



Margarida Penteado

Revista de
Geomorfologia



PROCESSOS EROSIVOS EM ESTRADA PAVIMENTADA: MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE VOÇOROCA EM RIO CLARO/RJ- BRASIL

*EROSIVE PROCESSES ON PAVED ROAD: GULLY MONITORING AND
ASSESSMENT IN RIO CLARO MUNICIPALITY, RIO DE JANEIRO STATE/BRAZIL*

*PROCESOS EROSIVOS EN CARRETERAS PAVIMENTADAS: MONITOREO Y
DIAGNÓSTICO DE VOÇOROCAS EN RIO CLARO/RJ, BRASIL*

Diego Janoti Suarez¹

¹ Mestrando do Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ),

E-mail: diegojanoti@gmail.com,

 <https://orcid.org/0000-0002-7632-8809>

Wellynne Carla de Sousa Barbosa²

² Doutora em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ),

E-mail: wellynnekarla@gmail.com,

 <https://orcid.org/0000-0001-5885-1631>

Antonio José Teixeira Guerra³

³ Professor Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ),

E-mail: antoniotguerra@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-2562-316X>

Helena Polivanov⁴

⁴ Professora Titular do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ),

E-mail: hpolivanov@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-1331-9224>

RESUMO

A voçoroca é uma feição erosiva relacionada à erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos, relevo e ação humana, que pode intensificar o processo, causando impactos socioambientais e econômicos. Esta pesquisa teve como objetivo monitorar e diagnosticar a voçoroca no talude da estrada RJ-155/BR-494. Foram coletadas amostras de solo para análises laboratoriais (textura, densidade e porosidade) e utilizadas geotecnologias, imagens de satélite, VANTs e softwares (Google Earth Pro, Maps, Street View, Drone Deploy, SketchUp e Excel). Identificaram-se quatro classes texturais, predominando a franco-arenosa. Em cinco dos sete pontos, a densidade do solo apresentou valores críticos. As imagens históricas mostraram evolução da feição e avanço em direção à RJ-155 e suas estruturas de drenagem

Palavras-chave: Erosão. Voçorocas. Geotecnologias. Solos.

ABSTRACT

Gully erosion is a landform associated with rainfall erosivity, soil and rock erodibility, terrain characteristics, and human activity, which can intensify the process and cause significant socio-environmental and economic impacts. This research aimed to monitor and diagnose a gully located on the slope of the RJ-155/BR-494 paved road. Soil samples were collected for laboratory analysis (texture, density, and porosity), and geotechnologies, satellite images, UAVs, and software tools (Google Earth Pro, Maps, Street View, Drone Deploy, SketchUp, and Excel) were used for monitoring and diagnosis. Four soil textural classes were identified, with sandy loam being predominant. Soil density revealed critical values at five of the seven sampled



points. Historical images indicated the evolution and continuous growth of the gully toward the RJ-155 and its drainage structures.

Keywords: Erosion; Gullies; Geotechnologies; Soils.

RESUMEN

La cárcava es una forma erosiva vinculada a la erosividad de lluvias, erodibilidad del suelo y rocas, relieve y acción humana, que puede intensificar el proceso y causar impactos socioambientales y económicos. Esta investigación tuvo como objetivo monitorear y diagnosticar la cárcava en el talud de la carretera RJ-155/BR-494. Se recolectaron muestras de suelo para análisis de textura, densidad y porosidad y se utilizaron geotecnologías, imágenes satelitales, VANTS y softwares. Se identificaron cuatro clases texturales, con predominio de franco-arenosa. En cinco de los siete puntos, la densidad presentó valores críticos. Las imágenes históricas mostraron la evolución de la feição y su avance hacia la RJ-155 y sus estructuras de drenaje.

Palabras clave: Erosión; Cárcavas; Geotecnologías; Suelos.

INTRODUÇÃO

A erosão às margens de estradas é um problema recorrente nas rodovias brasileiras, que persiste há décadas devido ao descaso ou à ineficaz aplicação das soluções já existentes por parte de muitos órgãos e agentes públicos. Esse tema envolve riscos às pessoas e estruturas.

Para análises e prevenções consistentes da erosão às margens de estradas é necessário avaliar as causas dos processos erosivos, e isso ocorre através de estudos sobre erosão do solo, assim como a compreensão de suas características físicas e distribuição no contexto geográfico, valorizando assim sua função essencial para o ecossistema (Kuhn *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2016; Guerra *et al.*, 2017, 2020; Loureiro *et al.*, 2022; Guerra *et al.*, 2023).

A construção civil, ligada ao modal rodoviário, nem sempre é desenvolvida com o planejamento adequado, o que pode ocasionar impactos no meio ambiente, tais como: desmatamento, erosão, alteração nos cursos fluviais acarretando a perda de recursos naturais e biodiversidade. Muito embora a erosão seja um processo natural, ela também é ocasionada pela ação humana, que atua diretamente na degradação de áreas frágeis e agrava o processo erosivo. E com isso, é essencial a adoção de medidas para conservação do ambiente, com atividades sustentáveis de uso do solo (Brady e Weil, 2009; Castro *et al.*, 2011; Fullen e Catt, 2014; Guerra e Jorge, 2017; Santos e Guerra, 2021; Lima *et al.*, 2022; Guerra *et al.*, 2023).

A dinâmica da erosão dos solos é um processo cíclico, pois envolve a remoção e o transporte de material superficial em um ciclo contínuo, contribuindo para a transformação da paisagem, como o surgimento de ravinas e voçorocas, além de ocasionar uma série de outros problemas como a perda de fertilidade do solo, assoreamento de rios e lagos, diminuição da capacidade de infiltração da água no solo e, conseqüentemente, o aumento do risco de enchentes e deslizamentos de terras. É importante destacar que o uso inadequado do solo, associado às atividades humanas, altera o equilíbrio do ciclo erosivo, intensificando a perda de materiais ligados ao escoamento superficial e subsuperficial, culminando na degradação dos solos e danos socioeconômicos, como deterioração de estradas, escorregamentos, dutos, problemas nas edificações, barragens, etc. (Brady e Weil, 2009; Boardman e Evans, 2020; Santos e Guerra, 2021; Caldas *et al.*, 2019; Frota Filho *et al.*, 2020; Guerra, 2021; Lima *et al.*, 2022; Pinheiro *et al.*, 2022; Guerra e Loureiro, 2023).

À medida que essas feições erosivas se alargam e se aprofundam, podem evoluir para voçorocas. Estas, por sua vez, envolvem processos erosivos complexos, desencadeados por vários fatores. As voçorocas se desenvolvem em diferentes declividades, em áreas de pouca vegetação, com material menos coeso ou inconsolidado, sendo mais comuns em depósitos aluviais ou coluviais, além de detritos de movimentos de massa (Selby, 1982; Boardman *et al.*, 2019; Roskopf *et al.*, 2020; Frota Filho *et al.*, 2020; Guerra *et al.*, 2020; Loureiro *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2021; Guerra *et al.*, 2023).

A partir dessa concepção, foi utilizado no presente estudo um trecho da estrada RJ-155 (BR-494), no município de Rio Claro-RJ, considerando que é uma via que liga os municípios

de Barra Mansa e Angra dos Reis, com grande relevância para a região, inserida no alto curso da bacia hidrográfica do rio Pirai, com o predomínio do relevo de mares de morros. Ademais, a rodovia estudada sofre danos constantes, como feições erosivas do tipo voçorocas, que se instalam em suas margens, o que motivou a presente pesquisa.

É importante ressaltar que estudos sobre monitoramento e diagnóstico de voçorocas são discutidos a nível internacional (Kuhn *et al.*, 2014; Goodwin *et al.*, 2016; Boardman e Evans, 2019; Fernández *et al.*, 2020; Loureiro *et al.*, 2020). Este trabalho tem como objetivo monitorar e diagnosticar a voçoroca localizada no talude da estrada RJ-155 (BR-494), no município de Rio Claro-RJ. Propõe-se a discussão de dados e informações obtidos por intermédio do uso de geotecnologias (ortofotos, NDVI, hipsometria e imagens de satélite) e análises laboratoriais (textura, densidade e porosidade) a fim de monitorar a degradação do solo pela erosão hídrica no talude de estrada pavimentada, que resultou na formação de uma voçoroca.

VOÇOROCA: REFLEXÕES SOBRE CONCEITOS E METODOLOGIAS

A evolução das ravinas para voçorocas, está relacionada ao tamanho dessas feições. Diversos autores estabelecem diferentes medidas iniciais acerca da área, largura e profundidade de uma voçoroca. Essa determinação é importante pois é o critério mais usado na diferenciação das feições erosivas (Quadro 1). Além do fator tamanho, Fullen e Catt (2004) consideram que as ravinas tendem a incidir no horizonte A do solo, enquanto as voçorocas atingem facilmente os horizontes B e C, podendo, às vezes, chegar à rocha matriz.

Quadro 1 - Comparativo conceitual das medidas de voçorocas.

Autores/Instituições	Largura (cm)	Profundidade (cm)	Área (m ²)
Imeson e Kwaad (1980)	>100	>100	-
Foster (1982) e Bergsma <i>et al.</i> (1996)	>30	>30	-
Oliveira (2012) e Morgan (2009)	>50	>50	-
Poesen <i>et al.</i> (2003)	-	-	1
Castillo e Gómez (2016)	-	>30	-
Guerra (2021)	>50	>50	-

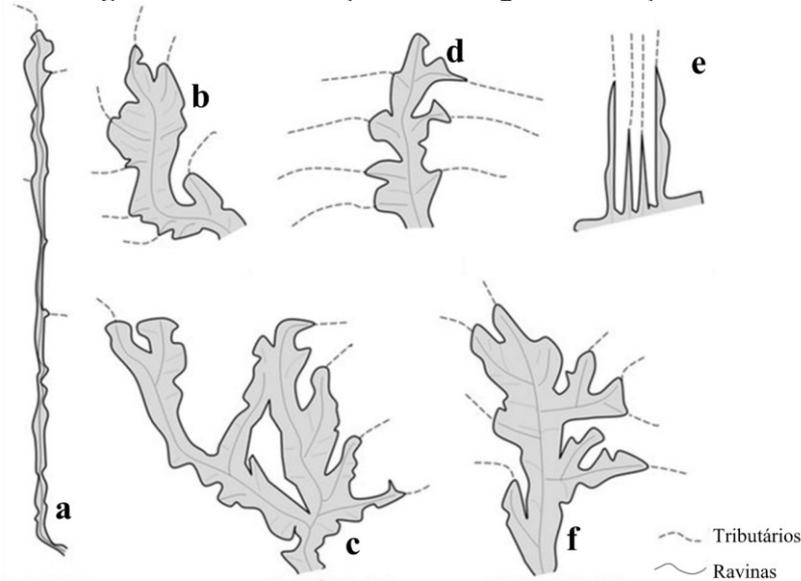
Fonte: Elaborado pelos autores

O Quadro Comparativo apresenta medidas de voçorocas de diferentes autores e instituições e fornece informações importantes e reflexivas sobre o tema, destacando as variações nas medidas de largura, profundidade e área das voçorocas, o que contribui para uma compreensão mais ampla desses fenômenos erosivos. Essas informações podem auxiliar na contextualização do problema e na fundamentação teórica da pesquisa, fornecendo um panorama das abordagens e medidas adotadas por outros estudiosos no campo da erosão do solo.

A erodibilidade do solo é um aspecto importante a ser considerado no estudo das voçorocas. Ao abordar a erodibilidade, destacamos propriedades físicas do solo, como textura, densidade e porosidade, que desempenham papéis fundamentais nos processos erosivos. A textura do solo, por exemplo, influencia diretamente a taxa de infiltração de água, enquanto a densidade e porosidade estão relacionadas à resistência do solo à erosão. Portanto, ao compreendermos a erodibilidade do solo, podemos analisar de forma mais aprofundada os processos de formação e evolução das voçorocas, o que é relevante para o monitoramento e diagnóstico desses fenômenos (Goodwin *et al.*, 2016; Guerra e Jorge, 2017; Boardman e Evans, 2019; Fernández *et al.*, 2020; Loureiro *et al.*, 2020; Frota Filho *et al.*, 2020).

Outra forma de classificar voçorocas é a partir da forma em que ela se apresenta na natureza, uma proposta de classificação foi feita por Ireland *et al.* (1939), com boa aceitação na comunidade científica e se baseia na morfologia, de acordo com a autora são identificados os seguintes tipos: a) linear; b) bulbiforme; c) dendrítica; d) em treliça; e) paralela; f) composta (Figura 1).

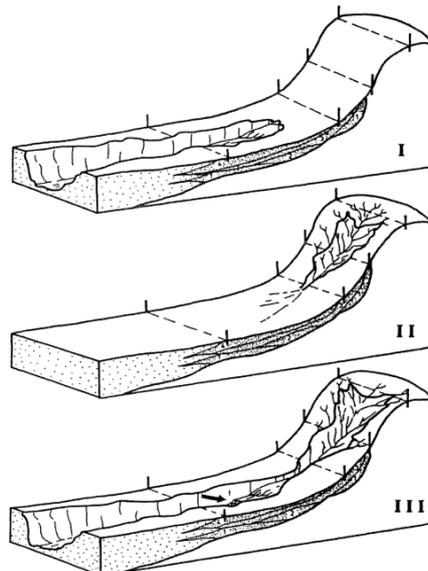
Figura 1 - Classificação morfológica das voçorocas



Fonte: Adaptado de Ireland *et al.*, (1939).

Os tipos de voçorocas indicados na Figura 2 foram propostos por Oliveira (2023), apontando diferentes situações desse processo, as marcas verticais que representam três situações distintas de voçorocamento, indicam zonas de associação entre setores de encosta e a geometria desses fenômenos erosivos. O caso antrópico não está representado na figura, pois não possui características genéricas.

Figura 2 - Tipos de voçorocas



Legenda: I – Voçoroca integrada, II - Voçoroca desconectada, III – Integração dos dois tipos de voçorocas. A seta em III indica a previsão de um degrau no canal integrado. **Fonte:** Oliveira (2023).

Os tipos de voçorocas propostos por Oliveira (2023) destacam diferentes situações desse processo erosivo, evidenciando as associações entre setores de encosta e a geometria desses fenômenos. Essa classificação pode auxiliar na escolha do tipo de monitoramento das voçorocas, pois as características morfológicas desses fenômenos podem influenciar as técnicas mais adequadas a serem utilizadas. Por exemplo, voçorocas com características lineares podem requerer abordagens de monitoramento diferentes das voçorocas bulbiformes. Logo, ao considerar a classificação morfológica das voçorocas, podemos direcionar de forma mais precisa as estratégias de monitoramento, contribuindo para uma melhor compreensão desses fenômenos.

O monitoramento contínuo das voçorocas é uma metodologia importante para compreender sua dinâmica e evolução ao longo do tempo. Esse monitoramento pode ser feito por meio de diferentes técnicas, como geotecnologias (drones, imagens de satélite, GPS), medições no local, análises laboratoriais e observações de campo. Além disso, é importante considerar a integração dessas metodologias para obter uma visão holística das voçorocas. Por exemplo, o uso de drones e imagens de satélite pode fornecer informações detalhadas sobre a morfologia e extensão das voçorocas, enquanto as medições no local relacionadas ao solo e análises laboratoriais podem fornecer dados como propriedades do solo, discutidos anteriormente, e a dinâmica hídrica (Goodwin *et al.*, 2016; Guerra *et al.*, 2017; Boardman *et al.*, 2019; Garritano *et al.*, 2019; Poesen *et al.*, 2003; Loureiro *et al.*, 2020; Moura, 2021; Guitierrez *et al.*, 2023).

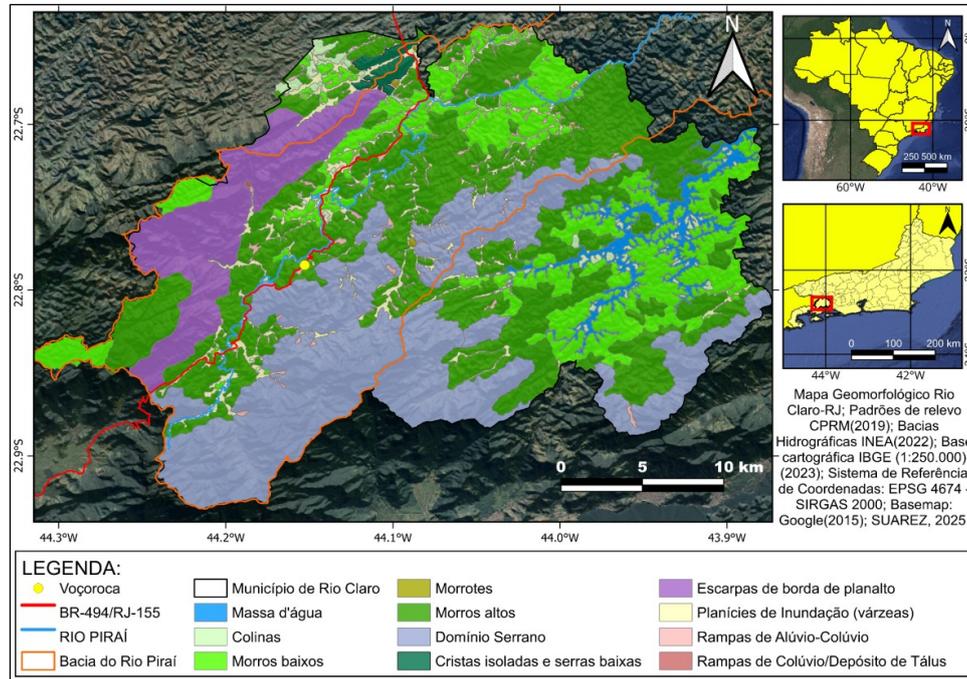
Inspeções regulares das voçorocas são cruciais para a gestão e manutenção adequada de estradas, especialmente no que diz respeito à prevenção de acidentes e à preservação das estruturas viárias. Um bom sistema de drenagem, conforme destacado por Lima *et al.* (2022), contribui significativamente para a durabilidade das estradas, evitando o acúmulo de água nas rodovias e a erosão em estruturas como taludes, sarjetas, caixas coletoras, bueiros de greide, descidas d'água de aterro e dissipadores de energia. A integração entre o monitoramento das voçorocas e a implementação de sistemas de drenagem eficientes é essencial para garantir a integridade das estradas e prevenir danos causados por processos erosivos.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo refere-se à voçoroca localizada no km 35 da estrada RJ-155 (BR-494) (22°47'05.5"S; 44°09'10.1"W), no município de Rio Claro-RJ, inserida no alto curso da bacia hidrográfica do rio Pirai (Médio Vale do Rio Paraíba do Sul) (Figura 3) reverso da escarpa da Serra do Mar.

Sobre o contexto geotectônico, localiza-se na porção interna do cinturão da Faixa Ribeira, parte da Província Mantiqueira, que é afetada pelo Ciclo Orogênico Neoproterozoico/Cambriano (Brasiliano). A Faixa Ribeira, segundo Almeida *et al.* (1973), constitui uma entidade geotectônica do Neoproterozoico. A voçoroca encontra-se inserida na Megassequência Andrelandia, Grupo Raposo, Unidade Conservatória, com a presença das rochas silimanita-granada-biotita gnaiss, hornblenda ortognaiss e quartzitos (Heilbron *et al.*, 2016). Por estar localizada em áreas de menor declividade no reverso da escarpa da Serra do Mar, a bacia do Alto rio Pirai apresenta solos mais espessos, favorecendo o uso agropecuário, ao contrário das escarpas oceânicas.

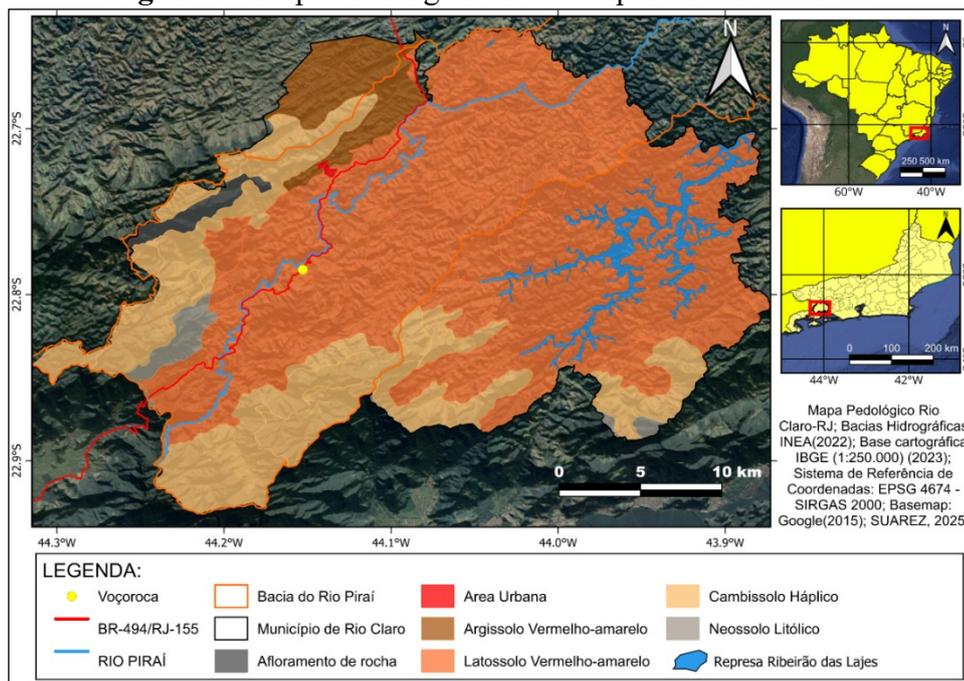
Figura 3 - Mapa Geomorfológico da área de estudo.



Fonte: IBGE, 2023, CPRM, 2019, INEA, 2022, GOOGLE (2015). Adaptação Suarez (2025).

As principais classes de solos predominantes na bacia do Alto Pirai são Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos, mais próximos ao leito do Rio Pirai, e Cambissolos Háplicos, que ocorrem em encostas íngremes. Nas porções altas da bacia ocorrem Neossolos Litólicos de característica intermediária da classe dos Cambissolos Háplicos, associados a Neossolos Litólicos na base de afloramentos rochosos. Também ocorrem Neossolos Flúvicos e Planossolos nos fundos de vale com topografia suave. Segundo a Figura 4, a voçoroca estudada se encontra em área com predomínio de Latossolos (Instituto Terra, 2008; Loreiro, 2019).

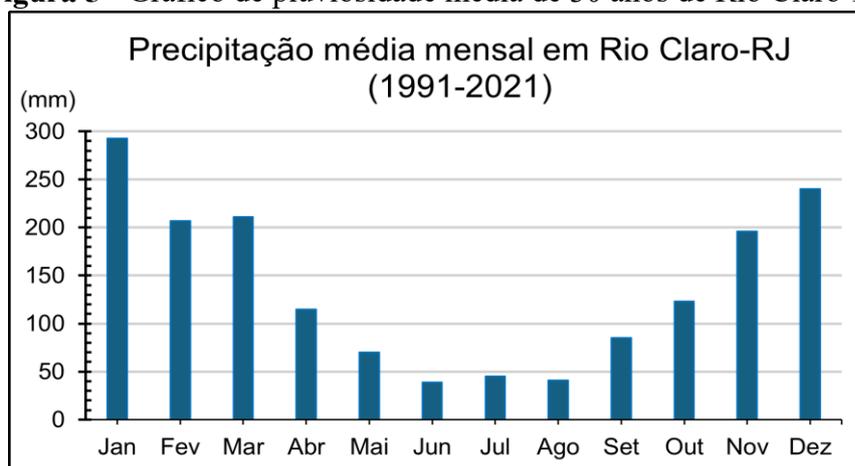
Figura 4 - Mapa Pedológico do município de Rio Claro-RJ



Fonte: INEA, 2022, IBGE, 2023, GOOGLE, 2015. Adaptação Suarez (2025).

O clima predominante em Rio Claro é o tropical superúmido, com temperatura média anual de 21°C e índice pluviométrico médio anual de 1665 mm. O regime pluviométrico é marcado por chuvas mais intensas entre os meses de outubro e março, e por uma estação seca entre abril e setembro (Figura 5). As chuvas na região da Serra do Mar são do tipo orográficas, concentrando-se principalmente nas escarpas, o que confere à área um alto potencial erosivo devido à declividade acentuada (Itpa, 2011; Inea, 2015; Ana, 2016; Climate-Data, 2020).

Figura 5 - Gráfico de pluviosidade média de 30 anos de Rio Claro-RJ.



Fonte: Climate-Data.org, 2025. Adaptação dos autores.

A vegetação da região está inserida no bioma da Mata Atlântica. No entanto, há um predomínio de gramíneas, devido à atividade antrópica, que utiliza o solo para pastagens e agricultura. Contudo, ainda é possível encontrar fragmentos isolados de vegetação florestal em topos de morros e algumas encostas da região (Itpa, 2011; Inea, 2015)

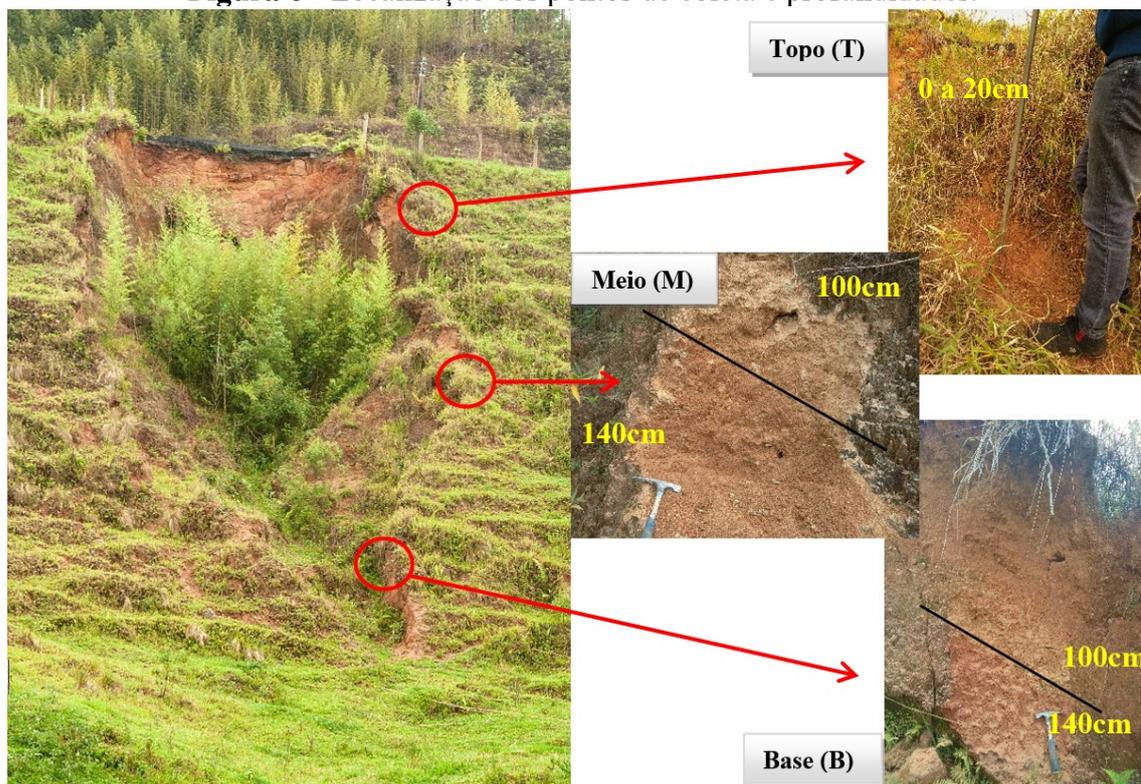
MATERIAIS E MÉTODOS

A etapa metodológica consistiu em três momentos: trabalho de campo, para investigação da área de estudo. Após seleção da voçoroca a ser analisada realizou-se a coleta de amostras de solo. Por fim fez-se os sobrevoos com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT).

Análises dos Solos

Nos trabalhos de campo foram observados aspectos importantes relacionados ao entorno da estrada e da erosão do solo na voçoroca estudada. Optou-se por coletar amostras em três pontos ao longo da borda direita da feição erosiva, nomeadas de Base, Meio e Topo (Figura 6). Com auxílio do trado holandês obteve-se três amostras deformadas na profundidade de 0 a 20cm. Nesses mesmos pontos foram coletadas três amostras indeformadas, utilizando o coletor volumétrico com anel de Kopecky de 100 cm³.

Figura 6 - Localização dos pontos de coleta e profundidades.



Fonte: Elaborado pelos autores.

No interior da voçoroca foram coletadas amostras das paredes, obtidas em dois pontos (base e meio), em profundidades de 20 a 100 cm e 100 a 140 cm. Totalizando quatro amostras deformadas, utilizando martelo estratigráfico, e oito indeformadas com o mesmo método do anel volumétrico.

As análises de solo foram feitas no Laboratório de Geomorfologia Maria Regina Mousinho de Meis (Departamento de Geografia da UFRJ), realizadas conforme Teixeira *et al.* (2017) e consistiram nas seguintes análises: granulometria, densidade do solo (D_s), densidade de partículas (D_p), e porosidade (P), calculada de forma indireta através da Eq. (1). Esses atributos ajudaram na composição do diagnóstico da erodibilidade.

$$P = (D_p - D_s) / D_p \quad (1)$$

Terminadas as análises no laboratório, os dados obtidos foram transcritos para planilhas de cálculo no programa *Microsoft Excel*, a fim de elaborar tabelas e gráficos. Após obter as porcentagens das frações areia, silte e argila, estas foram plotadas no triângulo textural (USDA) (Schoeneberger *et al.*, 2012).

Levantamento com Geotecnologias

Através das geotecnologias *Google Earth*, *Google Maps*, *Street View* e VANT (modelo *DJI Phantom 4 Pro*) foram obtidas imagens para interpretação de dados, estas foram analisadas posteriormente com auxílio de *softwares* como: *Excel professional 2024*, *Drone Deploy* e *SketchUp Pro*.

É importante ressaltar que os serviços Google, através de seus aplicativos *Google Earth*, *Google Maps* e *Street View*, têm impactado positivamente no suporte às pesquisas científicas. Estas ferramentas são alternativas de baixo custo e de grande relevância na compreensão de feições erosivas (Loureiro e Ferreira, 2013; Boardman *et al.*, 2016; 2019; Campos e Botelho, 2022).

O manuseio dessas ferramentas foi de suma importância para a realização desta pesquisa, auxiliando na tomada de decisão, desde as atividades pré-campo até as pós-campo. Utilizou-se o *Google Earth Pro* e o *Google Street View*, para comparar o histórico das imagens de satélite e ter uma visão com mais detalhe do local de interesse em diferentes anos (2012, 2015, 2017 e 2019). Esse procedimento possibilitou o monitoramento evolutivo da feição erosiva.

Foi utilizado um modelo 3D, de proposta adequada de estrutura de drenagem para situações semelhantes à estudada nesta pesquisa. Esse modelo foi construído a partir do aplicativo *Sketchup*, que se destaca pela rapidez, facilidade e acessibilidade na criação de estudos volumétricos.

O *software Microsoft Excel professional 2024* também foi usado para tabulação dos dados e confecção de tabelas e gráficos que auxiliaram na análise.

Os VANTs são muito utilizados em projetos sobre erosão de solos, pois auxiliam na compreensão desses processos geomorfológicos, pois proporcionam a captura rápida e precisa de múltiplas imagens com ótima qualidade. Logo, optou-se pelo seu uso no presente trabalho (Loureiro e Ferreira, 2013; Garritano *et al.*, 2019; Cunha *et al.*, 2020; Julian, 2020; Loureiro *et al.*, 2022; Kuinkel *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023).

Através da sobreposição das imagens captadas pelo VANT foi possível obter dados relevantes na observação da área, como características físicas das encostas (hipsometria), presença de cobertura vegetal ou solo exposto (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*), medidas como declividade, largura, comprimento, área e volume de feições erosivas. O plano de voo, o processamento digital das imagens e a modelagem 3D da área foram confeccionados através do *software Drone Deploy*. Imagens da etapa de sobrevoo e processamento das imagens podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 - Etapas de coleta e processamento de imagens com VANT.



Legenda: (a) Preparação para sobrevoo de VANT. (b) Sobreposição das imagens obtidas pelo VANT no software *Drone Deploy*. **Fonte:** Acervo dos autores

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Erodibilidade dos Solos da Voçoroca

Para determinar a classe textural do solo deve-se observar a predominância de uma, duas ou equilíbrio entre as três principais partículas que o compõem, areia, silte e argila (Brady e Weil, 2009; Centeno *et al.*, 2017; Cassol *et al.*, 2023; Gutierrez *et al.*, 2023). A voçoroca estudada apresenta um domínio de solos arenosos, como mostra a Tabela 1. Foram identificadas quatro classes texturais, argilo-arenoso, areia franca, franco-argilo-arenoso e franco-arenoso, sendo este o mais predominante, ocorrendo em quatro das sete amostras.

Tabela 1 - Análise granulométrica com definição da classe textural do solo da voçoroca.

Pontos	Profundidade (cm)	Areia Total (%)	Areia Grossa (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Silte + Areia Fina (%)	Classe Textural do Solo
T ¹	0 - 20	52,7	35,1	17,6	10,0	37,3	27,6	Argilo-arenoso
M1 ²	0 - 20	63,4	42,1	21,3	19,4	17,2	40,7	Franco-arenoso
M2 ²	20 - 100	82,6	63,8	18,7	11,0	6,4	29,7	Areia franca
M3 ²	100 - 140	68,2	51,8	16,5	12,5	19,2	29,0	Franco-arenoso
B1 ³	0 - 20	59,0	40,9	18,1	22,2	18,8	40,3	Franco-arenoso
B2 ³	20 - 100	76,9	61,4	15,5	12,1	11,0	27,6	Franco-arenoso
B3 ³	100 - 140	57,5	36,5	21,0	22,3	20,2	43,3	Franco-argilo-arenoso

Legenda: ¹ T: ponto amostral de solo coletado no topo. ² M: pontos amostrais de solo coletados no meio; ³ B: pontos amostrais de solo coletados na base da voçoroca.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Segundo Centeno *et al.* (2017) os solos arenosos têm baixos teores de matéria orgânica e nutrientes, estrutura de grãos simples, alta capacidade de drenagem e maior suscetibilidade à erosão. De acordo com as análises feitas em laboratório, observa-se que todas as camadas possuem mais de 52,7% de areia, podendo chegar até 82,6%, como no ponto M2.

De acordo com a Tabela 1, a presença da argila é menor nas profundidades de 20-100 cm (M2: 6,4% e B2: 11,0%), quando comparadas com as outras profundidades de 100-140 cm e 0-20 cm, chegando ao valor de 37,3% no ponto T1. Solos argilosos são mais coesos, menos permeáveis com drenagem mais lenta, e conseqüentemente são menos propensos à erosão (Soares *et al.*, 2018; Jalil *et al.*, 2021; Roskopf *et al.*, 2021; Santos e Guerra, 2021; Loureiro *et al.*, 2022; Lima e Guerra, 2023).

Avaliar os teores de silte e areia fina também é fundamental na análise da erodibilidade do solo, pois a literatura aponta que a combinação dessas frações a partir de 400 g/kg (40%) indica material mais propensa ao processo erosivo (Poesen *et al.*, 2003; Morgan, 2009; Fullen e Catt, 2014; Guerra *et al.*, 2017; Rangel e Guerra, 2018; Boardman e Evans, 2020; Guerra *et al.*, 2023). Na Tabela 1 é possível observar valores de “silte + areia” fina superiores a 40% nos pontos B1, B3 e M1

Segundo Reichert *et al.* (2003), Rangel e Guerra (2018), Densidade do solo (Ds) críticas para erosão situam-se entre os valores de 1,4 g/cm³ e 1,5g/cm³ na classe franco arenosa. As amostras apontaram para valores mais próximos desse contexto em cinco dos sete pontos coletados B1, B2, B3, M2 e M3 (Tabela 2), variando entre 1,41 e 1,71 g/cm³.

Tabela 2- Análises de Densidades do Solo, de Partículas e Porosidade.

Pontos	Profundidade (cm)	Densidade do Solo (g/cm ³)	Densidade de Partículas (g/cm ³)	Porosidade Total (%)
T1 ¹	0 - 20	1,31	2,66	50,65
M1 ²	0 - 20	0,92	2,63	65,11
M2 ²	20 - 100	1,51	2,64	42,63
M3 ²	100 - 140	1,47	2,60	43,41
B1 ³	0 - 20	1,71	2,59	33,95
B2 ³	20 - 100	1,43	2,62	45,99
B3 ³	100 - 140	1,41	2,63	46,39

Legenda: ¹ T: ponto amostral de solo coletado no topo. ² M: pontos amostrais de solo coletados no meio; ³ B: pontos amostrais de solo coletados na base da voçoroca.

Fonte: Elaborado pelos autores

Na profundidade 0-20 cm (B1, M1 e T1), horizonte mais superficial, os valores de D_s apresentaram variação significativa, em M1 devido à presença de raízes ($0,92 \text{ g/cm}^3$) e em B1 por trilhas de pisoteio de gado ($1,71 \text{ g/cm}^3$). Esse aumento na densidade é resultado da diminuição dos macroporos, ocasionando solos mais erodíveis (Salomão, 2015).

Avaliando os dados de porosidade, nota-se que a maioria dos pontos contém valores abaixo de 47%. Loureiro (2019) propõe o intervalo de 30 a 45% para baixas porosidades, 45 a 55% média, e acima de 55% alta porosidade para áreas degradadas. Logo, as amostras B1, M2 e M3 apresentam baixa porosidade, as amostras B2, B3 e T1 média, e M1 alta (Fullen e Catt, 2014).

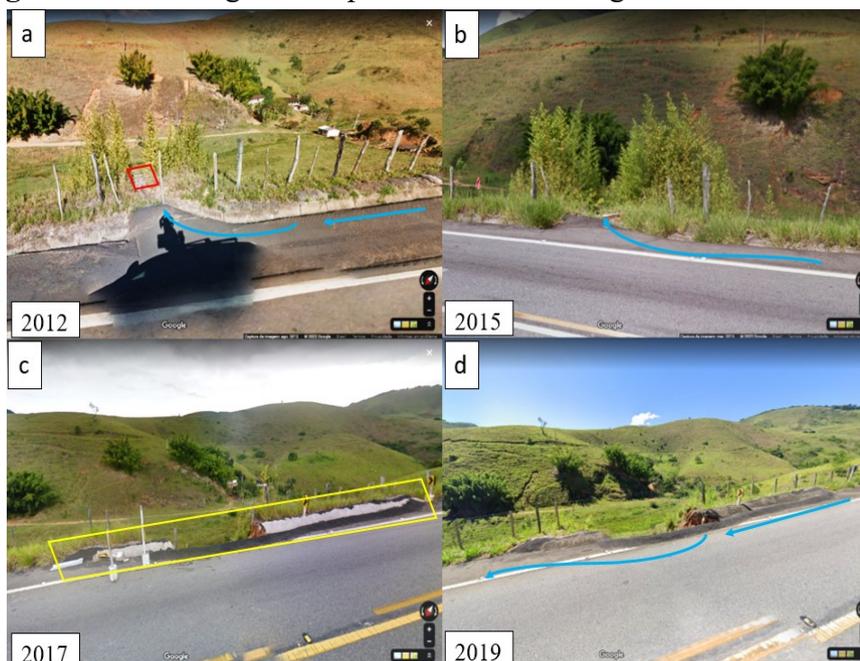
Segundo Lepsch (2016) o solo ideal apresenta 50% de poros, sendo 25% ocupados por água e 25% ocupados por ar, essa faixa proporciona uma boa capacidade de infiltração e drenagem, evitando problemas como a compactação do solo e o escoamento superficial, fatores cruciais no contexto da erosão dos solos. O desenvolvimento das raízes do pasto e menor compactação por pisoteio no topo da voçoroca (mais próximo da rodovia), podem justificar o valor encontrado nesta área (50,65%) ficando próximo do solo com porosidade ideal.

Com base nas observações de campo e nos resultados da análise granulométrica obtidos neste estudo, verifica-se que a textura predominantemente arenosa dos horizontes superficiais contribui para a maior erodibilidade do solo, conforme discutido por Lepsch (2021).

Produtos das Geotecnologias

Os produtos gerados a partir das geotecnologias possibilitam diferentes formas de análise, ao levar em consideração fatores como: disponibilidade, quantidade e qualidade das imagens. Na Figura 9a, (ano de 2012), é possível observar o arranjo do sistema de drenagem composto por sarjeta e caixa coletora, ambas em bom estado de conservação. Já em 2015 (fig 9b), nota-se um considerável aumento da vegetação no entorno dessas estruturas, o que representa clara ausência de manutenção ao longo dos anos anteriores. Nos registros de 2017 (fig 9c) e 2019 (fig 9d), percebe-se a destruição desses componentes na borda da estrada e parte de uma pequena obra de desvio do escoamento superficial.

Figura 9 - Fotos registradas pelo veículo do Google Street View na RJ-155 (BR-494).

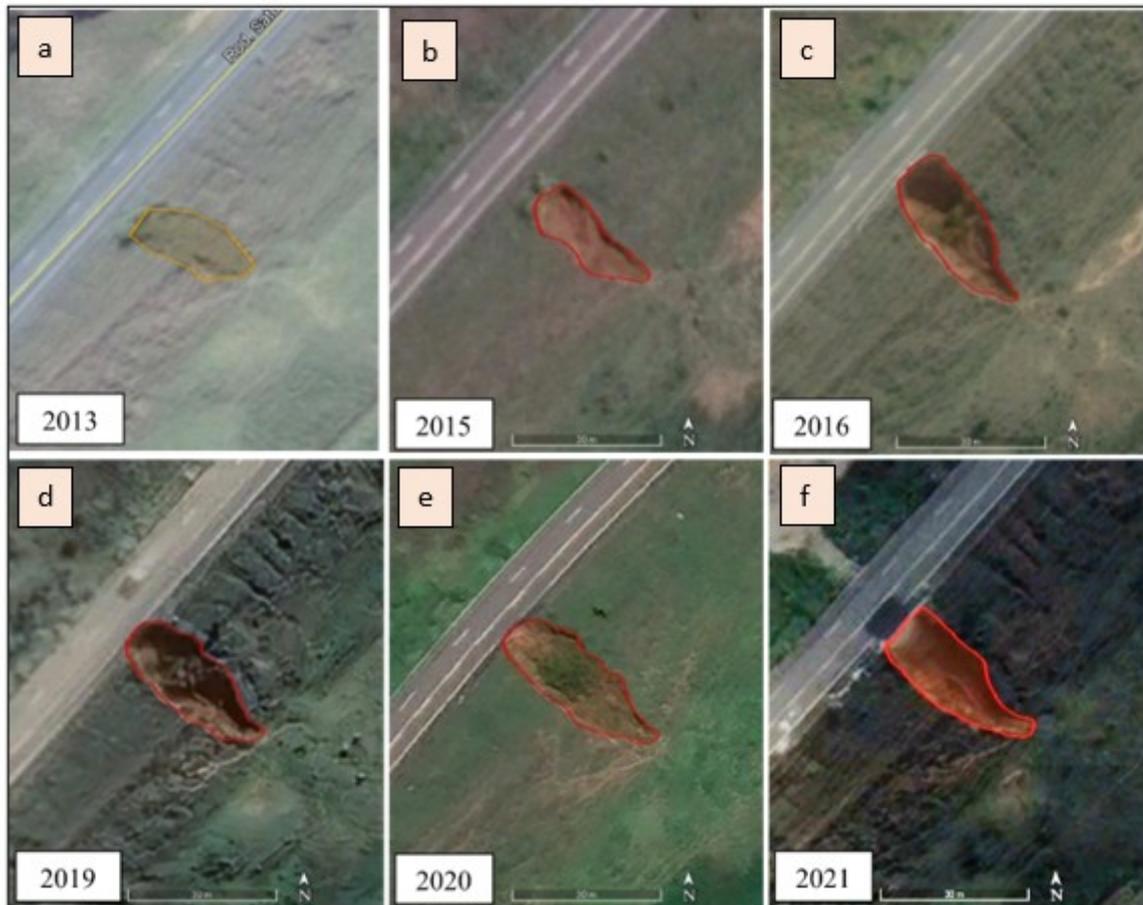


Legenda: (a) ano de 2012 mostrando o sistema de drenagem, em azul a direção do fluxo de água, em vermelho, caixa coletora; (b) ano de 2015, crescimento de vegetação na convergência do fluxo; (c) ano de 2017, obra de desvio do escoamento superficial destacada em amarelo; (d) em 2019, sentido do fluxo com desvio. **Fonte:** *Google Street View*. Elaborado pelos autores.

A constante falta de conservação e manutenção do sistema de drenagem das rodovias, além de possibilitar acidentes, influencia no surgimento de feições erosivas como ravinas e voçorocas. A ausência de estruturas como escada hidráulica (descidas d'água) e dissipadores de energia na base do talude, podem agravar o processo erosivo provindo do escoamento superficial da rodovia (Zoccal, 2016; Alencar, 2017; Goulart *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2022).

A fim de obter melhor compreensão dessa evolução do processo erosivo, no contexto da estrada e seu sistema de drenagem, utilizou-se também imagens do *Google Earth Pro* em diferentes períodos (Figura 10). A partir delas foi possível fazer um comparativo histórico da evolução da voçoroca no talude da rodovia.

Figura 10 - Imagens do Google Earth Pro mostrando a voçoroca estudada em diferentes anos.



Legenda: (a) 2013, processos erosivos iniciais; (b) 2015, feição erosiva perceptível; (c) 2016, aumento do perímetro e profundidade da voçoroca; (d) 2019, erosão alcança a rodovia; (e) 2020, progressão longitudinal contínua da voçoroca; (f) 2021, obra mitigatória de contenção realizada na RJ-155 (BR-494), impedindo parcialmente o avanço da voçoroca.

Fonte: Google Earth Pro. Elaborado pelos autores.

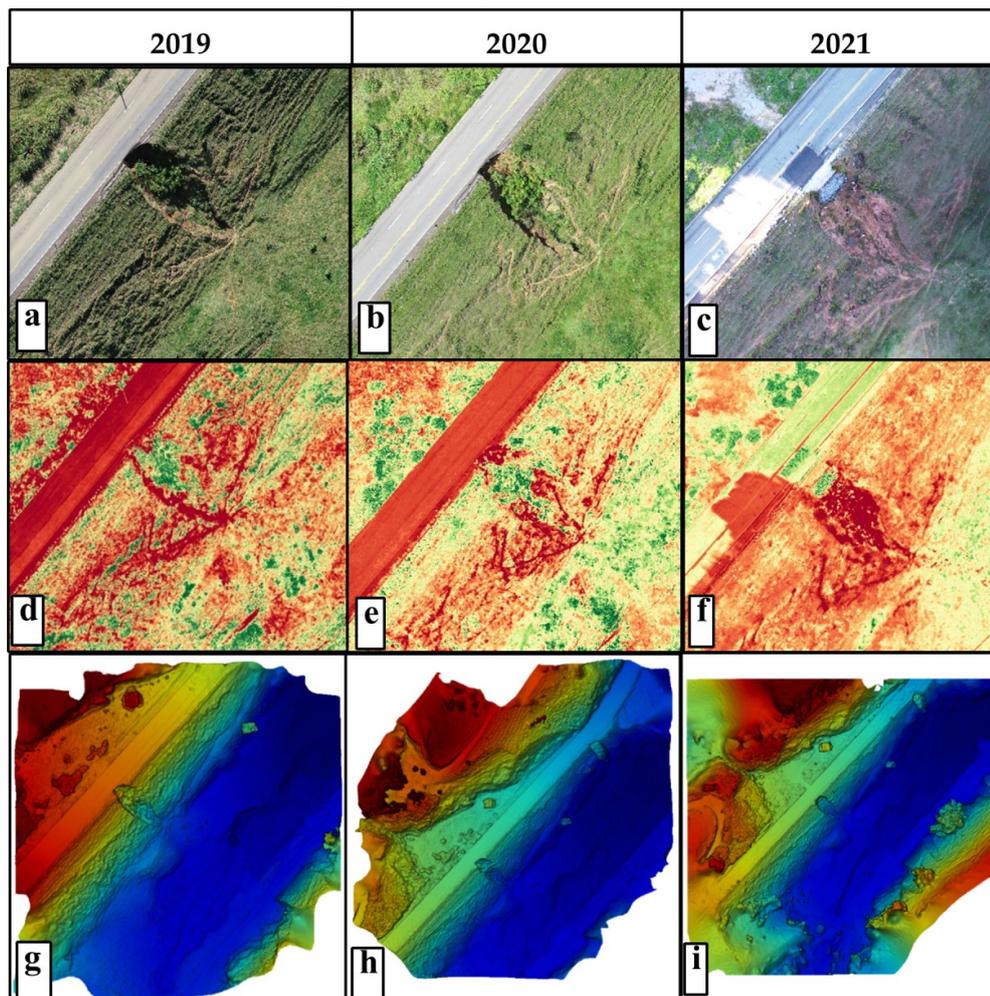
A partir de 2015 (fig 10b) é possível observar com maior nitidez a feição erosiva próxima à RJ-155 (BR-494), que nesse momento apresentava, de acordo com a geotecnologia em questão, área 183,00 m² e perímetro de 63,80 m. Em 2016 (fig 10c) nota-se que a voçoroca já alcançou a estrada, o que levou à necessidade da obra para desvio do *runoff*. Nesse registro, a área da feição aumentou cerca de 37%, comparado ao ano anterior, apresentando área

Margarida Penteadó - Revista de Geomorfologia. v.2 n.1, junho de 2025, p.1-22
<https://doi.org/10.29327/ISSN2966-2958.v2n1.2024.022>

total de aproximadamente 291,00 m² e perímetro de 77,20 m. Observou-se entre os anos de 2020 (fig 10e) e 2021(fig 10f) uma redução de 6% do tamanho da voçoroca, devido à obra de contenção na tentativa de recuperação do talude, feita em janeiro de 2021.

Com o auxílio do VANT, importante ferramenta utilizada neste monitoramento ambiental, foi possível analisar alguns parâmetros capturados por sua câmera. Na Figura 11 temos um comparativo de imagens geradas através do *Drone Deploy*, que contém ortofotos, NDVI e hipsometria no intervalo de 2019 a 2021.

Figura 11 - Monitoramento multitemporal da voçoroca com uso de ortofotos, NDVI e hipsometria (2019–2021).



Legenda: (a), (b), (c) Ortofotos nos anos de 2019, 2020 e 2021 obtidas pelo VANT; (d), (e), (f) NDVI mostrando alterações da cobertura vegetal no interior e entorno da voçoroca; (g), (h), (i) hipsometria em diferentes altitudes de voo ao longo dos anos estudados.

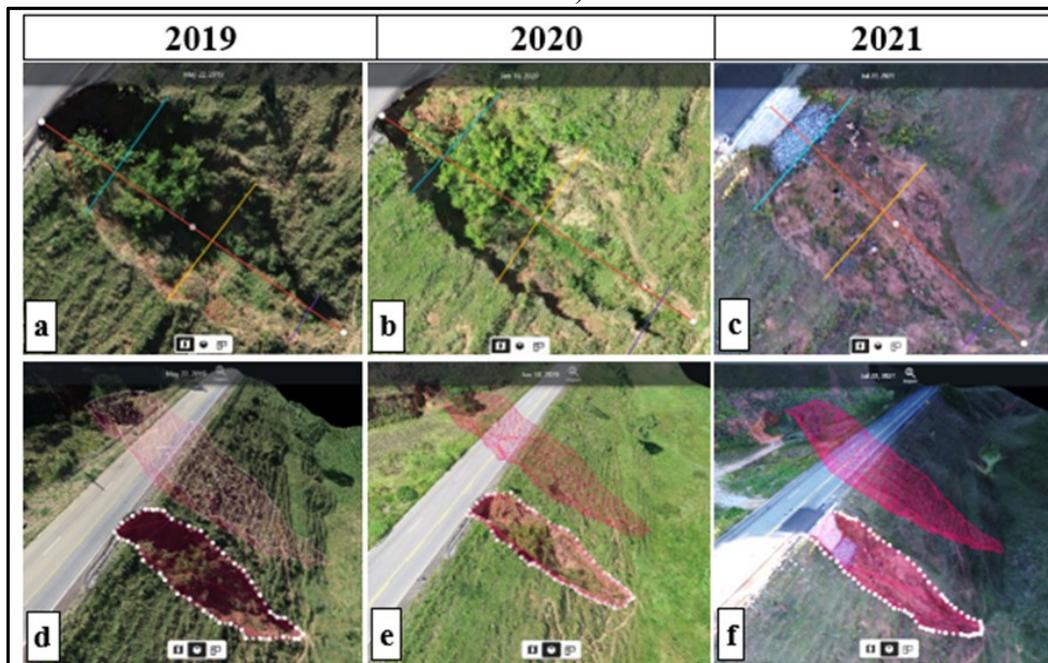
Fonte: Imagens de VANT. Elaborado pelos autores.

Observando a dinâmica espaço-temporal da hipsometria na área de estudo, nota-se que a base da voçoroca está situada em área de baixa altitude relativa, representada por cores frias com tons azulados. Nesse caso, é importante destacar que a altura do voo influenciou na amplitude dos dados hipsométricos, resultando na variação entre cores quentes e frias da estrada e da voçoroca.

O software *Drone Deploy* também possibilitou realizar diferentes medidas da feição erosiva como largura, comprimento, área e volume, observados na Figura 12. A linha indicativa de comprimento longitudinal (vermelho) conecta o ponto mais baixo e o mais alto da voçoroca,

possibilitando aferir as dimensões da declividade, já as medições de largura (azul, amarelo e roxo) foram referenciadas a partir dos pontos de coleta das amostras (topo, meio e base).

Figura 12 - Análise morfométrica e modelagem tridimensional da voçoroca (2019 - 2021)



Legenda: (a), (b), (c) medidas transversais e longitudinais da voçoroca em diferentes anos; (d), (e), (f) visualização 3D das áreas superficiais, áreas internas e volumes.

Fonte: Imagens de VANT. Elaborado pelos autores.

Na Figura 12 é mostrada a representação tridimensional da voçoroca nos anos de 2019, 2020 e 2021. Essa visualização em 3D é obtida a partir da triangulação dos pontos captados, o que possibilitou aferir valores de área superficial, área interna e volume.

Partindo dos dados unidimensionais da Tabela 3, é perceptível o crescimento da feição erosiva entre 2019 e 2020, pois a largura do meio cresceu 1,04 m e da base 1,92 m, ratificando a dinâmica erosiva e os constantes avanços da feição. Entretanto, neste mesmo período, a largura no topo e o comprimento longitudinal diminuíram 0,64 m e 0,48 m respectivamente.

Tabela 3 – Dimensões e características físicas da voçoroca

DADOS VANT	2019	2020	2021
Largura Topo (m)	11,66	11,02	12,42
Largura Meio (m)	12,19	13,23	13,03
Largura Base (m)	4,47	6,39	5,12
Perfil Longitudinal (m)	36,04	35,56	34,76
Declividade do Talude	32,59°	32,63°	32,63°
Volume (m ³)	24,77	23,93	28,55
Área (m ²)	276,34	358,99	345,1
Área superfície interna (m ²)	566,03	526,97	482,92

Fonte: Elaborado pelos autores

Em 2021 o comprimento longitudinal reduziu 1,28 m, comparado à 2019, fato visível por conta da obra de contenção da estrada, a qual retificou a cabeceira da voçoroca. Ainda na Tabela 3 nota-se que a declividade do talude apresentou valores relativamente constantes de 32,60°, indicando boa precisão da ferramenta ao correlacionar altitudes diferentes.

Com a triangulação dos pontos foi possível obter dados bi e tridimensionais ao longo da superfície do talude e da voçoroca, a área superficial de 2019 para 2020 cresceu 82,65 m², e no ano seguinte reduziu 13,89 m², claramente por conta da obra de contenção.

Os valores obtidos da área interna e do volume foram influenciados diretamente pela presença ou ausência de vegetação. Em 2021 a área interna reduziu de tamanho quando comparada aos anos de 2019 e 2020, já o volume no ano de 2021 aumentou em relação aos anos anteriores. Destaca-se que essas medidas levam em consideração também a altimetria da vegetação, podendo superestimar a área interna ou subestimar o volume.

A Figura 13 mostra o resultado da obra emergencial na tentativa de contenção do talude e recuperação do trecho da rodovia. Em janeiro de 2021 o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Rio de Janeiro - DER-RJ realizou a intervenção, onde fizeram serviços de recomposição da via, reaterro, uso de colchão drenante e sacos de ráfia com solo cimento (DER-RJ, 2021).

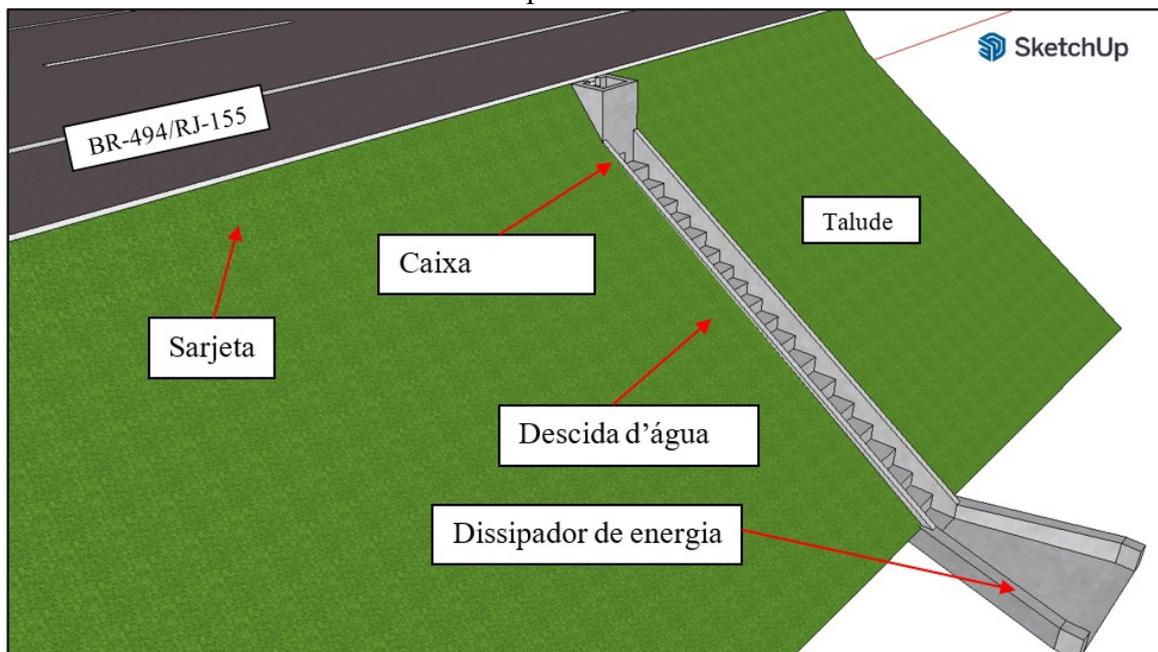
Figura 13 - Obra de recuperação da estrada realizada pelo DER-RJ em 2021.



Fonte: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Rio de Janeiro (2021)

Avaliando os dados discutidos até o momento, propõe-se um modelo mais apropriado para áreas de contexto físico similar ao exposto ao longo deste trabalho. A Figura 14, representa os dispositivos de drenagem superficial adequados para estradas pavimentadas, tais como: sarjeta, caixa coletora, descida d'água de aterro e dissipador de energia (Alencar, 2017; Lima *et al.*, 2022).

Figura 14 - Modelo representativo dos dispositivos de drenagem em estrada pavimentada.



Fonte: Elaborado pelos autores

CONCLUSÕES

O objetivo principal de monitoramento da voçoroca no talude da estrada RJ-155 (BR-494) foi alcançado, em razão da coleta de informações e múltiplos dados obtidos através das análises de solo em laboratório e do uso das geotecnologias.

Foram identificadas quatro classes texturais de solo, sendo o predominante o franco-arenoso. Em relação à densidade do solo, os valores variaram entre 1,41 e 1,71 g/cm³. Notou-se também uma predominância de valores de porosidade do solo inferiores a 47%.

Ao verificar e comparar as imagens históricas do *Google Street View* e *Google Earth Pro*, foi possível compreender a evolução da feição erosiva, e seu constante crescimento e avanço em direção à RJ-155 e suas estruturas de drenagem. A utilização do VANT mostrou-se importante nesta pesquisa de monitoramento ambiental, visto que esta geotecnologia possibilitou analisar parâmetros como ortofotos, NDVI e hipsometria, além de outras medições bi e tridimensionais.

As ortofotos, quando comparadas às imagens do *Google Earth*, possuem melhor qualidade, nitidez e resolução, o que confere maior riqueza de detalhes da feição erosiva estudada. Cabe ressaltar que a flexibilidade no manuseio do VANT possibilita a captação de imagens em diferentes alturas, propiciando a adequação desse fator ao objeto de estudo.

Os dados gerados no *software Drone Deploy* (largura, comprimento, área superficial e interna, volume e modelagem 3D) apresentaram resultados relevantes na compreensão da dinâmica erosiva, mostrando com precisão o constante crescimento da voçoroca.

A presença da vegetação e outros materiais no interior da voçoroca influenciam na precisão dos valores da área interna e volume calculados pelo *software Drone Deploy*, sub ou superestimando esses dados.

Através do *software SketchUp* foi proposto um modelo de cenário em 3D mais adequado para o sistema de drenagem de estradas pavimentadas, ilustrando o trecho da rodovia, o talude, sarjeta, caixa coletora, escada hidráulica e dissipador de energia, indicando assim medida mitigadora apropriada para situações como a estudada nesta pesquisa.

Constatou-se relação direta do sistema de drenagem da estrada pavimentada com o surgimento da voçoroca, uma vez que seu crescimento contribuiu para a destruição do referido sistema, sendo este um dos principais fatores de erosão em estradas do país. Além disso, um planejamento adequado, que leve em consideração as características físicas da área, também é uma etapa de suma importância na prevenção de voçorocas.

A combinação de técnicas de campo e de laboratório, em conjunto com o uso de geotecnologias, mostrou-se altamente relevante no estudo relacionado ao diagnóstico da erodibilidade e evolução da voçoroca, bem como na sua prevenção e recuperação.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos (opcional): agradecimento por auxílios recebidos para a elaboração do trabalho deve ser mencionado no final do artigo, após as referências.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, F. Avaliação dos projetos de drenagem profunda das rodovias de São José dos Campos – SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**, v. 2, n. 2, 2017.

BARBOSA, W. C. S.; LIMA, I. M. M. F.; GUERRA, A. J. T. Análise Multivariada da voçoroca urbana localizada na porção sul da Bacia Hidrográfica do Baixo Rio Parnaíba. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, v. 2, n. 2, p. 1–15, 2021. Disponível em: <https://williammorrisdavis.uvanet.br/index.php/revistageomorfologia/article/view/121> Acesso em: jan. 2023.

BOARDMAN, J. The value of Google Earth™ for erosion mapping. **Catena**, v. 143, p. 123–127, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.03.031

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.

BOARDMAN, J.; VANDAELE, K.; EVANS, R.; FOSTER, I. D. Off-site impacts of soil erosion and runoff: Why connectivity is more important than erosion rates. **Soil Use and Management**, v. 35, n. 2, p. 245–256, 2019. DOI: 10.1111/sum.12496

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Bookman Editora, 2009.

CALDAS, V.; SILVA, A. S.; SANTOS, J. P. C. Suscetibilidade à erosão dos solos da bacia hidrográfica lagos–São João, no Estado do Rio de Janeiro–Brasil, a partir do método AHP e análise multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 04, p. 1415–1430, 2019.

CAMPOS, A. B. A.; BOTELHO, R. G. M. Street View e Google Earth como ferramentas investigativas de alterações na paisagem: os campos virtuais. **William Morris Davis-Revista de Geomorfologia**, v. 3, n. 2, p. 1-19, 2022.

CASSOL, C. J.; ARRUDA, E. J.; ALOVISI, A. M. T.; RODRIGUES, C. M., & ABRÃO, R. S. D. S. Utilização de variáveis físico-químicas do solo para o mapeamento da fragilidade potencial e ambiental na bacia hidrográfica do rio Ivinhema. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 466-488, 2023.

CASTILLO, Carlos; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. **Earth-Science Reviews**, v. 160, p. 300-319, 2016.

CASTRO, U. N.; NEVES, S. R. A.; SILVA, L. F. T. C.; MENDES, S. P.; Guerra, A. J. T. Mapeamento de feições erosivas e cicatrizes de escorregamento por unidades de relevo na sub-bacia do Rio Sana (Macaé-RJ). **Revista de Geografia (Recife)**, v. 27, n. 3. Esp, p. 19–33, 2011.

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O. D; TIMM, L. C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31–37, 2017.

CUNHA, A. A.; ALIXANDRINI JR, M. J.; DE OLIVEIRA FERNANDES, V. Avaliação de erosão por imagens de aeronave remotamente pilotada a baixa altura de voo. **Geografia (Londrina)**, v. 29, n. 1, p. 191–210, 2020.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM- RJ. **DER-RJ finaliza recuperação de erosão em Rio Claro.** Disponível em: <http://www.der.rj.gov.br/detalhe_noticia.asp?ident=861>. Acesso em: 17 maio. 2023.

FERNÁNDEZ, T.; PÉREZ-GARCÍA, J. L.; GÓMEZ-LÓPEZ, J. M., CARDENAL, J.; CALERO, J.; SÁNCHEZ-GÓMEZ, M., DELGADO, J.; TOVAR-PESCADOR, J. Multitemporal analysis of gully erosion in olive groves by means of digital elevation models obtained with aerial photogrammetric and LiDAR data. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 4, p. 260, 2020.

FOSTER G.R, Modeling the erosion process. In: **Hydrologic Modeling of Small Watershed**, ASAE Monograph 5, Haan CT (ed.). ASAE: St. Joseph, MI; 1982. 297–360p.

FROTA FILHO, A. B.; ABREU, N. R. P.; VIEIRA, A. F. S. G. Processo de voçorocamento e feições secundárias: um estudo de caso em Manaus-AM. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 74, p. 313–323, 2020.

FULLEN, M. A.; CATT, J. A. **Soil Management: Problems and Solutions**. Routledge, 2014.

GARRITANO, F. N.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Unmanned Aerial Vehicle for monitoring gully erosion in Rio de Janeiro State. **Geophysical Research Abstracts** v. 21, EGU2019-11416-1, Viena, 2019. GOODWIN, N. R.; ARMSTON, J.; STILLER, I.; MUIR, J. Assessing the repeatability of terrestrial laser scanning for monitoring gully topography: A case study from Aratula, Queensland, Australia. **Geomorphology**, v. 262, p. 24–36, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.007>

GOULART, V. M.; LIMA, R. A.; NUNES, M. M. **Pavimentação de Rodovias –materiais, projeto e manutenção**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2017.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia – Uma atualização de bases e conceitos**. 16ª ed. Bertrand Brasil, p. 149–209, 1994.

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. DOI: 10.1016/S1002-0160(17)60294-7

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M.C.O. **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. Oficina de Textos, 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. **William Morris Davis Revista de Geomorfologia**, v. 1, p. 75-117, 2020.

GUERRA, A. J. T.; LOUREIRO, H. A. S. . Erosão dos Solos e Movimentos de Massa em Áreas Serranas da Mata Atlântica, nos Estados do Rio de Janeiro e São Paulo. In: Hugo Alves Soares Loureiro; Antonio Jose Teixeira Guerra. (Org.). **Erosão em Áreas Tropicais**. 1ed.Rio de Janeiro: Editora Interciência, v. 1, p. 1-43, 2023.

GUTIERRES, H. E. P; GIRÃO, O.; SILVA, C. S., & GUERRA, A. J. T. Monitoramento de voçorocas na barragem Serro Azul, Mata Sul do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 2, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i2.2158

HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. C. H. **Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro**. 2016.

IMESON, A. C.; KWAAD, F. J. P. M. Gully types and gully prediction. **Geografisch Tijdschrift**, 14(5), 430-441, 1980.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. **Plano de Manejo (Fase 1) Parque Estadual Cunhambebe**. Rio de Janeiro. Secretaria de Estado do Ambiente. 832p., 2015.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, CPTEC - **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. Disponível em: <http://energia1.cptec.inpe.br/> Acesso em março de 2022.

INSTITUTO TERRA. **Manejo PE Cunhambebe e APA Alto Piraí**. Disponível em: https://issuu.com/itpa/docs/estudo_para_cria_o_do_pe_cunhambebe_e_apa_alto_pi Acesso em: maio de 2022.

IRELAND, H.A.; SHARPE, C.F.S.; EARGLE, D.H. Principles of gully erosion in the Piedmont of South Carolina. **US Department of Agriculture Technical Bulletin**, n. 633, 142 p, 1939.

JALIL, A.; BENAMAR, A.; TOUHAMI, M. E. Investigation of Internal Erosion Susceptibility of Core Soil from Three Dams. **Journal of Civil Engineering and Construction**, v. 10, n. 2, p. 59–68, 2021. DOI: 10.32732/jcec.2021.10.2.59

JULIAN, C.; NUNES, J. O. R. Uso de Vant e Geoprocessamento para Cálculo de Solo Erodido em Voçoroca Localizada no Distrito de Amadeu Amaral. Marília/Sp-Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 4, 2020.

KUHN, N. J.; GREENWOOD, P.; FISTER, W. Use of field experiments in soil erosion research. **Developments in Earth Surface Processes**. Elsevier, 2014. v. 18p. 175–200.

KUINKEL, M. S. ZHANG, C., LIU, P., DEMIRKESEN, S., & KSAIBATI, K. Suitability Study of Using UAVs to Estimate Landfilled Fly Ash Stockpile. *Sensors*, v. 23, n. 3, p. 1242, 2023. DOI: 10.3390/s23031242

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta no campo**. 3. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 83 p, 1996.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. Oficina de textos, 2021.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. Oficina de textos, 2016.

LIMA, G. M.; GUERRA, A. J. T. Áreas degradadas por processos erosivos hídricos na trilha do morro dois irmãos, no município do Rio de Janeiro (RJ). *Revista Ciência Geográfica*, v. 27, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.57243/26755122.XXVII1020>

LIMA, W. A. S., SOUSA, J. P., MATOS, O. S., SILVA, F. G. S., OLIVEIRA, M. M., & PACHECO, G. V. Sistemas de drenagem: a importância para a infraestrutura do transporte rodoviário brasileiro. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 3, p. 17813–17831, 2022. DOI:10.34117/bjdv8n3-153

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T.; ANDRADE, A. G. Contribuição ao estudo de voçorocas a partir do uso experimental de laser scanner terrestre e VANT. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 4, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i4.1880

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T.; FERNANDO, J.; BEZERRA, R.; PEREIRA, L. S.; GARRITANO, F. N. Monitoramento da erosão hídrica no Brasil: dos métodos manuais aos digitais. In: UNB: JUNIOR, O. A. C.; GOMES, M. C. V.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**, 2022. p. 530–563p.

LOUREIRO, H.; FERREIRA, S. M. O papel das geotecnologias no estudo de feições erosivas e de movimentos de massa no Brasil. In: Guerra, A. J. T, Jorge, M. C. O (Ed) **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. Oficina de Textos, São Paulo, 2013. p. 95–125.

LOUREIRO, H.A.S. **Diagnóstico de erosão por voçorocas: experimentos com geotecnologias e solos na bacia do Alto rio Pirai-Rio Claro-RJ. 2019. 224 f.** Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geografia–Planejamento e Gestão Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

MARCHIORO, E.; ANDRADE, E. E.; OLIVEIRA, J. C. Evolução espaço-temporal de voçorocas no Espírito Santo: estudo de caso nos municípios de Afonso Cláudio e Alegre. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 17, n. 1, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i1.712

MEIRELES, G. B. **Relações entre a abordagem da ecologia da restauração e o ODS 15: um estudo sobre os impactos antrópicos na Mata Atlântica, 2021. 111 f.** Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) - Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, Centro de Economia e Administração, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2021.

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

MOURA, R. V.; SANTOS, A. L. F.; JUNIOR, L. R. A. Mapeamento da Voçoroca Contorno em Anápolis–GO por Meio de Geotecnologias. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, n. 2, p. 1002–1012, 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.

OLIVEIRA, M. A. T. Erosion disconformities and gully morphology: a three-dimensional approach. **Catena**, v. 16, p. 413-423, 1989.

OLIVEIRA, Marcelo Accioly Teixeira; LEMOS, Reginaldo; PINTO, Lucas Rocha. Pode uma voçoroca resultar da evolução de voçorocas conectadas e desconectadas? **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023.

PEREIRA, L. S.; RODRIGUES, A. M.; JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T; FULLEN, M. A. Processos hidro-erosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i2.877

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.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, n. 2–4, p. 91–133, 2003.

RANGEL, L. DE A.; GUERRA, A. J. T. Caracterização de atributos do solo de trilhas ecoturísticas em unidades de conservação do município de Paraty (RJ). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i1.1134

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ci. Amb**, v. 27, p. 29–48, 2003.

ROSSKOPF, C. M.; DI IORIO, E.; CIRCELLI, L.; COLOMBO, C.; AUCELLI, P. P. Assessing spatial variability and erosion susceptibility of soils in hilly agricultural areas in Southern Italy. **International Soil and Water Conservation Research**. v. 8, n. 4, p. 354–362, 2020. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.09.005

SALOMÃO, F.X.T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos**. 10ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015, p. 229 - 267.

SANTOS, R. C.; GUERRA, A. J. T. Avaliação da erosão dos solos na bacia hidrográfica do rio Pequeno, Paraty-RJ. **GEOSABERES: Revista de Estudos Geoducacionais**, v. 12, n. 1, p. 23–43, 2021

SCHOENEBERGER, P.J.; WYSOCKI, D.A.; BENHAM, E.C.; SOIL SURVEY STAFF. **Field book for describing and sampling soils**. Natural resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, 2012.

SELBY, M.J. **Hillslope Materials & Process**. New York: Oxford University Press, 1990.
Margarida Penteadó - Revista de Geomorfologia. v.2 n.1, junho de 2025, p.1-22
<https://doi.org/10.29327/ISSN2966-2958.v2n1.2024.022>

SOARES, D. L.; POLIVANOV, H.; VELLOSO BARROSO, E.; GORETTI DA MOTTA, L. M.; & CAMACHO DE SOUZA, C. Erodibilidade de solos em taludes de corte de estrada não pavimentada. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 179–193, 2018.

SUAREZ, D. J. **Voçorocas em estradas pavimentadas: Análises do solo e geotecnologias**. Trabalho Final de Curso (Geologia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 60p, 2022. DOI: 10.13140/RG.2.2.18859.52008

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa Brasília, DF, 2017.

WANG, Y.; JING, X.; CUI, L.; ZHANG, C.; XU, Y.; YUAN, J.; & ZHANG, Q. Geometric consistency enhanced deep convolutional encoder-decoder for urban seismic damage assessment by UAV images. **Engineering Structures**, v. 286, p. 116132, 2023. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116132

ZOCCAL, J.C.; SILVA, P.A.R., Manutenção de estradas e conservação da água em zona rural. Adequação de erosões em estradas rurais: causa consequências e problemas na manutenção e conservação de estrada rural. São José do Rio Preto: **CODASP**, v. 2, 118p. 2016.