



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GEOGRAFIA

Alice Longhi Branco

**EVOLUÇÃO DE UM SISTEMA DE BARRAS FLUVIAIS POR SENSORIAMENTO  
REMOTO**

Florianópolis – SC  
2025

Alice Longhi Branco

**EVOLUÇÃO DE UM SISTEMA DE BARRAS FLUVIAIS POR SENSORIAMENTO  
REMOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Geografia de Centro de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl

Florianópolis – SC

2025

Bracno, Alice Longhi  
EVOLUÇÃO DE UM SISTEMA DE BARRAS FLUVIAIS POR  
SENSORIAMENTO REMOTO / Alice Longhi Bracno ; orientador,  
Roberto Fabris Goerl, 2026.  
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de  
Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geografia,  
Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Geografia. 2. Geomorfologia Fluvial. 3.  
Aerofotogrametria. 4. Geomorphic Change Detection. I.  
Goerl, Roberto Fabris. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Geografia. III. Título.

Alice Longhi Branco

## **EVOLUÇÃO DE UM SISTEMA DE BARRAS FLUVIAIS POR SENSORIAMENTO REMOTO**

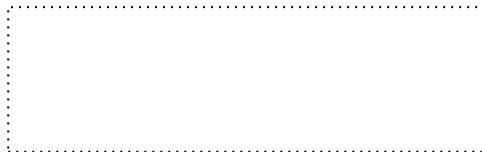
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso de Geografia.

Local Florianópolis, 03 de dezembro de 2025.



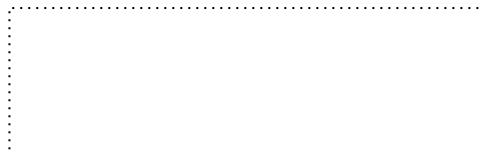
Coordenação do Curso – José Messias Bastos

### **Banca examinadora**



Prof. Dr. Roberto Goerl Fabris

Orientador(a)



Prof.(a) Dr.(a) Liliana Sayuri Osako

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Danilo Piccoli Neto

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2025.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Adriana e Otávio, por todo o amor, suporte, por me ajudarem de todas as formas em toda essa trajetória, servindo de pilar e porto seguro. Agradeço aos meus familiares por todo o carinho e compreensão na ausência de minha presença nas reuniões familiares, em especial a minha prima Sabrina, por sempre escutar meus surtos em relação a este trabalho.

Agradeço imensamente ao professor Roberto por todos os anos de parceria, desde a disciplina de Cartografia até a orientação deste trabalho. Foi ele quem me incentivou e direcionou para a área da qual estudo. Agradeço a oportunidade de ter feito parte de seu laboratório e de um projeto o qual me fez compreender o que é geografia de fato, o que é ir a campo, o que é pesquisa.

Aqui também agradeço aos colegas do LABGRID, aos que foram, aos que estão presente, as conversas e trocas foram riquíssimas, tanto em conteúdo como em fofoca. Agradeço especialmente aos colegas e amigos Alice, Diego e Matheus que me ajudaram nas pesquisas em campo, vocês foram fundamentais para que esse trabalho ocorresse.

Por último gostaria de agradecer aos amigos sejam eles da geografia, da UFSC, da infância. Aos amigos da geografia agradeço por terem feito esse capítulo da vida menos denso e pesado, obrigada pelos bares, pelas conversas de corredores, pelos colinhos, pelos trabalhos desenvolvidos em conjunto, pelas saídas de campo, pelas jantas. Aos amigos de infância agradeço por estarem ao meu lado desde quando eu não sabia o que era faculdade, obrigada Camile, Laura, Milena, Natalia e Pedro, vocês fazem a diferença em minha vida.



## RESUMO

A geomorfologia fluvial é indispensável para entender os processos e as formas associadas aos rios e canais, com destaque para as barras fluviais, que são formadas por acumulações de sedimentos como areia e cascalho. O principal objetivo deste trabalho é analisar a evolução de um sistema de barras fluviais com base em dados topográficos de imagens orbitais e suborbitais. Dessa forma, este estudo busca compreender a eficiência do mapeamento utilizando diferentes escalas e índices espectrais, assim como aplicar diferentes métodos de aerofotogrametria e topografia. A principal técnica utilizada foi o *DEM of Differencing* (Dod), a qual identifica e quantifica a mudança do Modelo Digital de Terreno (MDT), monitorando o transporte e deposição de sedimentos ao longo do recorte temporal. Além disso, também foram utilizadas imagens de satélite Sentinel-2 para o mapeamento das barras, mas o resultado obtido não foi preciso para o mapeamento das barras a partir apenas das imagens de satélite. O principal resultado da pesquisa foi a obtenção de distintos MDTs que mostraram as diferenças das barras e do canal diante a um evento extremo. Assim, o estudo visa que os aerolevantamentos e os estudos em campos são imprescindíveis para uma melhor compreensão de fenômenos extremos.

**Palavras-chaves:** Geomorfologia fluvial; aerofotogrametria; Geomorphic Change Detection;

## ABSTRACT

Fluvial geomorphology is essential for understanding the processes and landforms associated with rivers and channels, with particular emphasis on fluvial bars, which are formed by the accumulation of sediments such as sand and gravel. The main objective of this study is to analyze the evolution of a fluvial bar system based on topographic data derived from orbital and suborbital imagery. Thus, this research seeks to evaluate the efficiency of mapping using different spatial scales and spectral indices, as well as to apply different aerophotogrammetric and topographic methods. The primary technique employed was the DEM of Difference (DoD), which identifies and quantifies changes in the Digital Elevation Model (DEM), allowing the monitoring of sediment transport and deposition throughout the analyzed time period. In addition, Sentinel-2 satellite images were also used for bar mapping; however, the results obtained were not sufficiently accurate when relying solely on orbital imagery. The main result of the research was the generation of distinct DEMs that revealed differences in the fluvial bars and channel in response to an extreme event. Therefore, this study highlights that aerial surveys and fieldwork are essential for a better understanding of extreme geomorphological events.

**Keywords:** Fluvial geomorphology; aerial mapping; Geomorphic Change Detection;



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Gráfico de distribuição das publicações por países .....                                                     | 21 |
| Figura 2 – Distribuição das áreas de estudos dos 20 artigos mais citados .....                                          | 22 |
| Figura 3 – Nuvem de palavras a partir da bibliometria .....                                                             | 23 |
| Figura 4 – Mapa de localização da área de estudo .....                                                                  | 29 |
| Figura 5 – Comparação temporal do sistema de barras .....                                                               | 30 |
| Figura 6 – Planejamento do voo aerofotogramétrico no software Dronedeploy .....                                         | 33 |
| Figura 7 – Nuvem de pontos no software Metashape .....                                                                  | 35 |
| Figura 8 – Interface do software Geomorphic Change Detection .....                                                      | 37 |
| Figura 9 – Comparação entre os MDTs de 30 metros e 50 metros .....                                                      | 42 |
| Figura 10 – Gráfico de dispersão entre os MDTs obtidos através dos voos de 30 e 50 metros .....                         | 44 |
| Figura 11 – Índice NDVI de 03 e 23 de janeiro de 2025 .....                                                             | 46 |
| Figura 12 – Índice EVI de 03 e 23 de janeiro de 2025 .....                                                              | 47 |
| Figura 13 – Imagens do Sentinel-2 de 03 e 23 de janeiro de 2025 com a técnica de upsampling, resolução de 1 metro ..... | 48 |
| Figura 14 – NDVI do Sentinel-2 de 03 e 23 de janeiro de 2025 com a técnica de upsampling, resolução de 1 metro .....    | 49 |
| Figura 15 – Índice VARI para 30 metros em dezembro e maio .....                                                         | 51 |
| Figura 16 – Índice ViGreen para 30 metros em dezembro e maio .....                                                      | 52 |
| Figura 17 – Diferença dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) .....                                                       | 53 |
| Figura 18 – Gráfico de diferença entre as áreas dos MDT's .....                                                         | 54 |
| Figura 19 – Dados da diferença entre as áreas dos MDT's .....                                                           | 56 |
| Figura 20 – Gráfico de dispersão entre os MDTs de 30 metros de dezembro e maio .....                                    | 58 |

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Compilação das publicações utilizadas para fazer as estatísticas bibliométricas .....**Erro! Indicador não definido.**



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|         |                                                 |
|---------|-------------------------------------------------|
| APP     | Área de Preservação Permanente                  |
| CNN     | Rede Neural Convolucional                       |
| DEM     | Digital Elevation Model                         |
| DoD     | DEM of Differencing                             |
| EVI     | Enhanced Vegetation Index                       |
| GCD     | Geomorphic Change Detection                     |
| GCP     | Ground Control Points                           |
| GNSS    | Sistema Global de Navegação por Satélite        |
| MDE     | Modelo Digital de Elevação                      |
| MDS     | Modelo Digital de Superfície                    |
| MDT     | Modelo Digital de Terreno                       |
| NDVI    | Normalized Difference Vegetation Index          |
| NIR     | Near Infrared                                   |
| RGB     | Red, Green, Blue                                |
| SfM     | Structure From Motion                           |
| VARI    | Visible Atmospherically Resistant Index         |
| ViGreen | Visible Atmospherically Resistant Indices Green |



## SUMÁRIO

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                   | <b>16</b> |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOMÉTRICA .....</b>                       | <b>19</b> |
| <b>3</b> | <b>ÁREA DE ESTUDO .....</b>                              | <b>28</b> |
| <b>4</b> | <b>METODOLOGIA .....</b>                                 | <b>32</b> |
| 4.1.     | IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS MORFOLOGIAS. ....        | 32        |
| 4.2.     | PLANEJAMENTO DE VOO.....                                 | 33        |
| 4.3.     | GEOMORPHIC CHANGE DETECTION (GCD) .....                  | 35        |
| 4.4.     | OBTENÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE .....                    | 38        |
| 4.5.     | ANÁLISE DA EVOLUÇÃO POR MEIO DE ÍNDICES ESPECTRAIS ..... | 38        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                      | <b>41</b> |
| 5.1      | PROCESSAMENTO DE DADOS DE CAMPO.....                     | 41        |
| 5.2      | ÍNDICES ESPECTRAIS E EFEITO DE ESCALA.....               | 45        |
| 5.3      | ÍNDICES ESPECTRAIS DE ALTA RESOLUÇÃO .....               | 50        |
| 5.4      | GEOMORPHIC CHANGE DETECTION.....                         | 52        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                   | <b>59</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                  | <b>62</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A geomorfologia fluvial, ramo da geomorfologia dedicado ao estudo das formas e processos associados aos rios e canais, é essencial para compreender a dinâmica dos sistemas fluviais e os impactos naturais e antrópicos nesses ambientes. Nesse contexto, os sistemas de barras destacam-se como características geomorfológicas significativas, consistindo em acumulações de sedimentos, predominantemente areia e cascalho, formadas nos leitos de rios e canais. Essas formações desempenham um papel crucial na dinâmica e evolução dos cursos d'água, influenciando tanto a morfologia quanto o comportamento hidrodinâmico dos rios. O desenvolvimento e a estabilidade das barras fluviais são determinados por fatores como velocidade da corrente, carga de sedimentos, topografia do leito e condições climáticas. Além disso, eventos cíclicos, como cheias e secas, podem alterar significativamente a estrutura e posição dessas formações, evidenciando a natureza dinâmica dos sistemas fluviais (Stevaux & Latrubesse, 2017; Coelho et al., 2018).

O processo de formação dos meandros é condicionado pela estruturação vertical do escoamento, resultante do atrito entre o fundo do canal e a corrente de água, o qual gera diferenças de velocidade entre as porções internas e externas do fluxo, favorecendo o desenvolvimento de trajetórias sinuosas. A sinuosidade do escoamento intensifica-se com o aumento da profundidade em função da maior força de fricção exercida no leito do canal, sob tais condições, formam-se inicialmente barras laterais alternadas. Como consequência, ocorre erosão da margem côncava, que progride lateralmente em direção oposta ao centro do canal, originando a formação de barras em pontal. A margem convexa, por sua vez, em razão das menores velocidades de escoamento, apresenta predominância de sedimentação ativa, avançando por acreção lateral em direção ao centro do canal à mesma taxa em que a margem oposta é erodida, preservando, assim, a largura do canal (Stevaux & Latrubesse, 2017; Coelho et al., 2018).

A análise e o mapeamento de barras são essenciais para a compreensão da evolução dos rios e para a gestão de recursos hídricos. Ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, como drones e Modelos Digitais de Terreno (MDT), têm revolucionado o estudo dessas feições, permitindo a

visualização e o monitoramento detalhados de mudanças ao longo do tempo. A técnica fotogramétrica *Structure from Motion (SfM)* permite a reconstrução tridimensional de superfícies a partir de um conjunto de imagens bidimensionais capturadas sob diferentes ângulos e posições. Essa metodologia utiliza algoritmos avançados para identificar pontos em comum entre as fotografias e, com base na triangulação, criar nuvens de pontos tridimensionais densas que podem ser utilizadas para gerar Modelos Digitais de Superfície (MDS) e Modelos Digitais de Terreno (MDT). Uma das grandes vantagens do *SfM* é sua flexibilidade, pois não exige câmeras pré-calibradas ou específicas, permitindo que fotos obtidas por diferentes dispositivos sejam integradas em um mesmo projeto (Jaud et al., 2019). Tecnologias como *Structure from Motion (SfM)*, empregadas no processamento de imagens capturadas por drones, ampliam a capacidade de identificar padrões de sedimentação e erosão, contribuindo para a modelagem e a previsão dos processos fluviais (Schnorr et al., 2023; Jaud et al., 2019).

A integração dessas tecnologias possibilita não apenas a análise detalhada das barras fluviais, mas também a detecção de mudanças morfológicas, sendo feitas a partir da diferença de MDTs (*DoD - Difference of DEM*), que visa identificar e quantificar mudanças geomorfológicas ao longo do tempo. Essa metodologia permite o monitoramento contínuo de processos fluviais e terrestres, como a erosão e a deposição de sedimentos, a partir da comparação de dados topográficos coletados em diferentes períodos. Os *DoDs* (Wheaton et al., 2010) se destacam como ferramentas fundamentais na geomorfologia fluvial, oferecendo insights sobre a interação entre processos e formas e permitindo a avaliação de previsões provenientes de modelos morfodinâmicos numéricos. Amplamente utilizados, os *DoDs* servem para inferir taxas de transporte de sedimentos de fundo, interpretar processos como erosão, deposição, migração e avulsão de canais, mapear perturbações em habitats ecológicos, estimar tendências do nível do leito, validar modelos morfológicos e auxiliar na gestão de extração e reposição de cascalho. A principal distinção entre os diferentes tipos de investigação baseados em *DoDs* reside no propósito — se o foco é apenas mapear alterações no leito ou estimar taxas de transporte sedimentar (Williams, 2012).

O uso do *DoD*, pode ser integrado com tecnologias como drones e GNSS e a fotogrametria baseada em *Structure from Motion (SfM)*. Essas tecnologias permitem



gerar MDTs com alta resolução espacial e temporal, proporcionando uma análise detalhada das mudanças geomorfológicas ao longo do tempo. Com a utilização dessas ferramentas, é possível identificar a evolução de feições como barras fluviais, meandros e voçorocas, além de monitorar a movimentação de sedimentos e a modificação de cursos d'água (Schnorr et al., 2023; Jaud et al., 2019). A combinação dessas tecnologias com metodologias tradicionais permite uma abordagem mais robusta para compreender a dinâmica de sistemas fluviais, monitorar processos erosivos e sedimentares e propor estratégias para a gestão integrada dos recursos naturais (Ozturk et al., 2019). Essas abordagens são especialmente relevantes para avaliar os impactos de eventos extremos e intervenções humanas, que afetam diretamente os padrões de fluxo e sedimentação (Christofolletti, 1980; Coelho et al., 2018).

A utilização de drones e sensoriamento remoto amplia o escopo das análises geomorfológicas, fornecendo dados com alta resolução espacial e temporal em áreas de difícil acesso. Em síntese, a evolução dos estudos geomorfológicos fluviais, aliada ao avanço tecnológico, oferece uma base sólida para o manejo e a conservação de rios e suas feições associadas.

Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo principal a análise da evolução de um sistema de barras fluviais utilizando os dados topográficos e espectrais a partir de imagens orbitais e suborbitais. Para isso, foi escolhido um trecho do rio Biguaçu onde houve significativas mudanças após um evento extremo. Desse modo, foram realizados mapeamentos aerofotogramétricos visando analisar a influência de altura do voo nos parâmetros topográficos, assim como verificar a resposta do sistema fluvial a um evento extremo a partir de diferenças de MDTs. Ademais, foram utilizadas imagens de satélite e a pesquisa busca verificar a eficiência de índices espectrais para identificação de barras como também utilizar técnicas de *upsampling* para o mapeamento de barras.

Assim como, o presente trabalho visa responder às seguintes perguntas: Existe efeito de escala entre as resoluções espaciais de 10 metros e 1 centímetro? Qual é a influência do evento extremo nesse ambiente fluvial? Qual é a melhor altura de voo para o mapeamento das barras? O *upsampling* é viável para mapear as barras fluviais?

## 2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

A bibliometria é uma metodologia científica que utiliza técnicas estatísticas para analisar padrões em publicações acadêmicas, auxiliando na avaliação de produtividade, impacto e colaboração entre autores e instituições. Ela desempenha um papel central na compreensão da dinâmica do conhecimento científico e no planejamento de políticas públicas para ciência e tecnologia (Araújo, 2006). Por meio de indicadores como número de publicações, fator de impacto e redes de citações, é possível identificar tendências de pesquisa e áreas prioritárias. No Brasil, sua aplicação tem crescido com o aumento da produção científica indexada em bases internacionais e com a busca por maior visibilidade global (Guimarães & Humann, 2005). A bibliometria também subsidia análises estratégicas para gestores de instituições de ensino e pesquisa, contribuindo para a consolidação de áreas emergentes e para a gestão do conhecimento.

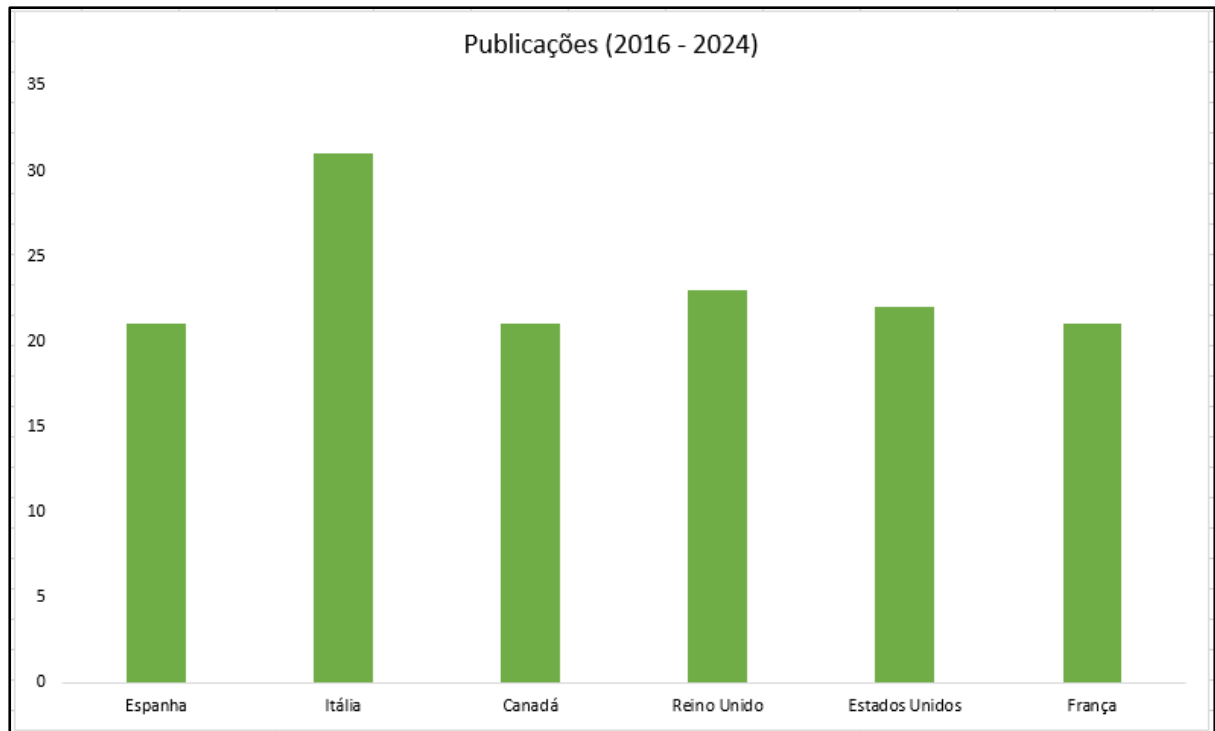
Com base na coleta e organização de dados extraídos de bases bibliográficas como *Web of Science* e *Scopus*, é possível gerar indicadores como contagem de publicações, índices de impacto e redes de coautoria (Leta, 2012). Essas ferramentas possibilitam a identificação de tendências, lacunas no conhecimento e o mapeamento de colaborações científicas. No Brasil, o uso da bibliometria tem crescido significativamente, acompanhado pelo aumento da indexação de trabalhos nacionais em bases internacionais, o que reflete uma busca por maior visibilidade e impacto global (Guimarães & Humann, 2005). Ferramentas computacionais, como VOSviewer e Bibliometrix, têm auxiliado na criação de representações gráficas e mapeamentos, tornando as análises mais acessíveis e detalhadas. Além disso, a análise de coocorrência de palavras-chave permite identificar temas emergentes e áreas prioritárias para pesquisa, promovendo a gestão estratégica do conhecimento científico (Araújo, 2006). Dessa forma, a bibliometria contribui de maneira fundamental para compreender e direcionar o desenvolvimento científico no contexto global.

A análise bibliométrica realizada neste estudo utilizou como palavra-chave o termo “*DEM Differencing*”, associado ao software utilizado na pesquisa. Após ajustes e refinamentos nas palavras-chave, considera-se que os resultados obtidos foram suficientes e relevantes para aprofundar o conhecimento na área. A coleta de dados

bibliográficos foi realizada em duas bases de dados reconhecidas, *Scopus* e *Web of Science*, resultando em mais de 200 artigos e textos relacionados ao termo pesquisado. Para selecionar os trabalhos mais significativos, adotou-se como critério o número de citações, sendo priorizados os 20 artigos mais citados globalmente, com o intuito de identificar as contribuições mais influentes e consolidadas no campo.

Após a coleta inicial, os artigos provenientes das bases *Scopus* e *Web of Science* foram consolidados em um único conjunto. Após a exclusão de duplicatas, restaram 20 artigos, que serviram como base para a análise bibliométrica. Esses documentos foram utilizados para a criação de representações gráficas e cartográficas, buscando sintetizar as informações obtidas. Um dos produtos gerados, o Gráfico 1, foi elaborado com o auxílio do software Bibliometrix em conjunto com a linguagem de programação R. Esse gráfico apresenta a distribuição das fontes dos artigos que abordam o termo *DEM Differencing*, revelando padrões na localização geográfica das publicações, com destaque para a concentração em países de maior tradição acadêmica e infraestrutura científica.

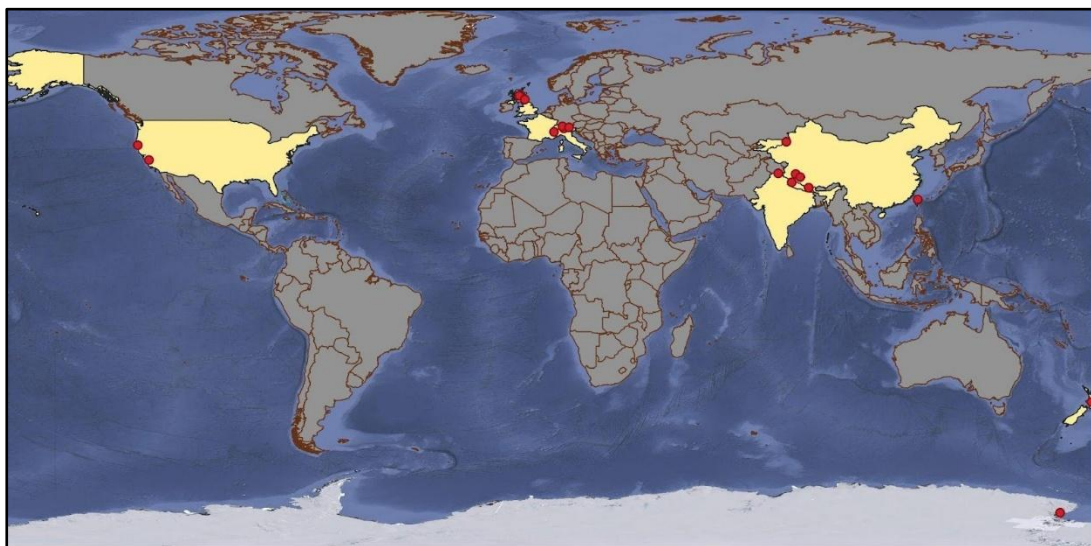
Gráfico 1 - Distribuição das publicações por países



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além disso, foi confeccionada uma representação espacial dos locais onde os estudos analisados foram realizados, apresentada na Figura 1. Observa-se uma maior concentração de pesquisas na Europa, particularmente nos Alpes Suíços e Italianos, e na Ásia, em locais diversos da Cordilheira do Himalaia. Tais regiões são caracterizadas por suas condições geomorfológicas e ambientais específicas, frequentemente associadas a estudos sobre elevação e detecção de mudanças topográficas em áreas montanhosas.

Figura 1 - Distribuição das áreas de estudos dos 20 artigos mais citados



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

As duas figuras permitem uma análise comparativa que evidencia diferenças importantes. O Gráfico 1, focado nos locais de publicação, destaca a predominância de países como Itália e Reino Unido como centros de produção científica. Já a Figura 2, que mapeia as áreas de estudo, revela uma maior concentração em países asiáticos como China e Índia, além de um caso singular na Antártica. Esse contraste reflete um cenário em que a pesquisa é majoritariamente produzida em países desenvolvidos, enquanto as áreas investigadas frequentemente se localizam em regiões ambientalmente críticas ou de relevância global, como cordilheiras e ambientes polares.

A comparação entre as figuras evidencia, ainda, a desigualdade no processo de produção científica. Embora as publicações estejam concentradas em nações de maior desenvolvimento econômico, como Estados Unidos e França, os locais de pesquisa abrangem, em grande parte, áreas de países emergentes ou em desenvolvimento. Esse padrão reflete tanto as limitações infraestruturais em algumas regiões quanto a importância estratégica de áreas específicas. Tal dinâmica reforça a necessidade de cooperação científica global para superar barreiras e promover maior equidade no acesso e na contribuição para a ciência.

Retomando a análise das palavras-chave, foi gerada, por meio do software Bibliometrix integrado à linguagem de programação R, uma nuvem de palavras que



O Quadro 1 apresenta um compilado dos artigos científicos que serviram de base para esta análise. Nela, são listados os autores, os títulos completos das publicações e os respectivos anos de publicação. Essa seleção de artigos foi realizada com o objetivo de englobar estudos relevantes e atualizados sobre as temáticas de mudanças geomorfológicas em áreas montanhosas e o emprego de técnicas de sensoriamento remoto para o monitoramento dessas dinâmicas.

Quadro 1 - Compilação das publicações utilizadas para fazer as estatísticas bibliométricas.

| <b>Autores</b>                                                                                                                 | <b>Artigos</b>                                                                                                                                                       | <b>Ano de publicação</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Zhao, FY; Long, D; Li, XD; Huang, Q; Han, PF                                                                                   | Rapid glacier mass loss in the Southeastern Tibetan Plateau since the year 2000 from satellite observations                                                          | 2022                     |
| Wu, KP; Liu, SY; Jiang, ZL; Xu, JL; Wei, JF; Guo, WQ                                                                           | Recent glacier mass balance and area changes in the Kangri Karpo Mountains from DEMs and glacier inventories                                                         | 2018                     |
| Paul, F; Bolch, T; Briggs, K; Kääb, A; McMillan, M; McNabb, R; Nagler, T; Nuth, C; Rastner, P; Strozzi, T; Wuite, J            | Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project | 2017                     |
| Cavalli, M; Goldin, B; Comiti, F; Brardinoni, F; Marchi, L                                                                     | Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models                                                      | 2017                     |
| Dehecq, A; Millan, R; Berthier, E; Gourmelen, N; Trouvé, E; Vionnet, V                                                         | Elevation Changes Inferred From TanDEM-X Data Over the Mont-Blanc Area: Impact of the X-Band Interferometric Bias                                                    | 2016                     |
| Hsieh, YC; Chan, YC; Hu, JC                                                                                                    | Digital Elevation Model Differencing and Error Estimation from Multiple Sources: A Case Study from the Meiyuan Shan Landslide in Taiwan                              | 2016                     |
| Fischer, M; Huss, M; Hoelzle, M                                                                                                | Surface elevation and mass changes of all Swiss glaciers 1980-2010                                                                                                   | 2015                     |
| Immerzeel, WW; Kraaijenbrink, PDA; Shea, JM; Shrestha, AB; Pellicciotti, F; Bierkens, MFP; de Jong, SM                         | High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles                                                                              | 2014                     |
| Lague, D; Brodu, N; Leroux, J                                                                                                  | Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z)                                              | 2013                     |
| Gardelle, J.; Berthier, E.; Arnaud, Y.; Kaab, A.                                                                               | Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999-2011                                                                                 | 2013                     |
| Wheaton, JM; Brasington, J; Darby, SE; Kasprak, A; Sear, D; Vericat, D                                                         | Morphodynamic signatures of braiding mechanisms as expressed through change in sediment storage in a gravel-bed river                                                | 2013                     |
| James, LA; Hodgson, ME; Ghoshal, S; Latiolais, MM                                                                              | Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis                                                  | 2012                     |
| Vincent, C; Ramanathan, A; Wagnon, P; Dobhal, DP; Linda, A; Berthier, E; Sharma, P; Arnaud, Y; Azam, MF; Jose, PG; Gardelle, J | Balanced conditions or slight mass gain of glaciers in the Lahaul and Spiti region (northern India, Himalaya) during the nineties preceded recent mass loss          | 2012                     |
| Berthier, E; Scambos, TA; Shuman, CA                                                                                           | Mass loss of Larsen B tributary glaciers (Antarctic Peninsula) unabated since 2002                                                                                   | 2012                     |
| DeLong, SB; Prentice, CS; Hilley, GE; Ebert, Y                                                                                 | Multitemporal ALSM change detection, sediment delivery, and process mapping at an active earthflow                                                                   | 2012                     |
| Wheaton, JM; Brasington, J; Darby, SE; Merz, J; Pasternack, GB; Sear, D; Vericat, D                                            | Linking geomorphic changes to salmonid habitat at a scale relevant to fish                                                                                           | 2009                     |
| Paul, F; Haeberli, W                                                                                                           | Spatial variability of glacier elevation changes in the Swiss Alps obtained from two digital elevation models                                                        | 2008                     |
| Fuller, IC; Large, ARG; Milan, DJ                                                                                              | Quantifying channel development and sediment transfer following chute cutoff in a wandering gravel-bed river                                                         | 2003                     |
| Fuller, IC; Large, ARG; Charlton, ME; Heritage, GL; Milan, DJ                                                                  | Reach-scale sediment transfers: An evaluation of two morphological budgeting approaches                                                                              | 2002                     |
| Brasington, J; Rumsby, BT; Mcvey, RA                                                                                           | Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey                                                   | 2000                     |

Fonte: Elaborada pela autora a partir de dados do Bibliometrix (2025).

Os artigos apresentados concentram-se na análise de mudanças geomorfológicas, principalmente em regiões glaciares, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Através de modelos digitais de elevação, topografia clássica e imagens de satélite, os pesquisadores investigam a perda de massa de glaciares em diversas partes do mundo, a erosão e a deposição de sedimentos em bacias hidrográficas, e os impactos de eventos extremos como deslizamentos de terra.



Dentre os trabalhos analisados, metade tem como principal objeto de estudo as áreas glaciais e apenas 5 deles estão situados em ambientes fluviais.

O estudo de Zhao *et al.* (2022) teve como objetivo quantificar com alta resolução temporal e espacial a perda das massas dos glaciares do Planalto Tibetano. Assim, os autores integraram dados de altimetria por satélite, *DEM of differencing* e gravimetria por satélite em uma análise temporal de vinte anos. Os resultados foram positivos para a perda de água dos glaciares com uma tendência de aumento.

Cavalli *et al.* (2017) em seu trabalho abordam a técnica de DEM of Differencing (DoD) para analisar mudanças geomorfológicas em duas bacias hidrográficas íngremes no norte da Itália. Os autores aplicaram dois métodos distintos: o DoD e o levantamento em campo, ambos para analisar os volumes de erosão e deposição de sedimentos. Assim se obteve um resultado positivo para observar e quantificar as mudanças geomorfológicas nos dois métodos. Quando combinados, os métodos também mostraram resultados coerentes.

Segundo Lague *et al.* (2013), a área de estudos foi em um rio de leito meandrante de rápida erosão. O método utilizado foi uma comparação direta entre nuvens de pontos 3D obtidas por um laser scanner terrestre com o objetivo de detectar mudanças afetadas por erosão e sedimentação. O principal resultado foi uma maior precisão e simplicidade operacional em relação aos métodos existentes, aplicado à área de estudo o nível de detecção de mudanças de até 6mm.

A pesquisa de Wheaton *et al.* (2013) realizou testes a campo sobre a importância dos mecanismos de entrelaçamento fluvial identificados em laboratório. A área de estudos foi um rio no Reino Unido, foram coletados dados utilizando levantamentos topográficos assim, eles analisaram as assinaturas morfodinâmicas das mudanças no armazenamento de sedimentos. O estudo comprovou a relevância dos processos identificados em laboratório.

Em seu trabalho, James *et al.* (2012) avaliou e aprimorou métodos de detecção de mudanças geomórficas pelo *DEM of Differencing* (DoD) com a finalidade de quantificar erosão, deposição e outras variáveis volumétricas. A pesquisa revisa as vantagens e limitações desses métodos utilizando análises por

várias décadas, o estudo também observa e aponta incertezas associadas a dados topográficos antigos.

Além de quantificar as mudanças, os estudos também buscam identificar os fatores que as controlam, como o clima, a geologia e a atividade humana. Os resultados dessas pesquisas são cruciais para a gestão de recursos hídricos, a avaliação de riscos geológicos e o planejamento de ações de adaptação às mudanças climáticas. Ressalto que em grande parte dos estudos realizados a área de estudo é um ambiente glacial, sendo que a técnica de *DEM of Differencing* foi desenvolvida para a utilização em ambientes fluviais. Dessa forma, o presente estudo é importante para aplicar o método DoD em um ambiente menos explorado pelos principais trabalhos desenvolvidos ao redor do mundo.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

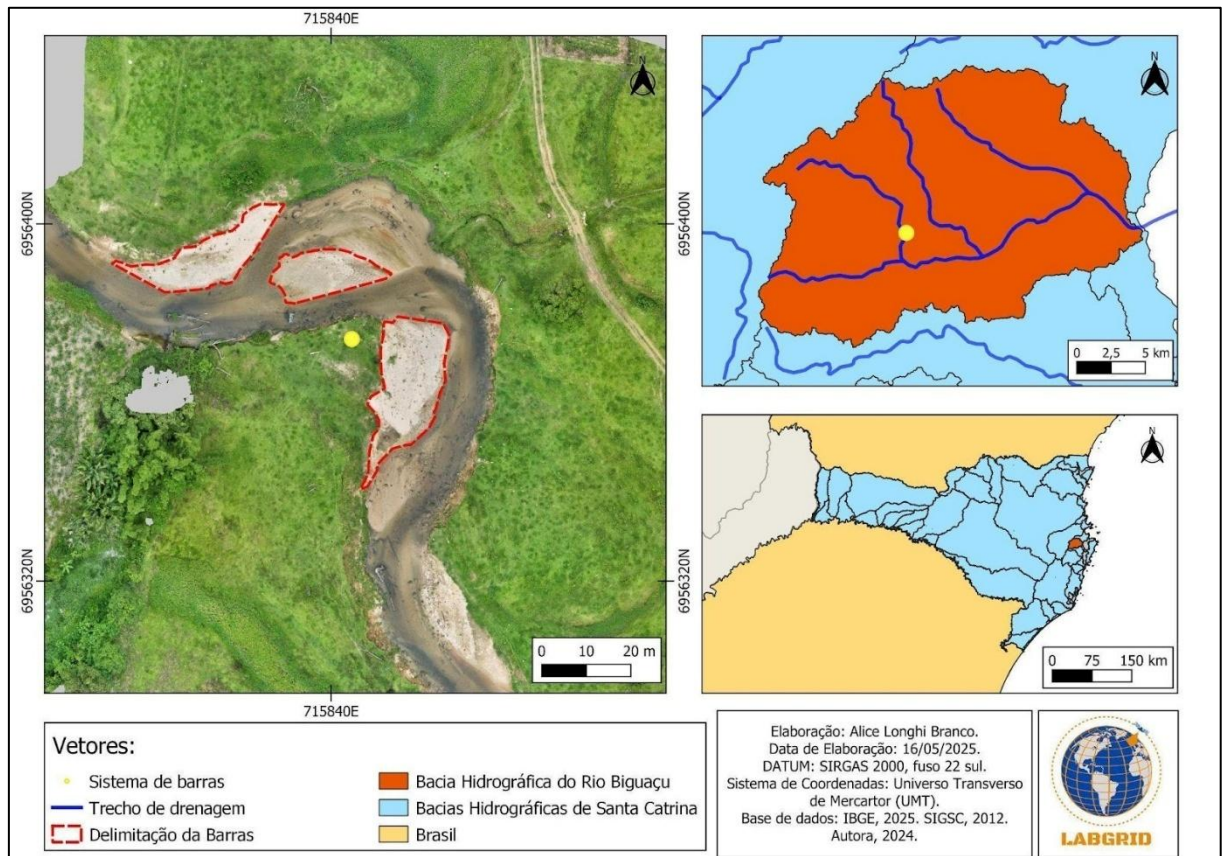
A região da bacia hidrográfica do Rio Biguaçu está localizada no centro-leste do estado de Santa Catarina, caracterizando-se como uma bacia costeira de extensão relativamente reduzida, cobrindo uma área total de cerca de 309 km<sup>2</sup>. Aproximadamente 205 km<sup>2</sup> está no território do município de Antônio Carlos, que incorpora a porção alta e média do vale do rio Biguaçu, enquanto a porção inferior do vale e a desembocadura do rio estão situadas no município de Biguaçu (Wilver, 2010). Segundo Reitz (1988), o Rio Biguaçu, que é o principal curso d'água da bacia, tem sua nascente em uma região de serra, na divisa entre os municípios de Antônio Carlos e Angelina, a uma altitude de 778 metros e deságua no município de Biguaçu, com extensão aproximadamente de 41 km.

A principal característica desta bacia consiste em sua drenagem perene, resultante dos elevados e regulares índices pluviométricos observados na região. Historicamente, essa condição hidrológica favoreceu o funcionamento de engenhos de açúcar, de produção de farinha, alambiques e outras atividades tradicionais. Na atualidade, as águas do Rio Biguaçu mantêm relevância econômica e social, sendo amplamente utilizadas na irrigação de cultivos de hortaliças e gramíneas (Kremer, 1993). Observa-se o predomínio de trechos fluviais meândricos que se estendem pelas planícies localizadas nas áreas de menor altitude dos principais cursos d'água. Contudo, diversos segmentos desses rios foram modificados por intervenções antrópicas, como projetos de retificação, com o objetivo de mitigar inundações e possibilitar o aproveitamento agrícola das terras mediante a drenagem dos terrenos (Wilver, 2010). Também como, a presença de áreas urbanas e o avanço da agricultura contribuem para a degradação do recurso hídrico e a perda de vegetação nativa.

A gestão das águas da bacia é desafiada pela crescente demanda urbana e agrícola, mas esforços para equilibrar as necessidades de abastecimento e conservação têm sido implementados com o apoio de políticas públicas e programas ambientais, como o Plano de Manejo de Recursos Hídricos de Santa Catarina. Essas iniciativas buscam promover o uso sustentável da água e a proteção de áreas de nascentes e margens, essenciais para garantir a saúde ecológica da bacia e o abastecimento contínuo de água para a população.

Dentro da bacia do rio Biguaçu foi escolhido um trecho onde ocorreram modificações nas feições fluviais, cuja descrição será apresentada mais abaixo (Figura 3).

Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

No trecho analisado e no estudo de campo foi possível observar que o Rio Biguaçu é bastante sinuoso e em suas margens existe a predominância de cultivos agrícolas e pastagens, assim como, é notável a ausência de mata ciliar na área de estudo e ao redor do local. Ademais, também é possível observar que existe um acúmulo de sedimentos nas margens, sendo composta principalmente por areia, característica de canais meândricos. Na paisagem ao redor da área de estudo existe uma estrada asfaltada assim como uma ponte, existe também um grande morro ao lado do rio com cerca de 200 m de altitude. Existem residências e pequenas empresas nos entornos da área de estudos, algumas inclusive, não respeitam o delimitar de Áreas de Preservação Permanente (APPs) de rios contido

no Código Florestal Brasileiro, que para rios de até 10m é necessário um recuo de 30m da margem.

Durante a realização da pesquisa notou-se por meio de imagens de satélite disponibilizadas pelo Google Earth que o Rio Biguaçu está constantemente em mudança, principalmente no trecho analisado. É possível ver feições e processos geomorfológicos, como um meandro que foi abandonado, o alargamento do canal do rio, erosão das margens, detritos lenhosos. O rio Biguaçu sofre significativas alterações quando ocorrem eventos extremos, devido a sua morfologia. Assim, através dos levantamentos de campo foi possível visualizar que ocorreu um evento que gerou uma mudança em todo o sistema de barras, canais e margem do rio. A Figura 4, a qual foi obtida através de imagens temporais pelo Google Earth, mostra essa significativa alteração na área de estudo ao longo de anos.

Figura 4 - Comparação temporal do sistema de barras



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Dessa forma, a partir da figura, nota-se que o sistema de barras evoluiu e formou morfologias diferentes ao longo dos anos. O contraste entre 2005 e 2010 nas imagens é pouco, pois o canal e a paisagem se mantiveram parecidos, mas, em 2010 existem maiores depósitos de sedimentos nas laterais do que em 2005. Dos anos de 2010 a 2013 ocorreu o abandono de um meandro assim como a formação de uma barra central, o canal ficou mais retilíneo. Ao longo dos anos de 2013 a 2016 a barra central já não existe e ela dá lugar a um canal maior, com uma barra lateral menor que a vista no ano de 2013. Entre 2016 a 2019 visualmente são as imagens que mais se parecem, porém existe um corte significativo na mata ciliar, também é possível observar o abandono de mais um meandro, na parte mais inferior da imagem. Já de 2019 a 2022 a principal mudança é a seção vertical do rio a qual aumentou em 2022. Na paisagem é possível identificar depósitos de sedimentos sobre a planície.

Em janeiro de 2025, uma chuva intensa e temporais isolados ocasionada por instabilidade atmosférica combinada com calor e umidade, gerou danos e prejuízos aos municípios da Grande Florianópolis, segundo dados da Defesa Civil (2025), choveu mais de 100 mm em vinte e quatro horas e na área de estudo choveu cerca de 40 mm. Esse grande volume de chuvas combinado com as características hidrogeomorfológicas do rio resultou em uma mudança expressiva no perfil do rio. Esse evento será discutido mais tarde nesta pesquisa.

Essas mudanças refletem a elevada dinâmica hidrogeomorfológica do rio Biguaçu, cuja morfologia responde de maneira imediata a eventos extremos, promovendo ajustes na configuração das barras, nas margens e no curso do canal. Essas transformações ressaltam a necessidade de investigações contínuas sobre a dinâmica geomorfológica de barras fluviais, visto que mudanças expressivas podem acarretar desastres.



## 4 METODOLOGIA

O estudo baseia-se na análise da evolução temporal da morfologia de feições fluviais, utilizando tecnologias de sensoriamento remoto, como drones e imagens históricas do Google Earth, em combinação com ferramentas de análise geomórfica, como o software *Geomorphic Change Detection (GCD)*. A metodologia foi estruturada em três etapas principais: levantamento de dados com drones, análise da evolução temporal com imagens satélites orbitais e suborbitais, processamento dos dados obtidos a partir do drone no Metashape e diferenciação dos modelos digitais de terreno no GCD.

### 4.1. IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS MORFOLOGIAS.

A etapa inicial consistiu na identificação e localização das morfologias na área de estudo. Essa etapa foi realizada a partir da análise de imagens de satélite, seguida de uma avaliação temporal preliminar utilizando técnicas de sensoriamento. Isso foi verificado com o software Google Earth Pro utilizando o recurso de imagens históricas, o qual disponibiliza uma biblioteca composta por várias imagens abrangendo um período de aproximadamente trinta anos.

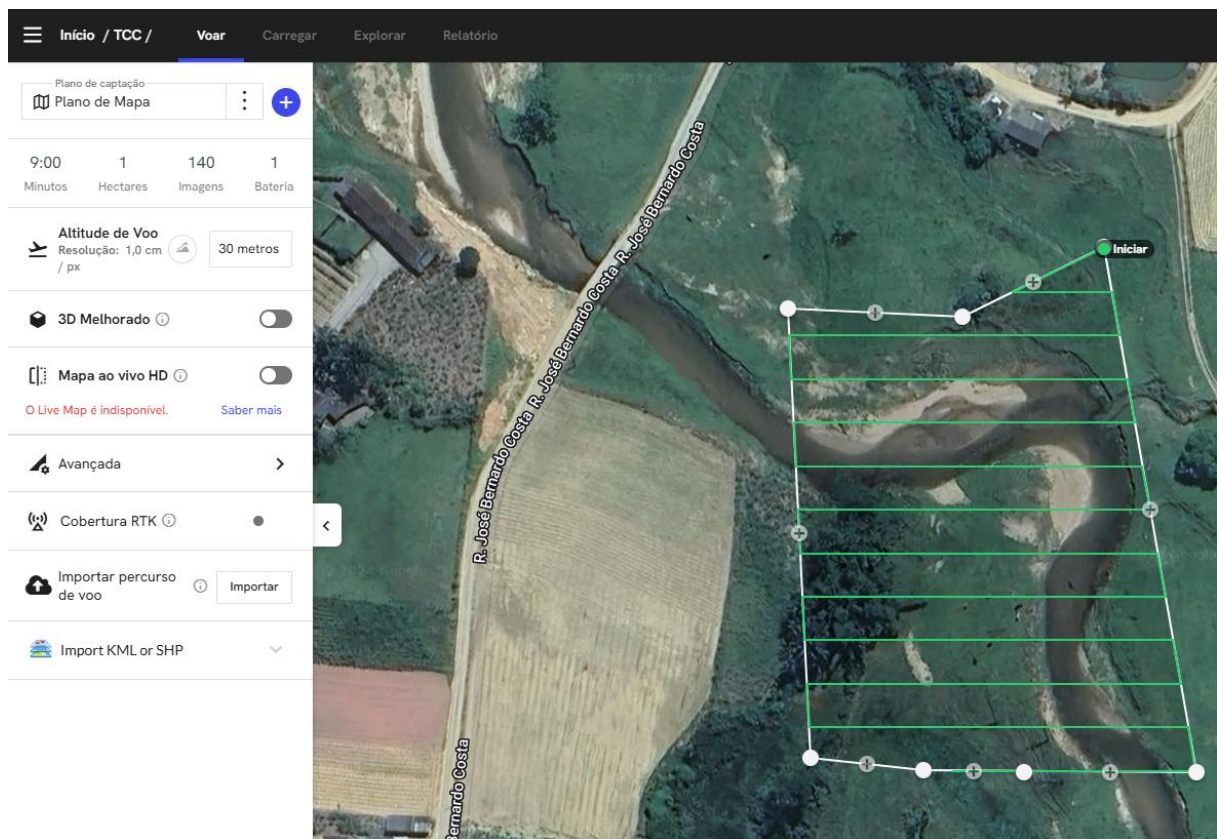
Após, foi realizado o levantamento de campo, cujo o principal objetivo foi confirmar e registrar a existência do sistema de barras, considerando que o rio possui alta dinâmica em processos geomorfológicos. Após a confirmação, o trabalho de campo em si foi executado, abrangendo a aquisição de imagens aerofotogramétricas e a coleta de pontos de controle para garantir o georreferenciamento preciso e a qualidade dos produtos gerados. Ademais, também é necessário a coleta de pontos com o GNSS para produzir o Modelo Digital de Terreno (MDT), passo importante para realizar o *DEM of Differencing (DoD)*.

Com base nisso, estruturou-se a metodologia para o levantamento aerofotogramétrico. Dessa forma, optou-se por adotar uma abordagem exploratória, testando diferentes parâmetros de direção e altura de voo, com o intuito de determinar as configurações mais eficazes e adequadas para alcançar os objetivos do estudo.

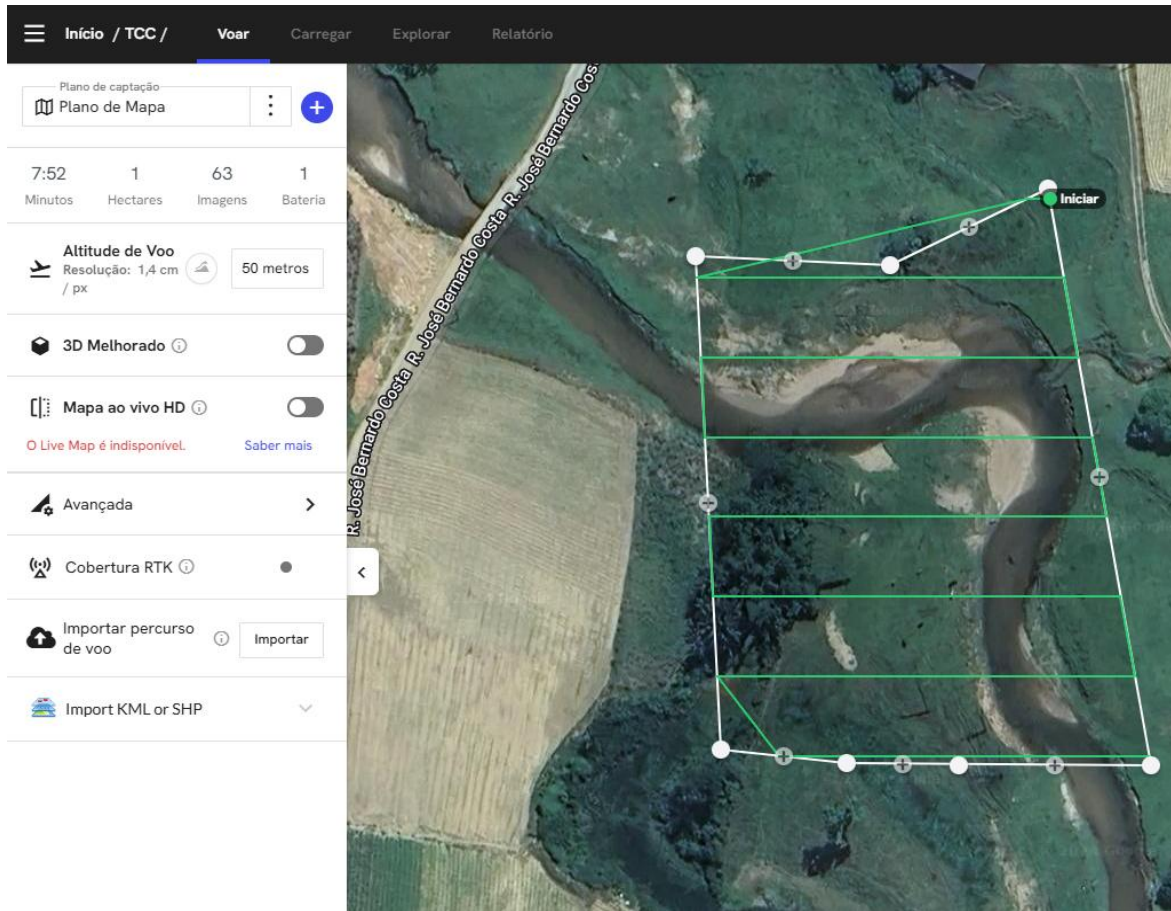
## 4.2. PLANEJAMENTO DE VOO

O voo foi planejado no software DroneDeploy uma variedade de voos com abordagem experimental e exploratória. A Figura 6 apresenta os parâmetros configurados no software para os voos. Ambos foram planejados com a mesma direção e alturas diferentes, um voo para 30 metros e outro para 50 metros. A velocidade definida foi de 2 m/s. No planejamento inicial, as principais diferenças entre os voos estão relacionadas apenas à altura adotada, sem alterações significativas em outros parâmetros.

Figura 5 - Planejamento do voo aerofotogramétrico no software DroneDeploy







Fonte: Elaborado pela autora no software Dronedeploy (2025).

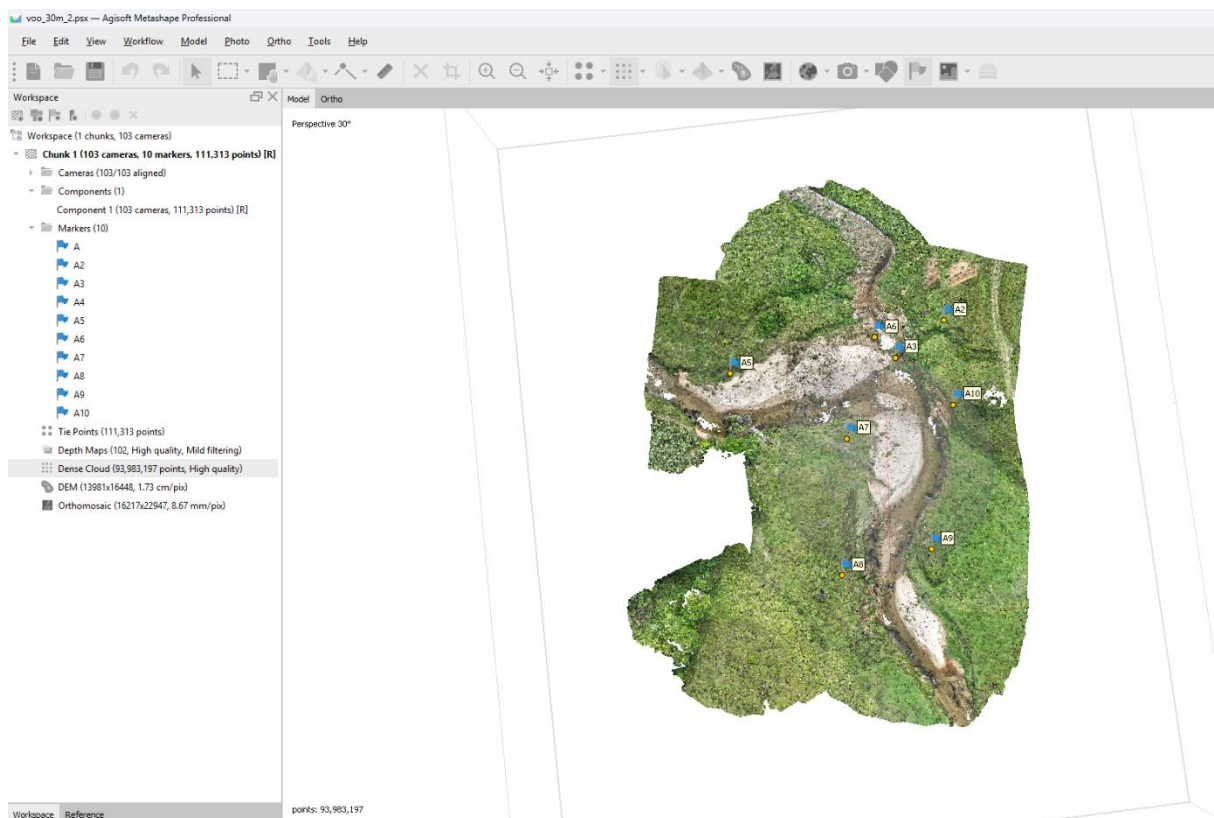
A principal diferença observada nesse caso é a resolução do pixel, que aumenta proporcionalmente à elevação da altura de voo. Além disso, essa configuração permite uma redução no tempo de execução do voo e resulta em um menor número de fotos capturadas, otimizando o processo sem comprometer a cobertura da área de estudo.

Após a conclusão dos levantamentos de campo, inicia-se a etapa de processamento de dados. Nesse momento, as informações coletadas por GNSS e as imagens captadas pelo drone serão processadas para a geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT). A figura 7 representa a interface do programa Metashape, nele foram realizados o processo de confecção de uma nuvem de pontos atrelada aos pontos de GNSS coletados, o MDT e um ortomosaico.

O primeiro trabalho de campo foi realizado em 04/12/2024, onde foram realizados dois voos, um a 30m e outro a 50m de altura. O objetivo foi verificar a influência deste parâmetro nos MDTs, visto que quanto mais alto o voo, menos fotos

e conseqüentemente menos tempo de processamento. O levantamento foi feito em uma área de cerca de 10.000 m<sup>2</sup> com 5 pontos de controle coletados em campo utilizando o GNSS. O segundo trabalho de campo foi realizado em 15/05/2025, onde foi realizado um voo com 30m de altura com 7 pontos de controle do GNSS. Os MDTs gerados a partir dos dois voos de 30m foram utilizados na análise do Geomorphic Change Detection.

Figura 6 - Nuvem de pontos no software Metashape



Fonte: Elaborado pela autora no software Metashape (2025).

#### 4.3. GEOMORPHIC CHANGE DETECTION (GCD)

O software GCD faz parte de um aglomerado de ferramentas para análise de paisagens fluviais. Sua principal função é detectar a mudança topográfica em rios, mas também funciona para detectar mudanças em qualquer superfície com base em MDTs. Ele foi desenvolvido por Joe Wheaton e James Brasington quando os autores colaboraram na detecção de mudanças geomórficas em 2004. O início da ideia era padronizar as aplicações de os níveis mínimos de detecção em suas análises de MDT, visando elevar os padrões na análise geomorfológica. O software ajuda a

reduzir impasses metodológicos para que os usuários dedicassem na interpretação e construção de teorias (Wheaton et al, 2010).

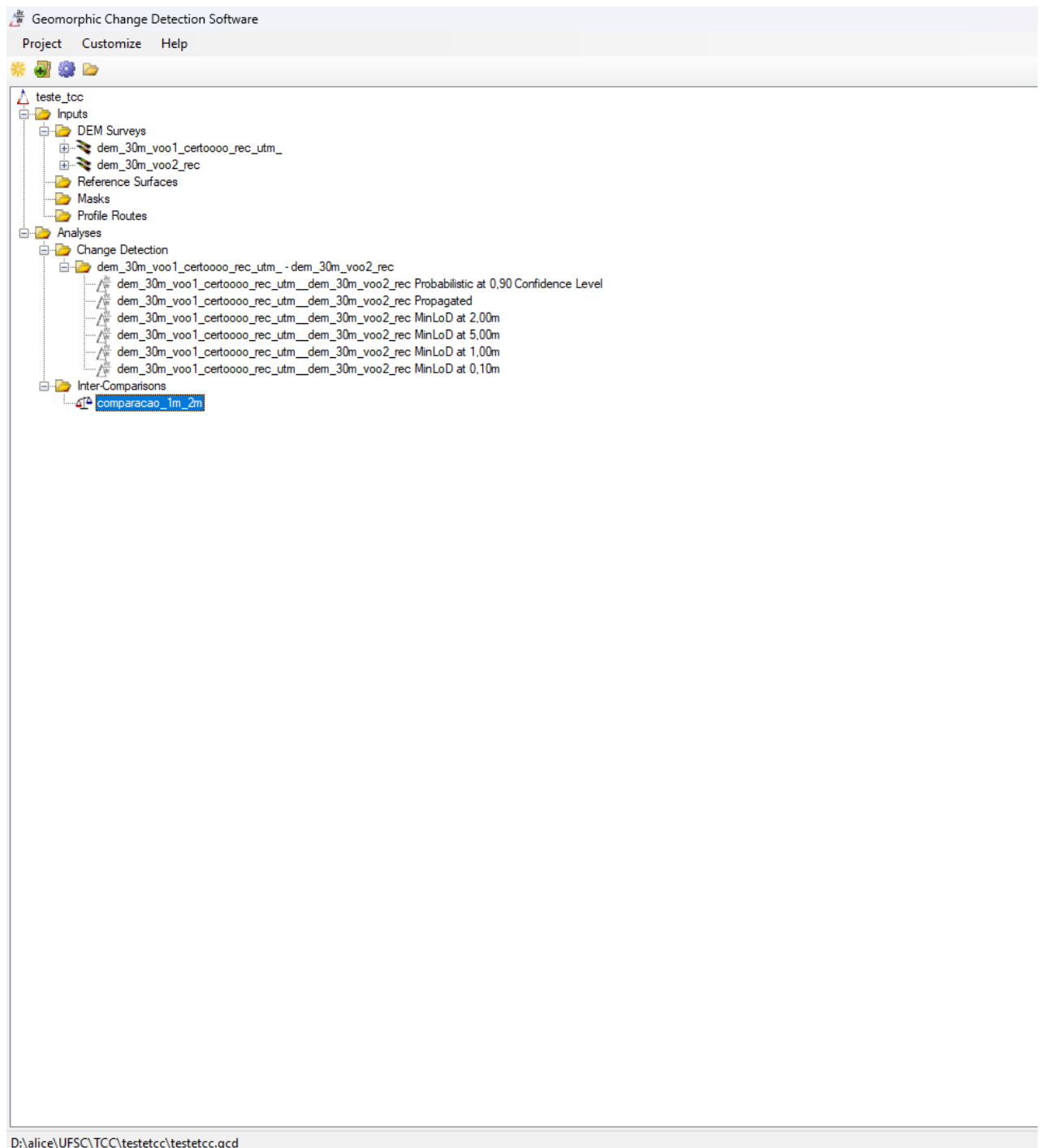
A criação do MDT é uma etapa fundamental, pois ele serve como base para que o software *Geomorphic Change Detection* (GCD) realize a análise e extração de dados relacionados ao transporte e à deposição de sedimentos, permitindo utilizar a técnica *DEM of Differencing* (DoD). Na Figura 8, é possível observar a interface do software GCD com suas ferramentas e dados produzidos para a presente pesquisa. Como dado de entrada foi utilizado o MDT anterior e o MDT posterior ao evento, analisando a variação volumétrica bem como locais de erosão e de deposição.

Um dos parâmetros do software é a altitude de cada ponto no MDT, assim ele calcula a diferença entre os dois MDTs sendo números positivos para um aumento na elevação, deposição de sedimentos, números negativos indicam diminuição na elevação que pode ser ocasionada por processos erosivos e quanto mais próximo de zero indica que a área não teve nenhuma mudança significativa na topografia.

Esse parâmetro pode ser ajustado por diferentes abordagens estatísticas, conforme ilustrado na Figura 7. O nível mínimo de detecção (Minimum Level of Detection – MinLoD) corresponde ao menor valor altimétrico que o software é capaz de identificar com confiabilidade, sendo estimado a partir do desvio padrão associado aos dados. A propagação de erros, outro procedimento estatístico disponibilizado no GCD, é empregada para quantificar a incerteza total de um resultado obtido indiretamente, integrando as incertezas individuais de todas as variáveis envolvidas no cálculo. Por fim, o limiar de probabilidade constitui um método estatístico voltado à conversão de uma probabilidade estimada em uma decisão binária, permitindo discriminar se determinada variação é estatisticamente significativa.

Dessa forma, para a elaboração do DEM of Differencing (DoD), adotou-se o método estatístico baseado no nível mínimo de detecção, considerando-o como referência para identificar as variações altimétricas mínimas detectáveis.

Figura 7 - Interface do software Geomorphic Change Detection



Fonte: Elaborado pela autora no software *Geomorphic Change Detection (GCD)* (2025).

Além disso, a evolução temporal da morfologia será analisada por meio de imagens de satélite, utilizando cálculos matemáticos chamados de índices. Essa abordagem é especialmente relevante, considerando que, após a primeira saída de

campo, foi constatado que a área de estudo apresenta alta dinâmica, com mudanças significativas em curtos intervalos de tempo

#### 4.4. OBTENÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE

As imagens escolhidas para a pesquisa foram do satélite Sentinel-2, elas foram adquiridas através do *Google Earth Engine (GEE)* a partir de um script simples. As imagens são datadas de 03/01/2025 e 23/01/2025 com nível 2 de processamento, com resolução espacial de 10 metros.

#### 4.5. ANÁLISE DA EVOLUÇÃO POR MEIO DE ÍNDICES ESPECTRAIS

Os índices espectrais são expressões matemáticas que combinam os valores de reflectância de diferentes bandas espectrais de uma imagem, a fim de realçar determinadas características da superfície terrestre. Tais índices são amplamente utilizados para analisar e interpretar dados de sensoriamento remoto, permitindo identificar, diferenciar e quantificar alvos espectrais, como vegetação, corpos d'água, solo exposto e áreas urbanas. Entre suas principais aplicações, destacam-se: monitoramento agrícola, acompanhamento de alterações ambientais e planejamento urbano.

Os índices espectrais foram aplicados em imagens de diferentes resoluções (métricas a centimétricas) buscando analisar se é possível identificar o efeito de escala na análise do sistema fluvial. Os dois primeiros índices utilizam imagens Sentinel 2, enquanto que os dois últimos aplicados nas ortofotos do drone.

#### **NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index***

O NDVI é amplamente utilizado para estimar a densidade e a saúde da vegetação. Sua lógica baseia-se na diferença de reflectância entre o infravermelho próximo (NIR), fortemente refletido pela vegetação saudável, e o vermelho (RED), fortemente absorvido pela clorofila (ROUSE; HAAS, 1974).

#### **Fórmula:**

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

Valores próximos de 1 indicam vegetação densa e saudável; próximos de 0, vegetação esparsa; e valores negativos correspondem a água, nuvens ou solo exposto. O NDVI já foi aplicado, por exemplo, na análise de padrões vegetativos como indicadores de atividade morfodinâmica na planície de inundação do médio Rio Paraná (MARCHETTI et al., 2016).

### **EVI – *Enhanced Vegetation Index***

O EVI foi desenvolvido para melhorar a sensibilidade em áreas de alta biomassa e minimizar interferências atmosféricas e de solo, sendo particularmente útil em monitoramento agrícola (JIANG et al., 2008). Além das bandas Vermelhas e Infravermelha, é adotado a banda azul (Blue) para corrigir distúrbios atmosféricos, como névoa e aerossóis. Adotou-se os valores de 2,5, 1, 6 e 7,5 para as constantes G, C, C2 e L, respectivamente.

#### **Fórmula:**

$$\text{EVI} = G \times \rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}} \rho_{\text{NIR}} + C1 \times \rho_{\text{RED}} - C2 \times \rho_{\text{BLUE}} + L \quad (2)$$

### **ViGreen**

O ViGreen é calculado utilizando apenas as bandas vermelha (RED) e verde (GREEN). É útil para classificar tipos de cobertura do solo, diferenciando vegetação verde, solo exposto, água ou neve (GITELSON et al., 2002).

#### **Fórmula:**

$$\text{ViGreen} = \rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{RED}} \rho_{\text{GREEN}} + \rho_{\text{RED}} \quad (3)$$

### **VARI – *Visible Atmospherically Resistant Index***

O VARI foi projetado para minimizar os efeitos atmosféricos utilizando apenas bandas do espectro visível, sendo adequado para imagens de alta resolução obtidas por drones e câmeras RGB (GITELSON et al., 2002).

#### **Fórmula:**

$$\text{VARI} = \rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{RED}} \rho_{\text{GREEN}} + \rho_{\text{RED}} - \rho_{\text{BLUE}} \quad (4)$$

Esse índice é sensível a variações na fração de vegetação, possibilitando a detecção de mudanças na biomassa e na quantidade de clorofila, com reduzida influência das condições atmosféricas.

Portanto, os índices que são aplicados para esse trabalho têm como finalidade a diferenciação de alvos espectrais para a identificação do objeto de estudo. Logo, nesse trabalho, eles devem distinguir as barras, o canal fluvial, o gramado na margem do rio para que a evolução da morfologia possa ser analisada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 PROCESSAMENTO DE DADOS DE CAMPO

A cada voo executado foram gerados relatórios no Software Agisoft Metashape Professional, eles apresentam o processamento dos levantamentos aerofotogramétricos realizados pelo drone DJI MAVIC 3 CLASSIC na área de estudo, gerando os modelos digitais de elevação (MDT), nuvens densas de pontos e ortomosaicos. Ambos os documentos produzidos, seguiram metodologias próprias da aerofotogrametria digital, com uso da mesma câmera embarcada (L2D-20c, 12,29 mm). Ainda que possuam objetivos semelhantes, diferem em parâmetros de voo, densidade de pontos, acurácia posicional e produtos finais, o que se reflete diretamente nas possibilidades de interpretação temporal do sistema fluvial.

O relatório do voo 1, altura de voo de 30 metros descreve uma missão mais extensa, baseada em 169 imagens cobrindo 0,0365 km<sup>2</sup>. A resolução obtida foi superior do que o voo 2, chegando a 1,11 cm/pixel, com MDT em 2,22 cm/pixel e densidade de 0,202 pontos/cm<sup>2</sup>, o que garante maior riqueza de informação espacial. Contudo, a precisão posicional foi menor, uma vez que os erros médios dos GCPs atingiram 31,7 cm, com destaque para desvios no eixo Z superiores a 15 cm. Apesar dessa limitação, a nuvem densa apresentou 12,8 milhões de pontos.

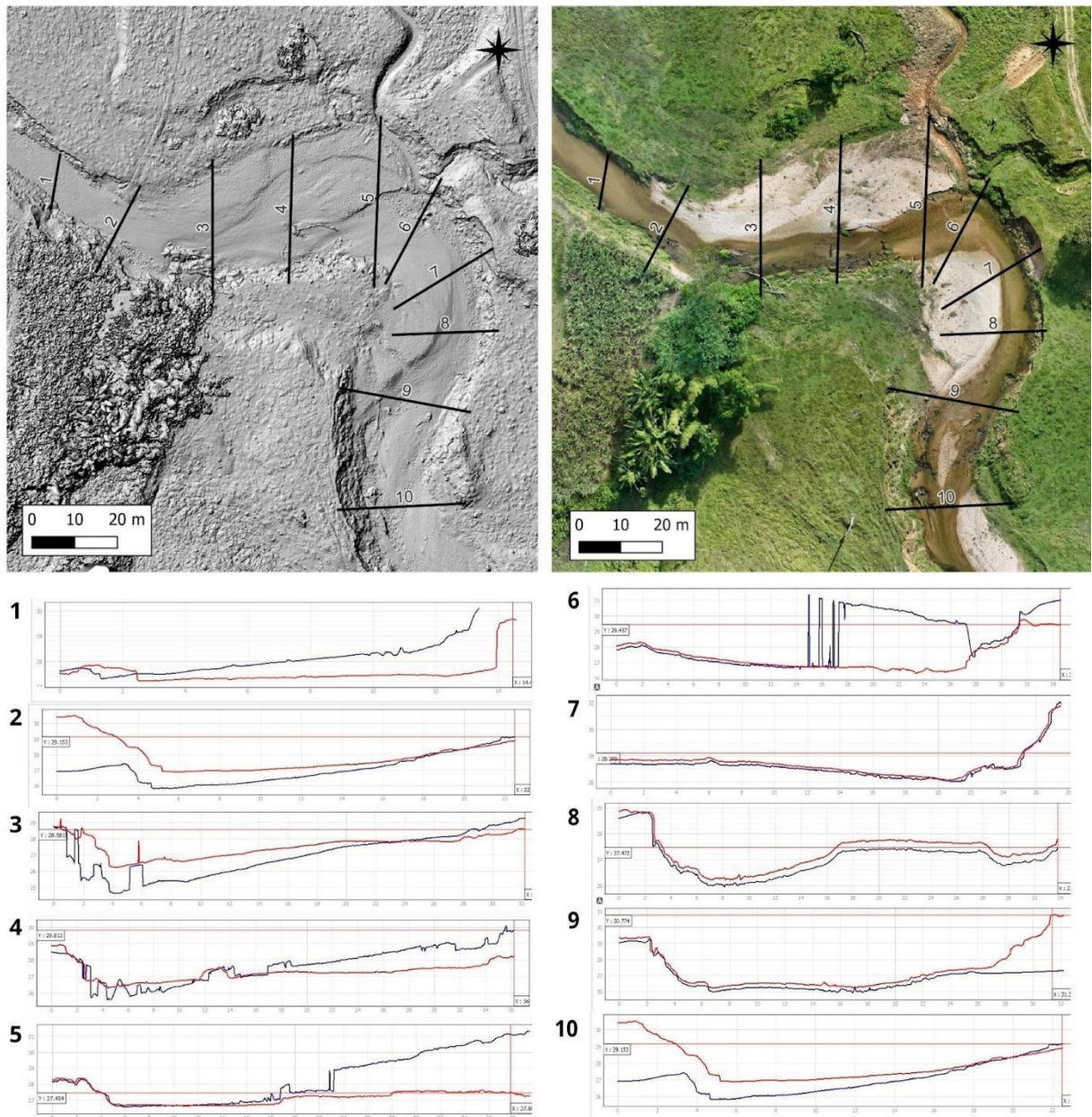
O relatório do voo 2, com altura de voo de 50 metros, apresenta um conjunto mais compacto de dados, composto por 72 imagens que cobriram uma área de 0,02 km<sup>2</sup>. O produto gerado obteve resolução de 1,36 cm/pixel, com DEM em 2,71 cm/pixel e densidade de 0,136 pontos/cm<sup>2</sup>. A etapa de aerotriangulação foi reforçada por sete pontos de controle em solo (GCPs), alcançando erro médio total de aproximadamente 6,8 cm, com valores reduzidos no eixo vertical. A nuvem densa final contou com cerca de 10,9 milhões de pontos, o que representa menor volume de informação em relação ao primeiro voo. Este levantamento se mostra particularmente adequado para análises de detalhe, como a quantificação de mudanças topográficas sutis na morfologia da barra fluvial.

Para representar as diferentes de altitude entre a topografia gerada a partir dos diferentes voos, foram gerados perfis transversais a cada 20 metros utilizando a ferramenta. A Figura 9 mostra os perfis transversais, onde a linha azul representa o



MDT produto do voo de 30 metros e a linha vermelha representa o MDT do voo de 50 metros.

Figura 8 - Comparação entre os MDTs de 30 metros e 50 metros



**Fonte:** Elaborado pela autora (2025).

As mudanças mais significativas dos perfis podem estar relacionadas à condições ambientais e não topográficas. Os voos foram feitos no mesmo dia, mas em horários diferentes, com diferentes condições de luminosidade o que pode influenciar a saturação do pixel e geração do MDT.

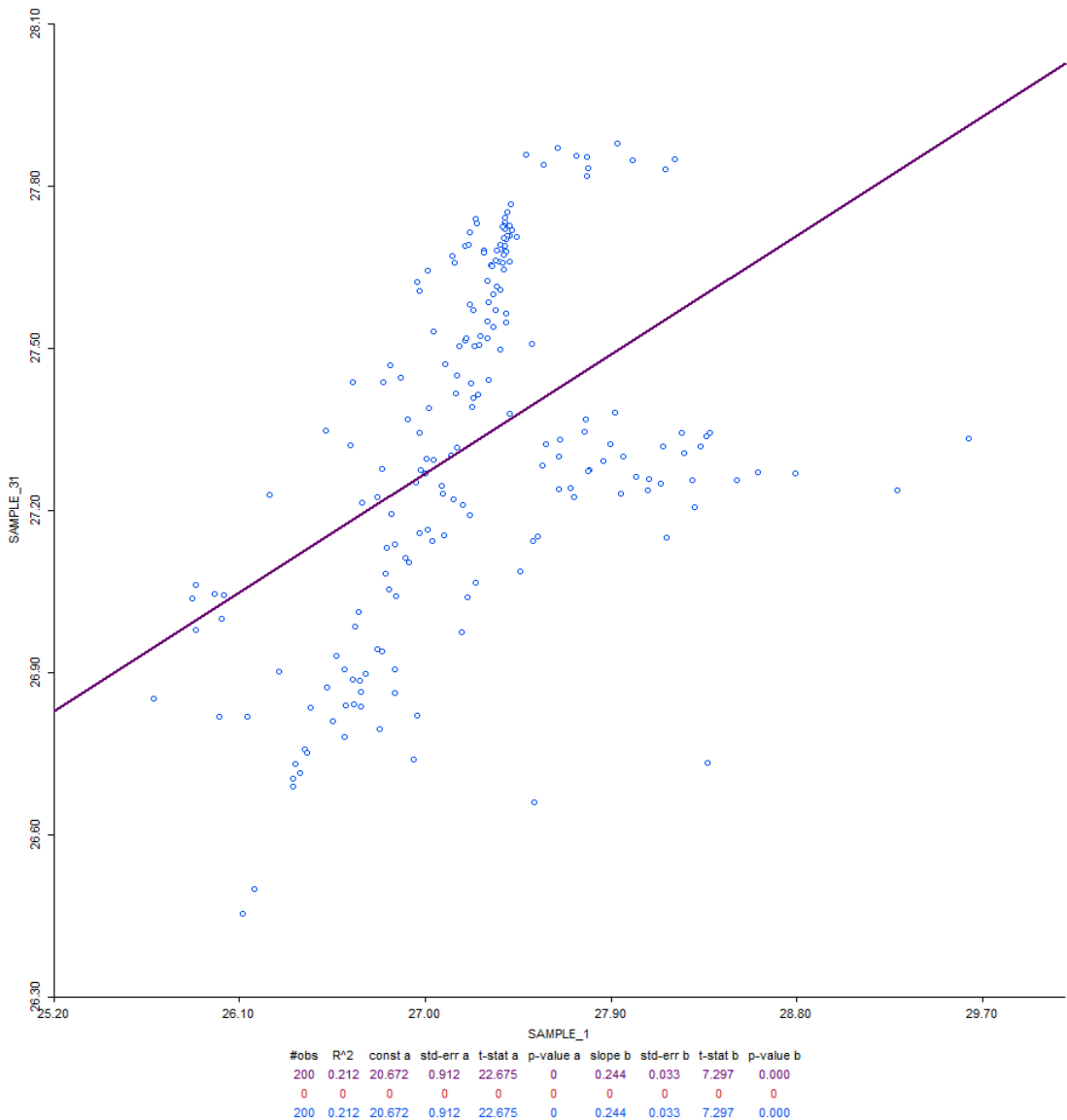
De modo geral, as principais diferenças entre os MDTs são ruídos do voo de 30 metros em comparação ao de 50 metros. Por exemplo, no perfil 6 é possível observar uma diferença de 4 metros entre os MDTs. O que pode ter ocorrido é que como o voo de 30 metros é mais detalhado, possui maior densidade de pontos a resposta do pixel pode ter sofrido interferência ambiental ou uma confusão de pixels. Outros perfis que possuem mais ruídos no MDTs de 30 metros são o 3 e 4, eles podem estar relacionados a detritos rochosos e lenhosos que estão na margem do rio. Também é observável que alguns perfis são semelhantes independentemente da altura de voo como demonstram os perfis 7,8 e 9. Por fim, os dados dos perfis 1, 2, 5 e 10 tem uma pequena semelhança, mas ainda sim são deslocados no eixo y, o que se pode concluir que de certa forma apesar dos ruídos e falhas entre os diferentes MDTs ainda existe uma coerência.

Outra forma de visualizar essa diferença de MDTs foi através de um gráfico de correlação entre os MDTs. Foram inseridos pontos aleatórios no QGIS dentro do limite das barras e amostrados as altitudes do MDT e inseridos no GeoDa. O gráfico 2 representa essa dispersão entre os pontos, cada ponto do diagrama corresponde à comparação da altitude registrada em uma mesma localização para ambos os levantamentos.

Verifica-se a presença de uma tendência linear positiva entre os conjuntos de dados, destacada pela inclinação da reta de regressão. Contudo, o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,212$ ) demonstra que apenas cerca de 21% da variabilidade observada no MDT obtido a 30 m pode ser explicada a partir dos valores provenientes do levantamento realizado a 50 m. Esse resultado indica fraca correlação entre os modelos e sugere ausência de forte concordância altimétrica. Dessa maneira, observa-se que a altura do voo influencia na altimetria, e não há um viés associado há erros sistemáticos, pois o aumento da altura do voo não gerou um aumento linear das altitudes do MDT.

O conjunto de pontos apresenta dispersão considerável em torno da reta ajustada, indicando inconsistências locais entre os modelos. Esses desvios podem estar relacionados a diferenças na densidade e qualidade da nuvem de pontos, ao processo de interpolação, assim como à interferência de elementos ambientais na hora dos diferentes voos, como o ângulo de incidência solar, ventos, nebulosidade.

Gráfico 2 - Dispersão entre os MDTs obtidos através dos voos de 30 e 50 metros.



Fonte: Elaborado no software GeoDa pela autora (2025).

De modo geral, os resultados demonstram que, apesar de existir relação linear positiva entre os MDTs, os dois levantamentos apresentam baixa equivalência altimétrica. Consequentemente, recomenda-se cautela ao utilizar um modelo como substituto ou equivalente do outro, sendo aconselhável aprofundar a análise por meio de validação com pontos de controle e verificação de possíveis fontes de erro associadas ao processo de aquisição e processamento dos dados.

Dessa forma, infere-se que para o presente trabalho o levantamento aerofotogramétrico com maior altura de voo foi o ideal, pois a partir dele foi possível

fazer os processamentos em tempo reduzido sem perda de qualidade do produto final. Como a finalidade do trabalho é identificar o sistema de barras, em ambas as alturas foi possível observar. Porém, notou-se que como resultado dessa aplicação de diferentes altitudes de voo impactam apenas na dimensão espacial do voo. Também se conclui que para essa estrutura geomorfológica o voo de menor altitude com maior GSD atrapalhou alguns processamentos e etapas da pesquisa. O tempo de processamento aumenta conforme o nível de detalhe do levantamento, sendo assim, não é necessário esse detalhamento para esse estudo.

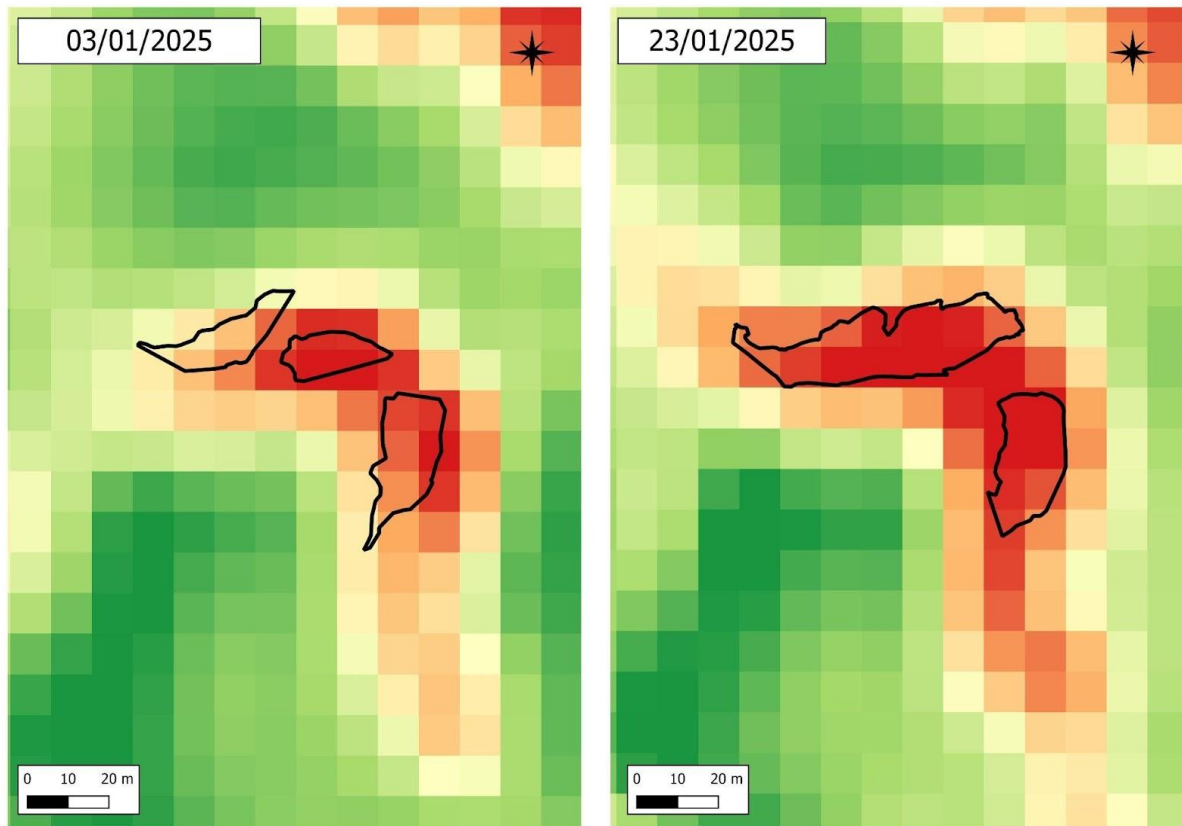
## 5.2 ÍNDICES ESPECTRAIS E EFEITO DE ESCALA

A escolha do índice espectral adequado depende do objetivo do estudo, do tipo de sensor utilizado e da disponibilidade de bandas espectrais. Índices que empregam o infravermelho próximo (NIR), como NDVI e EVI, são obtidos a partir de sensores multiespectrais de satélites, como o Sentinel-2. Dessa forma, esses foram os índices escolhidos para mapear o sistema de barras utilizando o NDVI e o EVI, esperando que eles pudessem mostrar alguma resposta espectral diferente dependendo da assinatura espectral dos alvos.

A análise inicia em comparar os índices entre si mas em épocas diferentes, uma quando o sistema de barras possui 3 barras no início de janeiro e a outra quando o sistema era constituído de apenas 2 barras no final de janeiro.

Os primeiros resultados em imagens de média resolução são dos índices NDVI e EVI. Ambos, por se tratarem de média resolução espectral, são muito genéricos. É possível diferenciar apenas as áreas de vegetação e as áreas que não são vegetação.

Figura 9 - Índice NDVI de 03 e 23 de janeiro de 2025

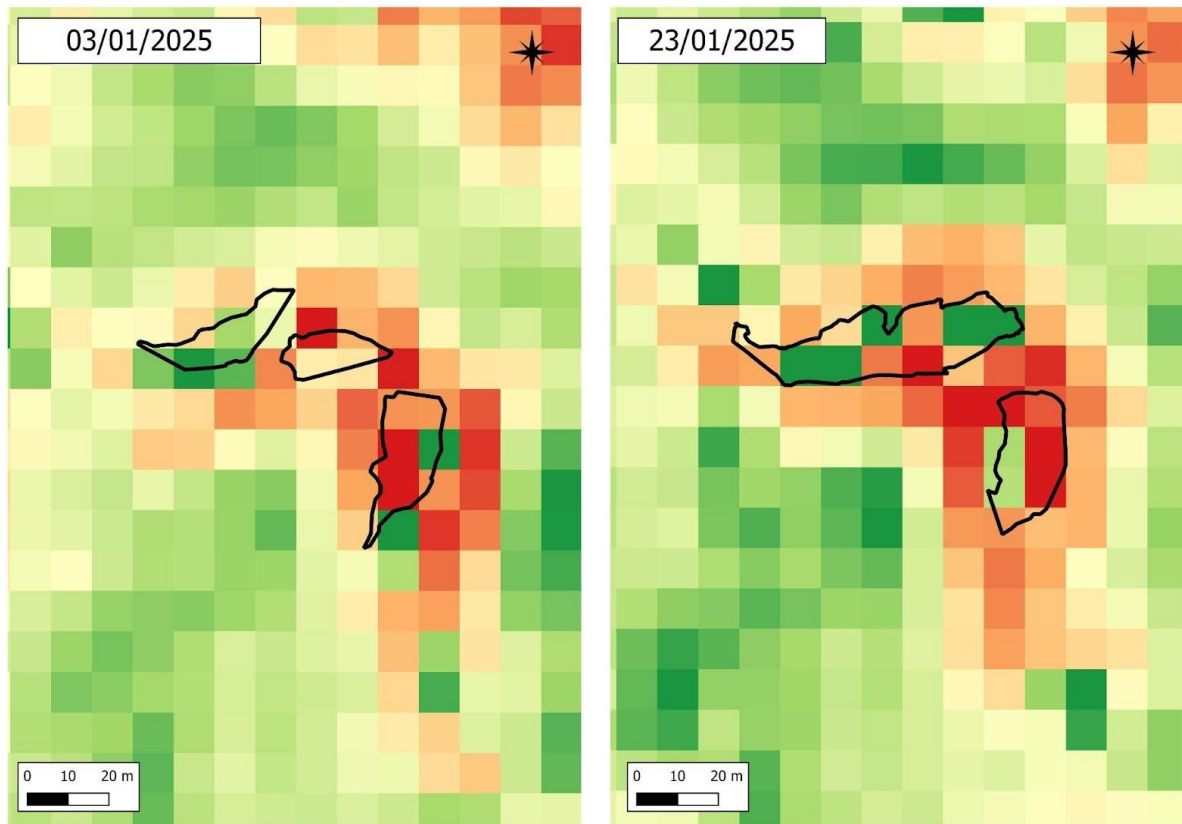


Fonte: Dado elaborado pela autora a partir dos dados do aerolevantamento. (2025)

A Figura 9 retrata o canal e as barras fluviais em vermelho, pois o índice fica perto do número negativo e os pixels verdes retratam a vegetação, quanto mais verde mais sadia e mais densa a vegetação. Mesmo assim, existe muita confusão espectral no índice NDVI, sendo difícil separar as delimitações do ambiente fluvial como as barras, o canal e a margem.

A Figura 10 abaixo mostra o índice EVI para as barras. Ao contrário do NDVI que possui pixels homogêneos, no EVI é possível notar uma heterogeneia no local de estudo. Em ambas as datas algumas partes das barras possuem dados positivos, indicando uma certa confusão do índice para caracterizar as barras.

Figura 10 - Índice EVI de 03 e 23 de janeiro de 2025



Fonte: Dado elaborado pela autora a partir dos dados do aerolevantamento. (2025)

A técnica de *upsampling* é relativamente recente no campo do sensoriamento remoto e consiste em um procedimento matemático derivado do processamento digital de imagens, no qual novos pontos de dados são gerados a partir de informações previamente existentes, aumentando a densidade amostral. Diferencia-se do processo de *upsampling*, no qual a conversão de uma resolução espacial mais baixa para uma mais alta ocorre por meio de algoritmos que interpolam e preenchem os novos pixels, sem necessariamente incorporar maior riqueza espectral ou estrutural à cena (DONG et al., 2016).

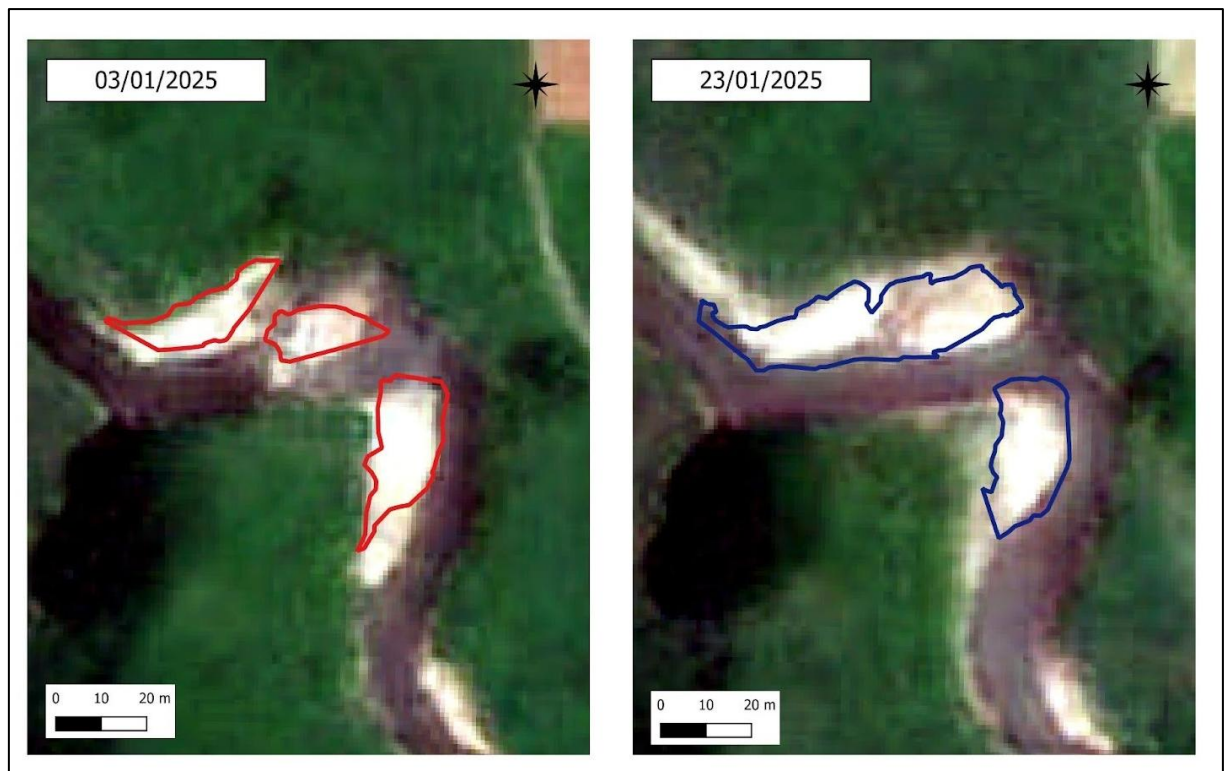
As imagens empregadas neste estudo foram submetidas a um processo de super-resolução espacial por meio do método S2DR3 – Sentinel-2 *Deep Learning Super Resolution* 3.0, desenvolvido pela empresa Gamma Earth. Esse procedimento baseia-se na aplicação de redes neurais convolucionais (CNNs), que permitem realizar o *upsampling* e o consequente aprimoramento da qualidade espacial de todas as 12 bandas espectrais provenientes de uma cena Sentinel-2 L2A (ou L1C).



A técnica parte das resoluções originais disponibilizadas pelo satélite (10 m, 20 m e 60 m por pixel) e as integra de forma a gerar um produto final com resolução espacial de 1 m por pixel, ampliando, assim, a capacidade de detalhamento e a acurácia nas análises da área de estudo.

Assim, a Figura 11 abaixo demonstra como é possível observar, com certa facilidade, as diferentes morfologias dos sistemas de barras. Na composição da figura foi colocada a delimitação de ambos os sistemas de barras, os quais foram mapeados a partir das ortofotos geradas anteriormente.

Figura 11 - Imagens do Sentinel-2 de 03 e 23 de janeiro de 2025 com a técnica de upsampling, resolução de 1 metro



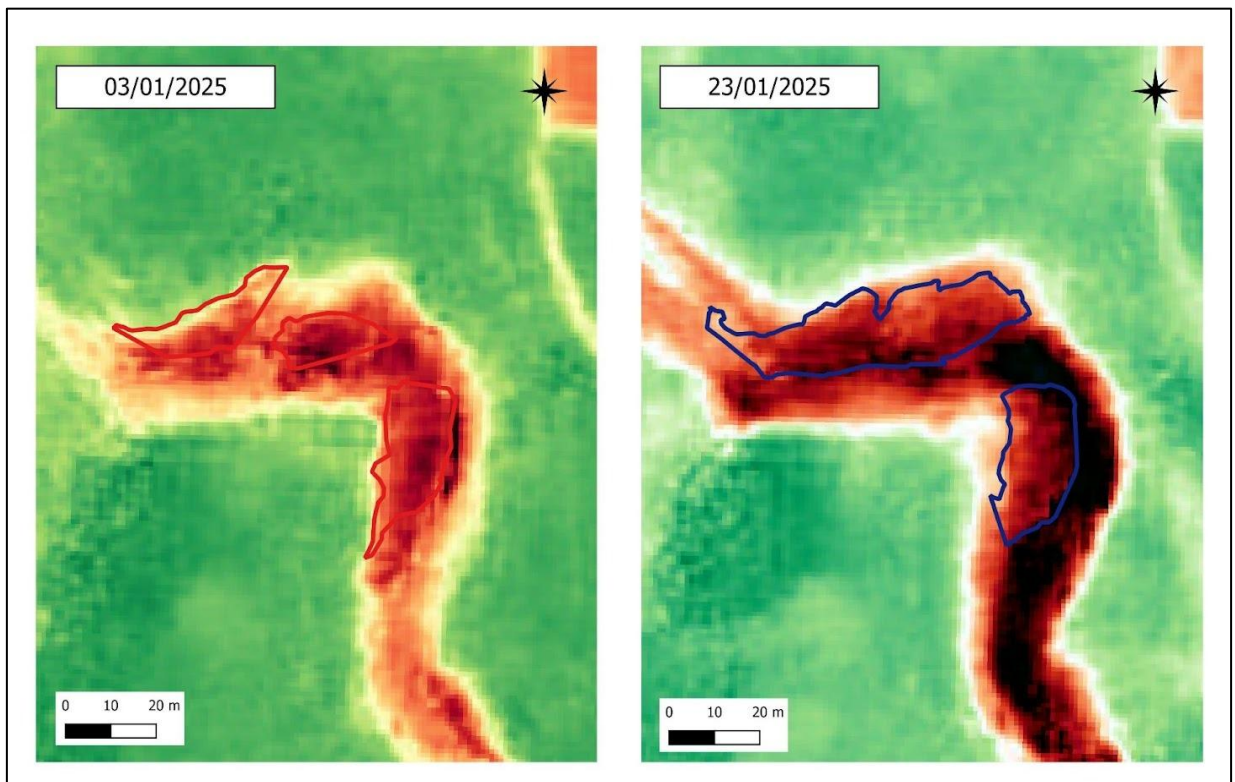
Fonte: Imagem feita a partir do upsampling. Autora, 2025.

Através dessa técnica também foi possível confirmar que as mudanças ocorridas nessa escala temporal têm associação com o evento extremo ocorrido em janeiro de 2025. Nesse sentido, apesar de um leve deslocamento entre a delimitação e a imagem, é visível que esse fenômeno mudou a configuração do canal, do sistema de barras e da margem. Assim, a técnica de *upsampling* pode ser utilizada para identificar mudanças na paisagem e posteriormente pode ser

relacionada com algum evento extremo, tornando-se assim uma ferramenta útil para o mapeamento e definição de áreas de risco.

No mesmo ambiente de desenvolvimento no Google Colab, é possível acessar outras composições espectrais e diferentes bandas, mantendo-se a mesma resolução espacial. A Figura 12 apresenta o NDVI gerado a partir do código, evidenciando também as alterações ocorridas após o evento extremo.

Figura 12 - NDVI do Sentinel-2 de 03 e 23 de janeiro de 2025 com a técnica de *upsampling*, resolução de 1 metro



Fonte: Imagem feita a partir do upsampling. Autora, 2025.

A Figura 12 permite distinguir o canal fluvial da cobertura vegetal e identificar, pelos diferentes tons de vermelho, as mudanças morfológicas resultantes do evento extremo. Entretanto, mesmo com a resolução espacial aprimorada para 1 metro, o NDVI não oferece precisão suficiente para delimitar o sistema de barras fluviais. Assim, em ambas as escalas disponibilizadas pelo Sentinel-2, o mapeamento das barras por meio deste índice mostra-se inviável. Por outro lado, utilizando-se a



composição de cor verdadeira (RGB), torna-se possível delinear o sistema de barras, ainda que com baixa precisão.

### 5.3 ÍNDICES ESPECTRAIS DE ALTA RESOLUÇÃO

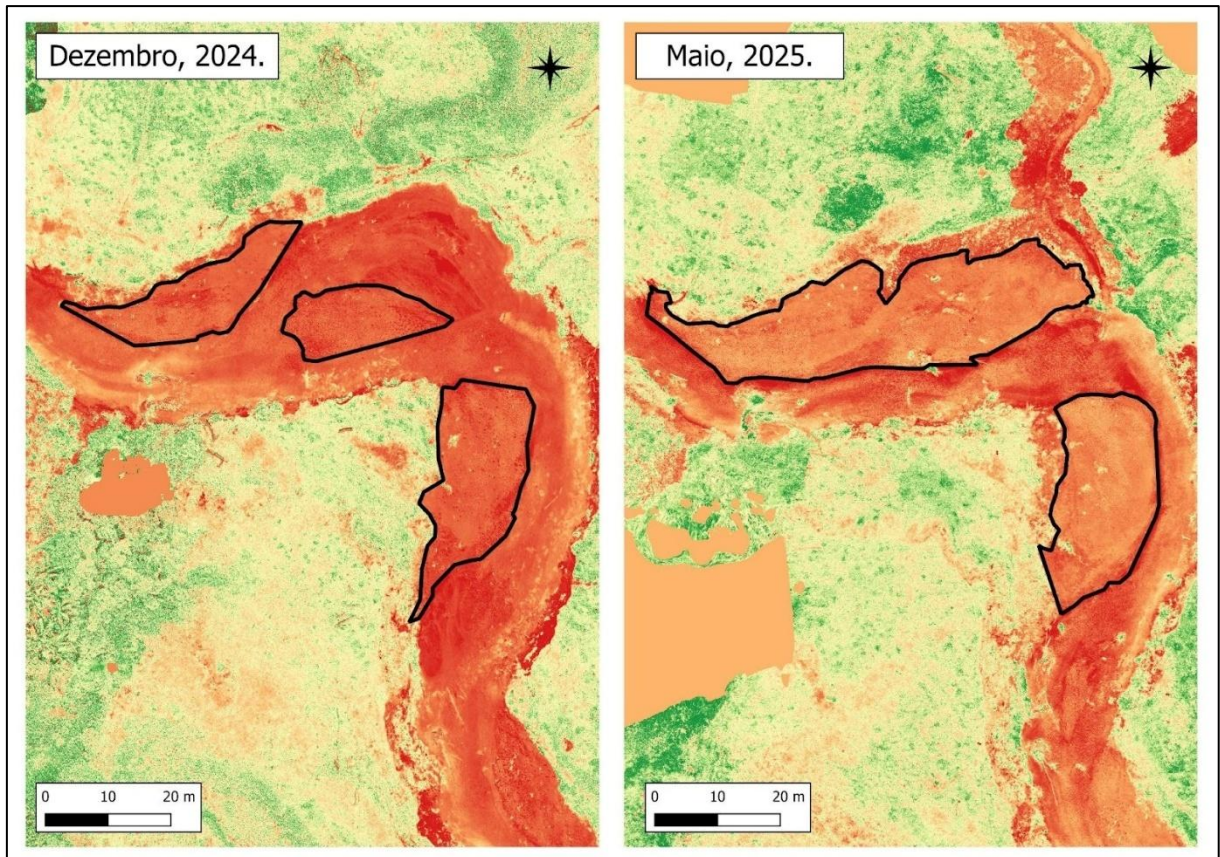
Ambos os índices não foram precisos para a identificação das barras, devido a resolução espectral da imagem Sentinel pois, cada pixel é equivalente a 10m<sup>2</sup>. Assim, como as barras não são extensas, a resposta espectral do pixel se mistura deixando incerto os alvos espectrais e seus respectivos retornos. O NDVI se saiu melhor no quesito separar o que é vegetação ou não, mas o EVI não foi tão preciso.

Já índices que utilizam apenas bandas do visível, como ViGreen e VARI, podem ser derivados de imagens captadas por drones com câmeras RGB. Os índices foram calculados para datas diferentes,

Os índices aplicados às imagens de alta resolução captadas pelo drone foram mais assertivos. Nelas é possível observar a formação das barras, o canal fluvial, os desníveis do terreno e a vegetação.

O VARI visualmente, retratado na Figura 13, conseguiu separar os diferentes alvos, porém deixa ressalvas na parte de separar o canal das barras, sendo assim, sem os limites feitos a partir das ortofotos é difícil identificar o que é o canal e o que são as barras. No que se refere à resolução espacial das imagens, não houve mudança significativa na identificação.

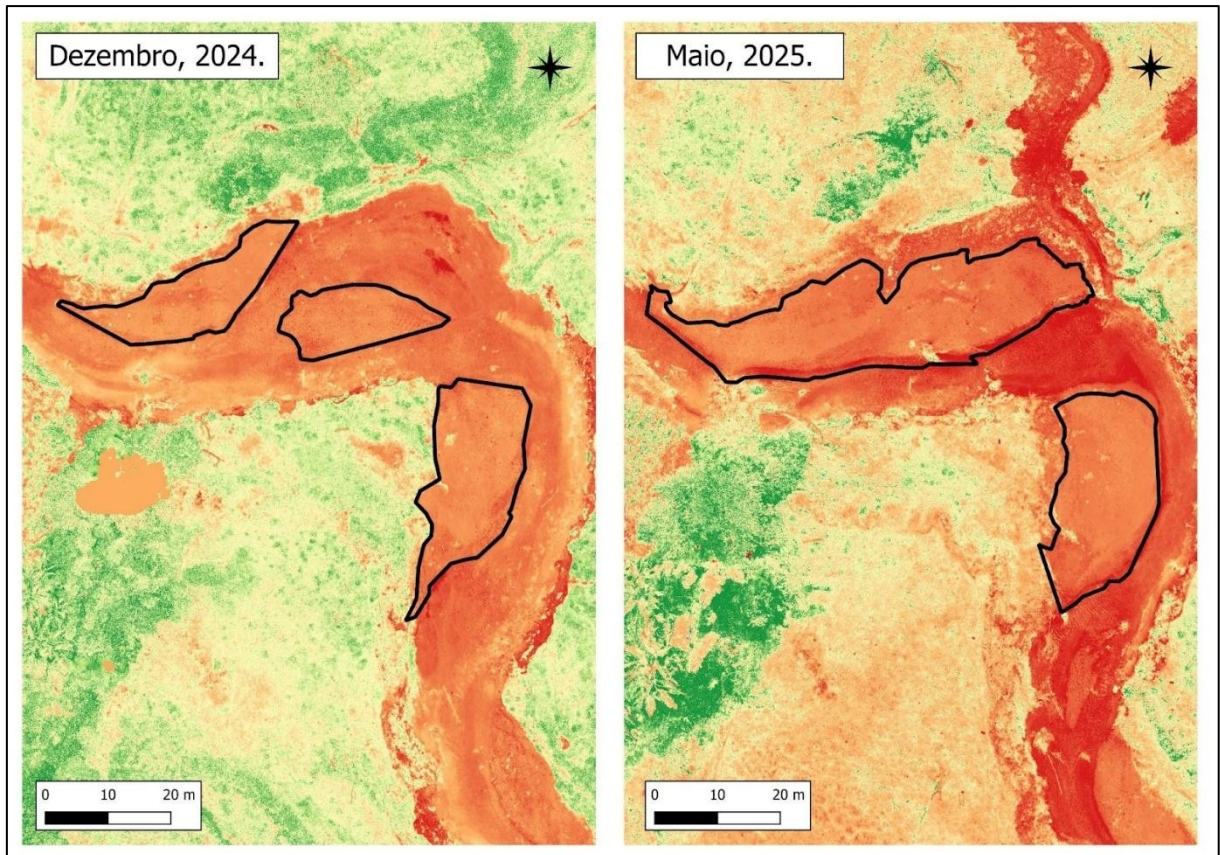
Figura 13 - Índice VARI para 30 metros em dezembro e maio



Fonte: Dado elaborado pela autora a partir dos dados do aerolevanteamento. (2025).

No ViGreen, representado pela Figura 14, na figura de dezembro, as barras fluviais delimitadas apresentam predominantemente tons vermelhos, correspondentes a valores baixos de ViGreen, o que indica areia exposta e ausência de cobertura vegetal. Pequenas manchas amareladas sugerem no início da vegetação alguns trechos, mas de forma ainda incipiente. Já em maio de 2025 observa-se uma expansão clara das áreas em tons vermelhos e alaranjados dentro das barras, sinalizando aumento da superfície arenosa exposta. Em contrapartida, nota-se maior diferenciação entre margens verdes e barras abertas, o que reforça a ideia de que essas feições estão em processo ativo de expansão geomórfica, mas ainda com baixa estabilização vegetal.

Figura 14 - Índice ViGreen para 30 metros em dezembro e maio



Fonte: Imagem feita a partir dos dados do aerolevantamento. Autora, 2025.

A comparação temporal evidencia que, entre dezembro de 2024 e maio de 2025, as barras aumentaram de área, mas mantiveram baixos valores de vegetação, caracterizando um processo típico de renovação fluvial em barras móveis sujeitas à deposição e erosão sazonais.

Foram traçados perfis para visualizar as respostas espectrais nos diferentes índices aplicados no drone, porém não foi observado nenhuma diferença significativa que consiga distinguir um índice do outro. Ademais, por esse perfil também não é possível diferenciar os alvos espectrais.

#### 5.4 GEOMORPHIC CHANGE DETECTION

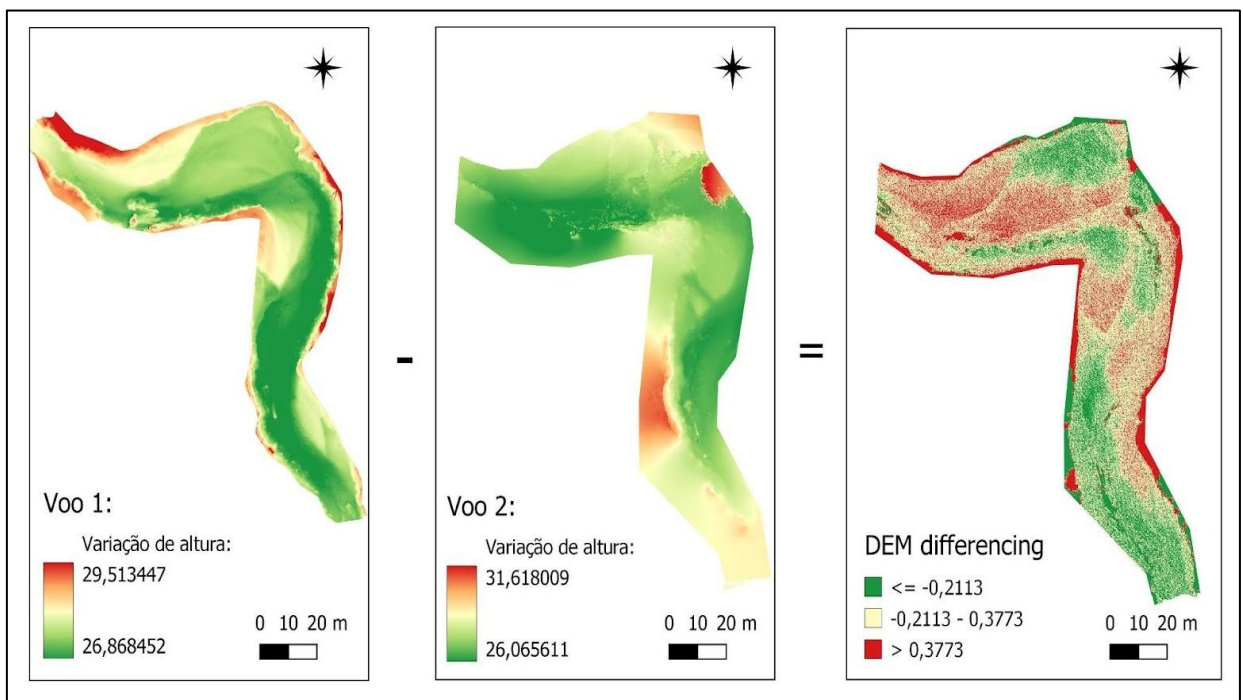
O software utilizado para calcular as diferenças topográficas é o *Geomorphic Change Detection (GSD)*, assim, os dados de entrada foram os Modelos Digitais de Terreno (MDT) obtidos no processamento de ambos os voos. As diferenças



calculadas levam em consideração a altitude de cada ponto do MDT, ela é feita tanto para o volume quanto para a área. O *Dem Differencing* é o cálculo da diferença entre os Modelos Digitais de Terreno (MDT). O método é feito no software *Geomorphic Change Detection*, ele estima a inclinação e a direção de um terreno a partir de um Modelo Digital de Terreno (MDT), onde as elevações são calculadas como o gradiente da função de elevação em cada pixel ou ponto do terreno, utilizando parciais para obter a magnitude da inclinação e a direção mais íngreme.

A partir disso, a Figura 15 foi desenvolvida, ela retrata os dois MDTs de dezembro e de janeiro e depois a diferença. Analisando é possível ver que as partes em verde foram os lugares que perderam altitude enquanto as vermelhas são as que ganharam altitude.

Figura 15 - Diferença dos Modelos Digitais de Terreno (MDT)

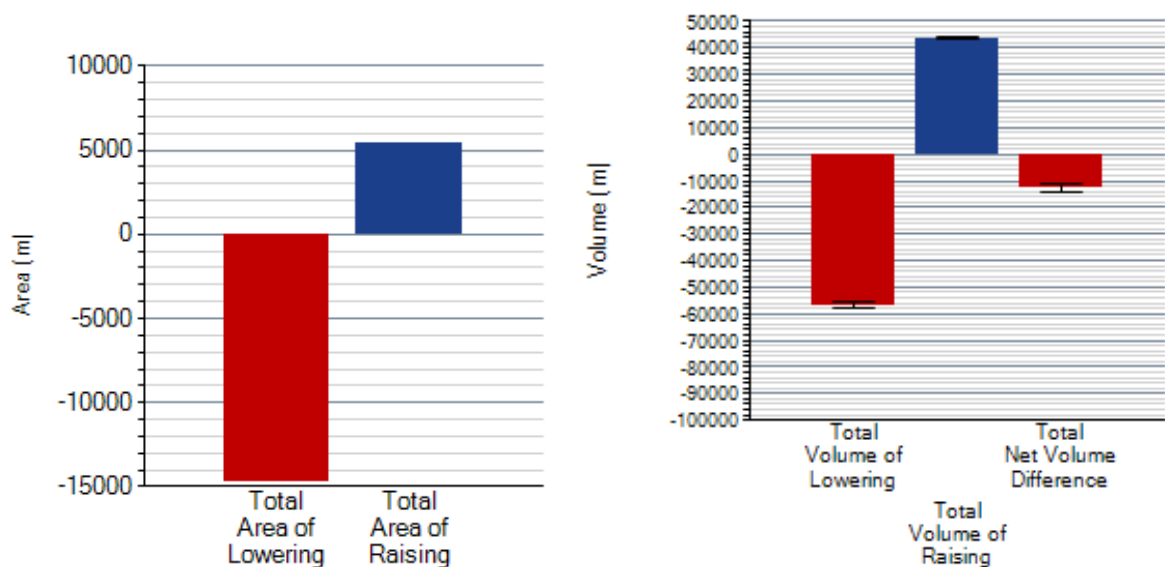


Fonte: Imagem feita a partir dos dados do aerolevantamento. Autora, 2025.

Nesse sentido, o uso do *Dem Differencing* foi eficiente, pois através desta ferramenta foi possível observar as mudanças mais significativas ocorridas no canal e no sistema de barras. Também como foi possível observar com melhor detalhamento as diferenças e similaridades ocorridas no sistema fluvial da área de estudos.

Após várias aplicações estatísticas no software, foram obtidos resultados congruentes com os aspectos visuais. Foram feitos testes estatísticos e conclui-se que os diferentes métodos de amostrar e reamostrar os dados decorrem nos mesmos resultados. Assim, no gráfico abaixo exprime os seguintes dados. Os gráficos são divididos em área e volume, os números trabalhados são os dados absolutos.

Gráfico 3 - Dados da diferença entre as áreas dos MDT's



Fonte: Imagem feita a partir dos dados do aerolevantamento. Autora, 2025.

No Gráfico 3 do lado esquerdo, é possível observar que ocorreu uma mudança de área significativa pois foram perdidos cerca de 15.000m<sup>2</sup> de área e ganhou cerca de 5.500m<sup>2</sup> de área, dando um balanço negativo o que resulta em uma perda de cerca de 9.500m<sup>2</sup> de área do sistema fluvial completo, tanto no canal como nas barras. Mas visualmente é possível interpretar que as barras foram as formas que mais se modificaram.

Já do lado direito que demonstra os dados de volume, ocorreu uma mudança considerável. Ele demonstra que foram perdidos cerca de 57.500m<sup>3</sup> de volume e ganhou-se cerca de 45.000m<sup>3</sup>. Sendo assim, no volume total do canal fluvial foram perdidos 12.500m<sup>3</sup> de volume.

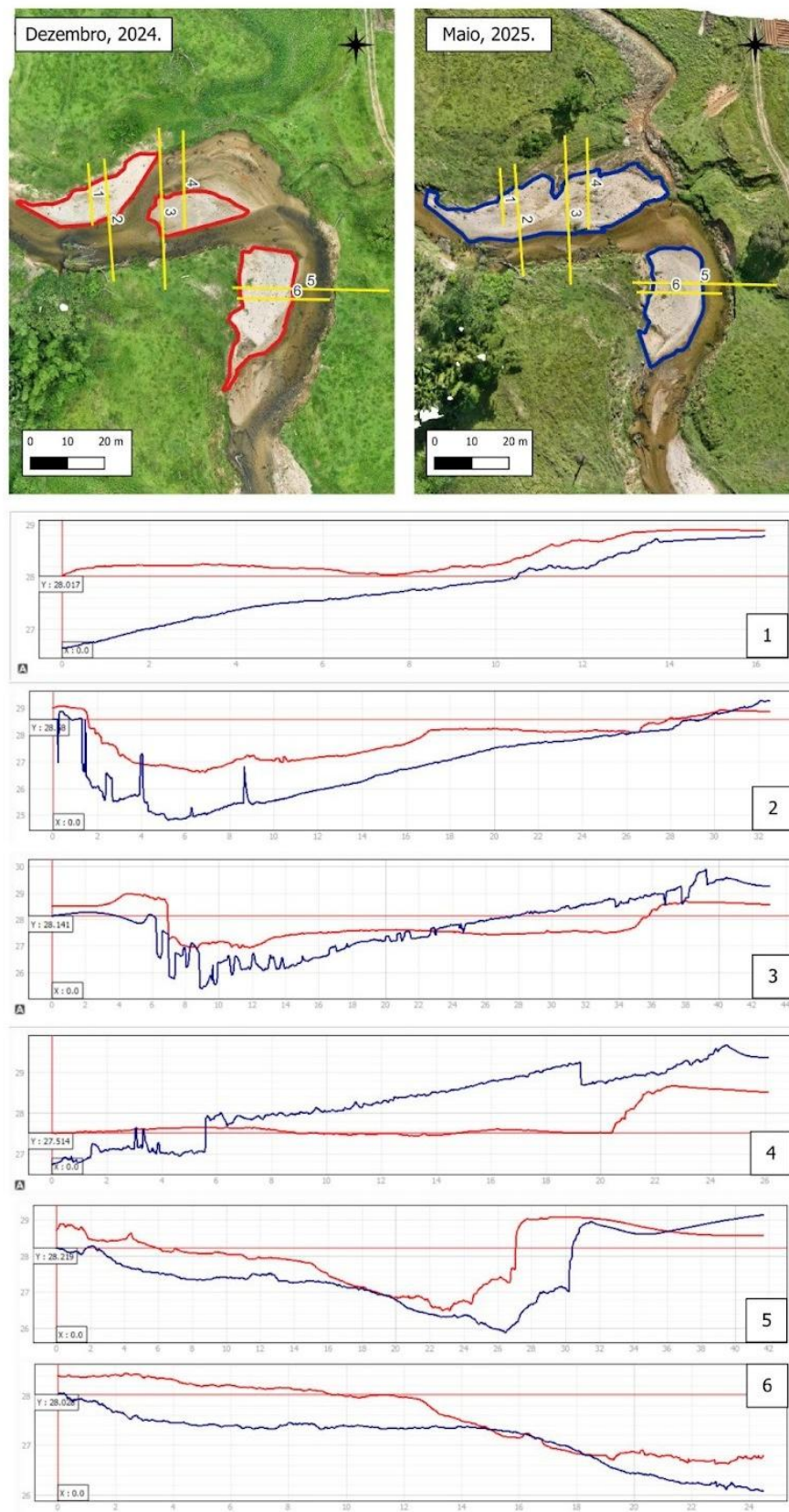
Deste modo, é possível verificar que na área de estudos ocorreram mudanças significativas, não apenas visualmente, mas também numericamente. Sendo assim, conclui-se que utilizar o software *Geomorphic Change Detection (GSD)* é positivo para mensurar as diferenças ocorridas entre dois dados topográficos em datas diferentes.

Para mostrar as mudanças também foi feito perfis topográficos de diferentes pontos no sistema de barras, utilizando o modelo digital de terreno (MDT) no software *Qgis*. Assim foi dividido em duas escalas temporais o qual, a cor azul representa o voo em dezembro de 2024 e o vermelho representa o voo 2 realizado em maio de 2025. De modo geral observa-se a ocorrência de processos de erosão das margens, incisão do leito e deposição de sedimentos, caracterizando a dinâmica hidrogeomorfológica de canais ativos.

Seis pontos foram espalhados pela imagem levando em consideração as diferenças topográficas e temporais. Dessa forma, não foi possível estabelecer um padrão de ocorrências. A Figura 16 ilustra os perfis e os gráficos que retornaram.

No perfil 1, observa-se que entre dezembro de 2024 e maio de 2025 ocorreu um rebaixamento da superfície topográfica, indicando erosão da barra lateral e incisão do leito. No perfil 2, a linha referente a maio de 2025 apresenta maior rugosidade e oscilações abruptas, que sugerem tanto aprofundamento do canal quanto a presença de ruídos altimétricos decorrentes do levantamento fotogramétrico. No perfil 3, verifica-se comportamento semelhante ao anterior, com instabilidade da curva azul e indícios de remoção de material e maior rugosidade do leito. No perfil 4, nota-se o rebaixamento no centro do canal associado ao acúmulo de sedimentos em setores marginais, o que evidencia a formação de barras arenosas. No perfil 5, a análise mostra incisão fluvial mais pronunciada em maio de 2025, indicando maior profundidade do leito e ajustes laterais nas margens. No perfil 6, constata-se um declive mais acentuado na curva azul, sugerindo intensificação do processo de aprofundamento do canal em relação ao período anterior.

Figura 16 - Dados da diferença entre as áreas dos MDT's



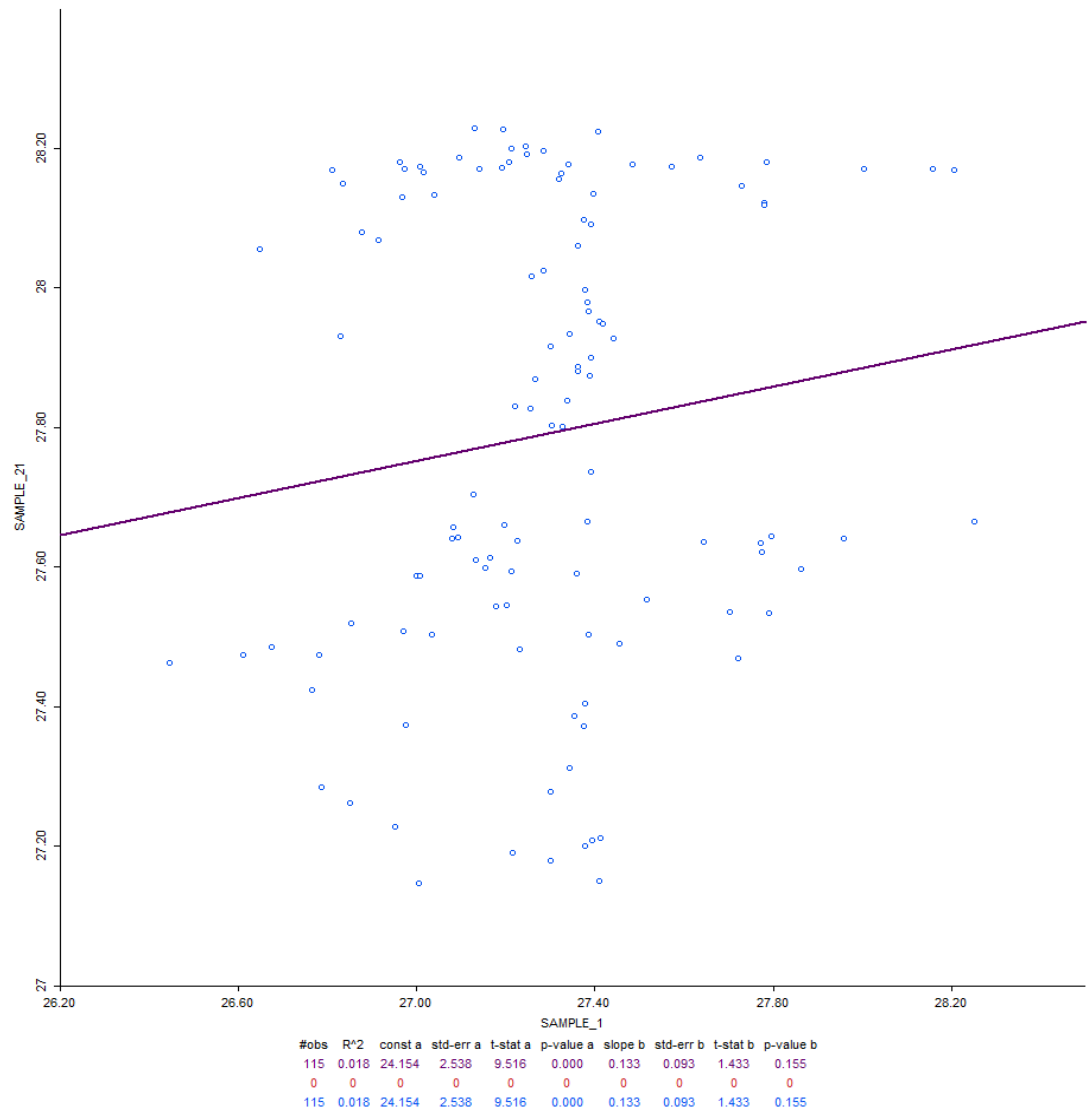
Fonte: Imagem feita a partir dos dados do aerolevantamento. Autora, 2025.

Ainda assim, a análise evidencia que, entre dezembro de 2024 e maio de 2025, o canal passou por ajustes morfológicos expressivos, com erosão de margens, incisão do leito e redistribuição de sedimentos em forma de barras arenosas, caracterizando um sistema dinâmico e altamente responsivo às variações hidrossedimentológicas. Esses resultados ressaltam não apenas a relevância dos processos naturais de remodelação do canal, mas também a necessidade de aprimoramento metodológico no uso de drones e seu processamento, como utilizar técnicas de filtragem altimétrica que minimizem as distorções geradas pelo levantamento em áreas de elevada complexidade geomorfológica.

No Gráfico 4, é representada a dispersão dos MDTs de 30 metros entre dezembro e maio. O gráfico de dispersão entre os dois Modelos Digitais do Terreno (MDTs), representa uma distribuição ampla e pouco estruturada dos pontos, indicando baixa associação linear entre as superfícies. A dispersão observada ao longo do plano cartesiano demonstra que os valores altimétricos obtidos em *SAMPLE\_1* não apresentam correspondência consistente com aqueles registrados em *SAMPLE\_2*, mostrando que existe uma grande diferença altimétrica entre os dois voos, o que pode indicar a mudança ocorrida após o evento extremo.



Gráfico 4 - Dispersão entre os MDTs de 30 metros de dezembro e maio.



Fonte: Elaborado no software GeoDa pela autora (2025).

Os resultados estatísticos corroboram essa interpretação: o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,018$ ) revela que apenas 1,8% da variabilidade do MDT mais recente é explicada pelos valores do MDT anterior, enquanto a inclinação da regressão ( $b = 0,133$ ) permanece baixa e estatisticamente não significativa ( $p > 0,05$ ). Esses indicadores demonstram que a relação linear entre os modelos é fraca e insuficiente para inferir equivalência ou estabilidade altimétrica entre as duas datas de aquisição. Esse comportamento é resultado do evento extremo ocorrido em janeiro de 2025, o qual modificou a paisagem fluvial

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a evolução de um sistema fluvial utilizando variadas técnicas de sensoriamento remoto orbital e suborbital, utilização de drone e GNSS para levantamento de dados em campo, imagens de satélite Sentinel-2, técnicas de *upsampling* para o satélite Sentinel-2 e processamento de modelos digitais de terreno. A área de enfoque é um sistema de barras no Rio Biguaçu, o qual possui uma dinâmica hidrogeomorfológica reativa a eventos extremos, como o caso da chuva de Janeiro de 2025.

Os objetivos que nortearam esta pesquisa foram atingidos de forma satisfatória. A análise da influência da altitude de voo revelou que, ainda que com uma menor altitude de voo se obtenha um maior detalhamento espacial, uma maior resolução não ampara o aumento de tempo de processamento dos dados. Por conseguinte, os voos a 50 metros de altitude foram adequados para a morfologia analisada no trabalho, assim como a quantidade de pontos coletados pelo GNSS em ambas as atividades em campo. O uso dos índices espectrais baseados nas imagens de satélites orbitais (NDVI e EVI) revelaram que pela resolução espacial das imagens não foi possível distinguir as barras nem o canal com muita precisão. Ao contrário dos índices aplicados com as imagens suborbitais do drone (VARI e ViGreen) que demonstraram maior eficácia na identificação e diferenciação das morfologias. O teste com a técnica de *upsampling* se mostrou positivo para melhorar a resolução espacial das imagens orbitais, permitindo assim uma análise mais precisa e exata do sistema fluvial, porém com a utilização do NDVI não é possível mapear a área de estudo. A utilização do *Geomorphic Change Detection (GCD)* confirmou-se como uma ferramenta precisa na detecção e quantificação das mudanças geomórficas, contabilizando as perdas e ganhos expressivos no período de tempo fornecido e analisado.

Os resultados indicam que o sistema de barras do Rio Biguaçu possui alta dinâmica marcado por processos simultâneos de erosão, deposição e redistribuição sedimentar, que se intensificam diante de eventos extremos. Esse desempenho evidencia a relevância de um monitoramento frequente, tanto para a finalidade acadêmica quanto para apoiar as políticas públicas de gestão de riscos e uso e

ocupação do solo. Isso deve-se ao fato de que variações abruptas na geomorfologia fluvial podem impactar diretamente comunidades em zonas agrícolas.

Já no ponto de vista da metodologia, essa pesquisa contribui ao revelar que é viável associar diferentes escalas de análise, como imagens suborbitais e orbitais e usar técnicas atuais, como a técnica de *upsampling* e a aplicação dos índices espectrais para as imagens de drone. Porém, é indispensável reconhecer algumas limitações do presente estudo. Como a falta de um regulamento único e universal para o mapeamento do sistema de barras e os ruídos altimétricos na obtenção dos modelos de terreno. Esses obstáculos destacam a relevância de futuros estudos que investiguem metodologias de mapeamento, aprimoramento de técnicas de filtragem e calibração do sensor.

Este trabalho se configurou como um estudo fundamentalmente experimental, alicerçado em uma abordagem metodológica exploratória. Essa natureza exploratória se manifestou no teste de diferentes parâmetros, como a análise da influência da altitude de voo nos parâmetros topográficos, e na verificação da eficiência de índices espectrais (como VARI e ViGreen) para a identificação e diferenciação das morfologias fluviais. Adicionalmente, o estudo explorou a aplicação de técnicas recentes, como o *upsampling*, que se demonstrou positivo para aprimorar a resolução espacial das imagens orbitais. A utilização do *software* Geomorphic Change Detection (GCD) foi crucial para aplicar a técnica *Dem Differencing* e quantificar as mudanças geomórficas, confirmando sua precisão na detecção das transformações ocorridas no sistema fluvial. Essa metodologia contribui ao demonstrar a viabilidade de associar diferentes escalas de análise (orbitais e suborbitais) e de aplicar técnicas atuais no monitoramento de sistemas fluviais.

A contribuição científica do presente estudo destaca a importância das barras fluviais como uma forma de sinalizar alguns processos geomorfológicos, além de enfatizar a necessidade de integrar e aplicar as novas tecnologias no monitoramento e na universidade. Na prática, alguns resultados podem apoiar autoridades como a defesa civil, fornecendo dados para prever impactos e gerenciar as bacias hidrográficas de forma consciente e sustentável.

Em suma, conclui-se que a pesquisa cumpriu seus objetivos ao fornecer uma análise abrangente e metodologicamente inovadora na evolução do sistema de barras fluviais. Ademais, demonstrou que a combinação de diversas técnicas de sensoriamento remoto, aerofotogrametria e análise geomórfica possui uma grande capacidade para ampliar a compreensão e a aplicação prática dos resultados. Sugere-se a continuidade das saídas e pesquisas em campo, utilizando séries temporais desenvolvidas e extensas, expandido as áreas de estudo e integrando diversas variáveis. Isso permite a consolidação de protocolos que combine solidez técnica e aplicabilidade em diversos contextos geográficos.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, C. A.** Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, v. 12, n. 1, p. 11-32, 2006.
- BRUNSDEN, D.** Geomorphological events and landform change. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 40, n. 3, p. 273 – 288, 1996.
- CARRIVICK, Jonathan L.; SMITH, Mark W.** Fluvial and aquatic applications of Structure from Motion photogrammetry and unmanned aerial vehicle/drone technology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 6, n. 1, p. e1328, 2019. <https://doi.org/10.1002/wat2.1328>
- CHRISTOFOLETTI, A.** *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.
- CHRISTOFOLETTI, A.** *Geomorfologia Fluvial*. v. 1. São Paulo: Edgar Blücher, 1981. 297p.
- COELHO, J. M.; LYRA, L. H. B.; PEREIRA, L. A.; FRANÇA, L. F. O.; CALADO, D. V.** Mapeamento e evolução das barras fluviais na margem esquerda da Ilha do Maroto, Alto Submédio São Francisco. In: *XII SINAGEO – Simpósio Nacional de Geomorfologia*, Crato/CE, 2018.
- DONG, Chao; LOY, Chen Change; HE, Kaiming; TANG, Xiaoou.** Image super-resolution using deep convolutional networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 38, n. 2, p. 295–307, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2439281>.
- GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D.** Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, v. 80, n. 1, p. 76-87, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9).
- GUIMARÃES, J. A.; HUMANN, M. C.** A ciência brasileira no SCI: análise do desempenho de 1981 a 2002. *Ciência e Cultura*, v. 57, n. 4, p. 16-19, 2005.
- JAUD, M.; KERVOT, M.; DELACOURT, C.; BERTIN, S.** Potential of Smartphone SfM Photogrammetry to Measure Coastal Morphodynamics. *Remote Sensing*, v. 11, n. 19, p. 2242, 2019.

**JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.** Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>.

**KREMER, R.** Datas históricas de Antônio Carlos: 1830 – 1992. Florianópolis: Papalivros, 1993.

**LETA, J.** Indicadores bibliométricos na análise da pesquisa científica. *Textos para Discussão FIOCRUZ*, v. 1, n. 1, p. 1-25, 2012.

**HART, M. G.** Geomorphology: Pure and Applied. London: George Allen & Unwin, 1986. 226

**MARCHETTI, Z. Y. et al.** NDVI patterns as indicator of morphodynamic activity in the middle Paraná River floodplain. *Geomorphology*, v. 253, p. 146-158, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.003>

**OZTURK, H. S. et al.** A low-cost approach for determination of discontinuity orientation using smartphone images and application to a part of Ihlara Valley (Central Turkey). *Engineering Geology*, v. 254, p. 63–75, 2019.

**QGIS DEVELOPMENT TEAM.** QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2025. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 5 dez. 2024.

**ROSAS M.A. et al.** Quantificando a mudança geomórfica nos vales dos rios andinos usando técnicas UAV-PPK-SfM: Um exemplo do oeste dos Andes peruanos. *Geomorphology*, v. 435, n. 108766 p. 1- 11, 2023.

**REITZ, R.** Alto Biguaçu: narrativa cultural tetrarracial. Florianópolis: Lunardelli; Editora da UFSC, 1988.

**ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, v. 1, p. 309-317, 1974. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>. Acesso em: 13 ago. 2025.

**SANTA CATARINA (Estado).** Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral (GAPLAN). Atlas de Santa Catarina. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986.

**SANTA CATARINA (Estado).** Secretaria do Estado de Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina. Acervo do sistema de informações geográficas de Santa Catarina (SIGSC): dados vetoriais, ortofotos e modelos digitais de elevação, ano 2012. 1 Mapa. Escala 1:10.000. 2012. Disponível em: <http://sigsc.sc.gov.br/download/index.jsp>. Acesso em: 15 nov. 2023.

**SANTOS, M. L. dos. FERNADES, O. V. Q.; STEUVAX, J. C.** Aspectos morfogenéticos das barras de canal do rio Paraná, trecho de Porto Rico, PR. Boletim de Geografia – UEM, v. 10, n. 1, p. 11-24, 1992.

**SCHNORR, G. G.; SCCOTI, A. A. V.; CARDOSO, G. S.; SOARES, M. A. R.** Uso de VANT em estudos do relevo e demais potencialidades. In: *XIV SINAGEO – Simpósio Nacional de Geomorfologia*, Corumbá/MS, 2023.

**SOARES, M. A. R.; TRENTIN, R.; COSTA, M.** Comparação de softwares de fotogrametria digital por meio dos produtos gerados de um voo de VANT sobre uma voçoroca no município de Cacequi - RS. In: *14º SINAGEO – Simpósio Nacional de Geomorfologia*, Corumbá/MS, 2023.

**STEUVAX, J. C.; LATRUBESSE, E. M.** *Geomorfologia Fluvial*. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

**THUMSER, Philipp et al.** Using structure from motion (SfM) technique for the characterisation of riverine systems-Case study in The Headwaters of the Volga River. *Geography, Environment, Sustainability*, v. 10, n. 3, p. 31-43, 2017.

**WHEATON, J. M.; BRASINGTON, J.; DARBY, S. E.; SEAR, D.** Accounting for Uncertainty in DEMs from Repeat Topographic Surveys: Improved Sediment Budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 35, n. 2, p. 136-156, 2010. DOI: 10.1002/esp.1886.

**WILLIAMS, R.** "DEMs of difference." British Society for Geomorphology. *Geomorphological Techniques, Chap. X, Sec. X (2012)* ).

**WILVERT, S. R.** Análise das Áreas de Risco relacionadas à dinâmica do meio físico na cidade de Antônio Carlos - SC. 2010. 143 f. Dissertação (Mestrado em Geografia)

- Curso de Mestrado em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, UFSC, Florianópolis, SC, 2010.

Chuva acima de 100mm na Grande Florianópolis e Litoral Norte. 16 de Janeiro em 2025. CIRAM EPAGRI SC. Disponível em: <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/2025/01/16/chuva-acima-de-100mm-na-grande-florianopolis-e-litoral-norte/> - Acesso em 05/11/2025 às 12:43.



