



APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE HACK PARA IDENTIFICAÇÃO DE *KNICKPOINTS* NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CHAPECÓ (SC) ¹

Igor William Andriolli ²
William Zanete Bertolini ³

RESUMO

Knickpoints são feições fluviais associadas a descontinuidades no perfil longitudinal dos rios, refletindo fatores tectônicos recentes, litológico-estruturais e climáticos. Caracterizam-se por trechos de maior declive, influenciando a erosão, o transporte sedimentar e a evolução da paisagem. O índice de Hack permite identificá-los por meio da relação entre o comprimento e o gradiente dos canais, com mudanças abruptas nos valores desse índice indicando possíveis zonas de instabilidade tectônica. Este estudo analisou a distribuição espacial de *knickpoints* na bacia hidrográfica do rio Chapecó (BHRC), no contexto dos derrames efusivos do Grupo Serra Geral. Utilizando dados do BDGEX (1:50.000) e SIG, foram analisados 56 afluentes dos rios Chapecó e Chapecozinho. *Knickpoints* foram definidos para cada um dos 56 canais como (i) trechos do canal entre curvas de nível com valores do índice de Hack acima da média aritmética e (ii) acima da média acrescida de um desvio padrão. Identificaram-se 284 *knickpoints* com o primeiro critério e 107 com o segundo. A maior parte dos 107 *knickpoints* localizam-se sobre litologias básicas e no Planalto Dissecado do Rio Uruguai, sendo 17 associados a falhas e fraturas e 18 associados às escarpas erosivas. Quanto à distribuição altimétrica, há predomínio dessas feições na média BHRC. Em relação à declividade, 80 *knickpoints* têm menos de 0,1 m/m, 25 variam entre 0,1 e 0,3 m/m e apenas 2 superam 0,3 m/m. Os *knickpoints* observados em campo apresentam diversidade morfológica, incluindo degraus, corredeiras e cachoeiras, e funcionam como importantes indicadores geodinâmicos na BHRC.

Palavras-chave: processos erosivos, morfometria fluvial, dinâmica erosiva, geomorfologia estrutural, indicadores tectônicos.

INTRODUÇÃO

A história geomorfológica do alto rio Uruguai está intrinsecamente relacionada à dinâmica da rede de drenagem, considerada um dos principais agentes morfogenéticos da paisagem planáltica da porção sul da bacia sedimentar do Paraná. O relevo atual resulta da interação entre fatores tectônicos, climáticos e hidrológicos. Essa dinâmica originou

¹ Artigo com resultado parcial de dissertação de Mestrado em Geografia, com bolsa de mestrado fomentada pela FAPESC Edital 48/2021.

² Mestrando do Curso de Geografia da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, igor_andriolli@hotmail.com

³ Professor orientador associado de Geografia Física da Universidade Federal da Fronteira Sul- UFFS, william.bertolini@uffs.edu.com



uma paisagem compartimentada em planaltos de diferentes níveis altimétricos com vales profundos e encaixados.

No contexto do alto rio Uruguai situa-se a bacia hidrográfica do rio Chapecó (BHRC), com uma área de drenagem de cerca de 8300 km². Essa bacia apresenta um relevo desenvolvido sobre os derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral. Do ponto de vista geomorfológico, está associado à Zona das Missões e ao Planalto das Araucárias (Almeida, 1956; Bartorelli, 2004). Segundo Potter (1997), o padrão de drenagem orientado para oeste pode ser um vestígio de sistemas fluviais antigos da época do supercontinente Gondwana.

Entre as feições relevantes da rede de drenagem destacam-se os *knickpoints*, rupturas de declividade que se expressam como cachoeiras, corredeiras, soleiras e degraus nos leitos fluviais. Essas feições podem indicar tanto processos de reorganização interna dos canais quanto a influência de falhamentos e fraturas associados a esforços tectônicos (Gailleton et al., 2019; Sordi et al., 2018) ou mesmo a características estruturais da litologia, como juntas de resfriamento (Lima e Flores, 2017; Lima, 2023). Dada a extensiva ocorrência na BHRC e a origem e significados ainda incertos dessas feições fluviais, o presente trabalho teve como objetivo analisar a distribuição espacial dos *knickpoints* nesta bacia, visando identificar possíveis associações com outras variáveis de caráter geológico e geomorfológico, bem como a possibilidade de se configurarem como registros de eventos tectônicos intraplaca. Para isso, aplicou-se o índice de Hack em 56 canais afluentes dos níveis de base da BHRC, isto é, os rios Chapecó e Chapecozinho.

METODOLOGIA

Neste trabalho, os *knickpoints* foram identificados na escala de 1:50.000, com base na cartografia sistemática disponibilizada pelo Banco de Dados Geográficos do Exército do Brasil (BDGEX). A identificação utilizou a relação entre declive e comprimento dos canais, expressa pelo índice de Hack (1957), aplicada aos 56 canais afluentes. A seleção dos canais buscou representar de forma abrangente os trechos de alta, média e baixa BHRC, contemplando as duas litologias predominantes (rochas ácidas e básicas) e os dois compartimentos geomorfológicos (Planalto Dissecado do Rio Uruguai e Planalto dos Campos Gerais).

Os valores do índice de Hack foram mensurados entre as curvas de nível da cartografia de 1:50.000, desde a nascente até a foz de cada canal. Os *knickpoints* foram



identificados a partir de dois critérios estatísticos aplicados aos valores do índice de Hack: (i) valores do índice de Hack superiores à média aritmética de cada canal e (ii) valores do índice de Hack superiores a essa média acrescida de um desvio padrão, para cada canal. A média diz respeito à média aritmética de todos os trechos do canal para os quais o índice foi mensurado. Trechos consecutivos anômalos foram interpretados como zonas de rupturas de declives (*knickzones*). O critério de $> \text{média} + 1\text{dp}$ segue foi o mesmo aplicado por Das (2018) na bacia do rio Pravara (Índia), também em litologia basáltica, e está de acordo com as recomendações de Hack (1973) e Peifer et al. (2020), que destacam a importância de considerar variações relativas ao longo do canal em contraposição às características geomorfológicas e geológicas locais. A extração e tratamento dos dados topográficos ocorreram em ambiente SIG (QGIS), enquanto a análise estatística foi realizada no Microsoft Excel, com o auxílio do suplemento Real Statistics (Zaiontz, 2025).

A distribuição geográfica dos *knickpoints* foi analisada em relação ao mapeamento geológico (Mapa Geológico de Santa Catarina – CPRM, 2014) e à presença de falhas e fraturas identificadas na mesma fonte, em escala de 1:500.000. Foi também realizada a contraposição dos *knickpoints* ao mapeamento geomorfológico do Projeto Radam Brasil (IBGE, 2018), com destaque para as feições, escarpas erosivas e a borda da cratera de impacto do Domo de Vargeão (SC).

A BHRC foi subdividida em três setores baseados na hipsometria derivada do MDE ALOS PALSAR, com resolução de 12,5 metros: alta bacia (acima de 1.080 metros); média bacia (entre 700 e 1.079 metros); e baixa bacia (abaixo de 699 metros) de altitude.

A etapa da realização de trabalhos de campo foi essencial para reconhecimento e validação dos valores do índice de Hack, distinguindo visualmente entre grandes rupturas (cachoeiras) e pequenos ressaltos de canal, além de caracterizar litologia, e morfologia local. Para fins de representação cartográfica, os *knickpoints* foram apresentados como pontos, ainda que conforme a metodologia adotada correspondem a trechos de canais.

REFERENCIAL TEÓRICO

Os *knickpoints* são feições geomorfológicas que indicam mudanças abruptas na inclinação do leito fluvial, associadas a processos tectônicos, variações litológicas e alterações no nível de base (Scheingroos et al., 2020; Wohl, 1998). Esses pontos



representam áreas de maior dissipação de energia, fundamentais para compreender a dinâmica dos rios, a interação com a geologia e os processos hidrossedimentares. Sua formação está ligada a perturbações externas, como soerguimentos e mudanças no nível de base (Gailleton et al., 2019), bem como à estratificação litológica e direção do fluxo (Miller, 1991; Wohl et al., 1994 apud Wohl, 1998).

O índice de Hack, proposto por Hack (1957; 1973), é amplamente utilizado para identificar *knickpoints*, ao quantificar a relação entre extensão e declividade dos canais, detectando mudanças abruptas que sugerem atividade tectônica ou variações litológicas (Burbank e Anderson, 2001). Sousa, Martins e Faria (2011) aplicaram essa metodologia no rio Zêzere, em Portugal, utilizando o perfil longitudinal, Modelos Digitais de Elevação (MDE) e o índice de Hack para identificar *knickpoints* associados a abatimentos tectônicos e à influência de soleiras quartzíticas na regulação erosiva. A utilização de MDEs tem facilitado a análise desses processos e feições em regiões de difícil acesso.

O conceito de nível de base, que regula a erosão remontante, é essencial para entender a dinâmica fluvial, influenciando zonas de sedimentação e erosão (Christofolletti, 1980). Mudanças eustáticas ou tectônicas nesse nível podem induzir a migração de *knickpoints* e a reconfiguração dos perfis fluviais (Magalhães Júnior, Barros e Cota, 2020; Zaprowski, Pazzaglia e Evenson, 2005). Em rios de leito rochoso, *knickpoints* também podem resultar da resistência diferencial das litologias, formando cachoeiras e corredeiras que alteram o fluxo e a sedimentação (Wohl, 1998).

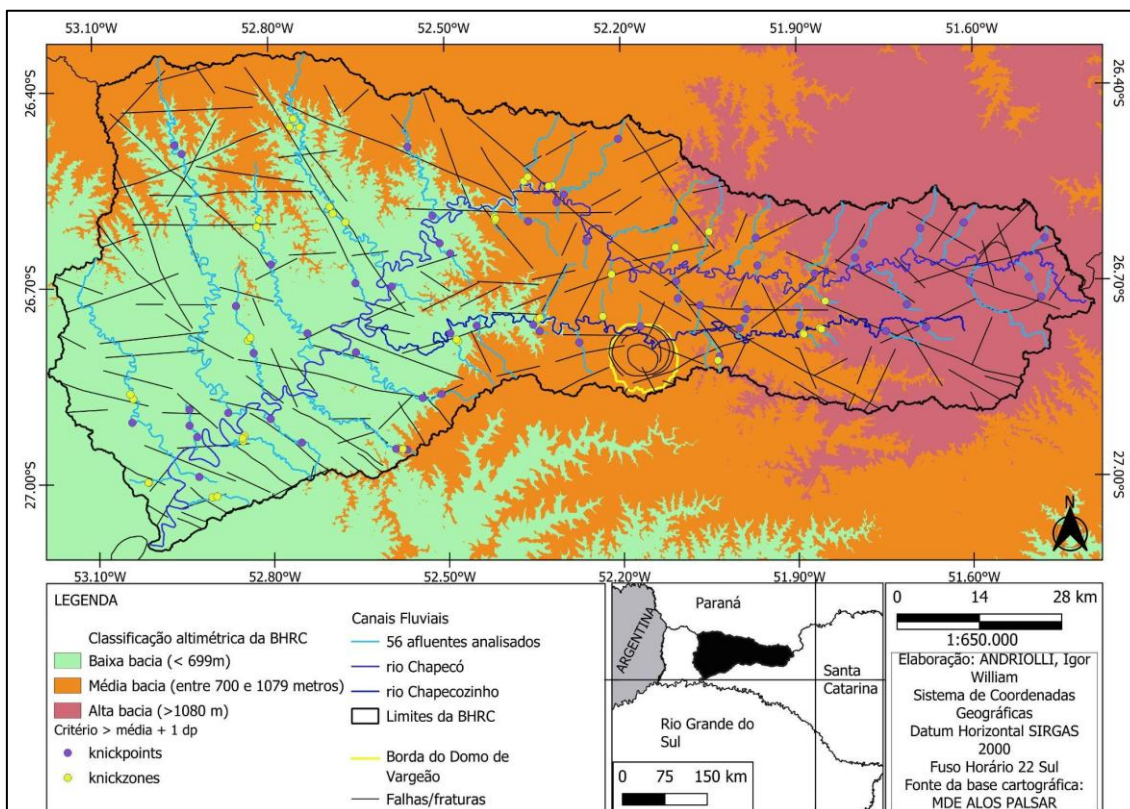
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no critério dos valores do índice de Hack $>$ média aritmética foram identificados 284 *knickpoints*, dos quais 248 foram classificados como *knickzones* por se tratar de trechos ou segmentos em sequência no canal. Dos 284 trechos, 181 estão sobre litologia básica (basaltos e andesitos) enquanto 87 ocorrem em litologia ácida (riolitos, riolacitos e dacitos). Outros 16 trechos situam-se em áreas de transição litológica entre essas duas tipologias.

Com base no critério do valor do índice de Hack $>$ média aritmética + 1 dp foram identificados 107 *knickpoints*. Desse total, 46 formam *knickzones*, enquanto 61 são trechos isolados.

O valor do índice associado aos 107 *knickpoints* variou entre 23,27 e 3.154,60. A contraposição à classificação altimétrica da BHRC (Figura 1) indicou que 11 deles estão localizados na alta bacia, 38 na média e 58 na baixa bacia (Planalto Dissecado do rio Uruguai), refletindo uma tendência de maior ocorrência dessas feições em áreas de menor altitude, associadas à maior incisão fluvial constatada por Bertolini, Deodoro e Zambot (2023) por meio da análise da amplitude altimétrica média dos vales - *local relief*.

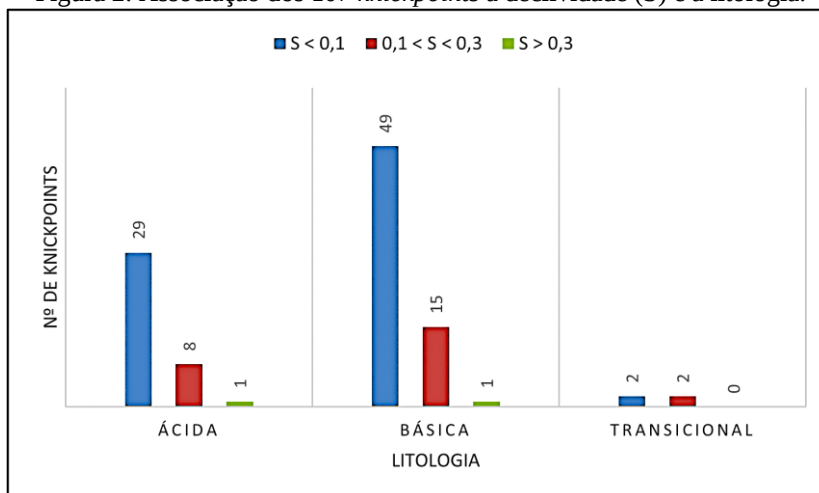
Figura 1: Mapa dos *Knickpoints* identificados pelo critério índice de Hack > média aritmética + 1 dp.



Fonte: elaboração do autor (2025).

Com relação à litologia, 65 dos 107 *knickpoints* ocorrem em rochas básicas, 38 em rochas ácidas e 4 em contato litológico entre essas duas tipologias rochosas. De acordo com a compartimentação geomorfológica, 51 *knickpoints* ocorrem no Planalto Dissecado do rio Uruguai e 38 estão no Planalto dos Campos Gerais.

Figura 2: Associação dos 107 *knickpoints* à declividade (S) e à litologia.



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Verificou-se que 17 dos 107 *knickpoints* identificados apresentam relação com falhas/fraturas do mapeamento geológico considerado (CPRM, 2014). Entre esses 17 *knickpoints*, dois também estão associados a escarpas erosivas, além das falhas/fraturas, enquanto um está localizado em correspondência a falha/fratura na borda da cratera de impacto do Domo de Vargeão. Embora apenas 18 estejam sobre as escarpas, é plausível que outros tenham origem associada a essas feições, mas tenham migrado em razão da erosão remontante.

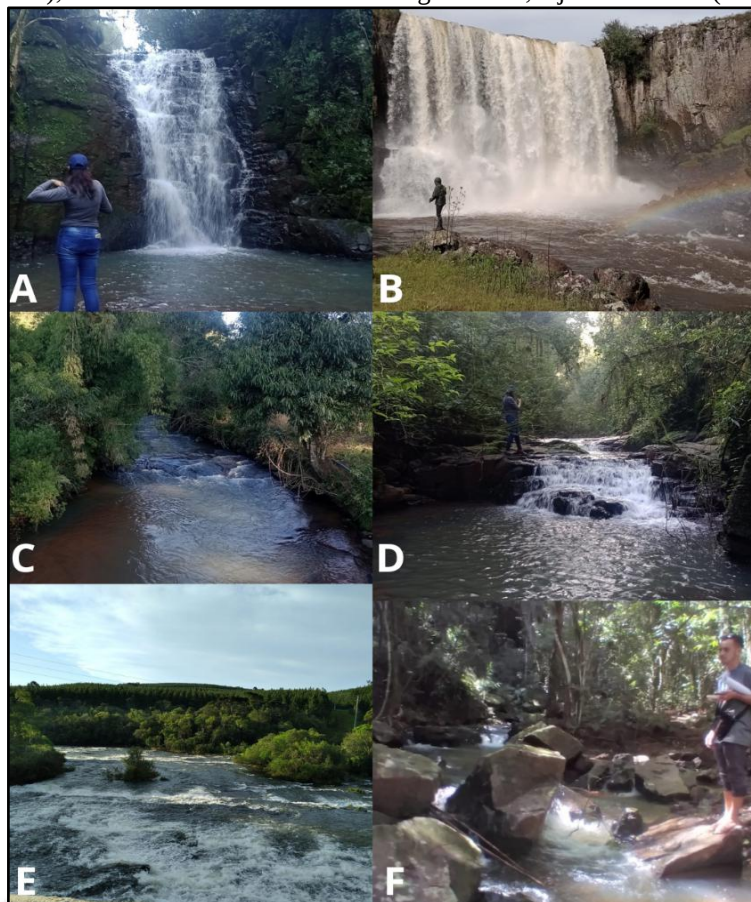
A declividade dos 107 *knickpoints* variou entre o mínimo de 0,003 m/m e máximo de 0,438 m/m. A maioria, ou seja 80 *knickpoints*, apresenta declividades inferiores a 0,1 m/m, sendo 8 na alta, 20 na média e 53 na baixa bacia. Entre os demais, 25 apresentaram declividades entre 0,1 e 0,3 m/m e apenas 2 superaram 0,3 m/m. *Knickpoints* com maior declividade concentram-se em canais com até 10 km de extensão, enquanto os de menor declividade distribuem-se ao longo de canais com extensões que variam de 3,64 km (córrego Zulmira) a 137,19 km (rio Burro Branco).

As observações de campo realizadas na BHRC permitiram identificar diferentes morfologias de *knickpoints* (Figura 3). As formas predominantes incluem cachoeiras, no geral em quedas retilíneas (figura 3A e 3B) com cerca de 1 metro ou mais de altura, quedas em degraus-poço (*step-pool*) (Figura 3D) e poço-corredeira (*pool-riffle*) (Figura 3C). As quedas retilíneas são caracterizadas por presença de poços na base, tendo sido observadas inclusive em níveis basálticos maciços, e em locais aparentemente condicionados por estruturas geológicas, como no caso do rio Roseira (Figura 3B), onde

o *knickpoint* coincide com falha mapeada pelo CPRM (2014). Importante ressaltar que o mapeamento geológico considerado aqui nestas análises mapeia estruturas lineares como falha/fratura de natureza indiscriminada sendo bastante inespecífico para estabelecer associações de caráter genético dos *knickpoints* com estruturas geológicas.

A morfologia do tipo degrau-poço (*step-pool*) consiste em uma alternância entre degraus formados por acúmulo de blocos, cascalho ou materiais mais resistentes, e poços mais profundos. Os degraus atuam como obstáculos/soleiras que reduzem a energia do fluxo, enquanto os poços funcionam como zonas de retenção de sedimentos e de fluxo hídrico com menor velocidade. Já a morfologia de poço-corredeira (*pool-riffle*) apresenta uma alternância entre poços e trechos rasos com fluxo acelerado, onde predominam corredeiras (Figura 3E). Os poços estão associados a baixa energia hidráulica e deposição de sedimentos, enquanto as corredeiras concentram maior energia e material mais grosseiro.

Figura 3: Morfologias observadas em campo. A: Queda retilínea em basalto fraturado, rio Xaxim (baixa BHRC); B: Queda retilínea, associada a falha/fratura, rio Roseira (alta BHRC); C: *Pool-riffle*, arroio Caramujo (média BHRC); D: *step-pool*, rio Xaxim (baixa BHRC); E: Corredeira, rio Chapecozinho (média BHRC); e F: Blocos caídos e sedimentos grosseiros, lajeado Tatumã (baixa BHRC).



Fonte: Registro e compilação dos autores (2025).



A partir das observações de campo, destaca-se também a ampla presença de segmentos fluviais com blocos caídos das margens e rolados dentro dos leitos (Fig. 3F), o que cria barramentos e maior turbilhonamento do fluxo hídrico mediante o declive do canal e a presença de *knickpoints* de pequenas dimensões existentes. A presença desses blocos com certo grau de arredondamento em canais de 2ª e 3ª ordem fluvial atesta vazões esporádicas com capacidades importantes de transporte e elevada competência fluvial, confirmando que é comum o processo de arrancamento (*plucking*) em canais de variadas ordens na BHRC.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise espacial dos *knickpoints* na BHRC, com base na aplicação do índice de Hack, permitiu identificar 284 trechos com valores acima da média nos 56 canais avaliados. Destes, 107 apresentaram significância estatística mais elevada, enquadrando-se no critério do índice de Hack $>$ média + 1 desvio padrão. Os resultados evidenciam uma ampla distribuição dos *knickpoints* ao longo da baixa, média e alta BHRC, bem como nos altos, médios e baixos cursos dos canais, inclusive em canais de 1ª ordem como se pode constatar em campo.

A análise dos 107 *knickpoints* em relação à litologia e à compartimentação geomorfológica revelou maior ocorrência sobre litologias básicas e no Planalto Dissecado do Rio Uruguai. Apenas 15,8% dos *knickpoints* mostraram associação com falhas e fraturas identificadas no mapeamento geológico disponível. Em relação à declividade, 74,7% dos trechos apresentam valores inferiores a 0,1 m/m distribuídos por toda a bacia; 23,3% situam-se entre 0,1 e 0,3 m/m, com maior presença na média bacia; e apenas 1,8% superam 0,3 m/m localizados também na média bacia. As observações de campo permitiram identificar diferentes morfologias de *knickpoints*, sendo comuns cachoeiras com mais de 1 metro de altura, trechos em degrau-poço e poço-corredeira, além da presença de blocos caídos e sedimentos grosseiros que indicam eventos de alta energia e processo de arrancamento (*plucking*) ativo.

A ampla distribuição espacial dos *knickpoints* em canais de variadas ordens e a ausência de associação com tipo litológico, nível altimétrico ou estrutura geológica (falhas/fraturas de natureza indiscriminada) nos faz supor que a maioria dessas feições



não está diretamente condicionada a características litoestruturais como fator primário da sua origem. Contudo, a maior concentração de *knickpoints* na média BHRC onde também estão os *knickpoints* mais declivosos sugere associação com a migração das escarpas erosivas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio por meio de bolsa de pesquisa concedida durante o mestrado.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M. de. **Fundamentos da geologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1956.

BARTORELLI, A. Origem das grandes cachoeiras do planalto basáltico da Bacia do Paraná: evolução quaternária e geomorfologia. In: BICCA, Yociteru (ed.). **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. cap. VI, p. 95–111.

BDGEX - **Banco de Dados Geográficos do Exército Brasileiro**. Disponível em: <https://bdgex.eb.mil.br/bdgexapp> . Acesso em: 30 abr. 2023.

BERTOLINI, W.Z.; DEODORO, S.C.; ZAMBOT, N. Morphometric analysis of Chapecó river basin: Searching for vestigial trace of neotectonic on a basaltic landscape at southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. 124, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104271>

BURBANK, D. W.; ANDERSON, R. S. Geomorphic markers. In: _____. Tectonic geomorphology. Malden: Blackwell Publishing, 2001. p. 13–32.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blüncher, 2 ed./ ver. e. ampl., 188 p., 1980.

DAS, S. Geomorphic characteristics of a bedrock river inferred from drainage quantification, longitudinal profile, knickzone identification and concavity analysis: a DEM-based study. **Arabian Journal of Geosciences**, [S.l.], v. 11, n. 680, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4039-8>

GAILLETON, B.; MUDD, S.M.; CLUBB, F.J.; PEIFER, D.; HURST, M.D. A segmentation approach for the reproducible extraction and quantification of *knickpoints* from river long profiles. **Earth Surface Dynamics**. 7, 211–230, 2019 <https://doi.org/10.5194/esurf-7-211-2019>

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



LIMA, A.G.; FLORES, D.M. River slopes on basalts: Slope-area trends and lithological control. **Journal of South American Earth Sciences**. 76, 2017. p. 375–388. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.03.014>.

LIMA, A.G. Rios de leito rochoso: dos processos à paisagem, e de volta. In: COSTA, L.R.F. da (org.). **Geociências: entraves e lacunas de pesquisa**. 3.ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2023. Cap. 2, p. 18-37.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. F. de P.; COTA, G. E. M.; Morfodinâmica fluvial. In: MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. F. de P. **Hidrogeomorfologia: formas, processos e registros sedimentares fluviais**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1. ed. p. 121-163. 2020

POTTER, Paul E. The Mesozoic and Cenozoic paleodrainage of South America: a natural history. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 10, n. 5–6, p. 331–344, 1997.

SANTA CATARINA. **Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: CPRM, 2014. Escala 1:500.000.

SCHEINGROSS, J.S.; LAMB, M.P.; FULLER, B.M. Self-formed bedrock waterfalls. **Nature**; v. 567, n. 7747, p. 229-233, 2019.

SORDI, M.V.; SALGADO, A.A.R.; SIAME, L.; BOURLÈS, D.; PAISANI, J.C.; LÉANNI, L. Implications of drainage rearrangement for passive margin escarpment evolution in southern Brazil. **Geomorphology**. 306, p. 155-169, 2018.

SOUZA, D. V.; MARTINS, A. A.; FARIA, A. L. L. de. Aplicação do índice de Hack (SL) a um trecho do rio Zêzere, Portugal. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 12, n. 1, 2011. DOI: 10.20502/rbg.v12i1.215. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/215>. Acesso em: 12 set. 2024.

WOHL, E.E. Bedrock Channel Morphology in relation to Erosional Process. In: TINKLER, K. J.; WOHL, E. E. **Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels**. Washington, DC: American Geophysical Union, 1998. p. 133-151. (Geophysical monograph 107).

ZAIONTZ, C. (2025). **Real Statistics using Excel** [Suplemento de software]. Real Statistics Resource Pack. <https://www.real-statistics.com/>

ZAPROWSKI, B.J.; PAZZAGLIA, F.J.; EVENSON, E.B. Climatic influences on profile concavity and river incision. **J. Geophys. Res.** 110, F03004, 2005. DOI:10.1029/2004JF000138.

