

TÉCNICAS AUTOMATIZADAS PARA ANÁLISE INTEGRADA EM EROSÕES LINEARES DE SUB-BACIAS NO MUNICÍPIO DE CACEQUI/RS

Antônio Von Ende Dotto

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Geociências, Santa Maria, RS, Brasil
dottovon@gmail.com

Lucas Krein Rademann

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Geociências, Santa Maria, RS, Brasil
lucasrademann@yahoo.com.br

Luís Eduardo de Souza Robaina

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Geociências, Santa Maria, RS, Brasil
lesrobaina@gmail.com

Romário Trentin

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Geociências, Santa Maria, RS, Brasil
romario.trentin@gmail.com

RESUMO

A área de estudo desse trabalho se localiza na região Sudoeste do Rio Grande do Sul no município de Cacequi que se destaca pela alta ocorrência de voçorocas em seu território. O arcabouço geológico e morfoestrutural pode interferir na forma, intensidade e orientação das voçorocas em Cacequi. Assim, esse artigo busca analisar a relação entre os lineamentos morfoestruturais e os elementos do relevo na ocorrência de voçorocas nas bacias Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande em Cacequi – RS, através da aplicação de técnicas automatizadas em MDEs. A extração automatizada de lineamentos morfoestruturais apresentou um resultado de feições coerentes com as características fisiográficas da área. A orientação de voçorocas e de lineamentos são coincidentes em direção predominante Leste – Oeste. Com a análise dos elementos do relevo pode-se verificar as microestruturas que elas constituem além de ser possível identificar áreas de avanço de voçorocas. As morfoestruturas se relacionam com os vales e cristas e as voçorocas com os vales, escavados e encostas. Dessa forma, conclui-se que o controle morfoestrutural caracterizado pelas condições geológicas e geomorfológicas é condicionante para a gênese e evolução das incisões erosivas presentes na área de estudo.

Palavras-chave: Voçorocas. Geotecnologias. Controle Morfoestrutural.

AUTOMATED TECHNIQUES FOR INTEGRATED ANALYSIS IN LINEAR EROSIONS OF SUB-BASINS IN THE MUNICIPALITY OF CACEQUI/RS

ABSTRACT

The study area is located in the municipality of Cacequi, which stands out for the high occurrence of gullies in its territory. The geological and morphostructural framework can interfere with the shape, intensity and orientation of the gullies in Cacequi. Thus, this article seeks to analyze the relationship between morphostructural lineaments and relief elements in the occurrence of gullies in the Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha and Arroio Areal Grande basins in Cacequi – RS, through the application of techniques automated in MDEs. The automated extraction of morphostructural lineaments produced results consistent with the physiographic characteristics of the area. The orientation of gullies and lineaments coincides in a predominant East – West direction. With the analysis of the relief elements, it is possible to verify the microstructures they constitute, in addition to being possible to identify areas of gully advancement. The morphostructures are related to the valleys and ridges and the gullies are related to the valleys, excavations and slopes. Therefore, it is concluded that the morphostructural control characterized by geological and geomorphological conditions is a condition for the genesis and evolution of the erosion incisions present in the study area.

Keywords: Gullies. Geotechnologies. Morphostructural control.

INTRODUÇÃO

A morfologia da superfície terrestre é produto dos processos geodinâmicos endógenos e exógenos atuantes sobre um suporte geológico estruturado, onde as características litológicas e tectônicas influenciam o modo de ação dos fatores de erosão e a direção desta erosão (Naudin; Prud'homme, 1973; Correa, 2022). Nessa conjuntura, Saadi (1991) define a morfoestrutura como a interface entre o controle litoestrutural e a erosão.

Para Araújo (2003), a análise morfoestrutural possibilita, inclusive a partir de lineamentos estruturais, traçar as flexuras do terreno derivadas de processos geológicos. O mapeamento de lineamentos morfoestruturais busca a identificação de grandes estruturas tectônicas no terreno. A realização destes mapeamentos é possível através da análise de imagens orbitais e de Modelos Digitais do Terreno, permitindo a identificação destas estruturas e compreensão da morfogênese e morfodinâmica de uma região. Lineamentos podem ser considerados feições lineares topográficas ou tonais observáveis nas imagens, que podem representar descontinuidades estruturais (Etchebehere; Saad; Fulfaro, 2007).

Mello e Ferrari (2003) destacam que a ocorrência de lineamentos pode originar formas de relevos diversificadas, como escarpas, deslocamentos de canais fluviais, basculamentos, subsidências, entre outros. Falhas e lineamentos geológicos também podem ser responsáveis pelo favorecimento da exposição de materiais mais suscetíveis à erosão causando um aumento do potencial erosivo, da intensidade das feições erosivas, bem como um controle na orientação preferencial destas feições (Selby, 1993).

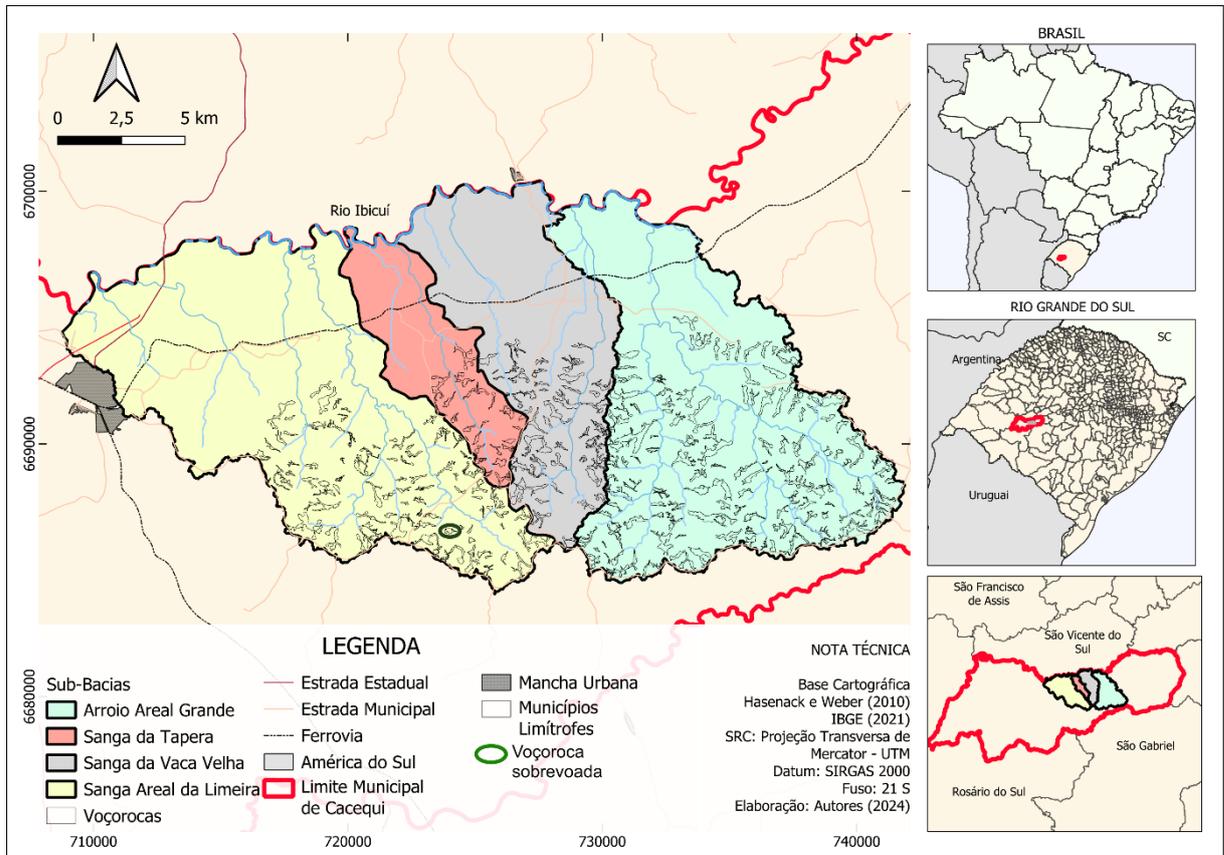
Por sua vez, a erosão é um dos principais problemas ambientais da atualidade, sendo um dos principais desencadeadores da degradação do solo (Robaina; Trentin, 2004; Loureiro, 2019) tendo um grande impacto econômico (Morgan, 2005; Sartori *et al.*, 2019) e ambiental (Bertoni; Lombardi Neto, 2012), com destaque para a perda de solo fértil, assoreamento dos rios, redução da qualidade do cultivo agrícola e impactos na paisagem e estruturas antrópicas (Marden *et al.*, 2018; Poesen *et al.*, 2003).

A erosão por voçorocamento é considerada o tipo de erosão com o maior impacto ambiental, sinalizando um desequilíbrio ambiental, que se desenvolve quando algum limite geomorfológico é transgredido (Bergonse; Reis, 2016). O estudo desta forma de erosão é associado à diversos fatores determinantes, sendo os principais: o clima, litologia, solo, relevo, cobertura vegetal e as intervenções antrópicas (Silva *et al.*, 2003; Parkner *et al.*, 2006; Muñoz-Robles *et al.*, 2010; Bertoni; Lombardi Neto, 2012; Burian; Mitusov; Poesen, 2015; Rahmati *et al.*, 2017). No âmbito geológico do aspecto erosivo, se destacam estudos que discorrem sobre a influência do controle estrutural no desenvolvimento de erosão linear a partir da análise de lineamentos extraídos por meio de técnicas de geoprocessamento como feito por Almeida (2011) e Dummer e Verdum (2023). A morfologia do relevo pode ser influenciada pela condição morfoestrutural das rochas, bem como a ocorrência de voçorocas que tendem a predominar em áreas de encostas com concentração de fluxo de água (DIAS, 2021) sendo a análise dos elementos do relevo uma importante etapa para o estudo destas feições erosivas.

O município de Cacequi, é localizado no Sudoeste do Rio Grande do Sul e é alvo de diversos estudos sobre erosão devido à alta ocorrência de voçorocas em seu território (Cabral, 2004, 2018; Rademann; Trentin, 2018). Em mapeamento realizado por Dias (2021), concluiu-se que o município de Cacequi é aquele que concentra o maior número de erosões lineares do sudoeste gaúcho com 698 feições constituídas por ravinas e voçorocas. Estima-se que as feições erosivas nesta área possuam mais de 200 anos de idade, antecedendo a ocupação antrópica intensiva da área (CABRAL, 2004) porém nas últimas décadas houveram grandes mudanças no uso da terra (RADEMANN; TRENTIN; ROBAINA, 2019), havendo alternância entre campos nativos e de pastoreio do gado, lavouras e mais recentemente a silvicultura através do plantio de eucaliptos.

O arcabouço geológico e morfoestrutural podem interferir na forma, intensidade e orientação das voçorocas em Cacequi, sendo que a hipótese de neotectônica como um dos desencadeadores dos grandes processos de voçorocamento foi investigada por Cabral, Prado e Cabral (2009) na área do município que compreende as bacias Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande, totalizando uma área aproximada de 280km² (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo



Fontes: Os autores, 2024.

Desta forma, o presente trabalho busca analisar a relação entre os lineamentos morfoestruturais e os elementos do relevo na ocorrência de voçorocas na porção leste do município de Cacequi – RS com os seguintes objetivos específicos: i) verificar a influência morfoestrutural na incidência de voçorocas a partir do aspecto geológico-geomorfológico; ii) realizar a extração automatizada de lineamentos morfoestruturais e de elementos do relevo; iii) observar as principais características geomorfológicas de uma voçoroca específica e caracterizar as áreas de avanço quanto aos processos predominantes e a sua forma.

METODOLOGIA

A área de estudo foi definida entre as bacias Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande. Mesmo que haja ocorrência de voçorocas em outros setores do município, nessas bacias existe concentração de voçorocas de grande magnitude e possibilita a delimitação de uma área de estudo com maior enfoque nesses processos erosivos que também foram estudados por Cabral (2004; 2018).

Dessa forma, a base de dados das feições erosivas presentes na área de estudo, foi obtida pelo levantamento de voçorocas elaborado por Cabral (2018) a qual identificou essas incisões a partir de chaves de interpretação de alvo nas imagens de satélite e verificação em campo. Após a posse do catálogo de voçorocas, para estimar a orientação dessas feições, aplicou-se a ferramenta *Zonal Geometry as Table* inserida na caixa de ferramentas de análise espacial do ArcGis 10.7.1 (ESRI, 2013) que calcula as medidas de geometria (área, perímetro, largura e as características da elipse) para cada zona do *shapefile* em um conjunto de dados e relata os resultados em formato tabular.

Para a extração de lineamentos morfoestruturais seguiu-se o método de Radaideh *et al.* (2016), que consiste em combinar diferentes azimutes de iluminação solar para mapear automaticamente os

lineamentos. Primeiramente, obteve-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros (1 *arc-second*) proveniente da Missão Topográfica Radar Shuttle disponibilizada pelo site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Em seguida, usou-se o algoritmo *Hillshade* do *software* ArcGIS Pro (3.1.0), que cria um relevo sombreado a partir de um raster de superfície considerando o ângulo de inclinação e direção do sol e as sombras. Nesse sentido, optou-se pela definição de quatro ângulos azimutais para representar todas as direções da fonte de iluminação, sendo eles: 0°, 45°, 90° e 315°.

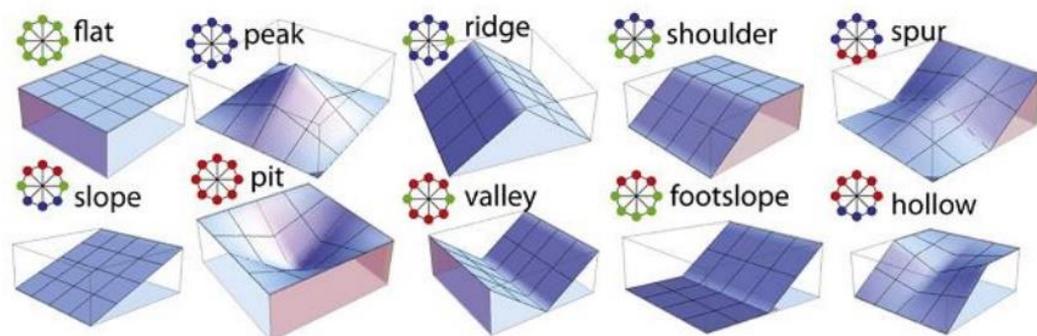
Através do módulo *Line* no *software* PCI Geomatica, é possível a detecção automática de feições lineares a partir do uso de diferentes valores atribuídos aos parâmetros de detecção de bordas, configuração de limiares e extração de curva. Assim, foi gerado os lineamentos do relevo sombreado para o perímetro da área de ocorrência das voçorocas e realizada uma inspeção visual dos resultados, eliminando os lineamentos sobrepostos com resultados redundantes. A orientação dos lineamentos foi estabelecida pelo mesmo procedimento utilizado para as direções das voçorocas. As orientações de cada feição são expressas em uma variação angular entre 0 e 180°. Assim, foram classificadas 6 orientações para as voçorocas e lineamentos definidos como: E-W, ENE-WSW, NNE - SSW, N - S, NNW- SSE, WNW - ESE. Com os lineamentos morfoestruturais organizados, foi gerado o mapa de densidade de lineamentos por meio do estimador de Kernel com o módulo *Kernel Density* (ferramenta *Spatial Analyst* do ArcGIS) que calcula a densidade de feições lineares a partir do comprimento do raio de busca.

O MDE também serviu para o mapeamento de elementos do relevo da área de estudo utilizando a técnica de classificação automatizada do relevo de *geomorphons* através do *software* ArcGIS Pro (3.1.0). Essa técnica foi desenvolvida por Jasiewicz e Stepinski (2013), e analisa a similaridade textural do MDE, que apresentará a variação para mais ou para menos de níveis de cinza utilizando parâmetros como diferença de altura topográfica, a distância e o ângulo de direção dos pontos vizinhos à célula central. Se maior “1”, se menor “-1” se igual “0”. Isso é transferido para valores de elevação do terreno de maior, menor ou igual. Portanto, existem parâmetros que definem a classificação semiautomatizada dos *geomorphons* baseado em critérios como nivelamento em graus, raio de busca e área de exclusão.

O parâmetro “*Search Distance*” do *geomorphons* foi alterado para 3 em virtude da escala de análise e consiste na definição da extensão do campo do algoritmo expressa em pixels, que corresponde a 90m. Demais parâmetros existentes nessa ferramenta não foram modificados.

A definição de *geomorphons* seguindo essa proposta definiu 10 elementos do relevo: áreas planas (*flat*), pico (*peak*), crista (*ridge*), ressaltos (*shoulder*), crista secundária (*spur*), encosta (*slope*), escavado (*hollow*), base de encosta (*footslope*), vales (*valley*), e fosso (*pit*) (ROBAINA; TRENTI; LAURENT, 2016). A representação gráfica desses elementos pode ser conferida na Figura 2.

Figura 2 - Representação dos elementos do relevo



Fonte: Jasiewicz e Stepinski (2013).

De acordo com Capoane e Souza Amorim (2022), o algoritmo dos *geomorphons* é sensível à resolução espacial do MDE, sendo que em modelos com pixels maiores as feições são generalizadas, suavizadas ou não detectadas, em contrapartidas modelos com pixels menores a heterogeneidade do relevo é melhor representada, mas com maior dificuldade de estabelecer áreas planas.

Nesse sentido, para avaliar a técnica de *geomorphons* no tocante a dinâmica evolutiva da erosão linear, foi gerado elementos do relevo a partir de um modelo digital do terreno (MDT) de altíssima resolução obtido através de aerolevanteamento realizado com Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) em uma das voçorocas presentes na área de estudo que exemplifica os mecanismos erosivos atuantes nas incisões lineares na região.

O aerolevanteamento foi realizado com a utilização de VANT modelo Phantom 4 Pro da fabricante DJI, portador de um sensor de câmera RGB modelo FC6310 com 12MP de resolução. Foram coletadas 222 imagens com uma sobreposição longitudinal de 80% e latitudinal de 70%, a uma altura de voo de 150m, para o processamento no software *Agisoft Metashape* utilizando o algoritmo SfM-CMVS descrito por Furukawa *et al.*, (2010) e Westoby *et al.* (2012). No software *Agisoft Metashape* o alinhamento foi realizado na qualidade *Highest*, resultando em uma nuvem de pontos esparsa de 233.147 pontos. Após o alinhamento, foi construída a nuvem densa na qualidade *High* resultando em 73.280,512 pontos.

Depois desta etapa, foram classificados os pontos correspondentes à superfície, a fim de obter o MDE sem considerar ruídos, como vegetação. Os parâmetros utilizados foram de ângulo máximo do terreno de 40°, a variação máxima do terreno de 0.4m e o tamanho máximo de célula onde não possui pontos de terreno de 80m. Para a correção das coordenadas dos pontos foram coletados pontos de controle com o auxílio de um par de GNSS RTK modelo Reach RS2+ da Emlid. Foi instalada a base na borda da voçoroca estudada e o tempo total de processamento foi de 1h e 11min. Ao todo foram coletados 8 pontos de controle que foram posicionados no modelo e utilizados para ajustar as coordenadas, resultando em um erro médio quadrático de 4,97cm. Após o ajuste posicional foi gerado o MDE com uma resolução de 9,03cm/pixel e então reamostrado para 50cm/pixel para a utilização no Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Para a análise dos processos internos da voçoroca foi elaborado o mapa dos elementos do relevo e foram delimitadas as áreas de avanço da voçoroca. Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Watershed* do software *Global Mapper* (BLUE MARBEL GEOGRAPHICS, 2017), onde foram delimitadas as bacias de captação com área até 5.000m² na voçoroca selecionada. Após a geração automática destas áreas, foram recortadas as áreas contidas no limite interno da voçoroca, e posteriormente editadas ou combinadas para que correspondessem às áreas de avanço, ou seja, as porções onde ocorrem o desenvolvimento lateral ou remontante de forma mais intensa na voçoroca. Uma vez delimitadas, foi calculada a distribuição dos elementos *geomorphons* em cada área de avanço e o índice de circularidade (IC) das mesmas, que é dada pela razão da área de avanço e um círculo de mesmo perímetro.

A base cartográfica referente a geologia foi adaptada da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2006) na escala 1:750.000 e as informações sobre os solos presentes na área de estudo foram coletadas pelo Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul, produzido pelo Ministério da Agricultura no Boletim Técnico de N.º30 (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 1973) o qual descreve informações pedológicas a partir da análise de perfis de solos. Essas fontes de dados foram ajustadas para a área de estudo por meio de trabalhos de campo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram elencados conforme o desenvolvimento das etapas metodológicas para alcançar os objetivos propostos que se baseiam nas características gerais da área de estudo, extração de lineamentos morfoestruturais e análise dos elementos do relevo.

Caracterização Geológica

A área de estudo possui substrato litológico de arenitos eólicos da Formação Pirambóia que apresenta características petrográficas como textura, composição granulométrica e estrutura que indicam suscetibilidade a processos erosivos por serem bastante friáveis e com poucos cimentantes (Rodrigues, 2014). Essa formação é constituída por rochas sedimentares, em que predominam arenitos finos a grossos moderadamente selecionados, avermelhados, com estratificações cruzadas de grande porte, interpretados como depósitos de dunas eólicas com um sentido de mergulho dos forsets para SE (LAVINA; FACCINI; RIBEIRO, 1993), além de estratificações e laminações plano-paralelas. A grande maioria dos arenitos da Formação Pirambóia apresenta-se friável e com alta porcentagem de porosidade, podendo alcançar 35% (CAETANO-CHANG; FU, 1993; STRUGALE *et al.*, 2008).

A alta porosidade dessas rochas pode ser explicadas a partir do trabalho de Gesicki(2007), que define a Formação Pirambóia de arcabouço aberto e feições de compactação física e química pouco a moderadamente eficiente. As rochas sedimentares com esse tipo de compactação podem apresentar características como uma menor densidade e resistência mecânica sendo o embasamento rochoso da área caracterizado pela formação de blocos estruturais, que são definidos por um conjunto de planos de falha e fraturas que os limitam e associam a zonas de cisalhamento.

Para Scoti (2017), os arenitos eólicos da Formação Pirambóia estão sujeitos a processos erosivos acelerados, que geram ravinas e voçorocas. Na Figura 3, podemos observar a parede de uma voçoroca localizada na Sub-Bacia do Areal do Limeira onde há ocorrência de rocha da Formação Pirambóia.

Figura 3 - Ocorrência da Formação Pirambóia em voçoroca



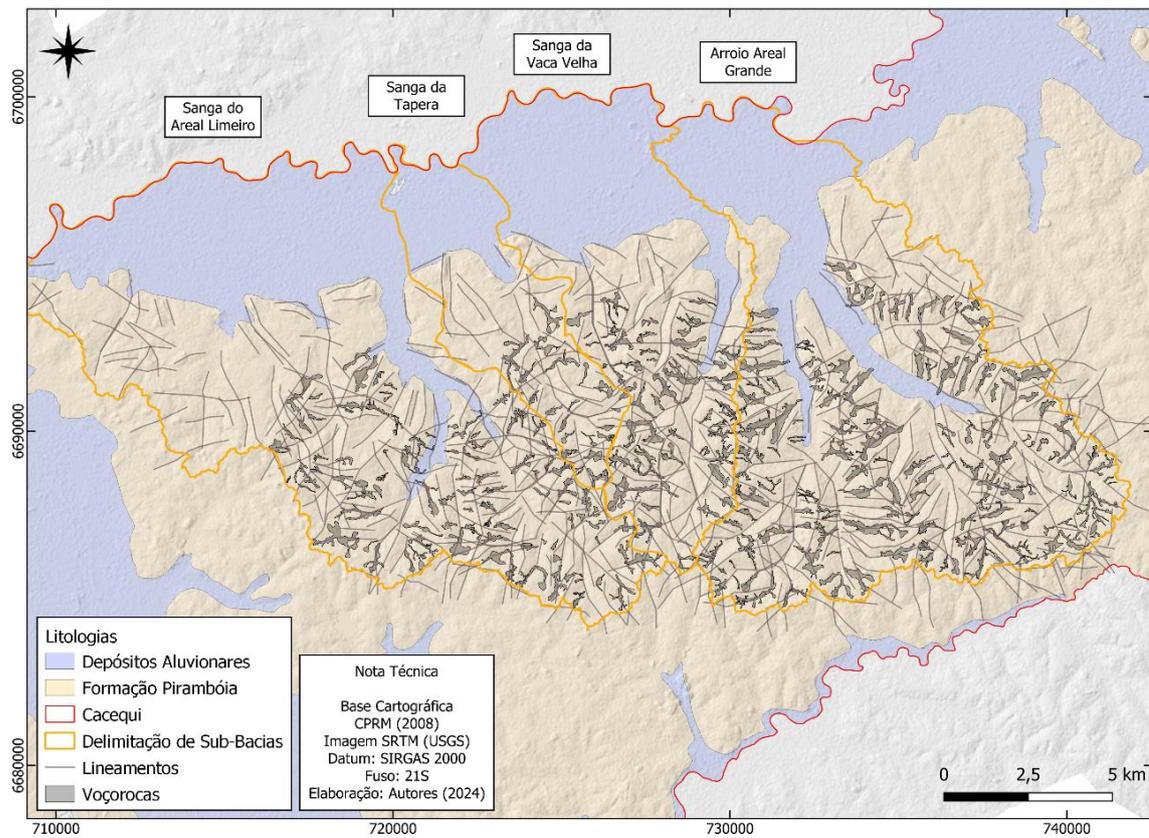
Fonte: Rademann (2019).

Nos setores inferiores a jusante das sub-bacias, próximos aos canais hídricos de maior ordem, ocorrem os depósitos aluvionares relacionados a barreiras-holocênicas compostas por areia grossa a fina, cascalho e sedimento siltico-argiloso, em calhas de rios e planícies de inundação (CPRM, 2006). Essas áreas são compostas por baixas declividades e não são encontradas voçorocas. A geração de erosões lineares em áreas planas não é favorecida uma vez que é necessário uma boa permeabilidade e certo grau de inclinação para que haja o entalhamento vertical do relevo.

A pedogênese possui uma estreita relação com as características geológicas uma vez que o desenvolvimento do solo ocorre sobre o embasamento rochoso. Em depósitos aluvionares, na área de estudo, são desenvolvidos Planossolos Háplicos medianamente profundos, imperfeitamente drenados, com cores bruno e acinzentadas nos horizontes superficiais e amareladas nos mais profundos. São solos com boa fertilidade natural e sua topografia propicia o cultivo do arroz irrigado. Na Figura 4, pode-se observar a ausência de voçorocas em Depósitos Aluvionares que ao mesmo tempo são áreas com presença de Planossolos.

Já nas áreas de ocorrência de arenitos da Formação Pirambóia há a formação de solos do tipo Argissolo Vermelho, sendo solos profundos de coloração bruno e vermelha, arenosos, porosos e bem drenados. Possuem limitações relacionadas à elevada suscetibilidade a erosão e fertilidade natural baixa com uso destinado principalmente para pecuária e silvicultura. Por causa do incremento argiloso (variação textural abrupta) no horizonte B no perfil desses solos, ocorre o fluxo lateral da água quando há saturação hídrica, iniciando o processo de escoamento subsuperficial. Segundo Sousa e Correchel (2013), o escoamento subsuperficial é propiciado pelas características da vertente mais a exfiltração da água que ocorre entre os horizontes pedogenéticos, associados ao uso da terra e a compactação superficial, sendo elementos fundamentais que podem explicar a gênese do voçorocamento.

Figura 4 - Mapa do substrato litológico da área de estudo



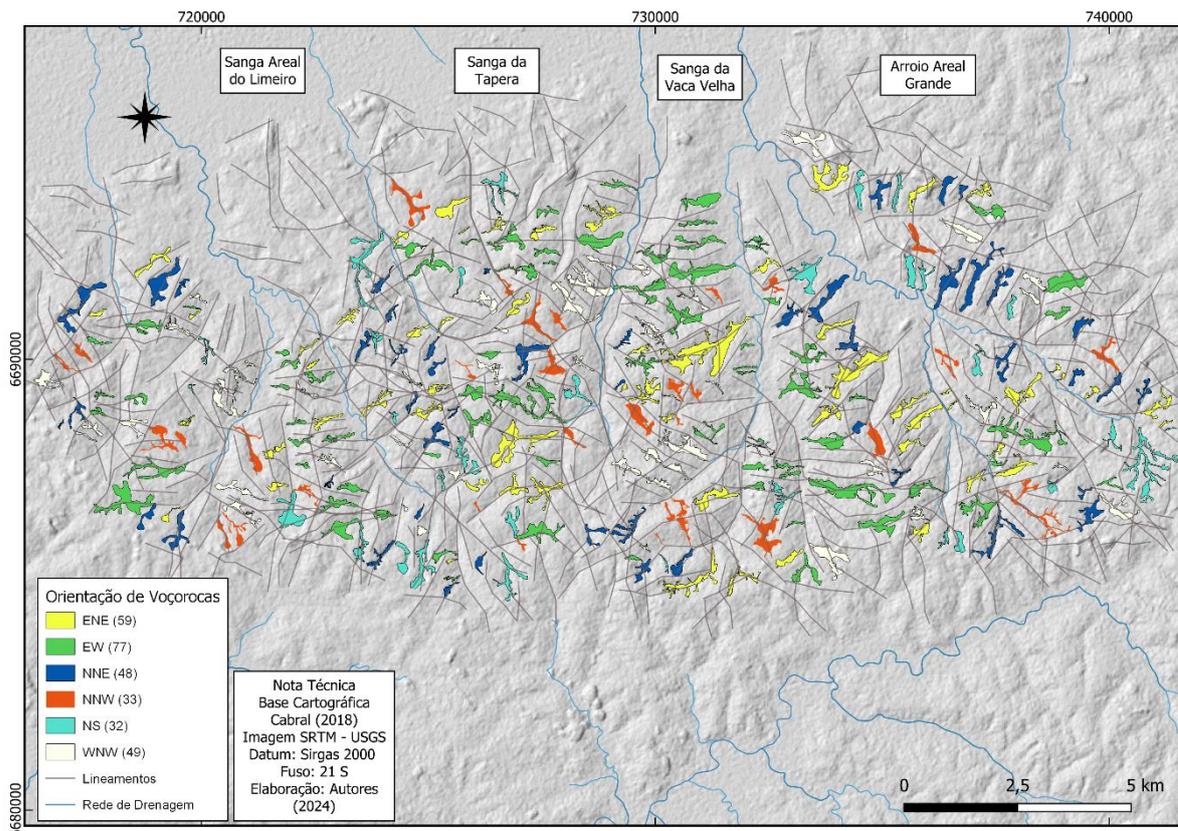
Fonte: Os autores, 2024.

Mapeamento de Lineamentos Morfoestruturais

A extração de lineamentos automatizada resultou em uma totalidade de 568 lineamentos morfoestruturais na região de ocorrência das voçorocas nas bacias Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande em Cacequi. Essas feições lineares estão associadas, em sua maioria, com a orientação da rede de drenagem e nas direções de cristas e encostas dissecadas nos topos de colinas. Conforme Cabral (2018), as sub-bacias em estudo apresentam um padrão de drenagem dendrítico à retangulares com presença de confluência de ângulos retos que demonstra anomalias atribuídas a fenômenos tectônicos.

Verifica-se na Figura 5, a distribuição dos lineamentos sobrepostos às voçorocas que estão situadas no setor médio e alto das bacias hidrográficas compostas por erosões em estágio avançado identificado pelo formato ramificado nas cabeceiras dos cursos hídricos. A maioria das voçorocas estão conectadas ao sistema de drenagem com número de lineamentos mais elevado, principalmente em áreas a montante das bacias, que apresenta uma alta densidade nos traços. De todos os lineamentos, o maior possui um comprimento de 4.201 metros, sendo o único atingir quatro quilômetros de extensão e o lineamento de menor comprimento tem 806 metros.

Figura 5 - Lineamentos Morfoestruturais nas áreas de sub-bacias em estudo



Fonte: Os autores, 2024.

Pela Tabela 1, pode-se observar que as voçorocas têm uma distribuição mais expressiva em direção E-W (leste-oeste), com 77 casos (25,5% do total), seguida por ENE (leste-nordeste) com 59 casos (19,7%), NNE (norte-nordeste) com 48 casos (16,1%) e N-S (norte-sul) com 32 casos (10,4%). Concomitantemente com as voçorocas, os lineamentos morfoestruturais mais frequentes estão orientados em direção E-W com 144 casos (25,3%).

Tabela 1 - Orientação dos lineamentos e voçorocas

ORIENTAÇÃO	ÂNGULO	VOÇOROCAS	LINEAMENTOS
E – W	0° – 25,7° e 154,2° - 180 °	77 (25,5%)	144 (25,3%)
ENE	25,7° – 51,4°	59 (19,7%)	71 (12,4%)
NNE	51,4° – 77,1°	48 (16,1%)	111 (19,5%)
N – S	77,1° – 102,8°	32 (10,4%)	104 (17,5%)
NNW	102,8° – 128,5°	33 (11%)	92 (15,2%)
WNW	128,5° – 154,2°	49 (16,4%)	57 (10%)

Fonte: Os autores, 2024.

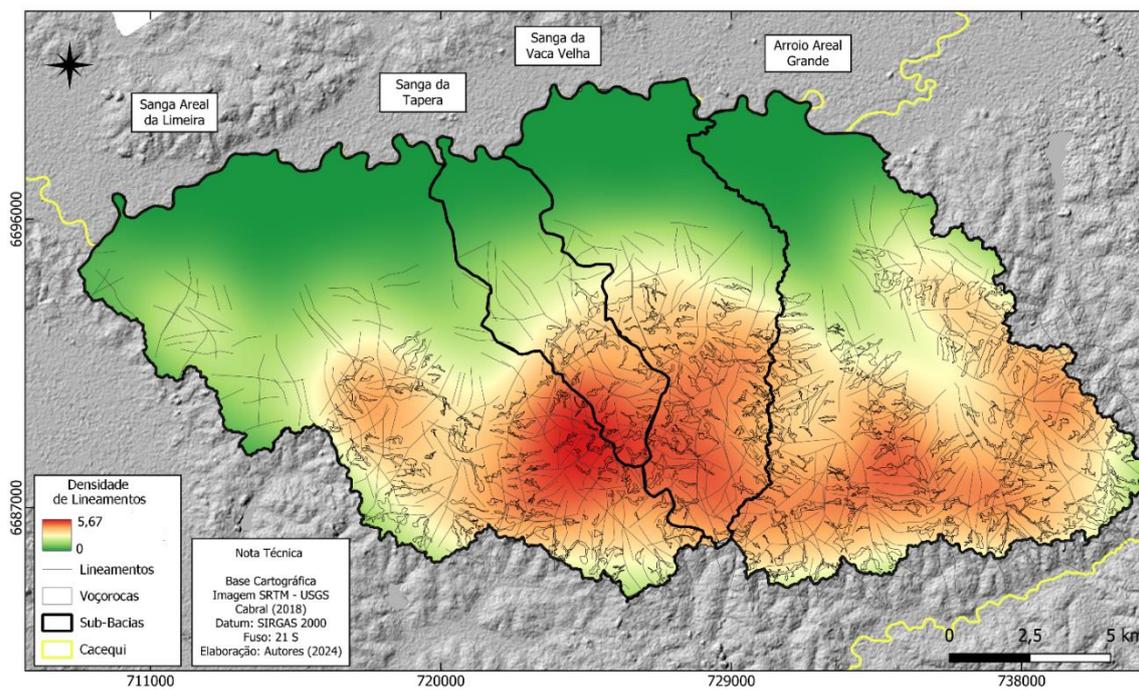
Em seguida, a orientação NNE apresenta 111 casos (19,5%), N-S com 104 casos (17,5%), NNW com 92 casos (15,2%), e WNW com 57 casos (10%). Esta orientação preferencial também foi encontrada no trabalho de Trentin, Robaina e Rademann (2023), que levantou os lineamentos da Bacia do Rio Ibicuí, na qual Cacequi está inserido.

Os autores salientam que as orientações NNE e E-W estão associadas ao soerguimento do arco de Rio Grande e as direções estruturais geradas durante a ruptura continental. Os dados quantitativos sugerem que há uma relação entre a orientação dos lineamentos morfoestruturais e a distribuição das voçorocas, com uma maior incidência de erosões em áreas onde há uma maior concentração de lineamentos com orientação E-W, ENE e NNE, respectivamente. Dessa forma, pode ser considerado que essas áreas possuem algum controle estrutural que influenciam no comportamento do escoamento subsuperficial e a estabilidade das vertentes que condicionam o voçorocamento.

É possível constatar que a orientação estrutural está relacionada com a orientação preferencial das voçorocas (Tabela 1). O escoamento superficial preferencial e fragilidade erosiva do material das encostas decorrente de falhas e lineamentos que coincidem com o desenvolvimento do canal principal das voçorocas. Esta relação pode não se repetir no desenvolvimento das ramificações laterais das voçorocas, sendo necessários estudos em nível de detalhe maior para estabelecer esta relação.

O mapeamento de densidade de lineamentos com a sobreposição de voçorocas é encontrado na Figura 6. A densidade tem como unidade de medida quilômetros por quilômetros quadrados, ou seja, os valores obtidos referem-se ao comprimento dos lineamentos em quilômetros, divididos pela área em quilômetros quadrados, e varia, na área de estudo, de 0 para 5,67 km/km². A alta densidade de lineamentos está localizada na porção Sul das sub-bacias nas cabeceiras de drenagens em altitudes superiores a 160 metros e sob as rochas da Formação Pirambóia. O divisor de águas entre a Sanga Areal da Limeira e Sanga da Tapera é onde se encontra a maior concentração de lineamentos. A menor densidade das feições lineares está nas áreas mais planas com depósitos sedimentares recentes.

Figura 6 - Mapa de densidade de lineamentos



Fonte: Os autores, 2024.

Elementos do Relevo – Morfologia Atual

Sendo a variável relevo e seus atributos morfométricos determinantes para análise da erosão (Bastos, 1999; Mathias, 2016), foi elaborado o mapa de elementos do relevo. Então, foi possível interpretar a geomorfologia do local a partir da caracterização de microestruturas fundamentais do relevo que representam um nível taxonômico antecedente as formas superficiais como ravinas e voçorocas (Scoti, 2017; Gouveia; Ross, 2019). Os elementos mais recorrentes presentes dentro dos limites das voçorocas são: vales, encostas, escavado e crista secundária (Tabela 2).

Tabela 2 - Distribuição de elementos do relevo em voçorocas

Elementos do Relevo	Frequência em voçorocas (%)	Frequência em sub-bacias (%)
Vale	42,9	16,1
Encosta	16,6	32,9
Escavado	13,3	7,8
Crista Secundária	12,3	12,2
Fosso	2,8	1,5
Crista	1,5	14,6
Base da Encosta	1,3	5,9
Ressalto	1,1	5,1
Pico	0,3	1,7
Plano	0,06	2,8

Fonte: Os autores, 2024.

Os elementos do relevo encontrados na totalidade da área das sub-bacias têm como principal classe as encostas com 32,6% da extensão territorial. Geralmente são vertentes convexas não erodidas em torno das voçorocas o que permite caracterizar a região com presença de colinas suavemente onduladas sendo no topo dessas colinas onde se encontram os elementos de crista (14,6%) e crista secundária (12,2%). Em seguida com a segunda maior representatividade, os vales (16,1%) ocorrem entalhados na rede de drenagem das sub-bacias. Do restante dos elementos do relevo, vale destacar o plano e fosso que compõem as planícies fluviais na área de estudo.

No que se refere a distribuição dos elementos do relevo inseridos na limitação de voçorocas, quase metade (42,9%) dessa espacialização são caracterizadas por vales. Essas feições são deprimidas e têm amplitude nas paredes com inclinações íngremes podendo ser encontradas em locais onde a incisão linear já está bastante desenvolvida, sendo as mesmas, na grande maioria voçorocas conectadas à rede de drenagem, o que confirma a condição dos elementos de relevo do tipo vale. Associado a feições de vale, o elemento de escavado se encontra com uma frequência de 13,3% nas áreas de voçorocamento, tendo uma concentração quase duas vezes maior do que na área geral das sub-bacias (7,8%). Estes elementos do relevo correspondem a áreas convergentes da encosta, facilitando a concentração do escoamento superficial e, portanto, bastante associados a formação de voçorocas.

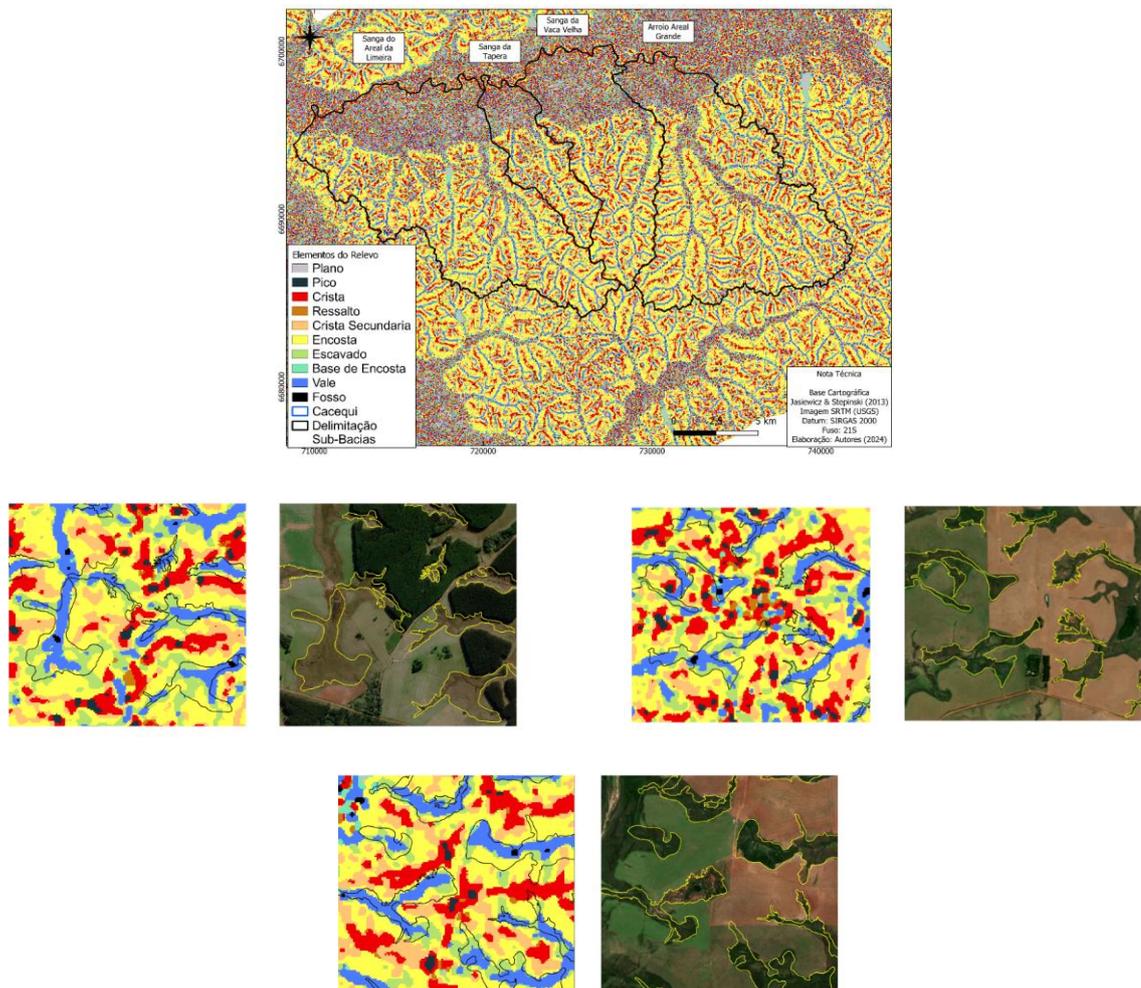
Encostas situadas no interior das voçorocas compõem 16,6%, dos elementos e correspondem a áreas de captação ou paredes menos abruptas das feições erosivas. Em um contexto geral as encostas são posicionadas, topograficamente, acima do elemento base da encosta que é pouco representativo nas áreas de voçorocamento (1,3%). A crista secundária (12,3%) possui um plano divergente em um relevo mais resistente que condiciona a dissipação do fluxo e são associadas as cristas.

Dos elementos do relevo citados, os lineamentos morfoestruturais estão dispostos majoritariamente nos vales e cristas devidos suas formas alongadas com rupturas de relevo que correspondem às falhas e estruturas, sendo testemunhos da tectônica na área de estudo.

O fosso pode ser considerado o talvegue de voçorocas e é pontual em áreas que possuem profundidade maior que as áreas circundantes, em alguns casos associados inclusive à rebaixamentos na voçoroca provocados por solapamento devido à erosão subsuperficial. As cristas, os picos e os ressaltos não possuem tanta representatividade pois são relacionadas aos interflúvios em topos côncavos com proeminência de altitude, não se relacionando as feições lineares.

As áreas planas não são encontradas no interior de voçorocas devido o modelado dessas feições, no entanto, terão significativa presença nos depósitos recentes que possuem grande contribuição de sedimentos oriundos de voçorocas (Rademann; Robaina; Breunig, 2023). A espacialização específica dos elementos do relevo na área de estudo é conferida na Figura 7.

Figura 7 - Mapa de Elementos do Relevo na área de estudo e comparação com imagens de satélite



Fonte: Os autores, 2024; Bing Satellite.

Visando avaliar os elementos e compreender os processos internos de uma feição erosiva foi aplicada a ferramenta dos *geomorphons* somente em uma voçoroca específica (Figura 8; localização indicada na Figura 1) com MDE de alta resolução espacial. Como resultado foram gerados oito elementos do relevo (Figura 9), não sendo encontrados na área de estudo os elementos plano e base da encosta. O ortomosaico constituído a partir da composição das imagens obtidas via VANT é visualizado na Figura 8.

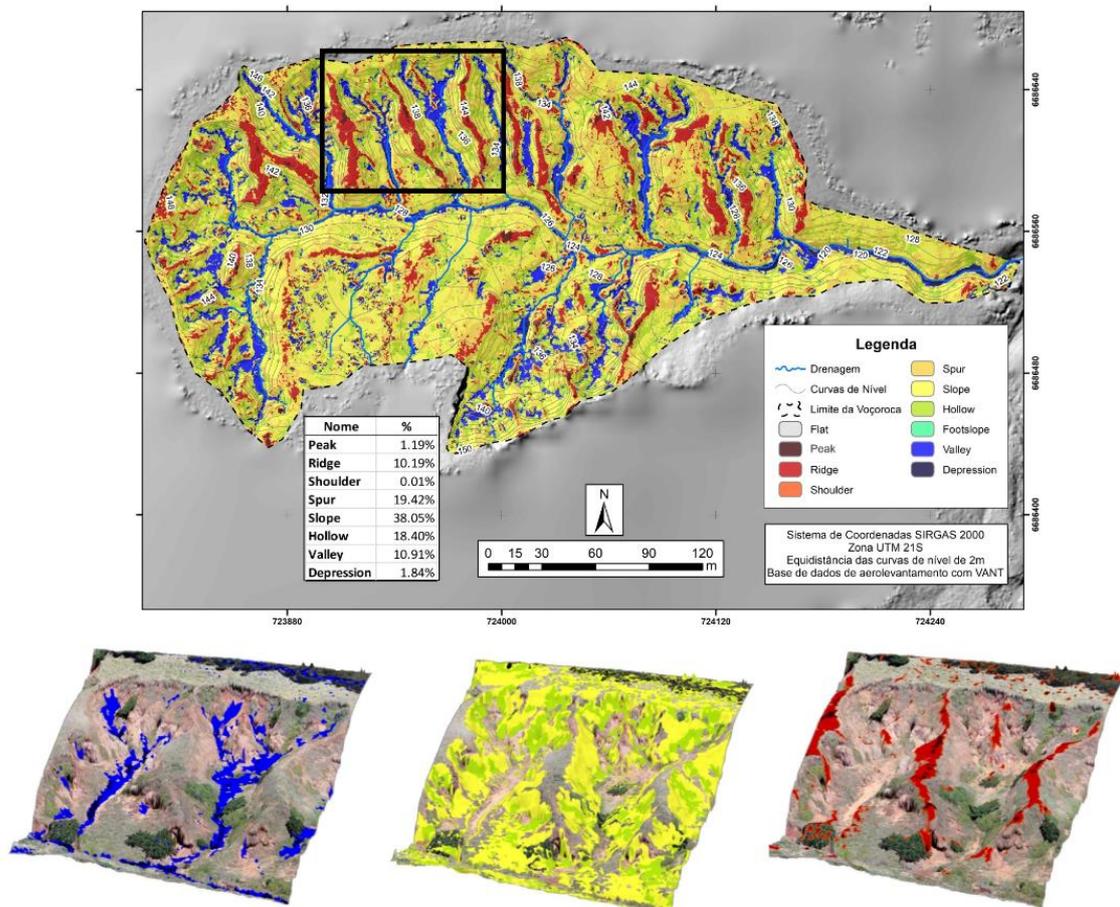
Na voçoroca há um predomínio do elemento de encosta (38,05%), presente principalmente nas paredes das áreas de avanço com declividades mais suaves, sendo mais comum no lado direito da voçoroca. O segundo elemento de maior concentração são as cristas secundárias (19,42%) marcando áreas onde as paredes da voçoroca são mais declivosas, representando encostas convexas, com a dispersão do fluxo da água. Este elemento do relevo se concentra nas porções mais elevadas das áreas de avanço, e se apresenta de maneira semelhante nos lados direito e esquerdo da voçoroca, com 17,84% e 16,08% da área de cada lado respectivamente.

Figura 8 - Ortomosaico sombreado da voçoroca analisada



Fonte: Os autores, 2024.

Figura 9 - Elementos do Relevo em uma voçoroca na área de estudo e recorte ampliado



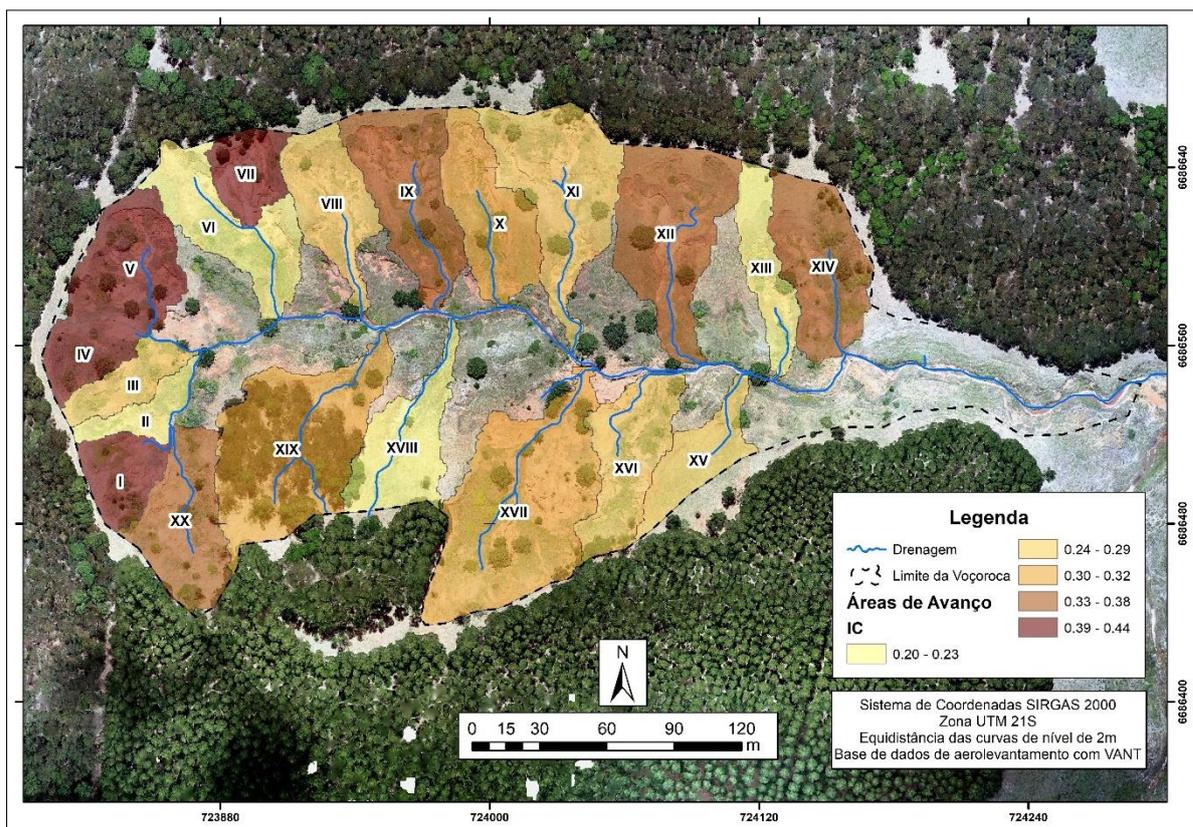
Fonte: Os autores, 2024.

Outro elemento do relevo que está bastante presente na voçoroca é o escavado, que representa 18.4% da área total. Esta classe é caracterizada pelas áreas de concavidade da encosta onde há uma concentração do fluxo de água e estão comumente associadas a base de áreas de ocorrência de movimentos de massa e a áreas de rebaixamento da voçoroca, marcada por paredes menos abruptas. A maior parte dos elementos de escavado estão no lado direito da voçoroca, representando 21,58% da área deste lado, onde as áreas de avanço são menos intensas e predominam este tipo de feição.

As classes de vale e crista representam cerca de 10% da área cada uma delas. Os elementos do vale correspondem a base da voçoroca, onde ocorre a concentração do escoamento superficial da água formando pequenos canais de drenagem intermitentes no fundo da voçoroca. Já as áreas de cristas estão presentes nas porções que possuem degraus ou paredes abruptas, se concentrando em áreas de avanço mais vertical com processos intensos ou movimentos de massa recentes.

Considerando as diferentes características das feições e dos processos atuantes na voçoroca, é possível dividir a voçoroca em vinte diferentes áreas de avanço considerando a sua área de captação. É possível observar que as áreas de avanço (Figura 10), possuem um predomínio distinto dos elementos do relevo entre si, e que estes elementos são respostas aos processos e mecanismos atuantes. Ao lado esquerdo do canal principal estas possuem como principal característica a ocorrência de vales encaixados, dispostos de forma paralela e na cabeceira a ocorrência de movimentos de massa de forma semicircular. No lado direito predominam declividades menos acentuadas, marcadas pelo predomínio do elemento encosta e com movimentos de massa menos intensos nas cabeceiras.

Figura 10 - Índice de Circularidade nas áreas de avanço de uma voçoroca na área de estudo



Fonte: Os autores, 2024.

As áreas a montante da voçoroca possuem uma forma mais circular, com comprimentos menores e avanço através de movimentos de massa e formação de semicírculos. No lado esquerdo da voçoroca, predominam áreas de avanço mais alongadas, onde há um canal principal com sentido definido, possivelmente marcando falhas e fraturas na litologia do local. Já no lado direito, as áreas de avanço são mais largas, possuem um fundo mais plano e as encostas alongadas. Desta forma, fica evidente,

através da espacialização dos elementos *geomorphons*, que existem processos de avanço distintos nas diferentes porções da voçoroca, resultando em formas diferentes, mesmo dentro da mesma feição erosiva, evidenciando a complexidade desta forma de erosão.

De forma geral, a região é marcada pela ocorrência de lineamentos morfoestruturais nas direções E-W e ENE que estão relacionados a ocorrência das voçorocas sendo que estas também possuem esta direção preferencial para desenvolvimento. Quando avaliados os elementos do relevo, as morfoestruturas se relacionam com os vales e cristas e as voçorocas com os vales, escavados e encostas. Em uma escala maior, com alto grau de detalhamento, é possível observar diferenças na forma, intensidade e mecanismos erosivos atuantes dentro da voçoroca, permitindo diferenciar áreas de avanço com características distintas, evidenciando também a complexidade do processo de evolução de uma voçoroca.

CONCLUSÕES

A erosão linear acarreta consequências que além da deterioração ambiental atinge a capacidade produtiva das terras na perda de solo fértil e de área utilizada. Com o desenvolvimento de novas técnicas para os estudos geomorfológicos a partir de geotecnologias é possível uma maior praticidade na obtenção de informações geoespaciais para análise dessa problemática.

A extração automatizada de lineamentos morfoestruturais apresentou um resultado de feições satisfatórias e coerentes com as características fisiográficas da área de estudo. A orientação das voçorocas levantadas por Cabral (2018) coincide com a orientação dos lineamentos morfoestruturais em direção predominantemente Leste - Oeste. Pelo mapeamento geomorfológico por meio da classificação de elementos do relevo, pode-se ter um bom apoio para a análise de processos erosivos e serve de auxílio na interpretação da dinâmica de desenvolvimento das voçorocas e das formas que elas constituem.

Pode-se concluir preliminarmente que o controle morfoestrutural refletido nas condições geológicas e geomorfológicas é condicionante para a gênese e evolução das incisões erosivas presentes na área de estudo visto a correlação de orientação dos lineamentos e voçorocas mais a fragilidade natural da área de estudo expressa pelos arenitos eólicos da Formação Pirambóia.

Portanto, através da utilização de geotecnologias, os resultados alcançados forneceram conclusões coerentes e satisfatórias para a avaliação das morfoestruturas e do relevo na área de estudo demonstrado pela alta precisão e agilidade no levantamento de dados. O método utilizado pode ser uma boa ferramenta para delimitação das áreas suscetíveis a voçorocamento no oeste do Rio Grande do Sul, demonstrado pela correlação positiva entre os lineamentos e a ocorrência das voçorocas. Já a análise do relevo em diferentes escalas a partir dos elementos *geomorphons* demonstra a potencialidade do método para caracterizar o relevo e identificar as feições dominantes. No caso da análise em nível de detalhe na voçoroca, apresenta limitações para a determinação de áreas planas e base de encosta, porém demonstra boa resposta para diferenciar as áreas de avanço da voçoroca com predomínio de diferentes mecanismos erosivos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPQ/CAPES pelo fomento financeiro e pela Universidade Federal de Santa Maria por possibilitar estrutura e assistência importantes ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGISOFT. **Agisoft Metashape Professional**. Version 2.1.2 (Software). 2024. Disponível em: <http://www.agisoft.com/downloads/installer/> Acesso em: 23 ago. 2024

ALMEIDA, F. T. O controle estrutural como elemento de direcionamento de voçorocas na bacia Colônia Antônio Aleixo, Manaus (AM). **Relatório de Pesquisa**. Universidade Federal do Amazonas. 2011.

ARAÚJO, C. C. **Gênese das ocorrências de arenito asfáltico da borda leste da Bacia do Paraná, SP**. 2003. 135p. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003.

- BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 303p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BERGONSE, R.; REIS, E. Controlling factors of the size and location of large gully systems: A regression-based exploration using reconstructed pre-erosion topography. **CATENA**, v. 147, p. 621–631, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.014>.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. São Paulo: Ícone, 8ª ed., 2012.
- BLUE MARBEL GEOGRAPHICS. **Global Mapper v24.1**. 2017. Disponível em: https://www.bluemarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-24-1/Licensing_Information.html. Acesso em: 09 jun. 2023.
- BURIAN, L.; MITUSOV, A. V.; POESEN, J. Relationships of attributes of gullies with morphometric variables. **Geomorphometry**, 2015. Disponível em: <https://www.geomorphometry.org/uploads/pdf/pdf2015/Burian2015geomorphometry.pdf>, Acesso em: 23 abr. 2024.
- CABRAL, I. L. L.; PRADO, R. J.; CABRAL, T. L. Indicadores morfodinâmicos que sugerem movimentos neotectônicos no divisor de águas dos rios Ibicuí/Jacuí - depressão periférica-RS. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 12., La Plata . **Anais...** La Plata, 2009.
- CABRAL, T. L. **Distribuição e classificação de voçorocas por meio de indicadores morfométricos em sub-bacias no município de Cacequi - RS**. 191p. Tese (Doutorado em Geografia). Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2018.
- CABRAL, I. de L. L. **Depressões interfluviais e voçorocas articuladas à rede de drenagem: o exemplo das bacias do Rio Ibicuzinho, Areal do Paredão, Cacequi, Santa Maria e Ibicuí**. 2004. 201 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001375420>. Acesso em: 21 ago. 2024.
- CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T. A Formação Pirambóia na região de Anhembi (SP), com base em dados de subsuperfície. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 3, 1993, Rio de Janeiro. **Boletim de Resumos...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993, p. 74. (b).
- CAPOANE, V.; SOUZA AMORIM, A. E. Classificação automatizada do relevo utilizando a ferramenta Geomorphons: estudo de caso para o município de Campo Grande–MS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 2, p. 750-766, 2022. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p750-766>
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Rio Grande do Sul**. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Escala 1: 750.000, v. 1, 2006.
- CORREA, I. C. S. Metodologia para análise morfoestrutural de áreas continentais e marinhas. **Projeto Livro Didático**. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.
- DIAS, D. F. **Utilização da análise hierárquica ponderada para o estudo dos processos erosivos lineares na bacia hidrográfica do rio Ibicuí–RS**. 190p. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal de Santa Maria. 2021.
- 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. <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2318>
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS version 10.2**. United States: ESRI, 2013
- ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; FULFARO, V. J. Análise de bacia aplicada à prospecção de água subterrânea no planalto ocidental paulista, SP. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 26, n. 3, p. 229-247, 2007.
- FURUKAWA, Y. CURLESS, B.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Towards Internet-scale multi-view stereo., In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR). **Anais...** San Francisco, CA, USA: IEEE, jun. 2010. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5539802>
- GESICKI, A. L. D. **Evolução diagenética das formações Pirambóia e Botucatu (sistema aquífero Guarani) no Estado de São Paulo**. 175p. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar). Universidade de São Paulo. 2007.

GOUVEIA, I. C. M.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental: uma proposta de aplicação de Geomorphons para a variável relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 37, p. 123-136, 2019. <https://doi.org/10.11606/rdg.v37i0.151030>

HASENACK, H; WEBER, E. **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul**. Escala 1: 50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia, v. 1, 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal** (shapefile). 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais>. Acesso em: 18 nov. 2021

JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, v. 182, p. 147-156, 2013. LAVINA, E. L.; FACCINI, U. F.; RIBEIRO, H. J. S. A Formação Pirambóia (permotriássico) no estado do Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia*, v. 38, p. 179-197, 1993. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>

LOUREIRO, H. A. S. **Diagnóstico de erosão por voçorocas: experimentos com geotecnologias e solos na bacia do Alto rio Piraí – Rio Claro - RJ**. 224p. Tese (Doutorado em Geografia). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

MARDEN, M. FULLER, I. C.; HERZIG, A.; BETTS, H. D. Badass gullies: Fluvio-mass-movement gully complexes in New Zealand's East Coast region, and potential for remediation. **Geomorphology**, v. 307, p. 12–23, abr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.11.012>.

MATHIAS, D. T. **Contribuição metodológica para o diagnóstico da dinâmica erosiva linear e seu prognóstico evolutivo visando subsidiar projetos de recuperação**. 2016. 178f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2016.

MELLO, C. L.; FERRARI, A. L. Neotectônica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9., Búzios. **Apostila do curso de Neotectônica**. Búzios, 2003.

MICROSOFT ABOUT BING DATA SUPLIERS. 2017. Disponível em: <https://support.microsoft.com/en-us/help/17831/about-bing-data-suppliers>. Acesso em: 08 fev. 2024.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológico. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul. - **Boletim Técnico N.º30**. 1973.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3. ed. Malden, MA: Blackwell Pub, 2005.

MUÑOZ-ROBLES, C.; REID, N.; FRAZIER, P.; TIGHE, M.; BRIGGS, S. V.; WILSON, B. Factors related to gully erosion in woody encroachment in south-eastern Australia. **CATENA**, v. 83, n. 2–3, p. 148–157, nov. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.002>

NAUDIN, J. J. ; PRUD'HOMME, R. 1973. La magnitude des réseaux d'entailles. Relation avec l'environnement géologique. *Bull. IGBA*, Bordeaux, 13: 117-128.

PARKNER, T. ; PAGE, M. J.; MARUTANI, T.; TRUSTRUM, N. A. Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East Coast, New Zealand. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 2, p. 187–199, fev. 2006. <https://doi.org/10.1002/esp.1321>

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, jan. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)

RADAIDEH, O. M. A. *et al.* Detection and analysis of morphotectonic features utilizing satellite remote sensing and GIS: An example in SW Jordan. **Geomorphology**, v. 275, p. 58-79, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.033>

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R. Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul. **Revista Georaguia**, p. 17, 2018. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2575>

RADEMANN, L. K. **Identificação e caracterização dos mecanismos erosivos atuantes na voçoroca do areal no município de Cacequi/RS com auxílio de veículo aéreo não tripulado**. 158p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Maria. 2019.

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Série histórica do uso e ocupação da terra no município de Cacequi - RS de 1986 a 2016. **Revista de Geografia - PPGeo - UFJF**, v. 9, n. 1, p. 34-49, 13 dez. 2019. <https://doi.org/10.34019/2236-837X.2019.v9.29256>

- RADEMANN, L. K.; ROBAINA, L. E. S.; BREUNIG, F. M. Avaliação da dinâmica de bancos de areia com imagens de alta resolução no rio Areal do Limeira, Sul do Brasil Assessment of sand bed dynamics using high-resolution images in Areal do Limeira river, South Brazil. **Ra'e Ga**, v. 57, p. 3-23, 2023. <https://doi.org/10.5380/raega.v57i0.87358>
- RAHMATI, O. *et al.* Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. **Geomorphology**, v. 298, p. 118–137, dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.006>
- ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; Degradação dos solos: Problema ambiental no Sudoeste Gaúcho. **Interface**, Porto Nacional, TO. v.1, n.1, p. 29-41, maio 2004.
- ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; LAURENT, F. Compartimentação do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, através do uso de geomorphons obtidos em classificação topográfica automatizada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 17, n. 2, p. 287-298, jun. 2016. <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i2.857>
- RODRIGUES, A. D. **Caracterização faciológica e estratigráfica dos depósitos flúvio-eólicos da Formação Pirambóia, permio-triássico da bacia do Paraná, oeste do Rio Grande do Sul.** 98p. Dissertação. (Mestrado em Geociências) — Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- SAADI, A. **Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais.** Belo Horizonte. Tese para admissão a cargo de Professor Titular, IGC/UFMG). 1991.
- SARTORI, M. *et al.* A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion. **Land Use Policy**, v. 86, p. 299–312, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.014>
- SCCOTI, A. A. V. **Estudo e zoneamento geoambiental com auxílio de sig na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria: sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul.** 153p. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2017.
- SELBY, M. J. **Hillslope materials and processes.** 2. ed. New York, NY: Oxford University Press, 1993.
- SILVA, T. P.; SALGADO, C. M.; GONTIJO, A. H. F.; MOURA, J. R. D. S. A influência de aspectos geológicos na erosão linear - médio-baixo vale do Ribeirão do Secretário, Paty do Alferes (RJ). **Geosul**, v. 18, n. 36, p. 20, 2003.
- SOUSA, A. T.; CORRECHEL, V. Voçoroca em borda de relevo tabular residual sobre cobertura latossólica, Quirinópolis (GO). **Boletim Goiano de Geografia**, v.33, n. 3, p. 165-183, 2013. <https://doi.org/10.5216/bgg.v33i3.27340>
- STRUGALE, M. *et al.* Compartimentação estrutural das Formações Pirambóia e Botucatu na região de São Jerônimo da Serra, estado do Paraná. **Brazilian Journal of Geology**, v. 34, n. 3, p. 303-316, 2008. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2004343303316>
- TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.; RADEMANN, L. K. Extração automática de lineamentos morfoestruturais na bacia do rio Ibicuí, RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA, 19., **Anais...** Rio de Janeiro, 2023.
- USGS - United States Geological Survey. **Shuttle Radar Topography Mission - SRTM.** Resolução espacial de 30 metros. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 23 mar. 2023.
- WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, dez. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- WILDNER, W.; RAMGRAB, G. E.; LOPES, R. D. C.; IGLESIAS, C. M. D. F. **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul.** CPRM, 2008.

Recebido em: 16/04/2024

Aceito para publicação em: 29/08/2024