

ESTUDO DE FEIÇÕES EROSIVAS EM LEITO FLUVIAL RIODACÍTICO POR MEIO DE IMAGENS DE RPA

Adalto Gonçalves Lima¹
Diego Moraes Flores²

INTRODUÇÃO

A erosão fluvial diretamente sobre os leitos rochosos é a principal responsável pela evolução da paisagem, isto porque ela comanda como ocorre a evolução das encostas (Whipple *et al.*, 2013). Em função dessa conectividade, há necessidade de se entender como as diferentes rochas respondem aos processos erosivos, tanto para entender a evolução das paisagens da Terra (e.g., Attal *et al.*, 2008; Langston e Tucker, 2018), quanto de outros planetas como Marte, onde processos fluviais já estiveram ativos no passado geológico (Dickson *et al.*, 2021).

As grandes províncias vulcânicas da Terra, como a do Paraná-Etendeka (Jerram e Widdowson, 2005), além de sua predominante cobertura com rochas básicas a intermediárias (basaltos e andesitos), possuem unidades de rochas ácidas (riodacitos e riolitos) que marcaram o final de seus processos eruptivos. Na Província Paraná, no sul do Brasil, essa unidade ácida recobre as unidades básicas em uma extensão de aproximadamente 64.000 km² (Nardy *et al.*, 2008).

Os riodacitos que cobrem a área possuem fraturas horizontais, formando espessas lajes. Além disso, a estrutura petrográfica, com acentuado bandamento, favorece o surgimento de fraturas e fissuras horizontais, na medida em que o intemperismo avança (Flores *et al.*, 2018). Fraturas verticais são mais espessadas nesse tipo de litologia que nos basaltos. A combinação de juntas verticais e horizontais faz com que o processo erosivo fluvial predominante seja o arrancamento (*plucking*). No entanto, feições de abrasão e macroabrasão também estão presentes, pelo que se observa em campo. Caracterizado por lascamentos produzidos pelo impacto de sedimentos em trânsito sobre o leito, principalmente por saltação, a macroabrasão é um conhecido processo atuante

¹ Doutor, Universidade Estadual do Centro-Oeste – PR, adalto@unicentro.br

² Doutor, Universidade Federal da Integração Latino-Americana – PR, diego.flores@unila.edu.br

sobre leitos rochosos (Hancock *et al.*, 1998), embora ainda sem estudos específicos em litologias vulcânicas.

Em levantamentos aerofotogramétricos de alta resolução, efetuados por meio de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) em leitos fluviais rochosos sobre o platô riocácitico de Guarapuava - PR, são visíveis feições abrasivas (*potholes*) e depressões circulares rasas, que aparentam terem sido escavadas por macroabrasão. Embora a tecnologia de RPAS ganhe espaço nos estudos relacionados à mineração e estabilidade de encostas (p. ex. Salvini *et al.*, 2017), na área de geomorfologia dos leitos fluviais rochosos seu uso ainda é incipiente. As imagens de RPA, usadas neste estudo, apresentam resolução centimétrica e possibilitaram a identificação, mensuração e análise da distribuição das feições erosivas no leito. Enquanto as marmitas mostraram-se pequenas e escassas, as feições macroabrasivas são maiores, mais abundantes e, a alta resolução das imagens permitiu identificar detalhes morfológicos da superfície, que ajudam a entender sua gênese.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo constitui um trecho de leito rochoso do rio Jordão, bacia do Iguaçu, no estado do Paraná. O trecho, com 200 m de comprimento e declividade aproximada de 0,08 m/m, possui boa exposição do leito por estar a jusante de uma barragem que serve a uma Pequena Central Hidroelétrica.

Durante levantamento de campo para outro projeto, esse trecho do rio foi fotografado a uma altura de 20 m do leito, utilizando-se um quadricóptero, Mavic Pro da DJI, com sistema GLONASS de posicionamento integrado. Utilizando câmera com distância focal de 4,73 mm e resolução de 4000x3000 pixels, resultou em fotografias com uma resolução do terreno da ordem de 5,41 mm/pixel. Os ortomosaicos gerados resultaram em resoluções entre 1 e 3 cm.

A altura de voo do levantamento mostrou-se adequada, de modo que as fotografias ficaram com uma resolução que possibilitou a identificação das fraturas, bem como macro e micro feições erosivas. Esse desempenho está atrelado aos parâmetros circunstanciais e técnicos do processo de levantamento. Primeiramente, a iluminação solar em ângulo mais próximo do nadir minimizou a projeção de sombras e a coloração clara das rochas do leito ajudou no contraste com os traços de fratura. Por outro lado, fraturas muito finas e sem

irregularidade da superfície da rocha ao longo de seu comprimento, dificultaram a identificação remota. Isto pode ser um fator negativo na identificação de fraturas que cruzam as feições abrasivas, porque o polimento da rocha no entorno das feições limita a irregularidade topográfica. Desse modo, a quantificação da associação de fraturas e marmitas como pressupõe a literatura (Ortega et al., 2013), pode ficar deficiente.

Sob uma lâmina d'água de até aproximadamente 30 cm, a identificação das fraturas se mostrou facilitada. Este aspecto foi positivo, primeiro para identificação da continuidade de fraturas em zonas adjacentes, porém secas do leito e, segundo, para identificação de zonas fraturadas, mas que não estavam nas plataformas secas. Com isso, o mapeamento das fraturas pôde ser estendido para além das áreas mais elevadas do leito (secas), facilitando uma análise mais ampliada.

A resolução das imagens utilizadas permitiu a mensuração precisa das feições erosivas no ambiente SIG (pelo ortomosaico) ou mesmo fora dele, nas fotografias individuais em ambiente CAD. A mensuração das feições envolveu a obtenção do diâmetro médio ($\text{diâmetro maior} + \text{diâmetro menor}/2$) das depressões circulares e marmitas, isso porque muitas feições não são exatamente circulares. Como resultado dos processos de ajuste, o ortomosaico apresenta menor resolução que as fotografias individuais. Neste sentido, o uso conjunto dos dois ambientes (SIG e CAD) foi importante para dirimir dúvidas quanto a microfieções erosivas e descontinuidades da rocha.

A análise também compreendeu quantificar a associação de marmitas e feições macroabrasivas com fraturas do leito (relação e categorização das fraturas quanto a cruzamentos).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso das imagens de RPA permitiu uma caracterização das feições erosivas de modo rápido e eficiente. Foram identificadas poucas feições abrasivas do tipo marmitas (*potholes*). Essas feições são relativamente pequenas, variando aproximadamente de 15 a 40 cm de diâmetro (Figura 1A). Os clastos que funcionam como ferramentas abrasivas e que se alojam no fundo dessas feições, não puderam ser identificados nas imagens; as pequenas dimensões das marmitas e seu formato cilíndrico projetam sombras no interior e, além disso, a presença de água contribui para obscurecer o fundo. As marmitas estão localizadas sobre plataformas do leito, as quais são áreas relativamente elevadas e planas, delimitadas e intersectadas por fraturas verticais. As fraturas que as delimitam marcam

canais secundários, onde a distância entre fraturas paralelas se torna menor e a erosão por arrancamento removeu blocos e aprofundou o leito. Em alguns casos, é possível perceber que marmitas foram desenvolvidas em associação com essas zonas fraturadas e, provavelmente auxiliaram a esculturação desses canais (Figura 1A).

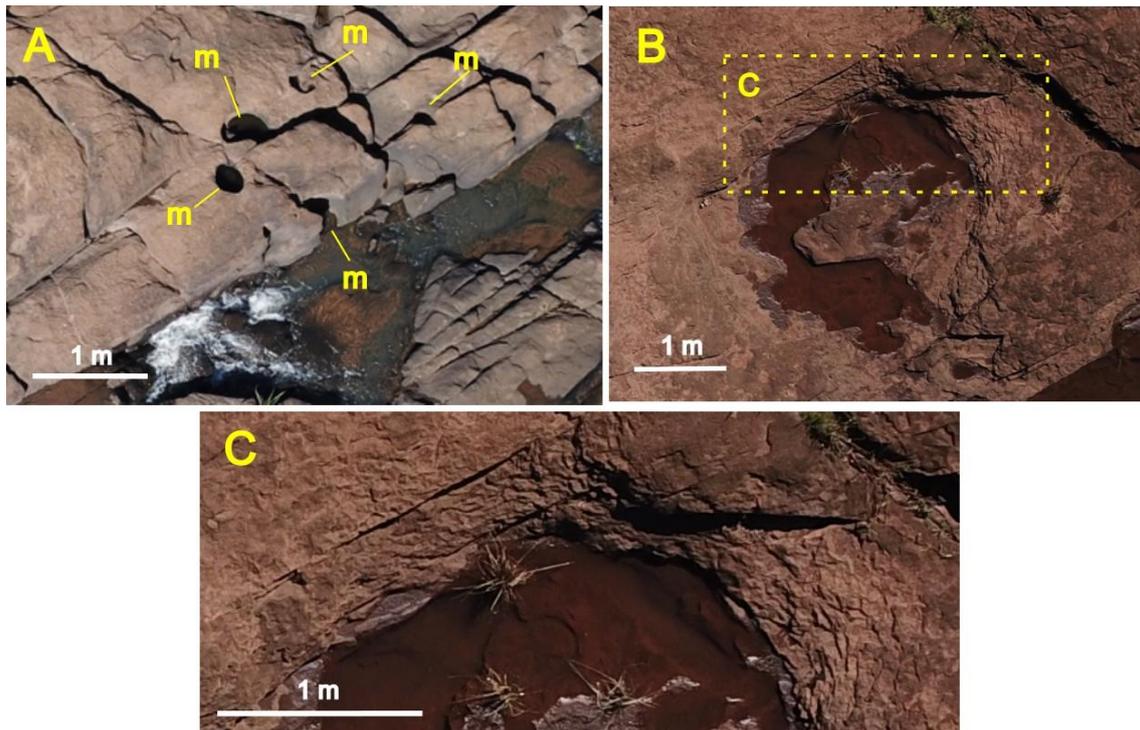


Figura 1. Feições erosivas: (A) marmitas (m) sobre plataforma e associadas com fraturas; na parte inferior direita situa-se um canal interno esculpido por arrancamento e abrasão; (B) depressão circular; (C) detalhe da depressão, onde se vê a estruturação microescalonada das paredes que a circunda.

As marmitas podem ou não estar associadas com fraturas, como se nota nos exemplares identificados na área de estudo. A associação com fraturas é interpretada como uma relação causativa, sobretudo quando há interseção dessas fraturas (Ortega et al., 2013). Como as fraturas são zonas mais suscetíveis à intemperização, ocorre erosão localizada, criando eventual irregularidade no leito e no fluxo, o que pode levar à formação de marmitas. Nem todas as marmitas analisadas estão associadas com fraturas e em nenhuma delas ocorre interseção entre duas ou mais fraturas. Contudo, isso pode ser

resultado de problemas na fotointerpretação das imagens obtidas por RPA (ver item Materiais e Métodos). A inexistência de fratura em transecto com algumas marmitas e a pouca ocorrência dessas e outras feições abrasivas, como sulcos (*grooves*), sobre os riodacitos que formam o leito estudado, em princípio sugere que: (1) As fraturas nem sempre são necessárias para que se desenvolvam as feições abrasivas, (2) a natureza das fraturas (distensivas ou compressivas) deve influenciar diferencialmente a predisposição para a erosão e associação com feições abrasivas, e (3) o tipo de rocha não favorece o desenvolvimento de marmitas, embora essa relação não seja considerada importante em alguns estudos (p. ex. Sengupta e Kale, 2011). Marmitas não associadas com fraturas indicam que a ocorrência de irregularidades de natureza variada pode dar ensejo ao desenvolvimento de fluxos turbilhonares localizados e, com isso, aos processos abrasivos.

A despeito da existência das citadas plataformas do leito e das fraturas que as intersectam, a relativa escassez de feições tipicamente abrasivas no leito riodacítico indicam a inadequação da rocha a esse tipo de processo. Os motivos podem estar relacionados à composição mineralógica dos riodacitos e ao modo como ocorre a intemperização química sobre eles. Os riodacitos do planalto de Guarapuava são caracterizados pela natureza porfirítica; fenocristais de plagioclásio, variando de 0,5 a 2 cm, estão imersos numa matriz de augita, pigeonita, magnetita e apatita, envoltos por uma trama de quartzo e feldspato alcalino (Nardy et al., 2008). A intemperização mais rápida dos fenocristais e o avanço sobre a matriz, resulta em uma rocha com cavidades deixadas pelos cristais e com acentuada perda da densidade (Lima et al., 2024). Fissuras horizontalizadas se propagam pelo interior da rocha emprestando-lhe um aspecto em camadas (Flores et al., 2018). Isso pode ser visto em campo, porém é também visível com um grau de detalhamento excelente nas imagens obtidas por RPA. Poucos clastos pequenos (inferior a grânulo) com suficiente resistência abrasiva são disponibilizados pela erosão. O avanço da intemperização é ainda mais intenso sobre os fragmentos menores da rocha, que são eventualmente arrancados pela força hidráulica. Essa escassez de ferramentas abrasivas pode explicar a escassez de feições como marmitas.

Por outro lado, as imagens revelaram a existência de maior frequência de depressões erosivas côncavas, rasas e de formatos circulares, semicirculares e elipsoidais (Figura 1B). Essas feições variam no seu diâmetro entre 1,5 e 4 m. A superfície interna é, muitas vezes, escalonada, condicionada pelas delgadas placas em que a rocha se divide pelo avanço da intemperização (Figura 1C). Como as marmitas, essas feições estão

localizadas sobre as plataformas do leito; algumas possuem fraturas que as intersectam, porém, outras se situam em blocos maciços, delimitados por fraturas. A presença de fraturas na parte interna está associada a uma irregularidade do fundo, expressando uma complexa relação entre vórtices, arrancamento e macroabrasão.

O formato relativamente circular, sem a existência de fraturas concêntricas pervasivas, sugere uma esculturação por processo turbilhonar. Como a rocha diminui sua resistência com a intemperização, um vórtice que se instale no leito, devido a alguma irregularidade, pode promover a incisão. O formato raso das depressões expressa que a erosão lateral é mais rápida que a vertical. Nesta configuração a tensão de cisalhamento no fundo, apesar de aumentar, não é suficiente para uma incisão vertical significativa (Pelletier et al., 2015), o que torna a evolução da incisão dependente do avanço da intemperização lateral. Isso explicaria a largura ser maior que a profundidade. A ampliação da depressão deve ocorrer em ciclos. Em estágios de vazão baixa, as depressões acumulam água (Figura 1B), seja do fluxo do rio ou das chuvas, o que favorece a intemperização da rocha, preparando-a para erosão no próximo evento de vazão maior.

O arrancamento deve ser um processo importante, removendo pequenos pedaços das placas intemperizadas de rocha, fissuradas na horizontal pelo intemperismo e na vertical pelas próprias tensões do fluxo turbilhonar. Esses fragmentos liberados, bem como outros que eventualmente estejam em circulação no fluxo, podem atuar, por conseguinte, como ferramentas macroabrasivas, potencializando o efeito erosivo.

Por todos esses aspectos, que envolvem a intemperização intermitente como um fator importante e a possível macroabrasão, além das dimensões métricas, as depressões circulares observadas não são marmitas rasas, mas feições que se enquadram como macroabrasivas. Em outro rio da região, de menor porte que o Jordão, em trecho com a mesma litologia riodacítica, onde outros estudos já foram realizados (Lima et al., 2024), essas feições macroabrasivas são muito escassas. O volume de água, que implica na profundidade do fluxo e na tensão de cisalhamento no leito, provavelmente é o fator determinante. Porém, seria necessário um estudo hidráulico mais detalhado de ambos os trechos para dirimir as dúvidas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As imagens obtidas por RPA a uma altura de 20 m do leito do rio permitiram a visualização de detalhes das feições erosivas presentes (marmitas e depressões

circulares). Como as marmitas desenvolvidas sobre os riodacitos da área são relativamente pequenas (15-40 cm de diâmetro), as sombras projetadas em seu interior não permitiram a identificação dos clastos responsáveis pela abrasão. As fraturas, porém, são facilmente identificáveis e mapeáveis, inclusive sob uma delgada lâmina de água, mostrando que algumas marmitas possuem relação com essas descontinuidades enquanto que outras não. Com relação às depressões (diâmetros > 1 m), as irregularidades centimétricas da superfície, produzidas pela intemperização e macroabrasão, podem ser observadas e caracterizadas.

Pelo que se observou nas imagens, as depressões aparentam ter sido geradas por fluxos turbilhonares que promovem a macroabrasão/arrancamento, facilitados pelo estilo de intemperização dos riodacitos, que produz delgadas camadas paralelas à superfície do leito.

A análise das feições erosivas por sensoriamento remoto, com imagens de alta definição, permite uma compreensão ampla dos processos e direciona as estratégias de campo. Por exemplo, a fase seguinte da pesquisa será buscar a relação das diferentes feições com a resistência da rocha (graus de intemperismo), a identificação de clastos responsáveis pela abrasão e a mensuração da profundidade das feições abrasivas.

Palavras-chave: Geomorfologia fluvial; Rio de leito rochoso; Sensoriamento remoto.

REFERÊNCIAS

- ATTAL, M.; TUCKER, G. E.; WHITTAKER, A. C.; COWIE, P. A.; ROBERTS, G. P. Modeling fluvial incision and transient landscape evolution: Influence of dynamic channel adjustment, **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v.113, n. F3, 2008.
- DICKSON, J. L.; LAMB, M. P.; WILLIAMS, R. M. E.; HAYDEN, A. T.; FISCHER, W. W. The global distribution of depositional rivers on early Mars. **Geology**, v. 49, n. 5, p. 504-509, 2021.
- FLORES, D. M.; LIMA, A. G.; OLIVEIRA, D. Morfologias de leito fluvial em riodacitos pórfiros do Grupo Serra Geral. **Revista do Departamento de Geografia**, v. especial, p. 107-117, 2018.
- HANCOCK, G. S.; ANDERSON, R. S.; WHIPPLE, K. X. Beyond power: bedrock river incision process and form. In: Tinkler, K., & Wohl, E. E. (eds.). **Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels**: 35–60. Washington: American Geophysical Union, 1998.

JERRAM, D. A.; WIDDOWSON, M. The anatomy of Continental Flood Basalt Provinces: geological constraints on the processes and products of flood volcanism. **Lithos**, v. 79, n. 3-4, p. 385-405, 2005.

LIMA, A.G.; BINDA, A.L. Differential control in the formation of river potholes on basalts of the Paraná Volcanic Province. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 59, p. 86-94, 2015.

LIMA, A. G.; GALVAO, A. C. C.; FLORES, D. M. Weathering and River Erosion: Insights from the Variation of Intact Rock Strength in Rhyodacites. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 47, p. 49202, 2024.

LANGSTON, A. L.; TUCKER, G. E. Developing and exploring a theory for the lateral erosion of bedrock channels for use in landscape evolution models. **Earth Surface Dynamics**, v. 6, n. 1, p. 1-27, 2018.

NARDY, A.J.R.; MACHADO, F.B.; OLIVEIRA M.A.F. As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: Litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 178-195, 2008.

ORTEGA, J. A. et al. Multiscale structural and lithologic controls in the development of stream potholes on granite bedrock rivers. **Geomorphology**, v. 204, p. 588-598, 2014.

PELLETIER, J. D.; SWEENEY, K. E.; ROERING, J. J.; FINNEGAN, N. J. Controls on the geometry of potholes in bedrock channels. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 3, p. 797-803, 2015.

SALVINI, R.; MASTROROCCO, G.; SEDDAIU, M.; ROSSI, D.; VANNESCHI, C. The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n.1, p. 34-52, 2017.

SENGUPTA, S.; KALE, V.S. Evaluation of the role of rock properties in the development of potholes: A case study of the Indrayani knickpoint, Maharashtra. **Journal of Earth System Science**, v. 120, p. 157-165, 2011.

WHIPPLE, K.X.; DIBIASE, R.A.; CROSBY, B.T. **Bedrock rivers**. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, v. 9, Fluvial Geomorphology, p. 550–573, 2013.