

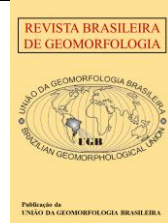


<https://rbgeomorfologia.org.br/>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 26, nº 3 (2025)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v26i3.2680>



*Artigo de Pesquisa*

# Mapeamento, caracterização tipológica e geomorfométrica das voçorocas da Formação Tupanciretã

*Mapping, typological characterization, and geomorphometric analysis of the gullies of the Tupanciretã Formation*

Henrique Roberto Schmitt<sup>1</sup> e Clódis de Oliveira Andrades Filho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Institute of Geosciences, Postgraduate Program in Remote Sensing, Latitude Research Group, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil. [h\\_schmitt@outlook.com](mailto:h_schmitt@outlook.com).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2660-5007>

<sup>2</sup> Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Institute of Geosciences, Postgraduate Program in Remote Sensing, Latitude Research Group, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil. [clodis.filho@ufrgs.br](mailto:clodis.filho@ufrgs.br).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8050-6719>

Recebido: 18/02/2025; Aceito: 13/08/2025; Publicado: 20/08/2025

**Resumo:** A Formação Tupanciretã, de origem sedimentar, apresenta elevada incidência de voçorocas resultantes do processo de erosão hídrica. Neste sentido, o objetivo deste estudo é realizar uma caracterização regional dos processos de natureza geológica e geomorfológica que atuam nas voçorocas da Fm. Tupanciretã, por meio de imagens de satélites e modelo digital de elevação global. Foram empregadas metodologias específicas para mapeamento e cadastro de 351 voçorocas em um recorte de 1.147.750 ha. As voçorocas delineadas compuseram um banco de dados em ambiente SIG, o que permitiu a manipulação dos dados por geoprocessamento, atribuindo unitariamente a tipologia de cada erosão, definindo suas formas, sua relação com a rede de drenagem e área da feição. Além disso, foram feitas ponderações a respeito da distribuição espacial das voçorocas na área de estudo, bem como analisado seus comportamentos perante as variáveis geomorfométricas, como declividade, hipsometria, formas de terreno e orientação das vertentes. Dentre o conjunto de voçorocas, a forma mais comumente encontrada é a ramificada, estando predominantemente conectada à rede de drenagem, com dimensões pequenas e médias, em relevo côncavo-convergente. Ao final foi possível compreender a variabilidade espacial de ocorrência, bem como padrões e fatores condicionantes das voçorocas da Fm. Tupanciretã no recorte proposto.

**Palavras-chave:** Processos erosivos; Erosão hídrica; Mapeamento remoto; Geoprocessamento.

**Abstract:** The Tupanciretã Formation, of sedimentary origin, has a high incidence of gullies caused by water erosion. This study sought to carry out a regional characterization of the geological and geomorphological processes that act on the formation's gullies using satellite images and a global digital elevation model. Specific methodologies were used to map and record 351 gullies in a 1,147,750 ha area. The delineated gullies were entered in a GIS database, so the data could be manipulated using geoprocessing to assign a unitary typology to each erosion as well as to define its shape, its relationship with the drainage network, and area. The spatial distribution of the gullies in the study area was considered, and their behavior in relation to geomorphometric variables such as slope, hypsometry, terrain shape, and slope direction analyzed. The most commonly found gully form is branched, predominantly connected to the drainage network, small to medium in area, and in concave-convergent relief. Ultimately, it was possible to understand the spatial variability of occurrence as well as the Tupanciretã Fm.'s gully patterns and the conditioning factors within the area.

**Keywords:** Erosive processes; Water erosion; Remote mapping; Geoprocessing.

## 1. Introdução

A erosão hídrica, processo de desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo deflagrado pela ação das chuvas, ocorre quando o potencial de transporte da água excede a agregação das partículas (FAO, 2019). Este fenômeno representa grave problema ambiental e agrônômico, responsável pela degradação acelerada de terras cultiváveis e assoreamento de corpos hídricos. Entre suas manifestações mais severas destacam-se as voçorocas – incisões lineares que caracterizam o estágio avançado da erosão hídrica superficial –, capazes de atingir vários metros de profundidade mediante colapsos de encostas e exposição do lençol freático. No Sul do Brasil, particularmente no Paraná e Rio Grande do Sul, a combinação de chuvas intensas com substratos sedimentares friáveis favorece o desenvolvimento dessas feições de grandes dimensões (Cabral; Nummer; Bateira, 2020; Petsch et al., 2022; Dummer; Verdum, 2023; Nóbrega et al., 2023).

Nesse contexto, a Formação Tupanciretã, unidade geológica sedimentar pós-Gondvânica no centro-norte do Rio Grande do Sul, configura área crítica. Originalmente descrita como sequência flúvio-lacustre (Menegotto; Sartori; Maciel Filho, 1968) e mapeada regionalmente como arenitos finos quartzosos, paraconglomerados e arenitos conglomeráticos sobrepostos aos vulcânicos da Formação Serra Geral (CPRM, 2008), sua litologia pouco consolidada gera solos predominantemente arenosos e friáveis (Menegotto, 1980). Essa condição geomorfológica determina elevada suscetibilidade à dissecação erosiva, tornando a unidade laboratório natural para estudos de degradação do solo. Mudanças recentes no uso da terra amplificam a vulnerabilidade: a transição de pecuária extensiva para cultivo intensivo de soja Moreira (2013) sobre afloramentos da formação acelerou a gênese de voçorocas, causando perda de terras produtivas.

As erosões aceleradas nos arenitos da Fm. Tupanciretã têm sido observadas, sobretudo, ao longo dos campos naturais e áreas de cultivo da região. Essas feições tendem a se desenvolver nas cabeceiras de drenagem, contribuindo para o redirecionamento dos fluxos superficiais em direção aos talvegues das diversas redes de drenagem locais. Esse processo favorece a evolução de voçorocas imensas e alongadas — ainda pouco documentadas — que se apresentam como potenciais fontes de estudo para melhor compreensão da dinâmica erosiva da unidade geológica, bem como para o desenvolvimento de estratégias de previsão e mitigação dos seus focos mais críticos.

Tanto os mecanismos de deflagração dessas feições lineares de grande porte quanto a própria história geológica da Fm. Tupanciretã carecem de estudos técnico-científicos. Trabalhos existentes abordam aspectos fragmentários: análises geomorfométricas em escala municipal (Pinheiro, 2023), influências morfoestruturais e tectônicas (Marin, 2022), ou contextos sedimentares em diferentes escalas temporais (Reis, 2020; Mexias, 2024; Ruppel; Dani; Lisboa, 2023).

Sistemas de Informação Geográfica (SIG) oferecem potencial metodológico para superar essas limitações. Permitem descrição quantitativa do relevo, modelagem de processos erosivos (Otto et al., 2017) e análise de assinaturas geomorfométricas que elucidam a evolução da paisagem (Andrades Filho et al., 2017). Sua aplicação ao estudo de voçorocas mediante variáveis morfométricas (Viero, 2004; Cabral; Nummer; Bateira, 2020) viabiliza a construção de bases de dados espacializadas para investigação de padrões territoriais.

Diante deste quadro, o presente trabalho objetiva mapear e caracterizar de forma integrada as voçorocas desenvolvidas na Formação Tupanciretã, no centro-norte do Rio Grande do Sul. Especificamente, busca-se identificar e classificar os tipos de voçorocas existentes, descrevendo suas formas e dimensões, bem como analisar sua distribuição espacial em relação aos fatores geológicos e geomorfológicos da área. Com isso, espera-se contribuir para o aprimoramento do mapeamento geológico-geomorfológico regional no que tange às áreas suscetíveis à erosão, além de fornecer subsídios técnicos para estratégias de mitigação e controle do processo de voçorocamento. Em última instância, os resultados almejados poderão auxiliar na conservação do solo e na prevenção de impactos ambientais associados à erosão em ambientes sedimentares similares.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se no sul do Brasil, limitada ao estado do Rio Grande do Sul, na porção meridional da Bacia Intracratônica do Paraná. Nessa região centro-norte do estado, encontram-se exposições descontínuas e isoladas dos depósitos sedimentares da Formação Tupanciretã, em contato com as rochas vulcânicas da Formação

Serra Geral. Menegotto, Sartori e Maciel Filho (1968) concentraram suas pesquisas no município de Tupanciretã, momento em que denominaram a unidade geológica como Formação Tupanciretã.

Gamermann et al. (1970) *apud* Coulon, Gamermann, Formoso (1973) ampliaram posteriormente o reconhecimento dessa unidade para outros municípios. Atualmente, o mapeamento geológico desses depósitos integra o Mapa Geológico do Rio Grande do Sul (CPRM, 2008), elaborado na escala 1:750.000 pela equipe da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Diante destes acontecimentos, houve a necessidade de ampliar a área de mapeamento remoto das voçorocas da unidade, definindo um *buffer* de 10 km no entorno das manchas isoladas e sem continuidade física (área de estudo), abrangendo 37 municípios interceptados pelo *buffer*, alguns totalmente inseridos, outros parcialmente, compondo ao todo uma área de 11.477 km<sup>2</sup>, sendo que destes, 22 municípios contemplam essencialmente as áreas da Fm. Tupanciretã já mapeadas, ou seja, a própria área de ocupação das unidades no mapa geológico do estado (CPRM, 2008), que é de aproximadamente 2.309 km<sup>2</sup>, enquanto os demais se restringem a presença parcial dentro do *buffer* definido, conforme representado na Figura 1.

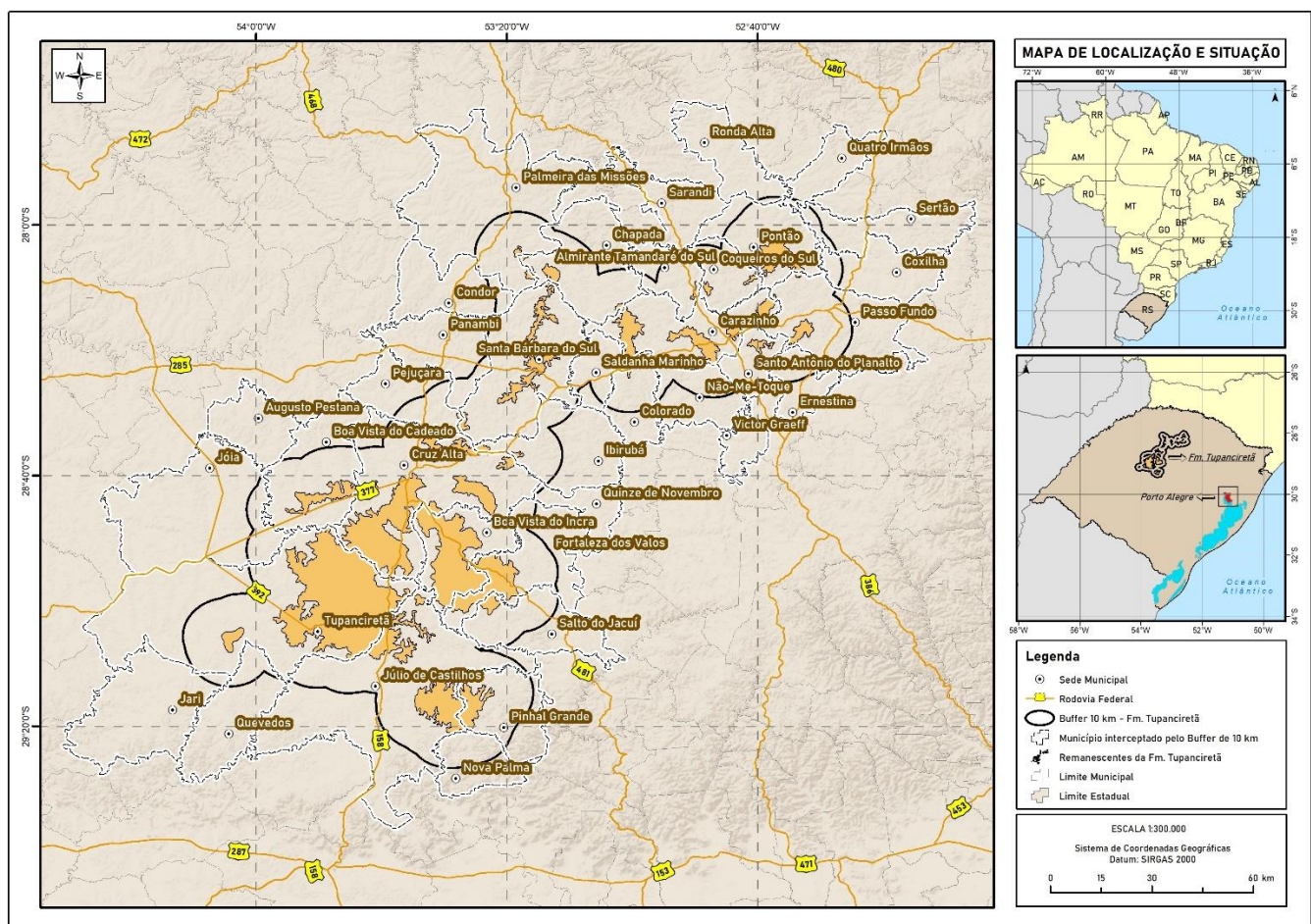


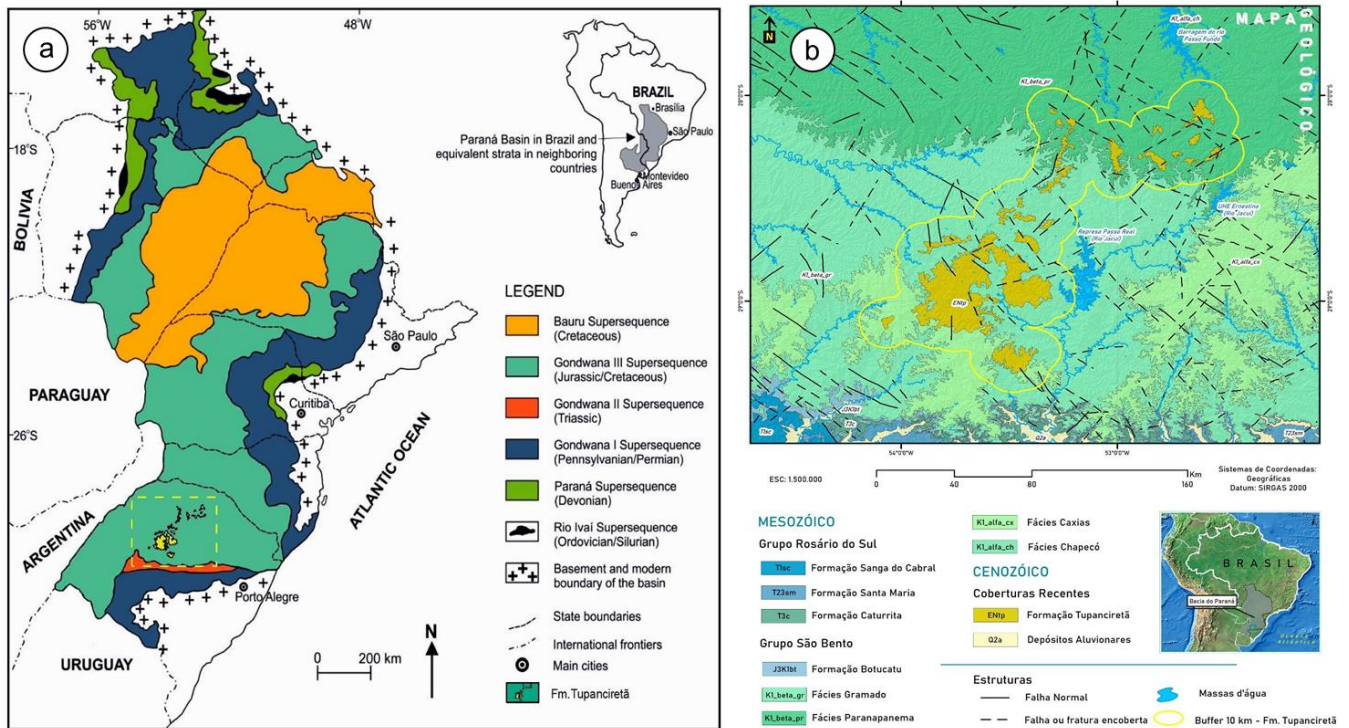
Figura 1. Localização e situação da área de estudo.

O contexto geológico regional insere as rochas sedimentares da Formação Tupanciretã na porção sul da Bacia do Paraná, no centro-norte do Rio Grande do Sul. Essas rochas ocorrem sobrepostas à Supersequência Gondwana III (Neojurássico–Eocretáceo) (Milani, 1997), especificamente sobre o pacote vulcano-sedimentar da bacia (Figura 2a), cujo topo é representado pela Formação Serra Geral. Nessa unidade vulcânica, houve extravasamento de lavas sobre o deserto de areias eólicas da Formação Botucatu, resultando em um empilhamento vulcânico com seis fácies distintas (Wildner et al., 2004), predominantemente basaltos.

Ruppel, Dani e Lisboa (2023), ao analisarem elementos morfotectônicos pós-gondwânicos das Formações Santa Tecla e Tupanciretã no Rio Grande do Sul, atribuíram as deposições da segunda formação à bacia gerada pela subsidência forçada dos basaltos da Formação Serra Geral, que criou espaço para acomodar sedimentos

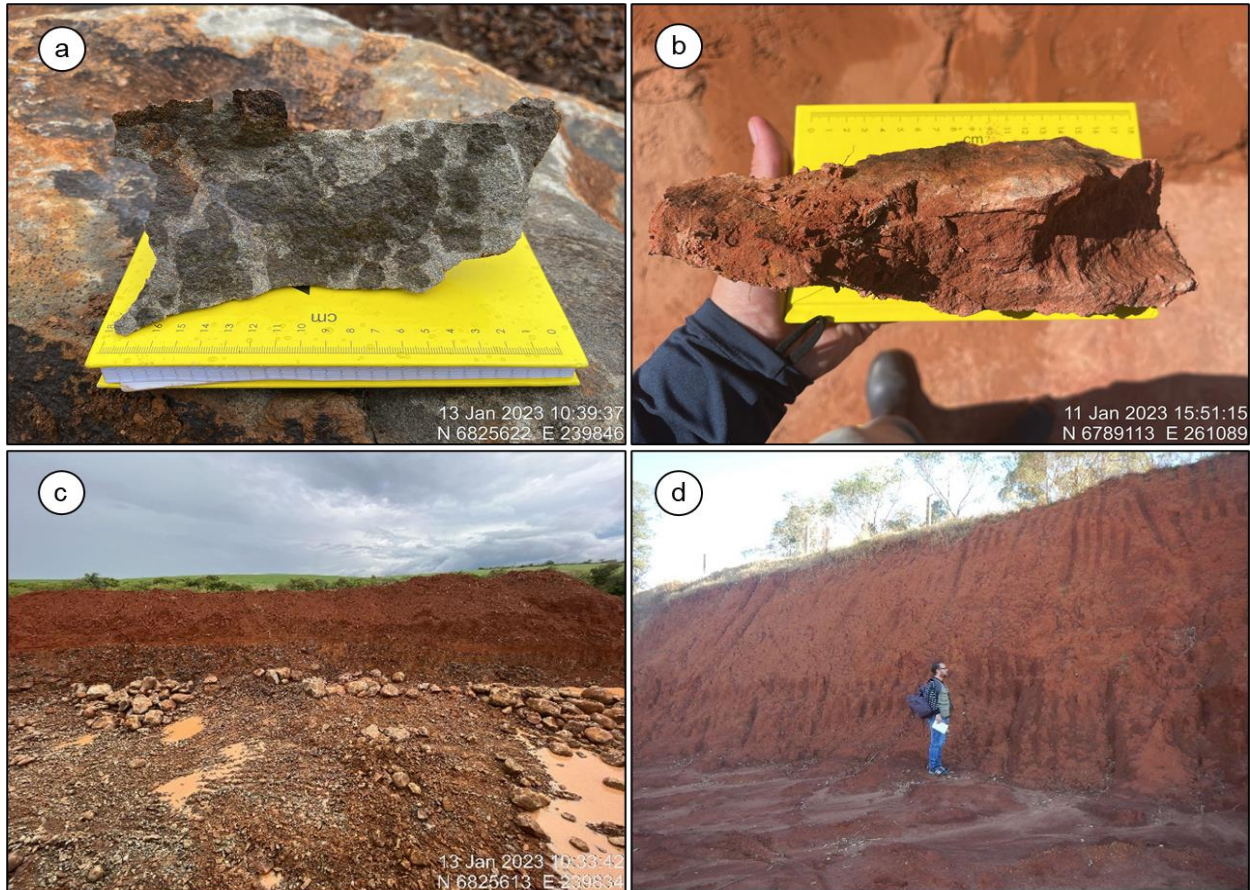
decorrentes do soerguimento do embasamento cristalino no sul do estado, processo relacionado à separação do supercontinente Gondwana. Durante o Paleógeno e o Neógeno, movimentos tectônicos e processos diagenéticos promoveram inversão do relevo e intensificaram a erosão, evidenciada hoje pelas voçorocas nos interflúvios.

Riccomini, Sant’Anna e Fambrini (2016) descrevem os depósitos da Formação Tupanciretã como compostos principalmente por arenitos, de granulometria média a conglomerática na base da seção levantada; granulometria fina com estratificação plano-paralela e camadas cruzadas na porção média; e granulometria fina, maciça, no topo. Além disso, em ambiente continental, a CPRM (2008) mapeou a Formação Tupanciretã (ENtp) em manchas isoladas sobre as coberturas basálticas da Formação Serra Geral, ocupando 2.309 km<sup>2</sup>, o equivalente a 0,82 % do território estadual, conforme representado na Figura 1b.



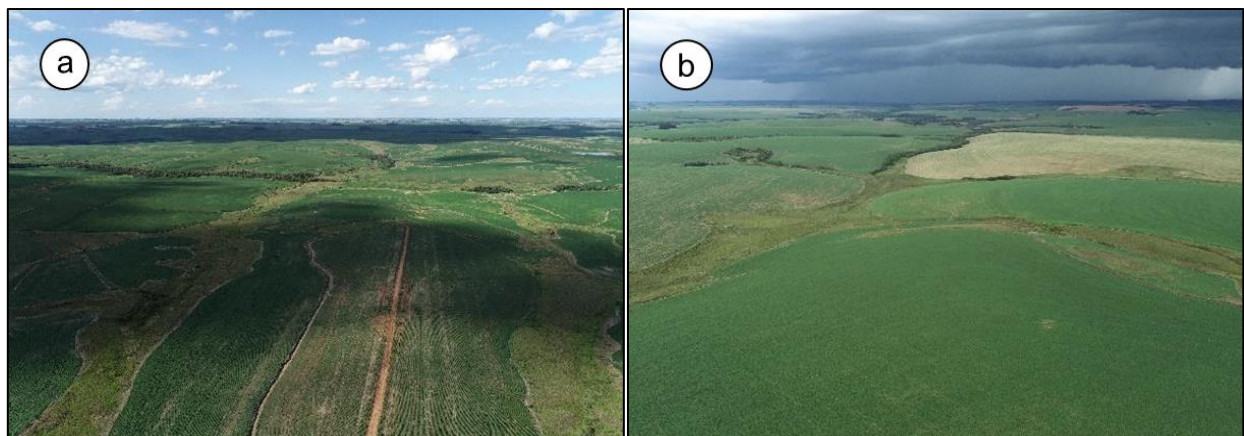
**Figura 2.** (a) Localização da Bacia do Paraná na América do Sul e distribuição das Supersequências em território brasileiro, com sobreposição das manchas da Fm. Tupanciretã. Adaptado de Souza et al., (2021); (b) Mapa Geológico da área de estudo. Adaptado de CPRM (2008).

Os derrames vulcânicos sobre o pacote sedimentar da Formação Tupanciretã incluem fácies máficas (Parapanema e Gramado) e fácies ácidas (Caxias), compostos por basaltos granulares finos a médios e por riolacitos a riolitos, respectivamente (CPRM, 2008). Esses derrames originam solos com textura mais argilosa quando derivam de rochas ígneas extrusivas e solos mais arenosos quando se formam a partir de arenitos e materiais semelhantes, geralmente em estágio avançado de laterização, conforme mostra a Figura 3.



**Figura 3.** (a) Amostra de basalto mesocrático; (b) Amostra de mão de arenito alterado com estrutura maciça. (c) Perfil de Latossolo Vermelho evoluído a partir de transformações de material vulcânico, menos espesso e mais argiloso; (d) Latossolo Vermelho muito profundo, altamente intemperizado, oriundo de litotipo sedimentar da Fm. Tupanciretã.

Os Latossolos Vermelhos cobrem a maior parte da área de estudo (IBGE, 2021a). Esses solos aparecem principalmente em cortes de estrada, integrando o perfil interno de diferentes erosões, e durante a preparação dos campos de soja, cultura predominante na região. Na paisagem, o planalto que abriga o pacote sedimentar da Formação Tupanciretã situa-se no Planalto das Missões. Esse relevo apresenta-se homogêneo, formado por colinas suaves e arredondadas (Figura 4), esculpidas sobretudo em rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e, em menor proporção, em rochas sedimentares da Formação Tupanciretã.



**Figura 4.** (a) Relevo homogêneo e suave com topos levemente convexos; (b) Vista para o relevo marcado por colinas suaves e topos bem arredondados.

## 2.2 Seleção da base cartográfica

Para elaborar produtos cartográficos, utilizou-se bases digitais estaduais obtidas na biblioteca da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler (FEPAM, 2005) e na Base Cartográfica Contínua do Brasil (BCIM) (IBGE, 2021b), ambas na escala 1:250.000. O mapa geológico oficial, contendo as manchas da Formação Tupanciretã, foi derivado do último mapeamento estadual realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2008) na escala 1:750.000. Para extrair índices morfométricos, empregaram-se dados altimétricos do Copernicus DEM, com tamanho de pixel de 30 m, disponíveis gratuitamente na plataforma *OpenTopography*. Na geração de produtos cartográficos temáticos e nas análises de geoprocessamento foi utilizado o ArcGIS 10.8, por meio do aplicativo ArcMap.

## 2.3 Mapeamento e cadastro das voçorocas

Desenvolveu-se uma metodologia específica para mapear e cadastrar as voçorocas por meio de fotointerpretação de imagens de sensoriamento remoto, de modo a cobrir toda a área de estudo em busca de erosões cujas feições são suficientemente grandes para aparecer em imagens de satélite de sensores de alta resolução espacial. Definiram-se duas áreas para o mapeamento da superfície: a primeira abrange as unidades da Formação Tupanciretã (CPRM, 2008) com um *buffer* de 10 km em torno de seus limites, pois o mapeamento vigente foi realizado em escala inferior à adotada neste estudo. A segunda corresponde à extensão das próprias unidades, onde se concentra a maioria das erosões, justamente por apresentarem solos arenosos e frágeis.

Para evitar erros no mapeamento das feições, dada a extensão territorial analisada e a diversidade de informações nas imagens aéreas, subdividiu-se o espaço de interesse em parcelas representadas por quadrantes, usando a ferramenta *Fishnet* do ArcGIS. Essa malha facilita o controle dos quadrantes já mapeados e organiza o processo de varredura (e.g., Carvalho e Castro, 2023; Nunes e Castro, 2023).

Dividiu-se a área de estudo em 905 quadrantes. Desse total, 695 localizam-se nas regiões adjacentes à Formação Tupanciretã, com dimensões de 4,33 km × 4,20 km, correspondendo a 11.477 km<sup>2</sup>; os 210 quadrantes restantes situam-se dentro das unidades, com dimensões de 1,28 km × 1,24 km, pois essas parcelas exigem atenção redobrada no mapeamento manual para identificar pontos erosivos e facilitam a interpretação de imagens orbitais, totalizando 2.309 km<sup>2</sup> (Figura 5).

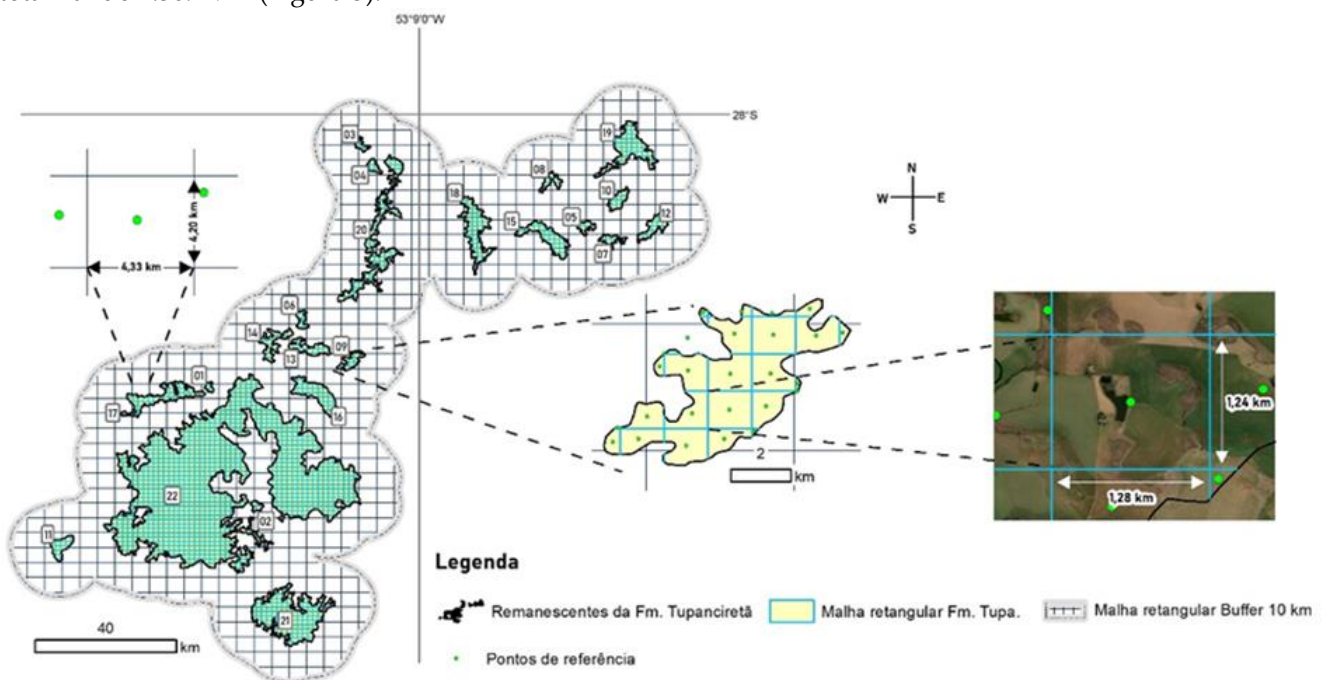


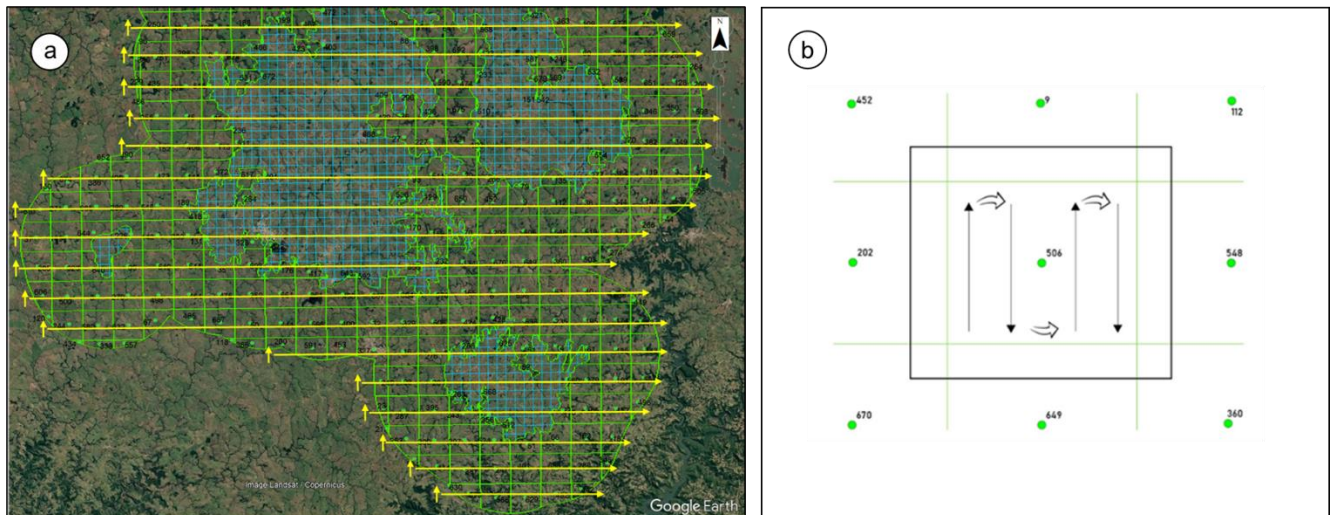
Figura 5. Distribuição dos quadrantes de acordo com o nível de detalhe do mapeamento.

As malhas retangulares e os pontos centrais de cada polígono foram importados para o *Google Earth Pro*, e a cada ponto central atribuiu-se um número sequencial para controlar os quadrantes mapeados. O mapeamento

remoto foi realizado manualmente por interpretação visual das imagens de alta resolução disponíveis no *Google Earth Pro*, que fornece um mosaico de cenas orbitais, principalmente do satélite GeoEye, ortorretificadas e em composição RGB (bandas vermelho, verde e azul).

Estudos anteriores (e.g., Quevedo; Etchelar; Guasselli, 2017; Castro et al., 2010; Garritano et al., 2018; Marchioro e Oliveira, 2014; Petsch et al., 2022; Carvalho; Castro, 2023) empregaram com sucesso o mapeamento de feições erosivas a partir de imagens do *Google Earth* em suas áreas de estudo e feições de interesse. O recurso de imagens históricas do *Google Earth Pro* permitiu avaliar cenas desde 2002.

A varredura visual dos quadrantes ocorreu de oeste a leste e de sul a norte, tanto em cada quadrante isolado quanto ao percorrer todas as malhas da região sul à região norte da área de estudo, conforme ilustra a Figura 6..



**Figura 6.** Mapeamento e cadastro das voçorocas. (a) Subdivisão dos quadrantes e sentido geral vertical e horizontal dos mapeamentos; (b) Sentido de mapeamento dentro dos quadrantes.

Na fase de mapeamento, primeiro identificaram-se todos os tipos de erosão ou exposição de solo visíveis nas imagens de satélite. Na etapa seguinte, após a primeira visita de campo e reconhecimento *in loco* de algumas voçorocas da unidade, catalogaram-se e delimitaram-se todas as feições classificadas como voçorocas. Nesse momento, todos os milhares de pontos erosivos previamente identificados foram analisados com o mesmo grau de detalhamento.

Para diferenciar ravinas, sulcos, escavações antrópicas, canais de drenagem e outras feições erosivas identificadas como pontos erosivos, empregou-se como critério interpretativo a forma, a dimensão e a profundidade (sombra) da feição. As voçorocas foram delimitadas manualmente por interpretação visual, na forma de polígonos no *Google Earth Pro*, e posteriormente importadas para o *ArcGIS*, onde foram convertidas em dado vetorial para a fase de análise.

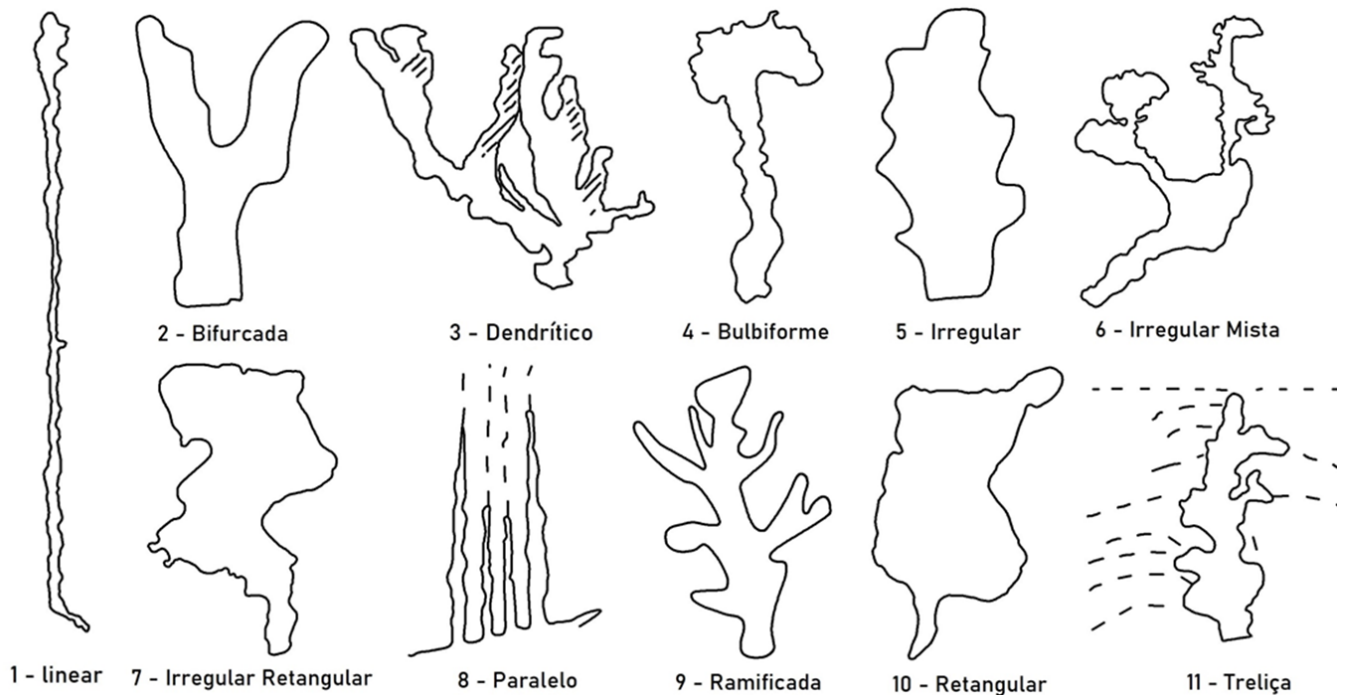
#### 2.4 Criação de um banco de dados em SIG e classificação das voçorocas

Nessa etapa, os polígonos das voçorocas mapeadas foram incorporados a um banco de dados georreferenciado no *ArcGIS* (*ArcMap*). Como a área de estudo abrange dois fusos UTM, os dados foram reprojetoados utilizando a Projeção Equivalente de Albers para extração de métricas, e o sistema geodésico de referência SIRGAS 2000 para apresentação dos produtos e visualizações.

Em seguida, a ferramenta *Feature to Point* converteu cada feição erosiva em ponto, possibilitando a interpolação dos dados pelo método estatístico *Kernel Density*. Esse procedimento gerou um produto cartográfico temático que mostra a intensidade das voçorocas, atribuindo cores quentes às maiores densidades e cores frias às menores. O raio de influência foi calculado automaticamente pelo *ArcGIS* com base na Regra de Silverman, fórmula estatística que estima a largura de banda ideal para suavização em estimativas de densidade.

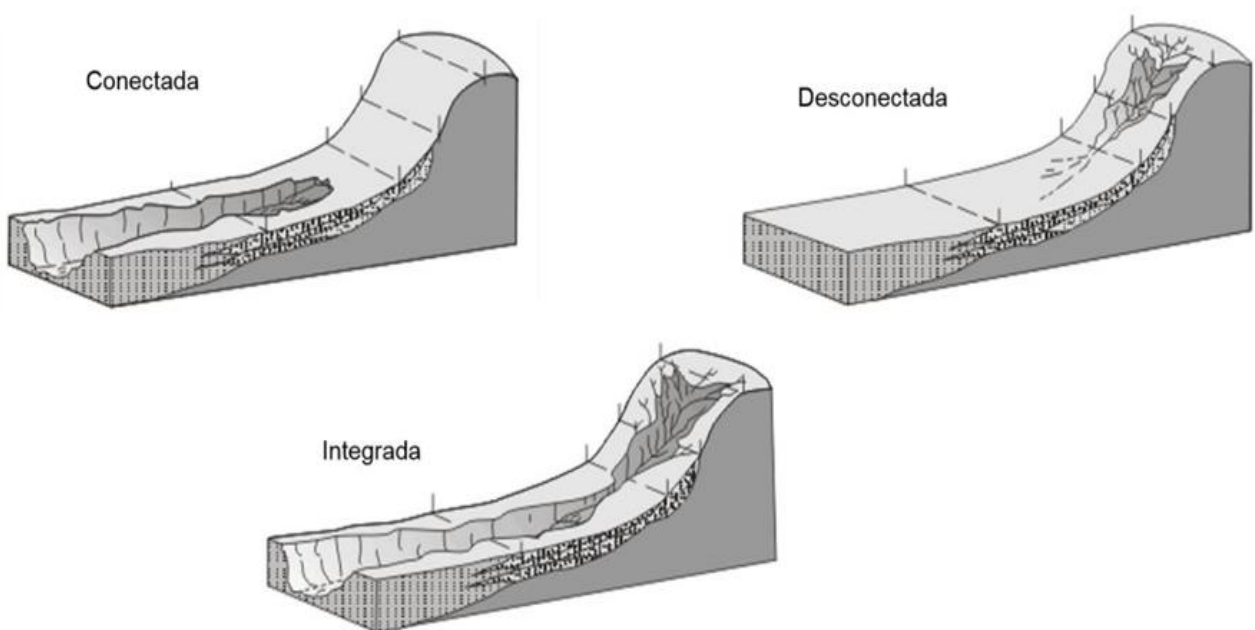
Os valores de área ( $m^2$ ) e perímetro (m) de cada polígono foram obtidos diretamente na tabela de atributos por meio da ferramenta *Calculate Geometry*, representando a extensão espacial e a medida de contorno de cada voçoroca. As formas das erosões foram comparadas a onze tipologias propostas por Ireland et al. (1939), Vieira

(2008) e Cabral (2018), conforme ilustrado na Figura 7, a fim de compreender as origens e as alterações morfológicas das voçorocas cadastradas.



**Figura 7.** Compilação das principais formas de voçorocas propostas em alguns trabalhos nacionais e internacionais. Adaptado de Ireland et al. (1939), Viera (2008) e Cabral (2018).

Na classificação da tipologia das erosões, empregou-se o modelo evolutivo de erosões lineares de Oliveira (1989) para agrupar as voçorocas em conectadas, desconectadas ou integradas à rede de drenagem. Essas feições foram caracterizadas por meio de fotointerpretação de imagens históricas e visualização 3D disponíveis no Google Earth Pro. Ademais, as incisões foram classificadas segundo tamanho e profundidade (pequena, média e grande), conforme Fendrich (1997).



**Figura 8.** Tipologias de evolução de voçorocas. Adaptado por Cabral (2018) de Oliveira (1989).



## 2.5 Análises geomorfométricas e dos lineamentos

As análises geomorfométricas empregaram o Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus. As variáveis investigadas, relacionadas aos aspectos naturais da paisagem, foram extraídas de forma automática e semiautomática, viabilizando uma abordagem quantitativa dos resultados. Dentre elas destacam-se hipsometria, declividade, curvaturas do terreno (horizontal, vertical e combinadas), orientação das vertentes e análise dos lineamentos.

Para otimizar os procedimentos computacionais e evitar perdas de informação nas bordas das voçorocas, executou-se: i) conversão dos dados matriciais e vetoriais do sistema geodésico de referência SIRGAS 2000 para Projeção Equivalente de Albers, de modo a conservar as áreas das erosões; ii) aplicação de recorte conservador com *buffer* de 60 m em torno das voçorocas, visando reduzir o volume de dados; iii) processamento dos dados matriciais recortados por meio de equações disponíveis no ArcMap; iv) reclassificação dos dados matriciais em classes de pixels; v) conversão dos dados matriciais para formato vetorial; vi) clipagem dos dados vetoriais, abrangendo exclusivamente as feições poligonais das voçorocas; e vii) extração de áreas e porcentagens de ocorrência.

Para avaliar a altitude individual de cada erosão — considerando pontos de montante, jusante e amplitude altimétrica — recorreu-se à ferramenta *Zonal Statistics as Table*, que determinou os valores máximos e mínimos de cada voçoroca. As declividades (%) foram obtidas pela ferramenta *Slope* e classificadas conforme Embrapa (1997) em seis classes: plano (0–3 %), suave ondulado (3–8 %), ondulado (8–20 %), fortemente ondulado (20–45 %), montanhoso (45–75 %) e escarpado (> 75 %).

Quanto às formas do terreno, geraram-se parâmetros de curvatura vertical e curvatura horizontal por meio da ferramenta *Curvature*, a partir do MDE. Na curvatura vertical, atribuíram-se três tipos: vertentes convexas (valores  $\leq -0,010$ ), curvaturas retilíneas ( $-0,010$  a  $0,010$ ) e vertentes côncavas ( $\geq 0,010$ ), conforme Valeriano (2008). Na curvatura horizontal, adotou-se procedimento análogo, definindo vertentes convergentes ( $\leq -0,010$ ), curvaturas planares ( $-0,010$  a  $0,010$ ) e vertentes divergentes ( $\geq 0,010$ ). Cabe ressaltar que valores exatos de 0,00 foram pouco considerados, pois raramente ocorrem na natureza, restringindo-se, em geral, a grandes massas d'água.

Após processar os dados de curvatura, combinou-se os dois arquivos matriciais com a ferramenta *Combine*, integrando-os em nove classes de curvaturas de vertentes: convexo-convergente, convexo-planar, convexo-divergente, côncavo-convergente, côncavo-planar, côncavo-divergente, retilíneo-convergente, retilíneo-divergente e retilíneo-planar.

A orientação das vertentes foi determinada pela ferramenta *Aspect*, que atribuiu classes de exposição variando de 0° a 360° em dez intervalos. Para avaliar a influência dos lineamentos, primeiro inspecionou-se manualmente as feições e atribuiu-se a direção preferencial da erosão no sentido montante–jusante, por meio de abreviações dos pontos cardeais. Esses dados possibilitaram comparar as orientações predominantes com estudos sobre o comportamento estrutural das formações Tupanciretã e Serra Geral.

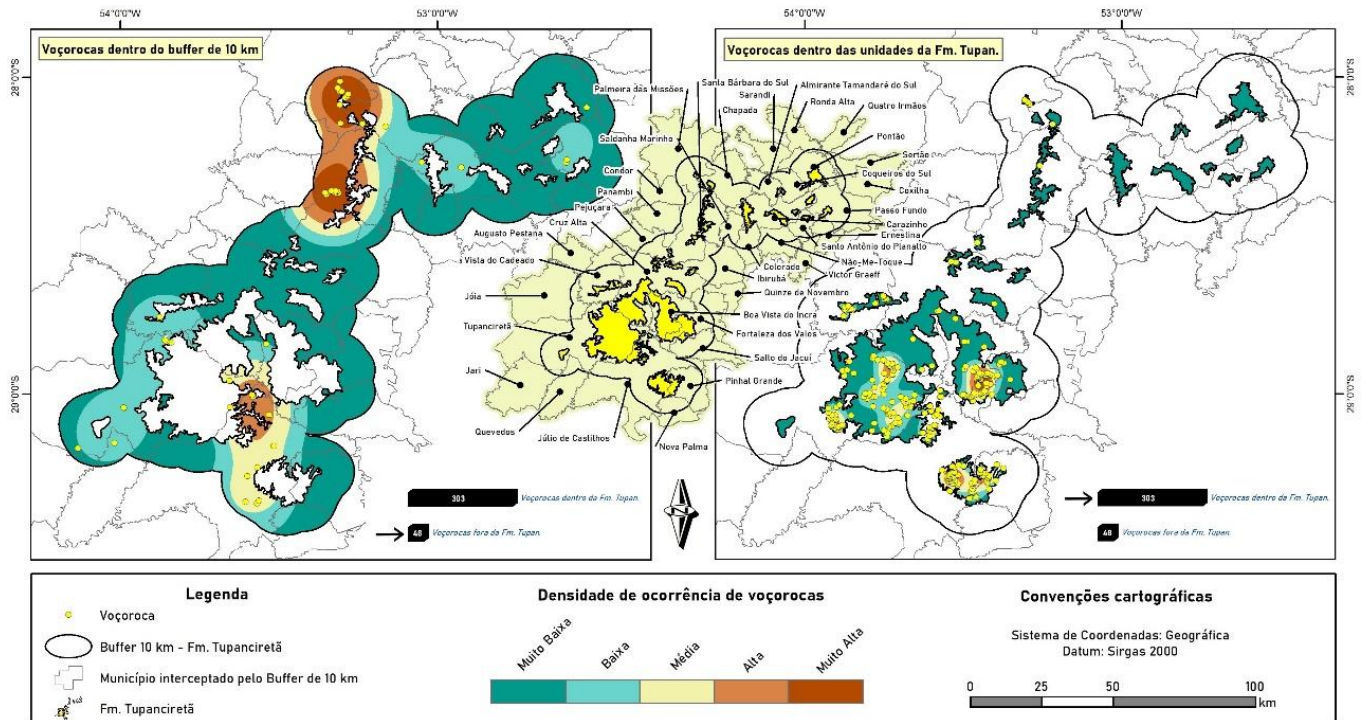
## 3. Resultados e Discussões

### 3.1 Cadastramento, análise e caracterização das voçorocas

#### 3.1.1. Cadastramento e análise das voçorocas

Identificaram-se 303 voçorocas na Formação Tupanciretã e 48 fora dela, dentro dos quadrantes definidos para o mapeamento das erosões — até 10 km dos contornos atuais da formação, incluindo seu interior — totalizando 351 voçorocas e 413 ha de área degradada, o que corresponde a 0,19 % da área total da unidade sedimentar.

O mapeamento das erosões na área de estudo permitiu elaborar os produtos da Figura 9. Neles, além de plotar os pontos de cada voçoroca, empregou-se a densidade de Kernel dentro do espaço definido pelas áreas externa e interna das manchas da Formação Tupanciretã. Assim, definiram-se cinco classes de densidade de ocorrência de voçorocas (Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta) em cada recorte, destacando as áreas de maior concentração desse tipo de erosão.



**Figura 9.** Espacialização das voçorocas sobre municípios e classes de densidade de ocorrência. Fonte: elaboração própria.

A figura anterior revela que as voçorocas mapeadas dentro do *buffer* de 10 km, portanto fora dos contornos litológicos da formação sedimentar, incluem pontos próximos às unidades e pontos distantes. Destacam-se voçorocas localizadas a mais de sete quilômetros dos contornos, indicando discrepâncias no mapeamento atual da CPRM (2008).

Nas voçorocas registradas na porção interna dos contornos da Formação Tupanciretã, o epicentro das erosões lineares concentra-se nas manchas do centro-sul, ocorrendo em grande número no município de Tupanciretã, com 114 focos erosivos de grande porte. Foram catalogadas 73 voçorocas em Júlio de Castilhos, seguidas por quantidades menores e sem ordem específica nos municípios de Pinhal Grande, Fortaleza dos Valos, Boa Vista do Ingra, Boa Vista do Cadeado, entre outros.

A conclusão do mapeamento evidenciou que as voçorocas ocorrem predominantemente em áreas rurais voltadas à produção agrícola, onde a cobertura vegetal foi removida e convertida. Uma porção significativa dessas incisões erosivas localiza-se próxima ao sistema viário, situado sobre ou perto dos divisores de água, em conformidade com a posição do pacote sedimentar da Formação Tupanciretã no topo do relevo. Nessa região, o escoamento superficial acentua-se devido à relação entre a altimetria e o comprimento de rampa das vertentes.

### 3.1.2 Caracterização das formas e tipos de voçorocas

#### 3.1.2.1 Formas das erosões

O mapeamento e cadastro das voçorocas evidenciou a multiplicidade de incisões com formas distintas, influenciadas pelo relevo, pela dinâmica das águas superficiais e subterrâneas e por possíveis controles estruturais. Essas formas refletem a evolução dos processos erosivos ao longo do tempo, alterando-se à medida que os processos se tornam mais recorrentes ou intensos.

Com base em Ireland et al. (1939), Vieira (2008) e Cabral (2018), classificaram-se nove tipologias de voçorocas: bifurcada ( $n = 29$ ), bulbiforme ( $n = 9$ ), irregular ( $n = 40$ ), irregular mista ( $n = 18$ ), irregular retangular ( $n = 17$ ), linear ( $n = 45$ ), paralelo ( $n = 3$ ), ramificada ( $n = 185$ ) e retangular ( $n = 5$ ), conforme ilustrado na Figura 10.

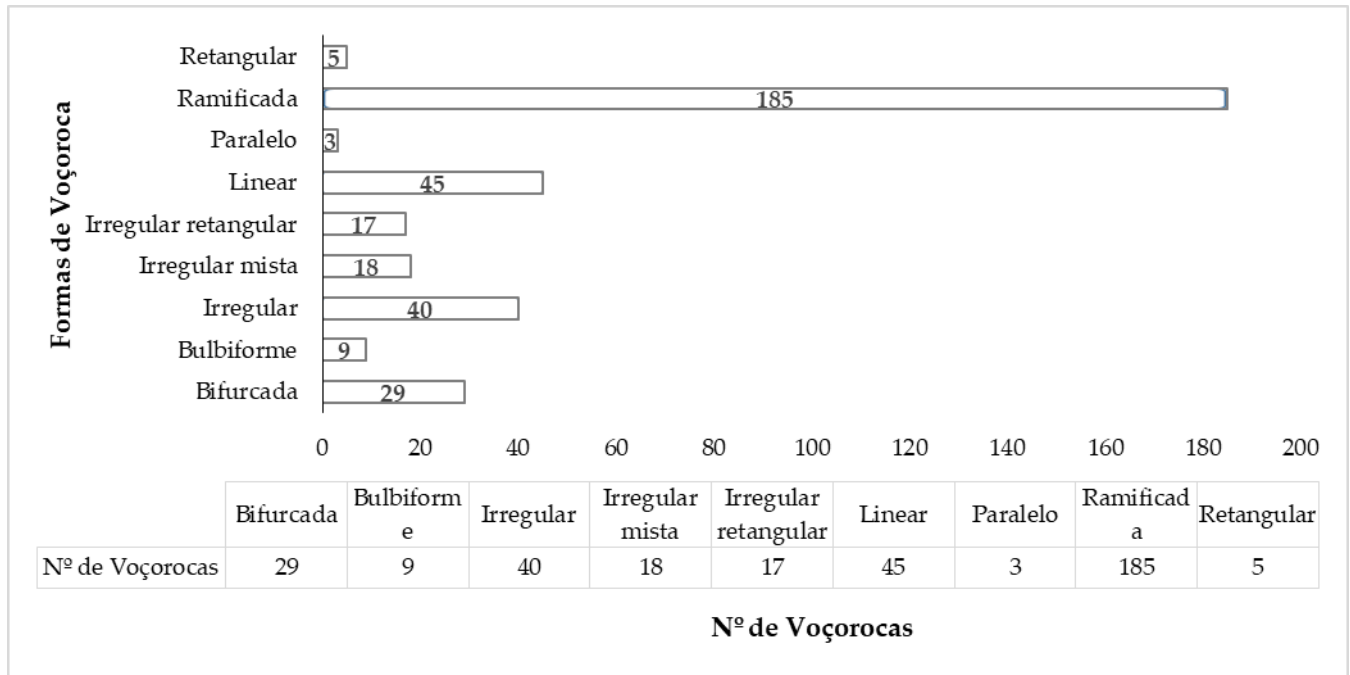


Figura 10. Relação das voçorocas e suas classificações de formas.

Na Formação Tupanciretã, a forma mais comum de voçoroca é a ramificada, com 185 ocorrências, correspondendo a mais de 50 % do total. Essa configuração relaciona-se à retrogressão, em que a erosão avança em sentido contrário ao fluxo da água — isto é, de jusante (parte baixa) para montante (parte alta) — ou à convergência de fluxos concentrados que alimentam o canal principal em múltiplas direções, originando ramos secundários irregulares, com espaçamento que varia de próximo a afastado. Esses ramos tendem a apresentar variação de profundidade, embora muitas ramificações ocorram em relevo colinoso de baixa amplitude, podendo desenvolver-se próximo à cabeceira ou nas laterais da incisão.

Voçorocas com padrão linear representam 13 % do total. Elas resultam de um único fluxo superficial concentrado e tipicamente exibem pequena área de ocorrência, baixo volume de solo removido e dimensões reduzidas em profundidade e largura, com comprimento alongado como característica principal. Esse padrão geralmente corresponde à fase inicial do processo de voçorocamento e ocorre entalhado no talvegue dos interflúvios, podendo evoluir para outras tipologias.

Quanto aos padrões irregular, irregular mista e irregular retangular, tais configuram 11 %, 5 % e 4 % das 351 voçorocas, respectivamente. As voçorocas irregulares apresentam abertura central mais ampla e fluxos superficiais variáveis nas bordas, com braços relativamente curtos e pouco espaçados. Nas voçorocas irregulares mistas, observam-se aberturas largas em alguns trechos e formatos distintos em outros, conferindo variação ao traçado. A forma irregular retangular exibe plano básico retangular, porém com sinuosidade nas margens. Esses padrões indicam estágio evolutivo mais avançado, com fundo amplo que favorece o estabelecimento de vegetação na parte interna.

Em cinco voçorocas (1,40 %), classificou-se o padrão retangular. Essas erosões, tipicamente mais antigas, apresentam perfis profundos, fundos chatos e paredes homogêneas, por vezes retilíneas, refletindo padrão mais simétrico em comparação ao formato irregular.

No padrão bulbiforme ( $n = 9$ ), a região de cabeceira alarga-se em forma de bulbo ou oval, enquanto o canal, a jusante, estreita-se, lembrando a estrutura de uma cebola. Esse alargamento na porção superior pode decorrer da confluência de vários ramos que se mantêm em erosão contínua até consolidar esse formato.

A forma bifurcada ocorreu em 29 voçorocas e caracteriza-se por dois fluxos concentrados na região de montante que convergem e intensificam a erosão no canal principal. Essa configuração relaciona-se a fluxos superficiais concentrados provenientes de estradas ou linhas de contorno de colinas, que alargam os canais em duas direções nos trechos montantes.

As voçorocas com padrão paralelo, as menos frequentes ( $n = 3$ ), exibem ramos ou canais muito próximos entre si, ladeados pelo mesmo flanco da erosão, o que sugere controle estrutural ou interferência antrópica — como canais artificiais construídos seguindo curvas de nível, com desembocadura em canais transversais coletores.

A classificação das formas das erosões, influenciada por fatores naturais e antrópicos, envolve subjetividade, pois algumas feições podem se encaixar em diferentes categorias. Neste estudo, adotou-se o padrão apresentado na Figura 11, que ilustra exemplarmente cada forma identificada.



**Figura 11.** Exemplo de cada forma de voçoroca considerada no presente estudo.

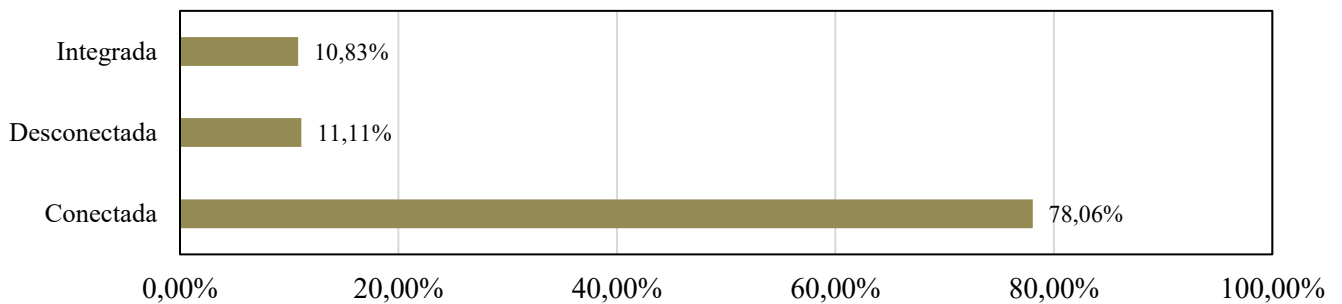
### 3.1.2.2 Voçorocas e rede de drenagem

Os agrupamentos de voçorocas mapeadas tendem a se localizar próximos aos divisores de água, onde o relevo é geralmente homogêneo, variando entre planos e ondulados. Nessa posição, inicia-se a rede de drenagem, o que aumenta a velocidade do escoamento superficial e favorece a erosão hídrica, especialmente na ausência de cobertura vegetal adequada.

Quanto à posição nas encostas, a tipologia de cada voçoroca classifica-a como canal de primeira ordem conforme Oliveira (1989), que agrupa as voçorocas em conectadas, desconectadas ou integradas à rede de drenagem. No caso de voçoroca conectada, a erosão possui contribuição subsuperficial e forma um canal de primeira ordem, normalmente no vale ou na base da encosta. Se a erosão ocorre na parte superior da encosta e depende apenas do escoamento superficial, caracteriza-se como voçoroca desconectada, sem vínculo direto com a rede de drenagem. Quando essas duas tipologias se unem em um ponto intermediário da encosta, considera-se a voçoroca integrada, geralmente indicando estágio avançado de evolução (Oliveira, 1989).

Com base nessa classificação e na análise de todas as voçorocas mapeadas, registrou-se: 274 unidades (78 %) como conectadas; 39 unidades (11 %) como desconectadas; e 38 unidades (10 %) como integradas à rede de

drenagem (Figura 12). Esses números mostram que a maioria das voçorocas contribui diretamente para o assoreamento dos corpos hídricos e acelera a remoção, em larga escala, dos sedimentos que compõem a Formação Tupanciretã.



**Figura 12.** Relação das voçorocas e suas classificações quanto a tipologia.

Após classificar as voçorocas quanto à forma no item anterior, associou-se essa informação com a tipologia apresentada no Quadro 1 e identificaram-se padrões que refletem diretamente o estágio de evolução das feições. Esses padrões permitem prever a progressão da erosão a montante.

Formas \ Tipos	Conectada	Desconectada	Integrada
Bifurcada	25	3	1
Bulbiforme	2	2	5
Irregular	33	5	2
Irregular mista	13	0	5
Irregular retangular	9	6	2
Linear	31	12	2
Paralelo	1	2	0
Ramificada	160	4	21
Retangular	0	5	0

**Quadro 1.** Correção entre os tipos e as formas de voçorocas.

Quando as incisões erosivas se aprofundam no substrato sedimentar, podem alcançar o nível freático e tornar-se canais de drenagem de primeira ordem, desprovidos de afluentes e integrados à rede principal. Na região, as formas de erosão que exemplificam esse comportamento são a ramificada ( $n = 160$ ), a bifurcada ( $n = 25$ ), a irregular ( $n = 33$ ) e a linear ( $n = 31$ ). No caso das voçorocas ramificadas, em sua maioria conectadas à rede de drenagem, observa-se maior influência da profundidade e da largura: canais intermitentes e efêmeros aprofundam e alargam a erosão, e seus ramos promovem encaixamento erosivo em áreas deprimidas ladeadas por colinas, sem avançar significativamente sobre as vertentes, conforme ilustra a Figura 13.



**Figura 13.** Exemplos de voçorocas Ramificadas e conectadas a rede de drenagem. Adaptado de Google Earth Pro (2024).

As voçorocas desconectadas da rede de drenagem geralmente indicam estágio inicial do processo erosivo, quando o escoamento superficial ou movimentos de massa iniciam a incisão, resultando em canais temporários. Exceto na forma irregular mista, todas as tipologias apresentam voçorocas desconectadas, especialmente o padrão linear ( $n = 12$ ), que costuma ser a configuração inicial à medida que uma ravina se aprofunda e alarga, originando uma voçoroca alimentada por fluxo superficial preferencial.

Além da falta de conexão com a rede de drenagem, essas voçorocas situam-se no meio e no topo da encosta. Em alguns casos, observam-se leques de sedimentos erodidos na base da vertente (jusante), formados pela descarga pluvial de alta energia, conforme ilustrado na Figura 14.



**Figura 14.** Exemplos de voçorocas desconectadas da rede de drenagem, com círculo indicando leque de sedimentos transportados pela ação do deflúvio. Adaptado de Google Earth Pro (2024).

As voçorocas integradas ocorrem quando uma incisão erosiva conectada à rede de drenagem avança montante e se encontra, em ponto intermediário da encosta, com outra incisão que até então não tinha ligação, formando uma única feição desde a parte alta até a base da vertente. O número reduzido de unidades nessa categoria ( $n = 38$ ) pode refletir a necessidade de relevo com maiores altitudes e declives acentuados, além de indicar feições erosivas antigas em estágio final de evolução. Na Figura 15 observa-se que o canal principal localiza-se em área deprimida do relevo, enquanto os ramos a montante atingem o terço médio da encosta das colinas, próximos às estradas vicinais, frequentemente situadas nos divisores de água.



Figura 15. Exemplos de voçorocas integradas a rede de drenagem. Adaptado de Google Earth Pro (2024).

### 3.1.2.3 Tamanho das erosões

Outra forma de classificar as voçorocas considera seu tamanho, adotando parâmetros como profundidade do canal, área da incisão erosiva e volume erodido. Exceto pela área, determinar profundidade e volume exige precisão e acurácia elevadas, considerando as limitações das bases de sensoriamento remoto disponíveis.

Na mensuração das dimensões dos polígonos, observou-se variação expressiva: as áreas das voçorocas vão de 322,02 m<sup>2</sup> (0,032 ha) a 94.901,31 m<sup>2</sup> (9,49 ha). Segundo Frenndrich et al. (1991), em termos de área, isso corresponde a voçorocas pequenas (< 2 ha) ou médias (2 a 20 ha). Verifica-se que o número de voçorocas diminui à medida que o tamanho aumenta, conforme ilustrado na Figura 16.

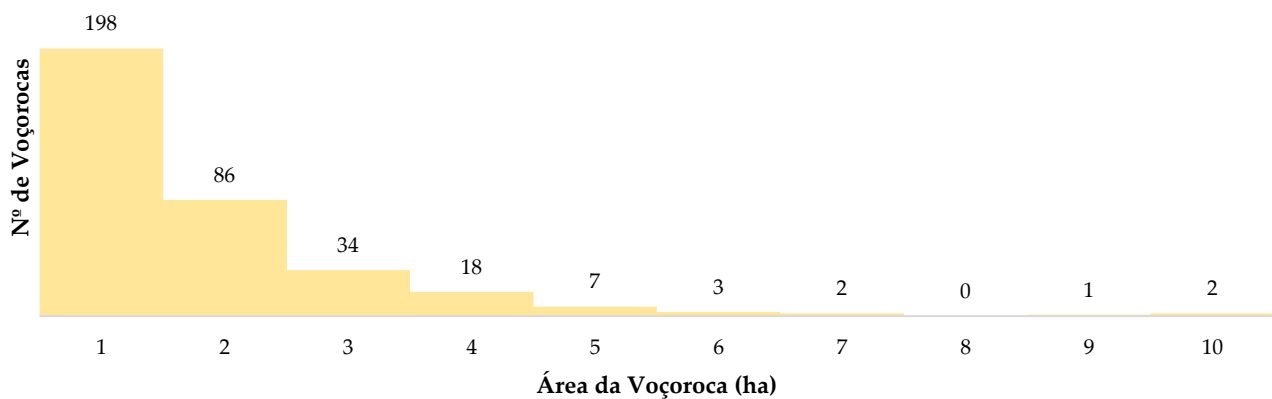


Figura 16. Frequência do número de voçorocas em relação ao seu tamanho de área.

## 3.2 Caracterização e análise geomorfométrica das voçorocas

### 3.2.1 Hipsometria

Elaborou-se o produto cartográfico de hipsometria a partir dos dados altimétricos do MDE (Figura 17). Nesse produto, empregou-se um esquema cromático que varia de cores frias (baixa altimetria) a quentes (alta altimetria) para representar as classes de cotas altimétricas dos pixels na área de estudo, com sobreposição das voçorocas mapeadas. No recorte analisado, as elevações variam de 103 a 712 m. A topografia apresenta-se mais elevada nas regiões norte, nordeste e sudoeste, enquanto nas porções oeste, leste e sul predomina altitude mais baixa, restando áreas de altitude intermediária principalmente no centro da área.

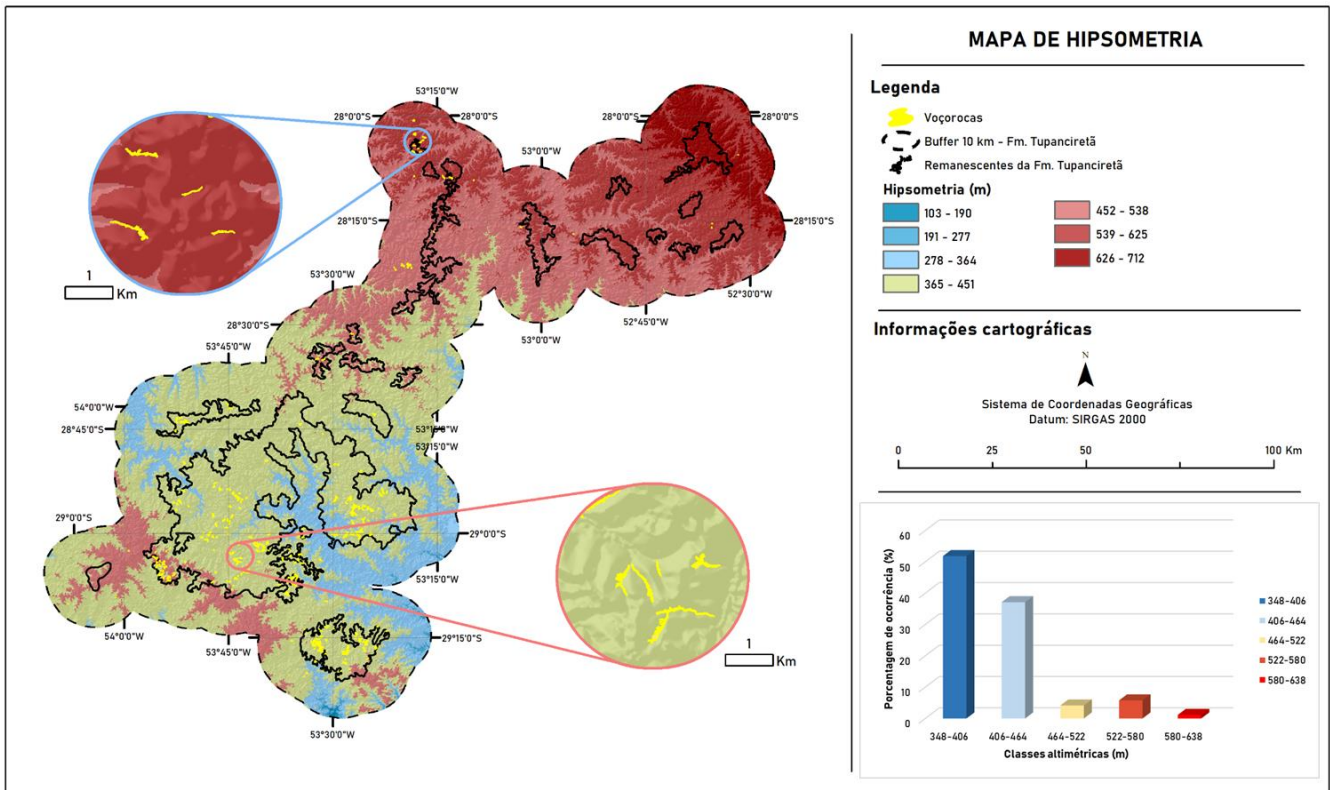


Figura 17. Hipsometria da área de estudo com sobreposição das erosões cadastradas.

Nas altimetrias de 348 a 406 m concentram-se 51,81 % das voçorocas mapeadas, seguidas pelo intervalo de 406 a 464 m, com 37 %. Em menor frequência, as erosões apresentam-se entre 464 e 533 m (4,14 %) e entre 522 e 580 m (5,77 %). Nas altitudes mais elevadas, de 580 a 638 m, a presença de voçorocas é reduzida, com apenas 1,14 %.

Ao analisar pontualmente as incisões erosivas, verifica-se que o ponto mais alto atinge 638 m na porção de cabeceira, enquanto o ponto mais baixo, na foz, situa-se a 348 m. Desse modo, as voçorocas da Formação Tupanciretã ocorrem entre 348 e 638 m, resultando em uma amplitude altimétrica geral de 290 m e média de 18 m nas unidades analisadas.

### 3.2.2 Declividade

Analisaram-se as declividades do relevo em cada célula do MDE empregado nas análises geoespaciais na área de estudo, expressas em porcentagem (EMBRAPA, 1997). Foram investigadas as classes de declividade presentes no interior de cada voçoroca, permitindo identificar os padrões de inclinação mais associados ao desenvolvimento dessas feições. Embora os resultados sejam referentes apenas à porção interna — e não aos segmentos montantes —, eles traduzem o contexto geral da superfície, pois o tamanho do pixel frequentemente engloba as bordas e tende a subestimar as declividades reais no interior da erosão.

As erosões de grande porte concentram-se predominantemente em relevo suave ondulado, com 59 % da ocorrência em área, mas também se manifestam em relevo plano (17,45 %) e ondulado (20 %). Em menor proporção, constatarem-se ramos erosivos em relevo fortemente ondulado (2,85 %) e quase ausentes em relevo montanhoso (0,06 %) (Figura 18).



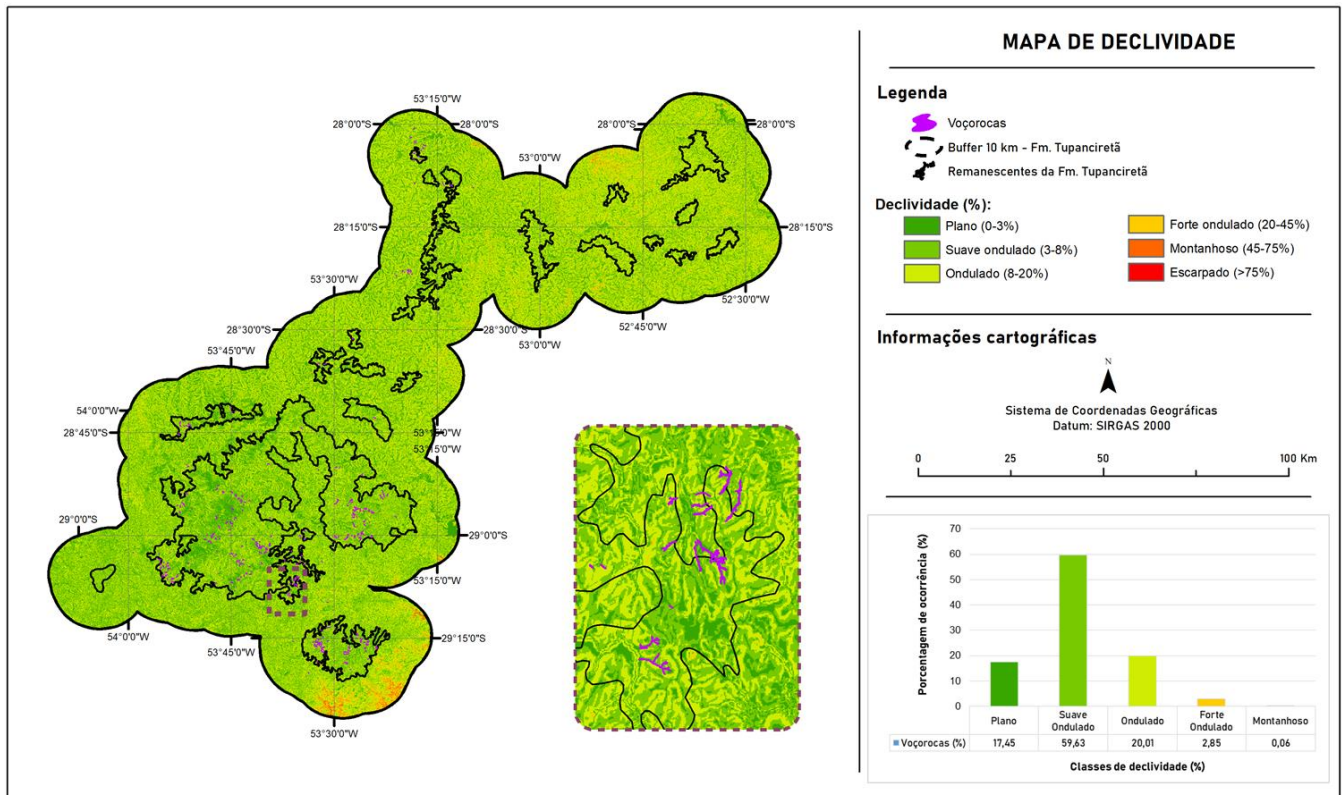


Figura 18. Declividade com sobreposição das unidades da Fm. Tupanciretã e respectivas voçorocas.

São inúmeras as voçorocas que apresentam padrões semelhantes de desenvolvimento sobre a superfície do relevo. Na maior parte, exibem porções planas próximas à foz (fundo de vale), intercaladas por áreas suavemente onduladas em direção à montante. Em alguns casos, principalmente quando a gully está integrada ou desconectada da rede de drenagem, observam-se declives mais acentuados próximos à região de cabeceira, em relevo ondulado ou fortemente ondulado.

Note-se que, apesar de 78 % das voçorocas estarem conectadas à rede de drenagem e de predominarem superfícies suaves, o fator declividade não precisa ser elevado para que a erosão se inicie e evolua. Isso ocorre porque, além do comprimento da rampa e da natureza do material (pouco coeso, friável e arenoso), a intensa atividade agrícola e o uso inadequado do solo amplificam as feições erosivas. Desse modo, a magnitude das erosões não se relaciona diretamente com a intensidade do escoamento superficial, mas sobretudo com a natureza do substrato.

### 3.2.3 Formas de Terreno (Perfil e Plano de curvatura das vertentes)

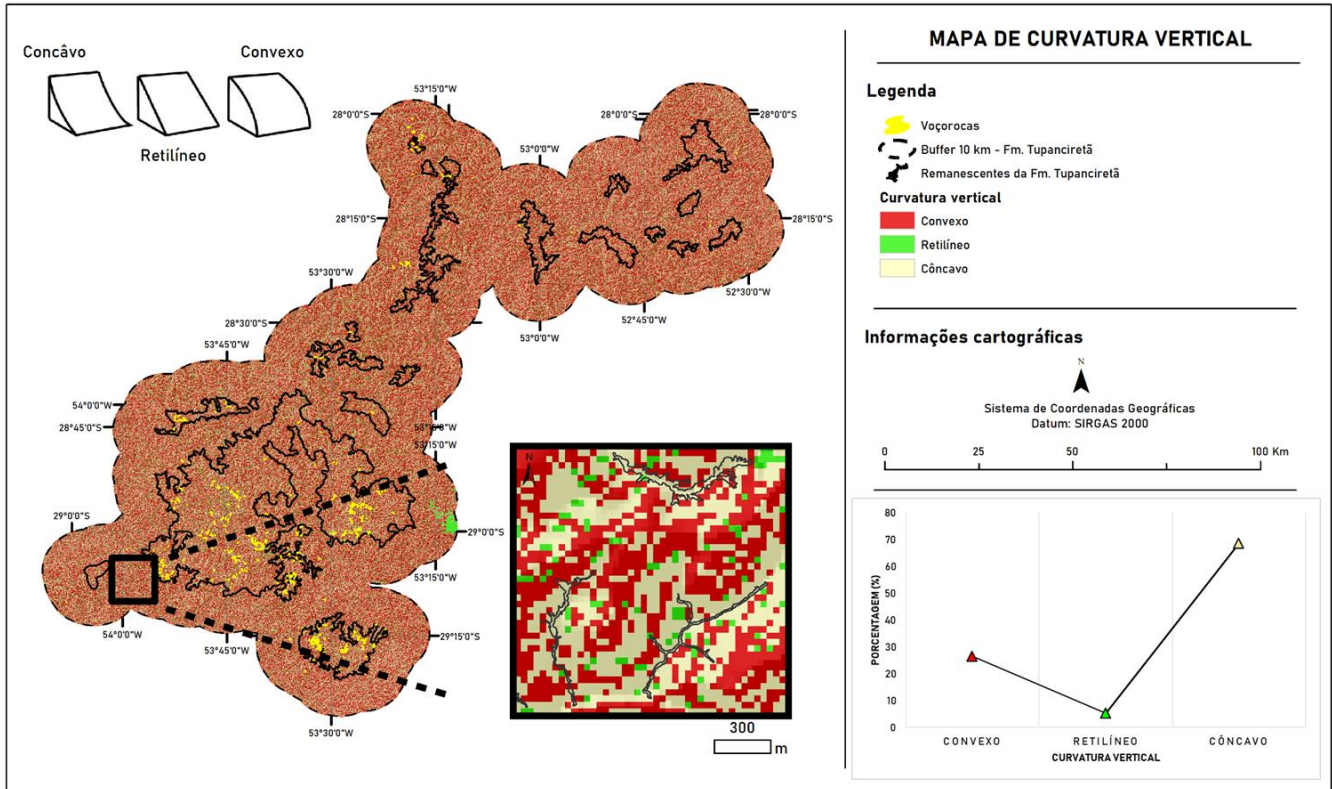
As vertentes ou encostas estabelecem a conexão entre os divisores de água (topos) e os canais e/ou vales fluviais (base). Elas estão intimamente ligadas ao regime de escoamento superficial das águas pluviais e ao comportamento da declividade imposta na superfície. Dependendo da curvatura do terreno, o fluxo pode convergir ou divergir, favorecendo ou desfavorecendo os processos erosivos hídricos.

A morfologia das encostas, em especial as inclinações, pode acelerar ou desacelerar o fluxo superficial proveniente de montante. É a partir das curvaturas impostas no perfil que se define, em termos de direção e formato (laminar ou concentrado), o escoamento das águas, influenciando diretamente a ocorrência de erosões.

#### 3.2.3.1 Curvaturas Verticais

A curvatura de perfil ou vertical representa o fluxo sempre paralelo à direção máxima da vertente, afetando principalmente a velocidade do escoamento, seja para freá-lo ou acelerá-lo. Para avaliar essas superfícies geométricas, classificaram-se as vertentes em três categorias: convexas (declividade aumenta para jusante),

retilíneas (declividade constante) e côncavas (declive maior próximo à montante). Com base na Figura 19, observa-se que predominam, no relevo regional, superfícies convexas (cores vermelhas), localizadas principalmente nos altos topográficos; em meia encosta, muitas vezes migram para padrão retilíneo (cores verdes); e, finalmente, aproximam-se de curvaturas côncavas (cores cremes).

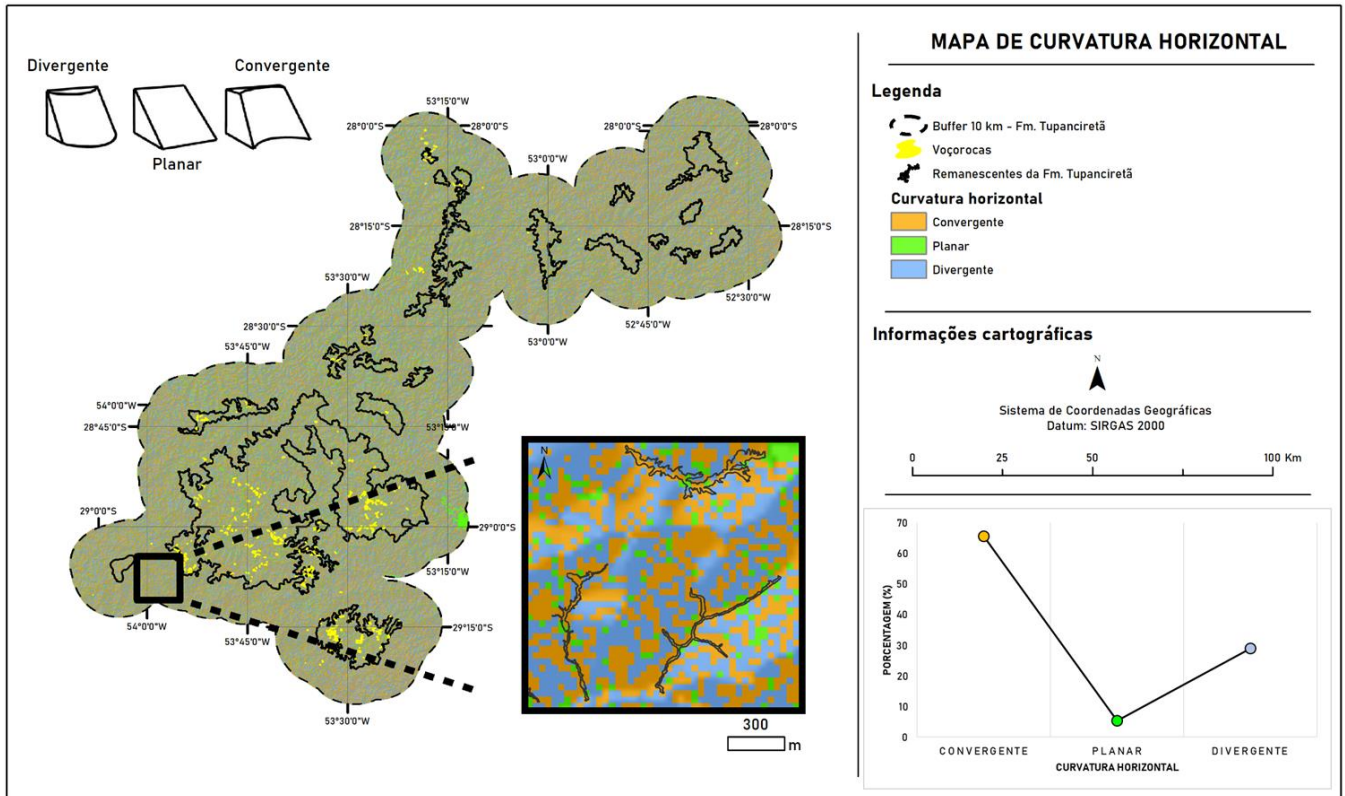


**Figura 19.** Curvatura vertical na área de estudo, com representação gráfica das vertentes e quadro exemplificativo com o número de voçorocas inseridas.

A maioria das voçorocas insere-se em curvaturas verticais côncavas (68 %), formato que tende a acumular água em seu interior, gerar fluxo concentrado com maior vigor erosivo e favorecer a descarga gravitacional. Em seguida, observam-se voçorocas em curvaturas convexas (26 %), onde ocorre dissipação do fluxo pluvial (fluxo difuso), e em curvaturas retilíneas (5 %), as quais desfavorecem a infiltração e aceleram o deflúvio.

### 3.2.3.2 Curvaturas Horizontais

Outra maneira de identificar padrões de fluxo nas encostas é por meio das curvaturas horizontais, também conhecidas como planas, que se baseiam na relação com o plano horizontal da rampa, correspondendo à dinâmica divergente ou convergente das linhas de fluxo na superfície da vertente. Adotaram-se três formas para representar as curvaturas horizontais, que se mostraram bastante diversificadas na área de estudo (Figura 20), reconhecendo a participação tanto no relevo quanto nas voçorocas das curvaturas convergentes, planares e divergentes.

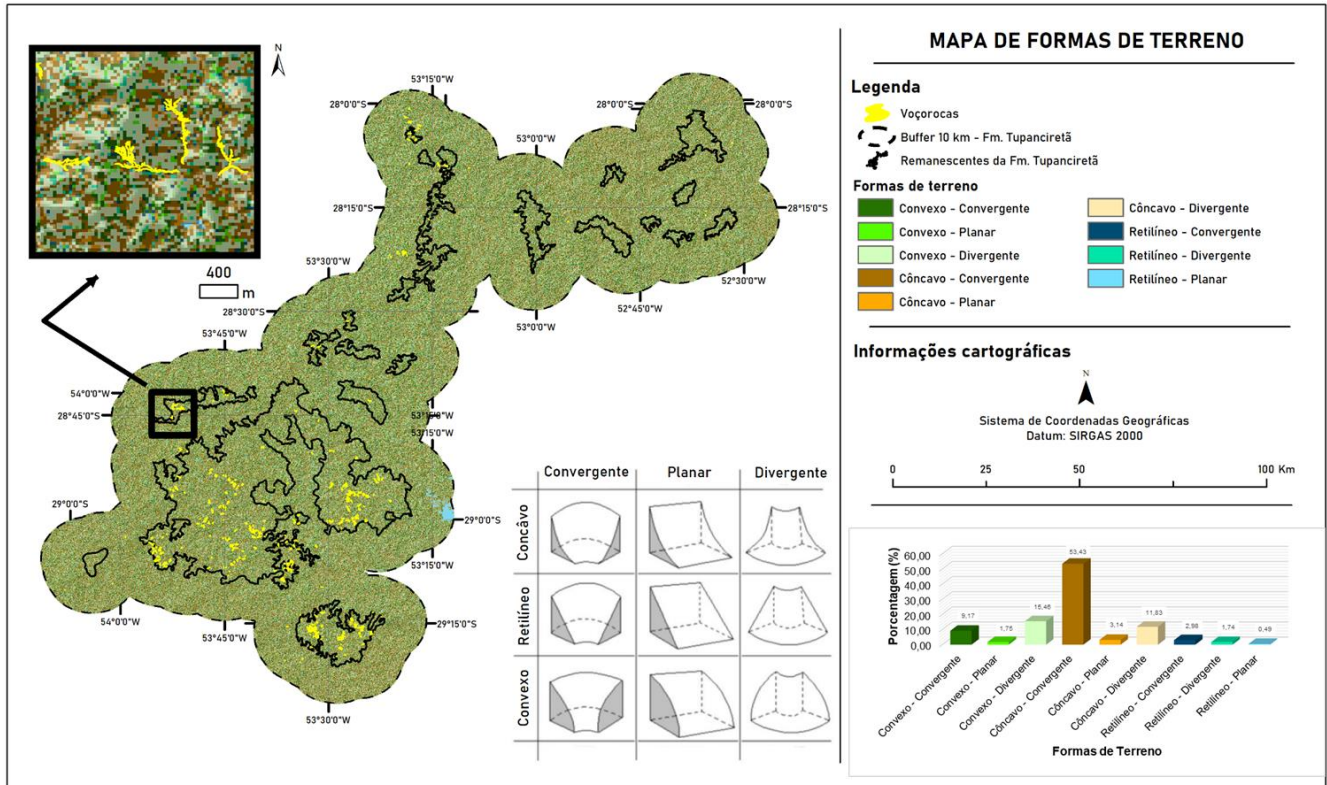


**Figura 20.** Curvatura horizontal na área de estudo, com representação gráfica das vertentes e quadro representativo do número de voçorocas inseridas.

Ao analisar os processos de voçorocamento em relação às curvaturas horizontais, observou-se que 65 % das ocorrências concentram-se na classe convergente, seguidas pela divergente (29 %) e pela planar (5 %). A predominância de voçorocas em curvaturas convergentes ocorre porque o escoamento na face da encosta segue direções de maior declive em direção ao centro, concentrando fluxos e ampliando a suscetibilidade à erosão linear. Em contraste, o fluxo em curvaturas divergentes desloca-se em direção às bordas do perfil, dissipando-se e reduzindo o potencial erosivo. A forma planar representa uma condição intermediária, na qual a superfície não apresenta convergência nem divergência laterais, mantendo o fluxo do topo à base da encosta.

### 3.2.3.3 Formas de terreno conjuntas

Nas vertentes, diferentes segmentos e curvaturas determinam formatos variados da superfície. Esses formatos influenciam a dinâmica e o funcionamento dos processos morfogênicos na encosta, incluindo movimentos de massa e erosões hídricas. Outra abordagem para representar as curvaturas das vertentes consiste em combinar as classes de fluxo vertical e horizontal, resultando em nove categorias de curvaturas de vertentes (Figura 21).



**Figura 21.** Formas de terreno, englobando curvaturas verticais e horizontais das vertentes. Representação de formas de Valeriano (2008), adaptado de Dikau (1990).

A integração das classes de curvaturas destaca cenários hidrológicos que intensificam a erosão hídrica, ao mesmo tempo em que evidencia combinações contrárias de fluxo nas vertentes, facilitando a interpretação da morfologia das encostas perante o surgimento ou a continuidade das incisões erosivas. A relação entre as voçorocas e as formas de terreno — resultado da combinação de curvaturas verticais e horizontais no perfil da encosta — está representada no gráfico anterior, que exhibe as porcentagens das áreas de voçorocas nas nove classes combinadas.

A classe côncavo-convergente destaca-se como a mais associada às voçorocas da Formação Tupanciretã, concentrando 53 % da área total. Nessa configuração, o fluxo tende a se canalizar para um único vetor, favorecendo o escoamento concentrado e acelerando o processo erosivo. Em paralelo, as vertentes divergente-convexas (15 %) revelam importância no processo, pois promovem dispersão do fluxo, ainda que em menor escala.

A classe côncavo-divergente, com 11 % de ocorrência, representa fluxo que se concentra em direção ao centro, mas ao mesmo tempo se dispersa lateralmente, o que pode gerar múltiplos canais (ramos) na encosta. Em 9 % da área de voçorocas, a classe convexo-convergente impõe escoamento mais lento; porém, devido à convergência lateral, pode intensificar as voçorocas, ainda que com processos menos vigorosos.

As classes restantes — que somam cerca de 10 % da área total — refletem curvaturas planares e retilíneas combinadas com outras configurações. Embora sua participação seja menor, essas classes também contribuem para a evolução de feições erosivas, pois todas foram interceptadas por voçorocas de grande porte ao longo da área de estudo.

De modo geral, as vertentes na área apresentam diferentes segmentos: curvaturas côncavas no terço inferior (com redução da inclinação em direção à base), padrões retilíneos na porção intermediária e curvaturas convexas no topo (com aumento do declive para jusante). Essa configuração, associada à presença de planos convergentes e planares, aumenta as chances de ocorrência de erosão laminar e, de forma mais rápida, de erosão por fluxos superficiais concentrados, desenvolvendo sulcos, ravinas e voçorocas.

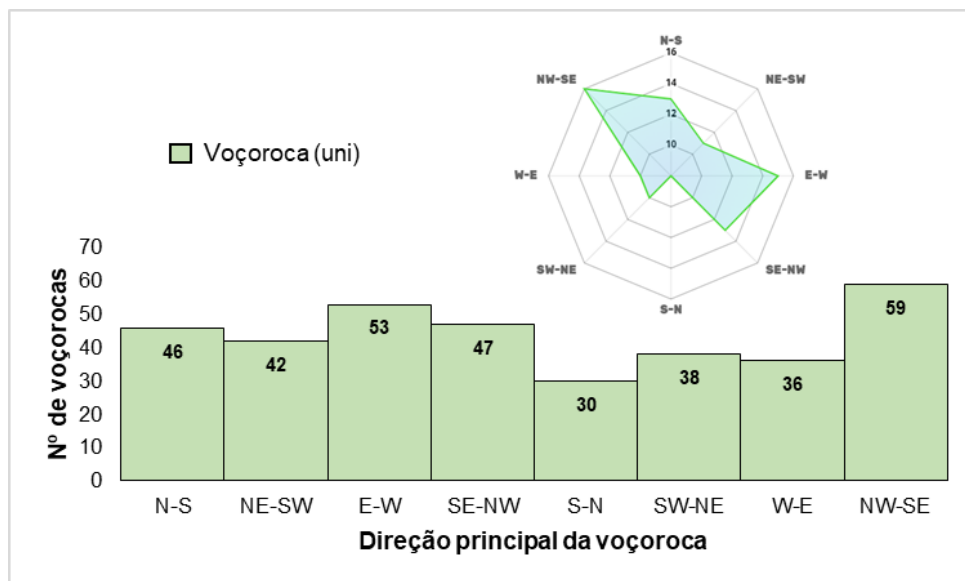
### 3.3.3 Análise dos lineamentos

Para analisar as possíveis influências da geologia (litologia e estruturas) na gênese e evolução das voçorocas da Formação Tupanciretã, caracterizaram-se as direções principais dos talvegues das erosões (efêmeros, intermitentes ou perenes) e compararam-se esses dados com as análises de lineamentos morfoestruturais realizadas por pesquisadores na mesma formação geológica e região de estudo. A origem sedimentar da Formação Tupanciretã, em contexto pós-Formação Serra Geral, implica predominância de sedimentos quartzosos com baixa cimentação, resultando em arenitos, em grande parte, pouco consolidados e friáveis, que se revelam facilmente erodíveis e moldáveis.

O escoamento superficial nesse tipo de solo se mostra agressivo, contribuindo para a formação de numerosas erosões lineares decorrentes do mau manejo das águas pluviais na agricultura, caracterizando-se, portanto, como fenômeno de origem antrópica. No entanto, de modo natural ou ao potencializar as interferências humanas no uso e cobertura do solo, o desencadeamento das voçorocas na região pode relacionar-se também à influência tectônica.

De forma manual e aparente, a cada unidade atribuiu-se a direção principal da voçoroca no eixo central, de montante para jusante. Dessa forma, supõe-se a existência de controle geomorfológico atuando no relevo da paisagem, favorecendo o aporte do escoamento superficial, bem como a atuação de fluxo subsuperficial condicionado por falhas e fraturas, o que facilita a mobilidade de sedimentos.

Ao analisar as direções predominantes, observa-se maior frequência na orientação NW-SE ( $n = 59$ ), seguida, em ordem decrescente, por E-W ( $n = 53$ ), SE-NW ( $n = 47$ ), N-S ( $n = 46$ ), NE-SW ( $n = 42$ ), SW-NE ( $n = 38$ ), W-E ( $n = 36$ ) e S-N ( $n = 30$ ). A Figura 22 exibe essa distribuição em colunas agrupadas e destaca, secundariamente, as direções predominantes em um diagrama semelhante à rosa dos ventos, com as porcentagens correspondentes.



**Figura 22.** Distribuição do número de voçorocas em relação a direção predominante tomadas pelos eixos principais.

Analisando as informações apresentadas na figura anterior, verifica-se que as erosões de grande porte ocorrem em todas as direções, sem pormenorizar, o que indica que o controle estrutural não é primordial para a gênese dessas feições. No entanto, a disparidade observada nas voçorocas com orientação preferencial NW-SE, seguida por NE-SW e, em menor grau, E-W, pode estar associada aos arcos regionais e lineamentos do arcabouço tectônico da Bacia do Paraná, correspondentes a estruturas proterozoicas reativadas (Zalán et al., 1990).

Reis (2020), ao conduzir análise morfoestrutural em área semelhante à deste estudo, incluindo regiões dominadas por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e por arenitos da Formação Tupanciretã, identificou que os principais lineamentos se orientam em E-W, seguidos por NE-SW e, em menor grau, N-S, esta última mais expressiva na unidade sedimentar. Essas três direções correspondem a 40 % das voçorocas mapeadas. O autor ressalta, ao comparar com outros estudos, que tais direcionamentos coincidem com os padrões regionais de estruturas da Bacia do Paraná, sobretudo E-W, presentes intensamente nas duas formações analisadas e associadas

a atividades tectônicas do Cenozoico superior na bacia (Peyerl et al., 2018). Assim, infere-se que a Formação Tupanciretã foi tectonicamente afetada.

Em consonância com Reis (2020), Mexias (2024) realizou estudo similar no município de Santiago/RS, onde, mesmo fora da área de estudo e não mapeados pela folha geológica oficial do estado, também ocorrem depósitos cenozoicos da Formação Tupanciretã e amplitudes expressivas de voçorocas. Assim como neste trabalho, Mexias observou predominância de voçorocas orientadas NW-SE, indicando correlação com o caráter morfoestrutural e tectônico de reativações de linhas pré-existentes.

Diante do exposto, conclui-se que parte das voçorocas apresenta direções coincidentes com estruturas pré-existentes, conforme apontado por estudos de morfoestrutura na área de afloramento da Formação Tupanciretã sobre a Formação Serra Geral (Reis, 2020; Mexias, 2024; Marin, 2022), reforçando a hipótese de que a orientação de algumas voçorocas segue antigas diretrizes tectônicas. Além disso, cerca de 90 % das feições estão interligadas à rede de drenagem, cujo padrão costuma refletir essas diretrizes geológicas. Entretanto, isso não implica necessariamente controle estrutural predominante na maioria das voçorocas, cuja influência permanece de difícil percepção.

### 3.3.4 Orientação das vertentes

A orientação da face das vertentes onde ocorrem as erosões mapeadas relaciona-se, em grande parte, à direção principal do eixo das voçorocas. Contudo, ao utilizar um MDE com resolução espacial de 30 m, os pixels não capturam detalhadamente as direções preferenciais do escoamento, ou seja, a face de exposição corresponde ao declive máximo no sentido descendente.

Para correlacionar a orientação dos lineamentos e das próprias voçorocas com a direção das vertentes, adotou-se análise em quatro quadrantes gerais (N-E, E-S, S-O, O-N), pois uma mesma classe de orientação pode corresponder a múltiplas direções preferenciais das erosões.

Em seguida, elaborou-se o produto da Figura 23, que utiliza nove orientações para as vertentes na área de estudo, expressas em graus de 0° a 360°, ou -1° quando a face é considerada plana. Com base em dados de geoprocessamento, verificou-se que 22,48 % das voçorocas localizam-se em vertentes com declive para Oeste. Em seguida vêm as faces Noroeste (17,33 %), Sudoeste (15,91 %) e Norte (11,01 %), posições perpendiculares às principais orientações das voçorocas (NW-SE/SE-NW, E-W, NE-SW/SW-NE e N-S). Já nas vertentes voltadas para Sul, Leste, Nordeste e Sudeste, a presença de voçorocas é menor, correspondendo a 9,96 %, 7,07 %, 7,78 % e 8,45 %, respectivamente, o que coincide com as direções menos frequentes das voçorocas (S-N e W-E).

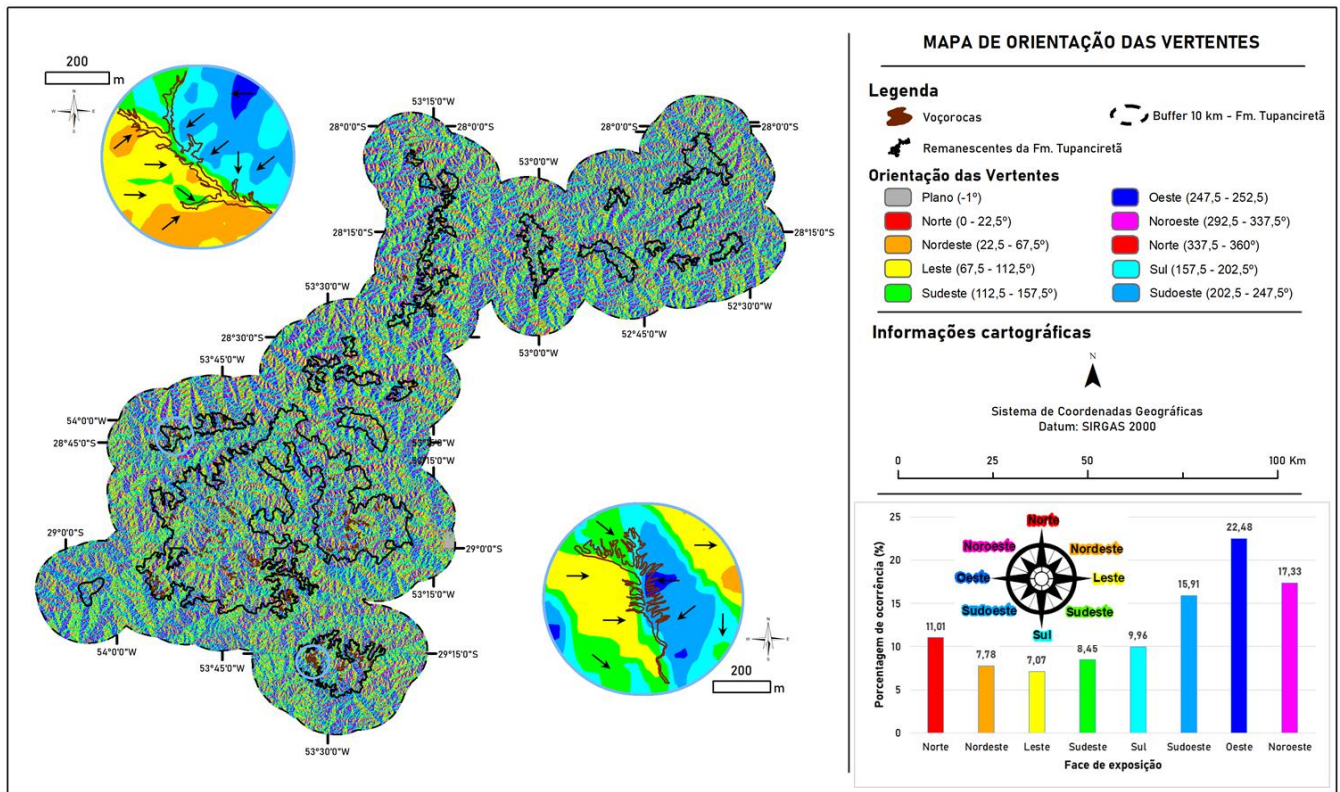


Figura 23. Distribuição do número de voçorocas em relação a direção predominante tomadas pelos eixos principais.

Além do possível controle estrutural na dissipação das voçorocas da Formação Tupanciretã, que molda as superfícies do relevo, a proximidade de muitas voçorocas aos divisores de água explica a diversidade de padrões de orientação das encostas identificada nas análises. A geomorfologia condiciona fortemente o direcionamento das linhas de drenagem para o centro da bacia hidrográfica.

### 5. Conclusões

Esta pesquisa reuniu e gerou novos dados sobre as voçorocas que afetam extensas áreas no centro-norte do estado, decorrentes do frágil manto de intemperismo da Formação Tupanciretã. Os procedimentos e técnicas de geotecnologias empregados na obtenção da base de dados demonstraram a aplicabilidade de diferentes ferramentas na avaliação de processos erosivos, permitindo quantificar e qualificar cada voçoroca no recorte estudado.

A forma de voçoroca mais comum é a ramificada, representando mais de 50 % do total. Essa configuração reflete múltiplos fluxos concentrados que convergem para o canal principal, originando ramos irregulares e secundários, com espaçamento variável, que podem ocorrer próximo à cabeceira e nas laterais da incisão.

Em relação à conexão com a rede de drenagem, 65 % das voçorocas situam-se próximas aos divisores de água, especialmente naquelas que subsidiam a Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí. Dentre todas as voçorocas mapeadas, 274 (78 %) estão conectadas à rede, 39 (11 %) permanecem desconectadas e 38 (10 %) apresentam integração parcial. Esses números indicam que a maioria contribui diretamente para o assoreamento dos corpos hídricos e intensifica a remoção dos sedimentos da Formação Tupanciretã.

As voçorocas ocorrem preferencialmente em altitudes entre 348 e 406 m. O ponto mais alto registrado atinge 638 m na porção de cabeceira, enquanto o mais baixo situa-se a 348 m na foz, resultando em amplitude altimétrica de 290 m.

Quanto à declividade do relevo interno das voçorocas, 59 % estão em relevo suave ondulado, 17,45 % em relevo plano, 20 % em relevo ondulado, 2,85 % em relevo fortemente ondulado e 0,06 % em relevo montanhoso. Esses dados indicam que inclinações acentuadas não são condição obrigatória para o surgimento e desenvolvimento das voçorocas, pois outros fatores — como comprimento da rampa, natureza pouco coesa e uso agrícola inadequado — também influenciam significativamente os processos erosivos.

Ao avaliar a morfologia das encostas, observou-se que 68 % das voçorocas estão em curvaturas verticais côncavas, que tendem a reter água em seu interior e gerar fluxo concentrado. Em termos de curvaturas horizontais, 65 % ocorrem em vertentes convergentes, que direcionam o fluxo para o centro da encosta. Quando combinadas, as curvaturas côncavo-convergente predominam em 53 % das voçorocas, indicando que o canal de escoamento concentrado favorece a evolução erosiva.

Ao analisar possíveis controles estruturais, verificou-se que as voçorocas ocorrem em todas as direções, o que demonstra que a influência tectônica não é condição primordial para sua formação. Ainda assim, algumas orientações preferenciais (NW–SE, NE–SW e E–W) coincidem com estruturas tectônicas pré-existentes, sugerindo que parte das voçorocas segue antigas linhas estruturais. Além disso, cerca de 90 % estão conectadas à rede de drenagem, cujo padrão geralmente reflete diretrizes geológicas, sem que isso implique controle estrutural predominante em todas as feições.

Por fim, a face de exposição das vertentes onde ocorrem as voçorocas revela que 22,48 % estão em vertentes voltadas para Oeste, 17,33 % para Noroeste, 15,91 % para Sudoeste e 11,01 % para Norte, posições perpendiculares às direções mais frequentes das voçorocas. As orientações Sul (9,96 %), Leste (7,07 %), Nordeste (7,78 %) e Sudeste (8,45 %) apresentam menor presença de voçorocas. Essa distribuição reflete a forte influência da geomorfologia, pois muitas voçorocas ocorrem próximas aos divisores de água, o que explica a diversidade de padrões nas orientações das encostas observada nos resultados.

**Contribuições dos Autores:** Concepção, H.R.S. e C.O.A.F.; metodologia, H.R.S. e C.O.A.F.; validação, H.R.S. e C.O.A.F.; análise formal, C.O.A.F.; investigação, H.R.S.; recursos, H.R.S. e C.O.A.F.; preparação dos dados, H.R.S.; redação, H.R.S.; edição, C.O.A.F.; supervisão, C.O.A.F.; obtenção de financiamento, C.O.A.F. Ambos os autores leram e concordam com a versão publicada do manuscrito.

**Financiamento:** As atividades de coleta de dados de campo para este estudo foram apoiadas pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

**Agradecimentos:** Agradecemos à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR) e aos membros do Laboratório Latitude. C.O.A.F. foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio de uma Bolsa de Produtividade em Pesquisa – PQ (Processo nº 302181/2025-3). Agradecemos também ao apoio de Gianni Gisele Perin do Programa BIC UFRGS para a Iniciação Científica. Agradecemos ainda aos revisores e editores da Revista Brasileira de Geomorfologia pelas correções e melhorias neste estudo.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram que não há conflito de interesses.

## Referências

1. ANDRADES FILHO, C. O. et al. Potencial de discriminação geomorfométrica da Formação Tupanciretã na Bacia do Paraná, sul do Brasil. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Santos: Galoá Proceedings, 2017. v. 18. p. 3247-3254.
2. CABRAL, T. L. **Distribuição e classificação de voçorocas por meio de indicadores morfométricos em sub-bacias no município de Cacequi – RS**. 2018 191 f. Tese 523 (Doutorado em Geografia). Instituto de Geografia. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
3. CABRAL, T. L.; NUMMER, A. V.; BATEIRA, C. V. de M. **Indicadores morfométricos como suporte para a classificação de voçorocas em sub-bacias hidrográficas no município de Cacequi, RS**. *Revista Brasileira Geomorfologia*, v. 21, n.1, p. 139-154, 2020.
4. CARVALHO, H. S. M.; CASTRO, S. S. Mapeamento e identificação de áreas críticas à erosão hídrica linear: o exemplo do bioma Cerrado no estado de Goiás, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 00, 2023. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2373.
5. COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul – Escala 1:750.000**. Porto Alegre, 2008.
6. COULON, F. K.; GAMERMANN, N.; FORMOSO, M. L. L. Considerações Sobre a Gênese da Formação Tupanciretã. *Pesquisas em Geociências*, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 79–89, 1973.
7. DIKAU, R. Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v.80, p. 45-55, 1990.



8. DUMMER, J.; VERDUM, R. Controle estrutural nos processos erosivos hídricos e na arenização, bacia hidrográfica do Arroio Miracatu - Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2318.
9. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997, 212 p.
10. Esri Inc. **ArcMap (versão 10.8)**. Redlands, Estados Unidos, 2016.
11. FAO. Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management. Rome, 2019. 100 pp.
12. FENDRICH, R. Erosão Urbana. In: FREDRICH, R et al. **Drenagem e Controle da Erosão Urbana**. 4.ed. Curitiba: Champagnat, 1997, p. 15-50.
13. FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESLLER (FEPAM). **Biblioteca digital: arquivos digitais para uso em SIG - base cartográfica digital do RS (escala: 1:250.000)**. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <[https://ww3.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases\\_geo.asp](https://ww3.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp)>. Acesso em: 08 fev. 2023
14. GARRITANO, F do N. et al. **Monitoramento, Mapeamento e caracterização de voçorocas através de imagens do Google Earth Pro e uso de drone**. IV Jornada de Geotecnologia do Estado do Rio de Janeiro. Seropédica-RJ, Brasil-UFRJ. P. 83-93, 2018.
15. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapeamento de recursos naturais do Brasil, escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2021a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em: 15 jan. 2022.
16. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). **Base cartográfica contínua do Brasil, escala 1:250.000**. Rio de Janeiro, 2021b. Disponível em: <[https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloadsgeociencias.html?caminho=cartas\\_e\\_mapas/bases\\_cartograficas\\_continuas/bc250/versao2021/](https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloadsgeociencias.html?caminho=cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bc250/versao2021/)>. Acesso em: 27 mar. 2023
17. 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. 1939. 142 p.
18. MARCHIORO, E.; OLIVEIRA, J.C. **Evolução espaço-temporal de voçorocas às margens da rodovia ES-482 em Alegre (ES)**. Revista Geonorte, Edição Especial 4, V.10, N.1, p.125-130, 2014. (ISSN 2237-1419).
19. MARIN, H. D. **Análise morfoestrutural como ferramenta para a identificação da influência de processos associados com a Formação Tupanciretã-RS**. 2022. 64 f. Monografia (Graduação em Geologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.
20. MENEGOTTO, E. 1980. Análise textural da Formação Tupanciretã. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 2, p. 91-103.
21. MENEGOTTO, E.; SARTORI, P. L. P.; MACIEL FILHO, C.L. Nova sequência sedimentar sobre a Serra Geral no Rio Grande do Sul. **Publicação Especial do Instituto de Solos e Culturas**, Seção Geologia e Mineralogia, Santa Maria, v. 1, p. 1-19, ago. 1968.
22. MEXIAS, L. **Mapeamento e análise morfoestrutural da Formação Tupanciretã em Santiago - RS**. 2024. 81 f. Monografia (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.
23. MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental**. 1997. 254 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997, 2v.
24. MOREIRA, V. S. **A dialética capitalista no meio rural em Tupanciretã/RS/Basil: da ocupação ibérica ao agronegócio nos assentamentos da reforma agrária**. 2013. 227 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
25. NÓBREGA, M. T. de; SILVEIRA, H.; CUNHA, J. E. da.; BECKAUSER, M. C.; BONIFÁCIO, C. M.; BALDO, M. C. As voçorocas no Noroeste do Paraná: locais preferenciais de ocorrência na paisagem. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2367.
26. NUNES, E. D.; CASTRO, S. S. Análise multiescalar aplicada à avaliação de erosão hídrica linear para área tropical subúmida situada na região Sudoeste do estado de Goiás - Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2368.
27. OLIVEIRA, M.A.T. DE. Erosion disconformities and gully morphology: a threedimensional approach. In: \_\_\_\_\_. **Catena: an interdisciplinary journal of soil science hydrology – geomorphology**. v. 16. W. Germany: Catena Verlag. p. 413- 423. 1989.
28. OTTO, J.C. et al. **GIS Applications in Geomorphology**. Earth Systems and Environmental Sciences, Amsterdã, p. 81-111, 2017.

29. PERIN, G. G. Ocorrência de erosões do tipo voçoroca na Formação Tupanciretã – RS. In: Salão De Iniciação Científica Da UFRGS (XXXV: 2023), Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: UFRGS, 2023. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/269317>>. Acesso em: 7 jul. 2025.
30. PETSCH, C.; VOLPATO SCCOTI, A. A.; SOUZA ROBAINA, L. E. de; TRENTIN, R. Controlling factors and mapping of linear erosive features in Santa Maria river watershed –RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 4, p. 1876–1892, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i4.2151.
31. PEYERL, W. R. L. et al. Reactivation of Taxaquara Fault and its morphotectonic influence on the evolution of Jordão River catchment, Paraná, Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, n. 3, 553-573, 2018. DOI: 10.1590/2317-4889201820170110.
32. PINHEIRO, G.R. **Mapeamento e análise espacial de ravinas e voçorocas associadas à Formação Tupanciretã em Santiago - RS, Planalto Meridional**. 2023. 51 f. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.
33. QUEVEDO, R. P.; ETCHELAR, B. C.; GUASSELLI, L. A. **Evolução Temporal de Voçorocas e Expansão Urbana na Sub-Bacia Hidrográfica do Arroio Feijó, RS – Brasil**. II Congresso Internacional de Geografia Urbana. Buenos Aires, Argentina. P. 1007-1016, 2017.
34. REIS, M. S. **Caracterização Morfoestrutural dos Depósitos Sedimentares da Formação Tupanciretã, no Planalto Meridional do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2020. 78p. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Sustentabilidade), Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, São Francisco de Paula. 2020.
35. RICCOMINI, C.; SANTANNA, L. G.; FAMBRINI, G. L. The Early Cretaceous Jacuí Group, a newly discovered volcanoclastic-epiclastic accumulation at the top of the Paraná Basin, southern Brazil. **Cretaceous Research** (Print), v. 59, p. 111-128, 2016.
36. RUPPEL, K. M. V.; DANI, N.; AMORETTI LISBOA, N. Evolução Morfotectônica e Megageomorfológica das Formações Pós Gondwânicas Santa Tecla e Tupanciretã no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 24, n. 1, 2023.
37. VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008. 75p.
38. VIEIRA, A. F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus: Principais fatores controladores e Impactos urbano-ambientais**. 2008. 310 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2008.
39. VIERO, A. C. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do Taboão, RS**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
40. WILDNER, W. Estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná - Conceitos básicos e divisão faciológica. In: Reunião Aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 2004. P.62-77.
41. ZALÁN, P. V. et al. Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. (Eds.). **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 1990. p.135-168.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.