares, que indicam para equilíbrio entre elevação tectônica e erosão, bem como de setores com elevada dispersão e descontinuidade, indicativos de estados transitórios e instabilidade morfodinâmica. Os canais próximos das zonas de cisalhamento exibem rupturas e desvios, evidenciando perturbações possivelmente associadas à deformação crustal reativada. Nessas áreas, o aumento da suscetibilidade erosiva nas encostas adjacentes é latente. Em contraste, os canais mais distantes das falhas tendem à linearidade, sugerindo menor interferência tectônica recente. Trechos lineares em setores elevados a montante representam superfícies relíquias preservadas.

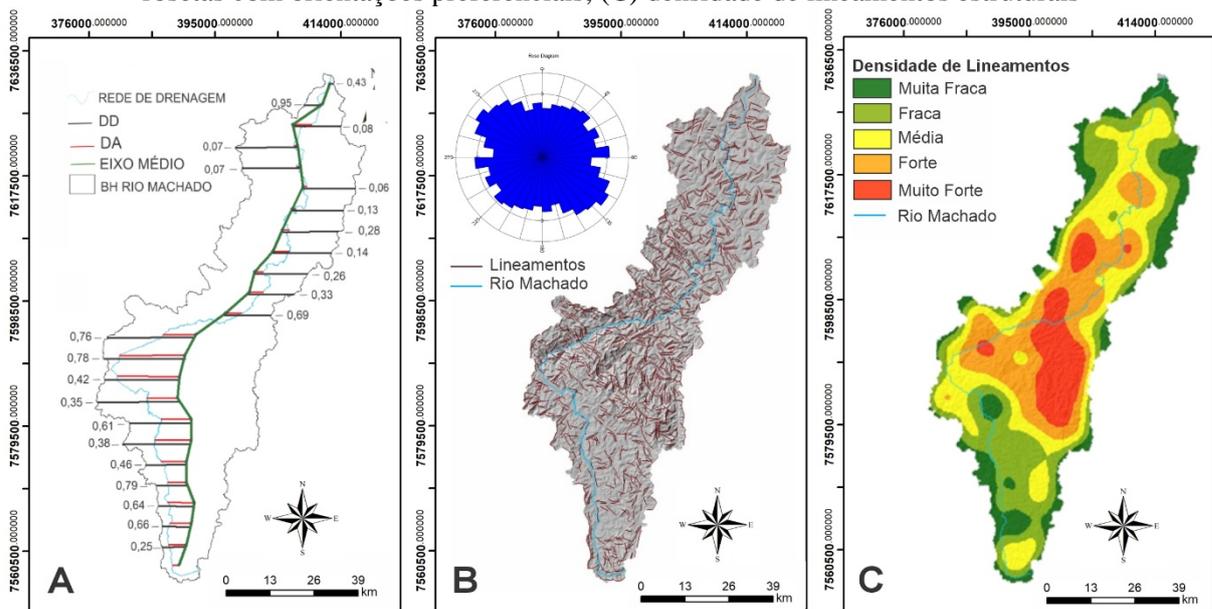
A hierarquia fluvial da bacia compreende canais de até 5ª ordem (Figura 3A). A densidade hidrográfica, definida como a razão entre o número total de canais (1.960) e a área da bacia (1.179,9 km²), resultou em 1,66 canais/km². Os maiores valores (2,00 a 3,08 canais/km²) concentram-se em setores com maior declividade, especialmente nas escarpas planálticas sob controle de falhas de empurrão, onde o escoamento superficial é intensificado, elevando a suscetibilidade à erosão. A densidade de drenagem, com média de 1,90 km/km², indica um relevo dissecado e um padrão de escoamento relativamente homogêneo entre os tributários. Os maiores valores de *Dd* ocorrem ao longo do canal principal e em afluentes de maior ordem, que drenam setores topograficamente mais acidentados (Figura 3C).

Figura 3: (A) Hierarquia fluvial; (B) Densidade hidrográfica; (C) Densidade de drenagem



O índice de simetria topográfica transversa (*FSTT*) indica o deslocamento lateral do canal principal em direção ao eixo médio da bacia (Figura 4A), com valores assimétricos predominando no médio e alto curso do rio Machado, após a interseção com falhas inversas. A razão de área entre as margens (*FABD*), com valor de 60,74%, reforça essa tendência, sugerindo reorganização da rede de drenagem induzida por esforços compressivos.

Figura 4: (A) Fator de Simetria Topográfica Transversa; (B) Lineamentos estruturais e diagrama de rosetas com orientações preferenciais; (C) densidade de lineamentos estruturais



A análise de lineamentos estruturais e do diagrama de rosetas (Figura 4B) evidenciou predomínio das direções de direções NW–SE, NNW–SSE e W-E, em concordância com as principais falhas inversas reconhecidas na bacia. A densidade de lineamentos (Figura 4C) é mais elevada nos setores central e norte da bacia, que coincidem com áreas de vertentes mais íngremes, altos valores de k_{sn} e rupturas nos perfis longitudinais. Essa correspondência espacial entre estruturas tectônicas e feições morfométricas reforça a hipótese de reativações recentes controlando a organização da rede de drenagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração entre dados morfométricos (Dd , Dh , $FSTT$, $FABD$), informações geológicas, padrões de lineamentos estruturais e índices de gradiente fluvial (k_{sn} e χ) evidencia que a rede de drenagem da bacia do rio Machado se encontra fortemente condicionada pela tectônica compressiva neoproterozoica associada ao ciclo Brasileiro-Pan-Africano. As falhas



inversas exercem controle direto sobre a organização dos canais, favorecendo a migração lateral do talvegue, o desenvolvimento de *knickpoints* e o aumento da potência fluvial local. As feições identificadas refletem desequilíbrios nos perfis longitudinais, compatíveis com o efeito de estruturas reativadas, caracterizando um cenário de ajuste morfotectônico em andamento, com rejuvenescimento topográfico e aumento da suscetibilidade à erosão nas vertentes adjacentes.

Adicionalmente, os resultados demonstram que índices tradicionalmente utilizados na análise da evolução da paisagem podem ser incorporados em modelagens ambientais voltadas à identificação de áreas suscetíveis à erosão. Destaca-se, em particular, o k_{sn} , que permite delimitar setores de maior potencial erosivo em canais de leito rochoso, funcionando como indicador da dinâmica hidrogeomorfológica em ambientes estruturalmente condicionados.

Palavras-chave: Canais fluviais; Perfis longitudinais; Gradiente fluvial; Índices morfométricos; Controle estrutural.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o suporte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por meio da chamada 016/2024 que visa fornecer apoio à participação coletiva em eventos de natureza técnico-científica.

REFERÊNCIAS

ANA. **Base Hidrográfica Ottocodificada da Bacia do Rio Grande**. Brasília: ANA, 2014. Escala 1:50.000.

BOWMAN, D. Base-Level Rise. BOWMAN, D. (Ed.). **Base-level Impact: A Geomorphic Approach**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 33–36.

CAVALCANTE, D. R.; BASTOS, F. H.; CORDEIRO, A. M. N. Controle estrutural da drenagem na bacia hidrográfica do rio Coreaú, Ceará, Brasil. **Revista GeoUECE**, v. 9, n. 17, p. 152–168, 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

COX, R. T. Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi embayment. **Geological Society Of America Bulletin**, Memphis, v. 106, n. 5, p. 571-581, 1994.

CRUZ, B. L et al. Reorganization of the drainage network based on morphostructural controls in passive margins. **Geomorphology**, v. 478, 109693, 2025.



GASPAR, Diogo Fonseca Alves. **Desenvolvimento de dobras e falhas em ambiente distensional: aplicação da modelagem física**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

HARE P. W; GARDNER I. W. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins. Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: MORISAWA M.; HACK J. T (org.) **Tectonic Geomorphology**. Proceedings 15th. Annual Binghamton Geomorphology Simp., 1985. Boston: Unwin, p.76-104.

KIRBY, E.; WHIPPLE, K. X. Expression of active tectonics in erosional landscapes. **Journal of Structural Geology**, v. 44, p. 54–75, 2012.

MARÇAL, A. R. S. et al. Land cover update by supervised classification of segmented ASTER images. **International Journal of Remote Sensing**, v.26, p.1347-1362, 2005.

MATTOS, S. H. V. L.; PEREZ FILHO, A. Complexidade e estabilidade em sistemas geomorfológicos: uma introdução ao tema. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 5 n.1, p. 11-18, 2004.

PERRON, J. T.; ROYDEN, L. An integral approach to bedrock river profile analysis. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 6, p. 570-576, 2013.

REIS et al. Morphometric parameters of the relief and drainage network of the Formiga River subbasin, Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.24 n.2, e2311, 2023.

ROSGEN, D. L. A classification of natural Rivers. **Catena**, v. 22, n.3, p.169-199, 1994.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. São Paulo: Contexto, 1990.

SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. Caldwell: The Blackburn Press, 1977.

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. Short Communication: TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 2, n. 1, p. 1-7, 2014.

SILVA, M. A. et al. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais. CPRM, 2020**. Escala 1:1.000.000.

SNYDER, N. P. et al. Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. **Geological Society of America Bulletin**, v. 112, n. 8, p. 1250-1263, 2000.

STARK, C. P. et al. The climatic signature of incised river meanders. **Science**, v. 327, n. 5972 p. 1497-1501, 2010.

ZERFASS, H.; CHEMALE JUNIOR, F. Geologia estrutural em ambiente rúptil: fundamentos físicos, mecânica de fraturas e sistemas de falhas naturais. **Terrae Didatica**, v. 7, n. 2, p. 75-85, 2011.