



ANÁLISE DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE (TWI) NA DINÂMICA DE EVOLUÇÃO DE VOÇOROCA NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO (RJ)

Willian de Souza Pereira Júnior¹
Gabriel Amorim Thaumaturgo da Silva²
Marcelo Correa Motta Roriz³
Jorge da Paixão Marques Filho⁴
Antonio Jose Teixeira Guerra⁵

RESUMO

A erosão hídrica é responsável por mais da metade da degradação dos solos no mundo, em especial em áreas de clima tropical, que apresentam médias pluviométricas mais elevadas, acelerando os processos erosivos. Dentre as feições erosivas, as voçorocas são consideradas as mais avançadas, iniciando por 0,5m de largura e profundidade, podendo chegar a mais de 30 metros de comprimento. Compreender a dinâmica desses processos é fundamental, e as geotecnologias surgem como uma ferramenta robusta para quantificar e elaborar modelos interpretativos. Nesse sentido, o estudo objetiva analisar a dinâmica de evolução de uma voçoroca por meio da utilização do Índice Topográfico de Umidade (TWI). A área possui um histórico de remoção da vegetação original para atividades agropecuárias, o que influencia diretamente a capacidade de infiltração do solo. O TWI modela a relação entre o armazenamento de água e o escoamento, indicando que áreas de menor declividade com grande área de contribuição tendem a acumular mais umidade. Esse balanço aponta os locais mais suscetíveis à erosão, especialmente perto dos canais de drenagem. Para o cálculo, foi gerado um Modelo Digital de Superfície (MDS) com imagens obtidas por levantamento aerofotogramétrico de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Os resultados evidenciaram a relação entre as áreas mais úmidas e as incisões da voçoroca. Valores elevados do índice indicaram os fluxos preferenciais de água que precedem a saturação do solo e geram o escoamento, explicando o comportamento e a expansão da feição erosiva. A análise foi corroborada por observações de campo, como a presença de *piping*, um indicativo de escoamentos subsuperficiais. O estudo comprova que a aplicação do TWI é uma ferramenta eficaz que prevê a expansão de voçorocas ao identificar os fluxos de água que causam a erosão, validando seu uso para o monitoramento e diagnóstico de áreas de risco.

¹ Graduando do Curso de Licenciatura em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, willianspjr@gmail.com;

² Mestrando do Curso de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, gabriel.thaumaturgo@gmail.com;

³ Graduando do Curso de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, rorizmarcelo@gmail.com;

⁴ Doutorando do Curso de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, marquesfilho.jp@gmail.com;

⁵ Professor Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, antoniotguerra@gmail.com.



INTRODUÇÃO

A erosão hídrica é responsável por mais da metade da degradação dos solos no mundo, em especial em áreas de clima tropical, que apresentam médias pluviométricas mais elevadas, acelerando os processos erosivos (Guerra, 2007). Dentre as feições erosivas, as voçorocas são consideradas o estágio mais avançado de desenvolvimento. Dentre suas definições, será considerado seu início por 0,5m de largura e profundidade, podendo chegar a mais de 30 metros de comprimento, visto a robustez e comum utilização em diversas literaturas (Guerra, 2007; Morgan, 2009; Oliveira, 2012).

Os fatores condicionantes deste processo partem do meio físico, como a forma da encosta, a antrópicos, como o manejo inadequado do solo (Jorge e Guerra, 2013). Assim, causando problemas tanto no local de origem, *onsite*, como em suas proximidades, *offsite*. Dentre os efeitos no ponto de ocorrência, destaca-se a perda de fertilidade do solo, devido ao transporte dos nutrientes da sua superfície, enquanto, externo a área de acontecimento, é destacável o assoreamento de rios. (Poesen, 2018; Boardman e Evans, 2020, Pinheiro et al., 2022).

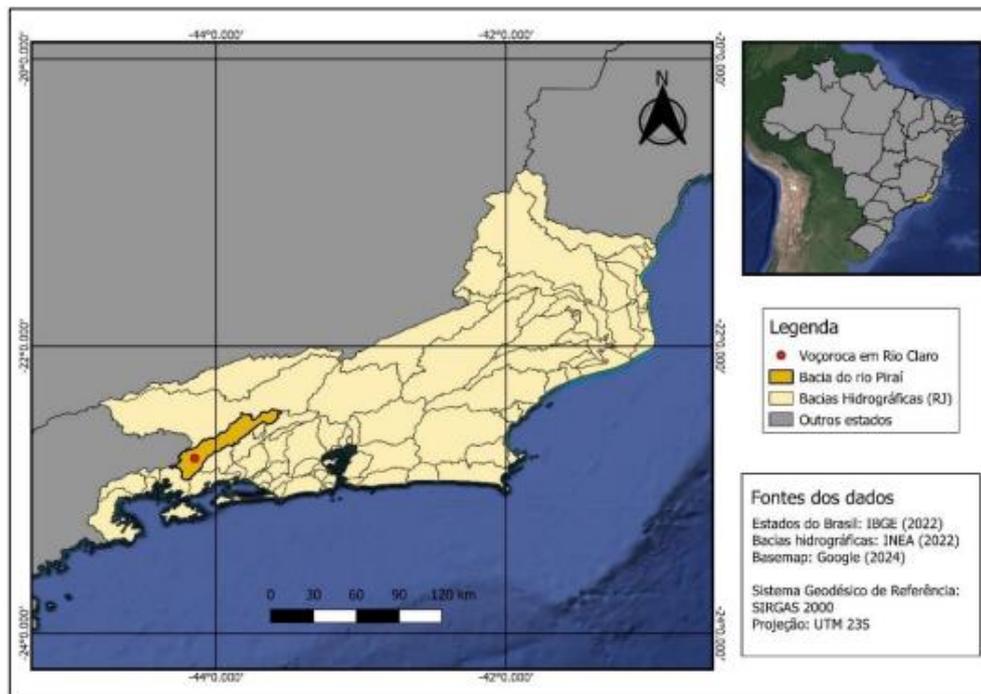
As geotecnologias representam uma ferramenta robusta no entendimento dos processos erosivos, facilitando a quantificação e elaboração de modelos que contribuem com a interpretação destes fenômenos (Garritano et al., 2018; Loureiro, 2019; Marques Filho, 2025). Nesse sentido, o estudo objetiva analisar a dinâmica de evolução de uma voçoroca por meio da utilização do Índice Topográfico de Umidade (TWI).

O TWI foi desenvolvido por Beven e Kirkby (1979) propondo um modelo entre o armazenamento de água e escoamento superficial por unidade de paisagem. Nesse sentido, às áreas com menor declividade concentram maior quantidade de água, quando associadas a uma grande área de contribuição, em razão do acúmulo de fluxos e menor capacidade de transposição. O balanço da água recebida por posição do terreno e água escoada, indica locais com maior suscetibilidade ao processo de erosão hídrica e torna-se mais propensa, segundo a sua proximidade, quanto mais próxima a área do canal de drenagem.

A feição escolhida para o estudo localiza-se no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Piraí, no município de Rio Claro (RJ), médio vale do Paraíba do Sul. A área de estudo

acompanhou o histórico de desenvolvimento brasileiro, seguindo a tendência de remoção da cobertura vegetal original, para empregar atividades agrícolas, além da atual presença da pecuária, influenciando diretamente na capacidade de infiltração do solo (Devide, 2014).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Silva et al.

Os eventos pluviométricos na área sofrem influência da orogenia do local, condicionados pela formação geomorfológica na região da Serra do Mar, com concentração nas escarpas, resultando em índices elevados de processos erosivos associados à declividade acentuada (Loureiro, 2019).

METODOLOGIA

O procedimento metodológico inicia-se com a aquisição de dados por meio de um Levantamento Aerofotogramétrico, sendo possível adquirir imagens de melhor qualidade em um intervalo de tempo definido pelo pesquisador (Garritano *et al.*, 2018; Loureiro

2019; Silva *et al.*, 2024), que resultou na criação de um Modelo Digital de Terreno (MDT) inicial. Este modelo serve como a base de dados primária para as etapas subsequentes.

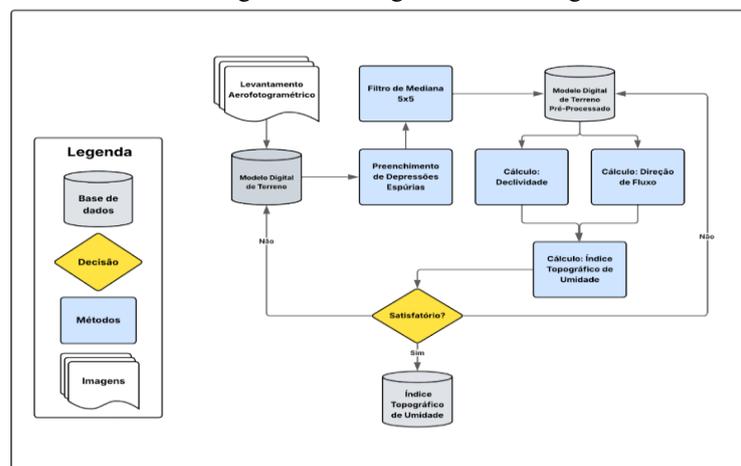
Uma vez gerado, o MDT passa por uma fase de pré-processamento para corrigir e refinar os dados. A primeira etapa deste pré-processamento é o Preenchimento de Depressões Espúrias, um método essencial para remover imperfeições no modelo que poderiam interferir na análise hidrológica (Marques Filho, 2025). Em seguida, aplica-se um Filtro de Mediana 5x5 sobre o modelo, com o objetivo de suavizar ruídos e anomalias, gerando um Modelo Digital de Superfície Pré-Processado.

A partir do Modelo Digital de Superfície (MDT) pré-processado, a metodologia avança para a distinção de dois atributos topográficos fundamentais, que são calculados em paralelo: a declividade, que determina a inclinação do terreno em cada ponto, e a direção de fluxo, que define o percurso que a água seguiria sobre a superfície.

Esses dois produtos servem como insumos diretos para o cálculo do Índice Topográfico de Umidade (ITU). Este índice é um indicador que quantifica a tendência de um determinado local acumular água, com base na análise integrada das características topográficas do seu entorno .

Após o cálculo, o Índice Topográfico de Umidade é submetido a uma etapa crítica de validação. Caso o resultado não seja considerado satisfatório, o processo retorna à fase de pré-processamento para um novo ciclo de cálculo, permitindo ajustes nos parâmetros até que um resultado de qualidade seja alcançado. Se o índice for aprovado na validação, o processo é finalizado, gerando o mapa de Índice Topográfico de Umidade como produto final.

Figura 2 - Fluxograma Metodológico

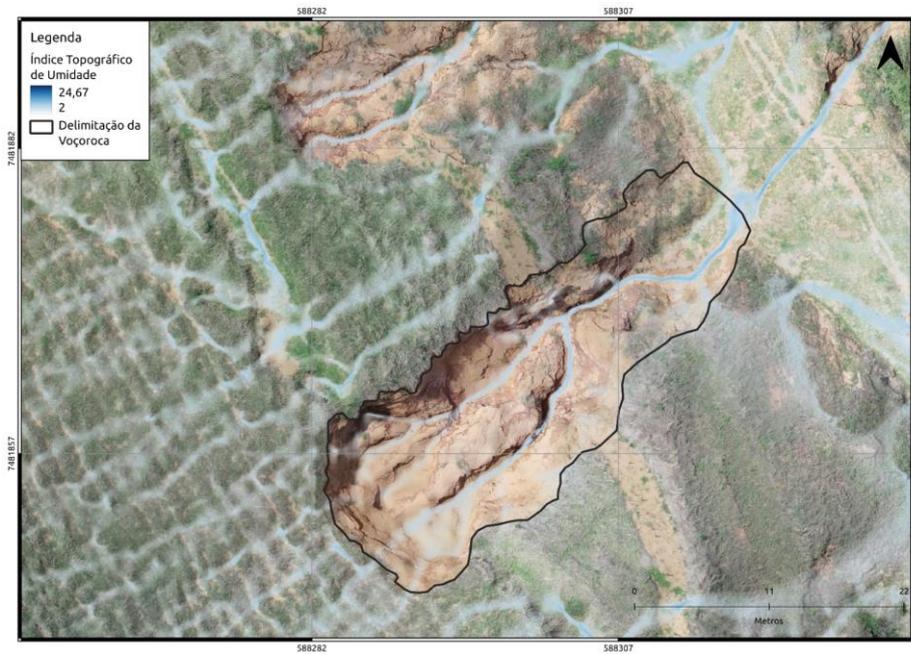


Fonte: Os autores, 2025.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos procedimentos metodológicos, iniciados pelo levantamento aerofotogramétrico, foi possível identificar o perímetro correspondente a área da feição erosiva. No mapa, as áreas em tons de azul representam os valores do TWI, indicando locais onde a topografia conduz os fluxos de água.

Figura 3 - Índice Topográfico de Umidade



Fonte: Os autores, 2025.

As tonalidades mais claras consistem em uma menor umidade, associada diretamente a maior declividade, inversamente proporcional no que tange os segmentos que apresentam uma tonalidade mais escura (Beven e Kirkby, 1979).

Em primeira análise é possível constatar a incidência dos caminhos preferenciais nas depressões do interior da voçoroca, sobrepondo as incisões observadas no modelo. É percebida nessa área uma tonalidade mais escurecida, indicando a possibilidade de saturação hídrica desse solo.

Na área que tange a parte superior a cabeceira da voçoroca, há a presença de uma grande quantidade de fluxos d'água, correspondendo a área de contribuição, visto que representa a decorrência dos fluxos que alimentam a expansão da feição erosiva. Essa incidência maior de caminhos preferenciais na cabeceira da voçoroca indica a maior



possibilidade de iminência da erosão, corroborando com a probabilidade de evolução da dinâmica orientada pelo recuo da cabeceira.

Nas paredes da voçoroca, especificamente em sua lateral direita, é constada a presença de *piping*, o que indica uma exfiltração de água decorrente de fluxo subsuperficial existente no ponto em questão, sugerindo uma ampliação lateral da feição analisada (Guerra *et al.*, 2020).

A existência de fluxo subsuperficial no local é consolidada pelos caminhos preferenciais gerados no TWI. Na orientação de saída da feição erosiva é constatado um fluxo que resulta em um *piping*, localizado especificamente na margem direita superior da figura 3.

A direita da margem superior da voçoroca, é destacado um caminho com ausência de vegetação, resultante de ação antrópica. Neste trecho é apresentado um maior valor de TWI. Este valor resulta da ausência de cobertura vegetal, promovendo a maior infiltração de água no solo (Jorge e Guerra, 2013). O valor também pode ser associado a menor declividade, visto que no trecho é interrompida a orientação natural da encosta para abertura do caminho, favorecendo o acúmulo de água e posteriormente a degradação do solo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do Índice Topográfico de Umidade (TWI) demonstrou-se uma ferramenta eficiente para a análise da dinâmica evolutiva da voçoroca estudada. Os resultados evidenciam que áreas com menor declividade e maior área de contribuição apresentam maior propensão ao acúmulo de água, o que favorece o desencadeamento de processos erosivos.

A associação entre o TWI e a análise morfológica da feição permitiu identificar os impactos na cabeceira, os caminhos preferenciais de fluxo em superfície e subsuperfície - constatados pela presença de *piping* - e áreas com maior propensão a saturação do solo, indicando pontos de maior vulnerabilidade à erosão.

Além disso, ausência de cobertura vegetal em trechos estratégicos, confirmam a influência de fatores antrópicos na intensificação do processo, que são corroborados pelo



Índice Topográfico de Umidade quanto a identificação da maior umidade em áreas de menor cobertura vegetal (Fernandes *et al.*, 2021).

Contudo, para melhor representação dos canais de drenagem, sugere-se imagens de alta resolução, visando a elaboração de um Modelo Digital de Terreno (MDT) de maior detalhamento. Modelos de baixa resolução tendem a suavizar o relevo, ocultando canais menores essenciais à compreensão da dinâmica erosiva e subestimando os riscos hidrológicos (Capoane *et al.*, 2015).

Agregar o TWI a outras análises, como as propriedades físico-químicas do solo, além de realizar levantamentos aerofotogramétricos em diferentes momentos, a fim de monitoramento, podem promover suas potencialidades. Além disso, sua aplicação não se restringe as dinâmicas de voçorocamento, podendo ser aplicado em outras temáticas como já abordado em diversas literaturas (Capoane *et al.*, 2017; Silva e Rocha, 2019; Naves e Almeida, 2021).

Desse modo, o estudo reforçou o potencial das geotecnologias na compreensão dos processos erosivos, sendo fundamentais para subsidiar ações de planejamento e recuperação ambiental em áreas degradadas, também como a prevenção em áreas suscetíveis.

Palavras-chave: Umidade, Voçoroca, Geotecnologias

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio concedido por meio da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC), que auxiliou o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. **A physically-based variable contributing area model of basin hydrology.** Hydrological Sciences Bulletin, v. 24, p. 43-69, 1979.

BOARDMAN, J.; EVANS, R. **The measurement, estimation and monitoring of soil erosion by runoff at the field scale: Challenges and possibilities with particular**



reference to Britain. *Progress in physical geography: earth and environment*, v. 44, n. 1, p. 31–49, 2020.

CAPOANE, V. et al. **Influência da resolução do modelo digital de elevação na determinação do índice topográfico de umidade e na capacidade de predição dos teores de carbono orgânico do solo.** *Geo UERJ*, n. 27, p. 144-155, 2015.

CAPOANE, V.; COSTA, L. F. F.; KUPLICH, T. **Efeito da resolução de modelos digitais de elevação na derivação do índice topográfico de umidade: estudo de caso no município de Palmitinho.** *Geografia em Questão*, v. 10, n. 2, p. 9-23, 2017.

DEVIDE, A. C. P.; CASTRO, C. M.; RIBEIRO R. L. D et al. **História ambiental do Vale do Paraíba Paulista, Brasil.** *Revista Biociências, Taubaté*, v. 20, n. 1, p. 12–29, 2014.

FERNANDES, L. A.; FORTUNATO, U. M. C.; BORGES, E. F. **Aplicação do Índice Topográfico de Umidade (TWI) e Métricas Fenológicas, na análise temporal do comportamento da cobertura vegetal na Mesorregião do Nordeste da Bahia.** *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 11, n. 4, p. 251926, 2021.

GARRITANO, F. N.; LOUREIRO, H. A. S.; SANTOS, D. S.; GUERRA, A. J. T. **Mapeamento da erosão: análise e caracterização de uma voçoroca através do uso de imagens aéreas obtidas com drone.** In: GUERRA, A. J. T.; FILHO, R. D. S.; TERRA, C. G. (Org.). *Arte e Ciência: História e Resiliência da Paisagem*. Rio de Janeiro: Rio Books, 2018. p. 445-456.

GUERRA, A. J. T. **O início do processo erosivo.** In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Orgs.) *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.17-56, 2007.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O.; RANGEL, L. A.; BEZERRA, J. F. R.; LOUREIRO, H. A. S.; GARRITANO, F. N. **Erosão dos solos, diferentes abordagens e técnicas aplicadas em voçorocas e erosão em trilhas.** *Revista de Geomorfologia William Morris Davis*, v. 1, n. 1, p. 75-117, 2020.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** 17. ed. Rio de Janeiro: Difel, 2024. 474 p.

JORGE, M. C. O. & GUERRA, A. J. T. **Erosão dos solos e movimentos de massa: recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes.** In: GUERRA, A.J.T. e JORGE, M.C.O. (Orgs.) *Processos Erosivos e Recuperação de Áreas Degradadas*. Editora: Oficina de Textos. São Paulo, 2013.

LOUREIRO, H. A. S. **Diagnóstico de Erosão por Voçorocas: Experimentos com Geotecnologias e Solos na Bacia do Alto Rio Piraí – Rio Claro – RJ.** Tese de Doutorado (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.



MARQUES FILHO, J. P.; SILVA, S. M. L.; COSTA, V. C. **METODOLOGIA PARA PRÉ-PROCESSAMENTO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**. Revista Tamoios, São Gonçalo, v. 21, n. 1, 2025. DOI: 10.12957/tamoios.2025.82947.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. John Wiley & Sons, 2009.

NAVES, F. E.; ALMEIDA, R. T. S. **ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE COMO MÉTODO PARA IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS DE ALAGAMENTO EM ÁREAS URBANAS**. Sociedade e Território, v. 33, n. 1, p. 209-227, 2021.

OLIVEIRA, M. A. T. de. **Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas**. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M.(Orgs.). *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 57- 99, 2012.

PINHEIRO, R. J. B.; NUMMER, A. V.; FERNANDES, L. P.; BASTOS, C. A. B. **Erodibilidade obtida por métodos indiretos e diretos de uma voçoroca localizada na região oeste do estado do Rio Grande do Sul-Brasil**. Geotecnia, n. 154, p. 25–46, 2022.

POESEN, J. **Soil erosion in the Anthropocene: Research needs**. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.43, p.64–84, 2018

SILVA, G. A. T.; PEREIRA JUNIOR, W. S.; MARQUES FILHO, J. P.; GUERRA, A. J. T. **Caracterização de voçoroca a partir da utilização de veículo aéreo não tripulado (vant): estudo de caso no município de rio claro (rj)**. Anais do XX SBGFA - Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada & IV ELAAGFA - Encontro Luso-Afro-Americano de Geografia Física e Ambiente... Campina Grande: Realize Editora, 2024.

SILVA, A. P. A.; ROCHA, P. C. **Análise espacial da suscetibilidade à inundação na Sub-Bacia Muriaé 2, Campos dos Goytacazes (RJ)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. Anais... São José dos Campos: INPE, 2019. p. 1-4.