

CARACTERIZAÇÃO DE VOÇOROCA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT): ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO (RJ)

Gabriel Amorim Thaumaturgo da Silva ¹

Willian de Souza Pereira Junior ²

Jorge da Paixão Marques Filho ³

Antônio José Teixeira Guerra ⁴

Resumo: Esse trabalho objetivou realizar a caracterização de uma voçoroca localizada, no município de Rio Claro (RJ), utilizando Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e Sistemas de Informação Geográfica. A erosão hídrica, intensificada por atividades antrópicas como o desmatamento e a pecuária, é um problema ambiental significativo, especialmente em regiões com alta pluviosidade. As voçorocas representam o estágio mais avançado desse processo erosivo. A partir imageamento efetuado pelo VANT, foi gerado um ortomosaico e o modelo digital de terreno (MDT) que permitiu delimitar, analisar suas dimensões, e a aplicar o índice topográfico de umidade (TWI), na voçoroca. Os resultados indicaram que a feição erosiva se encontra ativa e em constante expansão, com evidências de escoamento superficial e subsuperficial, como a presença de *piping*, além de terracetes no entorno da paisagem degradada. Na análise do TWI, calculado a partir do MDT, auxiliou na compreensão da influência da topografia e direção preferencial dos fluxos de escoamento superficial, influenciando na dinâmica dos processos erosivos. A aplicação do VANT demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o monitoramento e caracterização de voçorocas, fornecendo dados precisos e atualizados para o desenvolvimento de estratégias de recuperação e manejo sustentável do solo.

INTRODUÇÃO

A erosão dos solos é um fenômeno natural que ocorre globalmente, transformando paisagens, em diversas escalas e é considerada um problema ambiental significativo. A erosão hídrica, é desafiadora, especialmente em áreas tropicais, devido aos altos índices pluviométricos que agravam o fenômeno, podendo afetar qualquer

¹ Mestrando do Curso de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, gabriel.thaumaturgo@gmail.com;

² Graduando da Licenciatura em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, willianspjr@gmail.com.

³ Doutorando do Curso de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, marquesfilho.jp@gmail.com

⁴ Professor Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, antoniotguerra@gmail.com.

paisagem com declividade superior a 3° graus (Jorge e Guerra, 2013; Guerra *et al.*, 2020; Loureiro e Guerra, 2023).

Além disso, os autores Fullen e Catt (2004), Jorge e Guerra (2013) e Poesen (2018) apontam que a erosão hídrica é responsável por causar tanto impactos locais (*onsite*), como a infertilidade dos solos, quanto fora dos locais de origem (*offsite*), como a deposição de sedimentos em estradas e rios, vindo a causar diferentes impactos socioambientais

Por outro lado, as mudanças climáticas influenciam drasticamente na aceleração dos processos erosivos e degradação dos solos, em vista o aumento dos eventos extremos de chuvas concentradas em curtos intervalos de tempo, associadas às áreas desmatadas, urbanizadas e impermeabilizadas (Cardoso, Silva e Guerra, 2020; Loureiro e Guerra, 2023)

A degradação dos solos é intensificada por intervenções antrópicas, como desmatamento, pecuária em encostas, agricultura sem práticas conservacionistas e cortes inadequados de taludes para abertura de estradas. Assim, acelerando o escoamento superficial e a formação de ravinas e voçorocas, além da perda de sedimentos e matéria orgânica, tornando-os inférteis (Fullen e Catt, 2004; Guerra, 2017; Poesen, 2018; Coelho Netto, 2021; Guerra, Bezerra e Jorge, 2023).

Entre as feições erosivas que causam a degradação dos solos, as voçorocas são caracterizadas como o estágio mais avançado da erosão, formadas a partir do escoamento superficial concentrado na encosta, removendo e transportando os sedimentos para áreas distintas, onde tendem a evoluir e intensificar-se (Verdonk, 2015; Ionita *et al.*, 2015). A feição erosiva também pode apresentar escoamento subsuperficial, com a ocorrência de *piping* nas paredes laterais da feição erosiva, que vão influenciar em sua ampliação (Guerra, 2021).

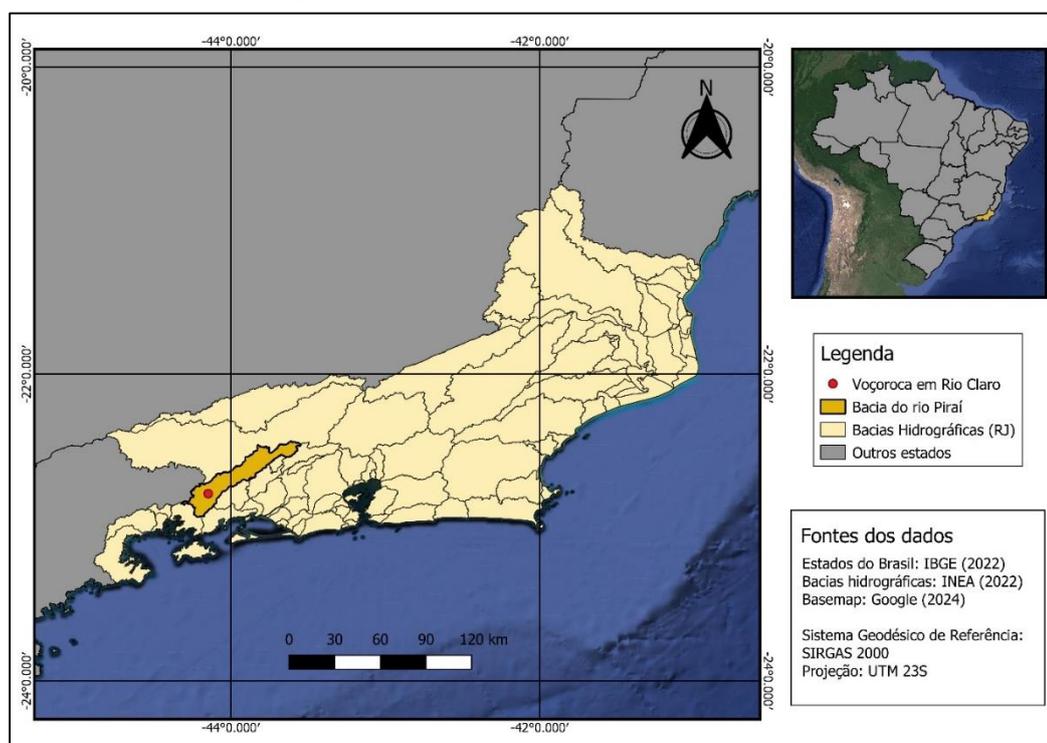
Compreender os processos erosivos é crucial para a escolha das metodologias e técnicas adequadas para monitoramento, diagnóstico e recuperação das áreas degradadas. Cada vez mais novas técnicas e tecnologias estão sendo desenvolvidas, para diagnosticar corretamente e garantir a eficácia das medidas de recuperação (Jorge e Guerra, 2013; Guerra, Bezerra e Jorge, 2023).

Nesse sentido, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) destacam-se no monitoramento e diagnóstico ambiental, usados em diversas áreas de estudo. Eles permitem obter imagens aéreas de alta resolução, modelos digitais de terreno e superfície,

e em menor resolução temporal, comparado às imagens dos sensores orbitais. Isso possibilita estudos em intervalos definidos pelos pesquisadores, diferente das imagens de satélite que têm um recorte temporal fixo (Longhitano, Mantovani e Beltrão, 2016; Salgado, 2016; Garritano *et al.*, 2018).

Portanto, este trabalho tem por objetivo caracterizar uma voçoroca no município de Rio Claro – RJ, localizado no Alto Curso da Bacia do rio Pirai (Figura 1). Ressalta-se a importância da aplicação das geotecnologias, na identificação e mapeamento de feições erosivas, uma vez que possibilitam o monitoramento ambiental mais eficaz, corroborando com as potencialidades dos VANTs nos estudos dos processos erosivos (Loureiro, 2019).

Figura 1 – Localização da Área de Estudo



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

A área de estudo está localizada no reverso da escarpa da Serra do Mar, no Alto Curso do rio Pirai, no município de Rio Claro (RJ), inserida no contexto do Médio Vale do Paraíba do Sul, onde o rio Pirai é um afluente da margem direita do rio Paraíba do Sul (Loureiro, 2019).

O histórico de uso e ocupação no Médio Vale do Paraíba está intimamente relacionado aos ciclos econômicos da cana-de-açúcar, do café, e atualmente, da pecuária,

desencadeando em uma sucessão de processos erosivos, degradação dos solos e voçorocamento (Carvalho *et al.*, 2010; Loureiro, 2019).

METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos deste trabalho consistiram em três etapas. I) baseada no levantamento bibliográfico sobre a temática abordada. II) obtenção das imagens aéreas da voçoroca, por um voo programado no *software DroneDeploy* (Tabela 1) e no sobrevoo com o VANT DJI *Phantom 4*, seguindo as normas da circular técnica para Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3 (EMBRAPA, 2018). III) processamento digital das imagens aéreas, obtidas em conjunto pelo *software DroneDeploy e do VANT*, para a geração do ortomosaico e modelo digital de terreno, posteriormente, manipuladas no *software Qgis 3.28*.

O sobrevoo na área de estudo, pré-programado no *software DroneDeploy*, gerou 77 imagens (Tabela 1). Estas, foram processadas no mesmo aplicativo utilizado para programar o voo, onde foi possível gerar um ortomosaico, sendo o primeiro resultado deste estudo, de grande importância para caracterizar a feição erosiva sob diferentes aspectos.

Tabela 1 – Dados do sobrevoo

Tempo de voo	6 minutos e 18 segundos
Altura do voo	110 metros
Área coberta	1,21 hectares
Quantidade de Imagens	77 imagens
Sobreposição Frontal das Imagens	80%
Sobreposição Lateral das imagens	75%

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

Diante do ortomosaico, foi gerado perfil longitudinal e transversais, onde foi possível extrair dados sobre a dimensão da feição erosiva e a topografia existente dentro da voçoroca. A fim de validar tal fato, utilizou-se o Índice Topográfico de Umidade (TWI) introduzido por Beven e Kirkby (1979), que tem por objetivo mensurar a distribuição da umidade do solo de forma espacial, considerando a influência da área de

contribuição. Essa área refere-se à parte do terreno que contribui para o escoamento em um ponto específico, e sua configuração afeta diretamente a capacidade do solo em reter água.

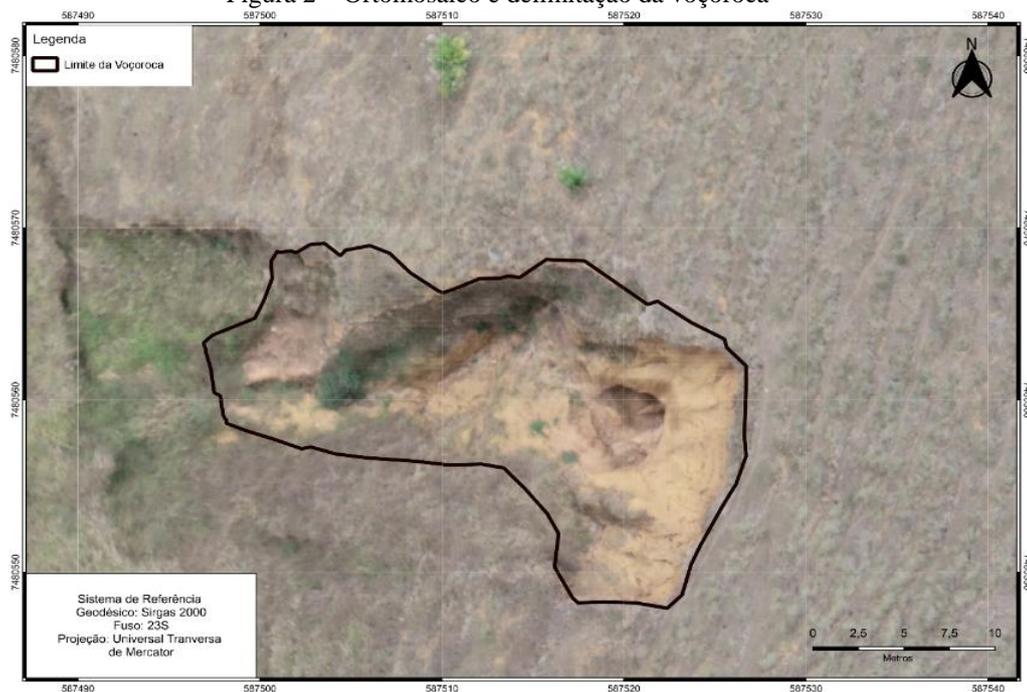
De acordo com Grabs *et al.*, (2019) os autores apontam que valores positivos do TWI apontam para zonas com maiores chances de estarem úmidas ou saturadas, indicando a ocorrência de escoamento nessas áreas. Por outro lado, os valores estão relacionados a locais com menor potencial de retenção hídrica. Além disso, Grabs *et al.*, (2019) apontam que a fórmula do TWI apresenta relação entre a área de contribuição e a inclinação do terreno, onde possibilita avaliar a umidade do solo em diferentes pontos da paisagem.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do ortomosaico (Figura 2), foi possível delimitar a voçoroca selecionada, identificar suas dimensões (Tabela 2) e o grau de atividade dos processos erosivos. É possível observar que a voçoroca está ativa, sem a presença de cobertura vegetal no interior, onde o solo encontra-se mais exposto aos efeitos da erosão por *splash*. Além disso, é possível identificar a presença de terracetes no entorno da feição erosiva.

Para Volk, Cogo e Streck (2010) e Guerra (2016) essas feições se originam a partir do pisoteio do gado, influenciando na compactação do solo e, conseqüentemente, no aumento do escoamento superficial. Por outro lado, é possível identificar a presença de *piping* no interior da voçoroca, indicando a sua presença nas paredes laterais da feição erosiva, responsáveis pelo escoamento subsuperficial e ampliação das voçorocas (Guerra, 2021).

Figura 2 – Ortomosaico e delimitação da voçoroca



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

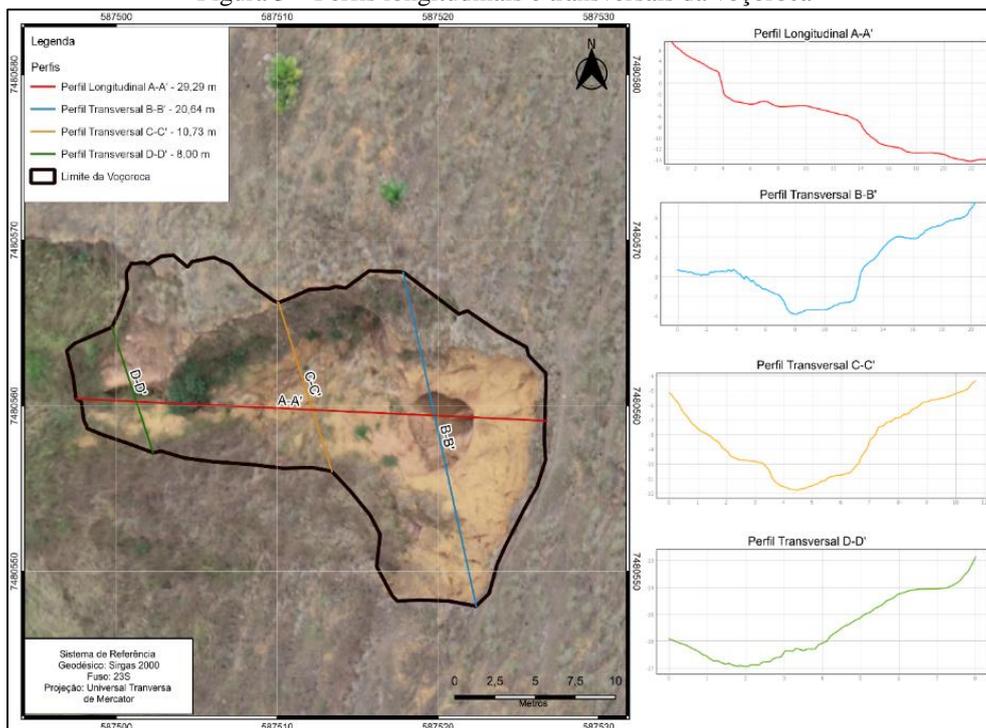
Tabela 2 – Dimensões da Voçoroca

Dimensões da Voçoroca	
Área em m ²	365,82m ²
Perímetro	87,56m

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

Com os perfis elaborados, foi possível observar o comportamento existente no interior da voçoroca e sua dimensão (Figura 3 e Tabela 3). O perfil longitudinal, em vermelho, indica a declividade existente da cabeceira até a base da voçoroca. No perfil transversal B-B' corresponde a largura máxima, onde é possível observar a incisão mais acentuada da feição erosiva próxima ao *piping*. O perfil transversal C-C' indica a largura média e o D-D' a largura mínima, onde em ambos, é possível identificar a incisão principal em desníveis acentuados nas áreas sem cobertura vegetal, resultantes do caminho preferencial do escoamento superficial.

Figura 3 – Perfis longitudinais e transversais da voçoroca



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

Tabela 3 – Dimensões dos perfis longitudinais e transversais

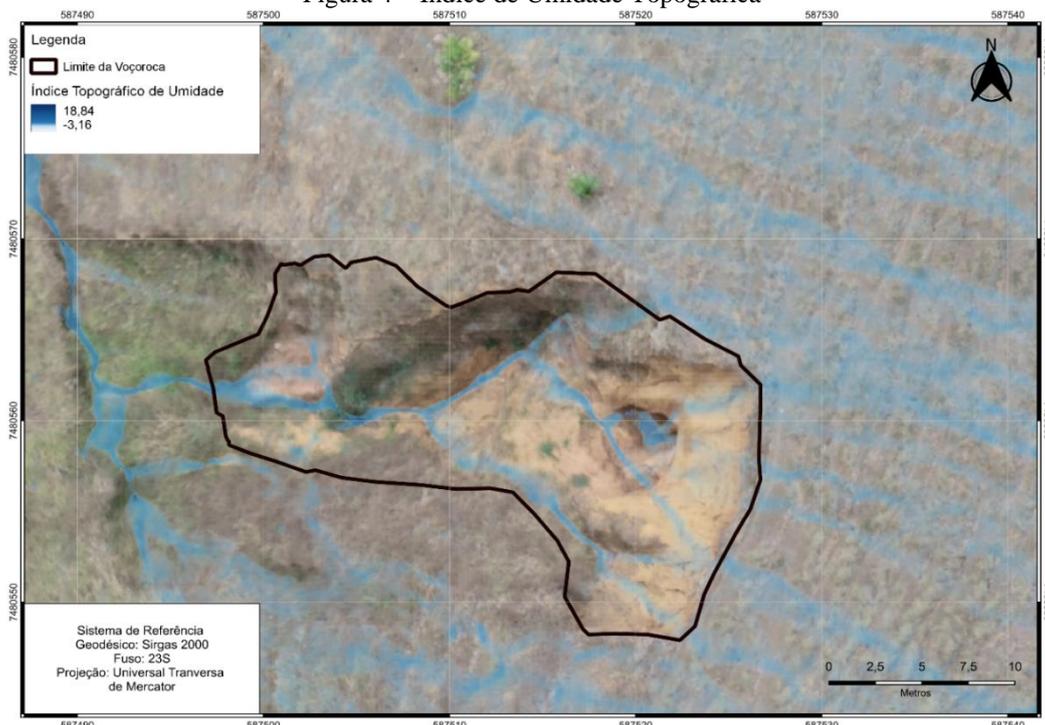
Perfis	Tipo	Comprimento
A-A'	Longitudinal	29,29m
B-B'	Transversal	20,64m
C-C'	Transversal	10,73m
D-D'	Transversal	8,00m

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

A topografia representada nos perfis, apontam maior incisão no interior da voçoroca, devido ao escoamento superficial em seu interior.

Ao relacionar os perfis elaborados (Figura 3) e a aplicação do Índice Topográfico de Umidade – TWI (Figura 4), é possível identificar que os valores positivos de TWI estão nas áreas de maior incisão, no interior da feição.

Figura 4 – Índice de Umidade Topográfica



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

Diante da figura 4, é possível observar que as zonas com maior umidade e saturadas, correspondem às áreas de caminho preferencial do escoamento superficial, desde a cabeceira da voçoroca, que de certo modo, irão contribuir para acelerar os processos erosivos e recuar a sua cabeceira, aumentando suas dimensões. No interior do *piping* também é possível observar valores positivos de umidade e saturação, que validam a ocorrência de escoamento subsuperficial. Por outro lado, os valores negativos no contexto da voçoroca analisada, correspondem às áreas com maiores declividades, e no entorno da encosta retilínea, como as paredes da voçoroca.

Além disso, percebe-se que o caminho preferencial do escoamento superficial está condicionado a diferentes fatores controladores do processo erosivo, pois ocorre de forma difusa no interior da feição erosiva, gerando diferentes morfologias na paisagem degradada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização da voçoroca selecionada, realizada por meio de imagens aéreas capturadas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), revelou um cenário complexo e

dinâmico de processos erosivos. A análise integrada dos dados obtidos permitiu identificar a morfologia da voçoroca, suas dimensões e as principais áreas de concentração do escoamento superficial, evidenciando a importância do relevo na evolução dessa feição erosiva.

O Índice Topográfico de Umidade (TWI) corroborou com as observações efetuadas em campo, indicando uma forte correlação entre as áreas de maior umidade e saturação do solo com as zonas de maior incidência da voçoroca. Essa relação demonstra a influência direta da topografia na concentração do escoamento superficial e, conseqüentemente, na intensificação dos processos erosivos. A presença de *piping*, identificada também nos perfis transversais e longitudinal, reforça a complexidade dos processos atuantes e a necessidade de considerar tanto o escoamento superficial quanto o subsuperficial na análise da evolução da voçoroca.

A relevância da utilização de VANTs no monitoramento de processos erosivos, permitem a obtenção de dados georreferenciados de alta resolução em áreas de difícil acesso e em curto espaço de tempo. A geração de produtos como ortomosaicos e modelos digitais de terreno (MDT) possibilitam a análise detalhada da morfologia da voçoroca, bem como a delimitação e a identificação de suas dimensões. Além disso, a integração desses dados com informações sobre o uso e cobertura da terra, clima e geologia permitem uma compreensão adequada dos fatores condicionantes da erosão e a avaliação da eficácia de medidas de controle.

Por fim, este estudo demonstra o potencial da tecnologia de VANTs na caracterização e monitoramento de voçorocas, fornecendo subsídios importantes para o desenvolvimento de estratégias de conservação do solo em áreas suscetíveis à erosão, como o município de Rio Claro (RJ).

Palavras-chave: Monitoramento; VANT, Voçorocas, Degradação, Rio Claro (RJ)

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.
- CARDOSO, C.; SILVA, M. S.; GUERRA, A. J. T. Apresentação: Geografia e os riscos socioambientais. In: CARDOSO, C.; GUERRA, A. J. T.; SILVA, M. S (Org). **Geografia e os riscos socioambientais**. 1º. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020. p. 13-24.

CARVALHO, E. M.; PINTO, S. A.; SEPE, P. M.; ROSSETTI, L. A. F. G. Utilização do geoprocessamento para avaliação de riscos de erosão do solo em uma bacia hidrográfica: Estudo de caso da bacia do rio Passa Cinco/SP. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO*, 3. 2010, Recife. Anais [...]. Recife: SBC, 2010. p. 1-82.

EMBRAPA ACRE. **Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3**. Rio Branco: EMBRAPA ACRE, 2018. 56 p.

FULLEN, M. A.; CATT, J. A. **Soil Management – Problems and Solutions**. Oxford: Oxford University Press, 2004.

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.

GRABS, T; SEIBERT, J.; BISHOP, K.; LAUDON, H. Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *Journal of Hydrology*, v. 373, p. 15-23, 2009.

GUERRA, A. J. T.; BEZERRA, J. F. R.; JORGE, M. C. O. Recuperação de voçorocas e de áreas degradadas, no Brasil e no mundo: Estudo de caso da voçoroca do Sacavém - São Luís - MA. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, p. 1-20, 2023.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; BEZERRA, J. F. R.; SHOKR, M.S. Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. *Pedosphere*, v. 27, n. 1, p. 27-41, 2017.

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. Processos Erosivos nas Encostas. *In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos*. 15º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2021. p. 149-209.

IONITA, I.; FULLEN, M. A.; ZGLOBICKI, W.; POESEN, J. Gully erosion as a natural and human-induced hazard. *Natural Hazards*, v. 79, p. S1-S5, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1935-z>.

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: JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T. (Org.). Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 7-30.

LONGHITANO, G. A.; MANTOVANI, J. C.; BELTRÃO, S. R. B. As contribuições associadas ao uso de VANTs para monitoramento da evolução de processos erosivos em Sonora-MS. GRSS-YP & ISPRS SUMMER SCHOOL, UNESP, Presidente Prudente, 2016.

LOUREIRO, H. A. S. **Diagnóstico de Erosão por Voçorocas: Experimentos com Geotecnologias e Solos na Bacia do Alto Rio Pirai – 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.

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T. **Erosão em Áreas Tropicais.** 1º ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2023. 270 p.

SALGADO, J. G. Mapeamento de voçoroca utilizando geotecnologia de levantamento por Drone. *In: SIMPÓSIO MINEIRO DE GEOGRAFIA*, 2016, Juiz de Fora. Anais [...]. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.

POESEN, J. Soil Erosion in the Anthropocene: Research Needs. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, p. 64-84, 2018.

VERDONK, S. C. **Gully Volume Estimates Using UAV Photometry in the Salagou Area.** 2015. Dissertação de mestrado em Ciências - University of Utrecht, Utrecht, 2015.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P.; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e sub-superfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 763-774, 2004.