



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DÉBORA MACIEL CASTELO HOLANDA

**EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE NASCENTES A PARTIR DE MODELOS
ALTIMÉTRICOS: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL E
DO TIPO DE MODELO**

FORTALEZA

2026

DÉBORA MACIEL CASTELO HOLANDA

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE NASCENTES A PARTIR DE MODELOS
ALTIMÉTRICOS: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL E DO
TIPO DE MODELO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Geografia. Área de concentração: Dinâmica Ambiental e Territorial.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Sopchaki

FORTALEZA

2026

DÉBORA MACIEL CASTELO HOLANDA

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE NASCENTES A PARTIR DE MODELOS
ALTIMÉTRICOS: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL E DO
TIPO DE MODELO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Geografia. Área de concentração: Dinâmica Ambiental e Territorial.

Aprovada em: 04/05/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Henrique Sopchaki (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Marta Celina Linhares Sales
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jader de Oliveira Santos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Wallason Farias de Souza
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Prof. Dr. Lúcio Correia Miranda
Universidade Federal do Pará (UFPA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pelas oportunidades que surgem em minha vida e pela força e coragem que me concede para aproveitá-las.

À minha mãe, Junelsa Maciel, pelo apoio incondicional desde o início da minha trajetória escolar até a universidade.

Ao Mestre Zé Carneiro, que tanto me ensinou sobre a dinâmica da natureza, sobretudo acerca das nascentes do rio Pacoti. O que começou como a relação entre um mateiro e uma estudante de mestrado, em 2021, transformou-se em um laço de amizade que foi fundamental para a conclusão de mais esta etapa, o doutorado.

Aos meus amigos, que, ao longo dos anos, escutaram pacientemente minhas reflexões sobre nascentes e esta pesquisa. Em especial, à minha amiga Amanda Brígido, que, de tanto ouvir sobre o tema, passou a compartilhar comigo, com carinho, conteúdos relacionados às águas e às nascentes.

Aos amigos Marcelo Rios, Thiago Rodrigues e Vladimir Gomes, pelas valiosas trocas de conhecimento sobre o universo da água, geoprocessamento e sensoriamento remoto, e por compartilharem comigo momentos de campo, contribuindo diretamente para a construção deste trabalho.

À minha ex-orientadora, Marta Celina, por ter iniciado esse caminho ao meu lado e pelo apoio na construção do pensamento voltado à proteção e conservação das nascentes.

Ao meu orientador, Carlos Henrique Sopchaki, por acreditar no meu potencial e na viabilidade desta pesquisa no âmbito do Doutorado em Geografia. Agradeço pelos diálogos, pelas disciplinas, pelas atividades de campo e pela constante disponibilidade.

A todos os professores com quem tive a oportunidade de cursar disciplinas ao longo do doutorado, tanto no curso de Geografia quanto no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos, Saneamento Ambiental e Geotecnia), cujas contribuições foram fundamentais para minha formação.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pela concessão da bolsa de estudos, que possibilitou minha

permanência no programa, a participação em eventos e a realização das campanhas de campo.

Por fim, espero que este trabalho, construído a partir dessas e de tantas outras trocas significativas, possa contribuir com a produção de conhecimento e inspire outros pesquisadores a se aprofundarem neste tema tão sensível, valioso e fundamental para a humanidade, a água.

“Tudo é interação e reciprocidade”
(Alexander Von Humboldt, 1769-1859)

RESUMO

As nascentes são ambientes hidrogeomorfológicos essenciais para a dinâmica hídrica, a manutenção da biodiversidade e o abastecimento humano. Apesar de sua relevância ambiental e social, permanecem marcadas pela invisibilidade na representação espacial, o que compromete ações de gestão e proteção. As discussões sobre o mapeamento de nascentes são frequentemente acompanhadas pela dificuldade em se definir uma metodologia para detectar essas feições na paisagem. Diante disso, esta tese buscou testar a aplicação do método de extração automática como ferramenta de apoio à identificação de nascentes. Assim, foi analisado a influência da resolução espacial e do tipo de modelo altimétrico na extração automática de nascentes, a partir da elaboração de Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes (MDEHCs). Foram empregados quatro Modelos Digitais de Elevação (NASADEM, COPDEM, SRTM/ASF e TanDEM-X) e dois Modelos Digitais do Terreno (ANADEM e FABDEM), todos derivados de interferometria radar, com resoluções espaciais de 12 m, 12,5 m e 30 m. O estudo foi desenvolvido em três áreas experimentais localizadas no maciço de Baturité, no estado do Ceará. A extração automática das nascentes foi realizada no ambiente QGIS, por meio da ferramenta do SAGA GIS. A avaliação dos resultados baseou-se em uma adaptação da análise de completude, conforme a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), utilizando como referência dados georreferenciados obtidos em campo, permitindo analisar tanto a correspondência espacial quanto a utilidade operacional dos dados. Os resultados indicaram melhor desempenho em modelos de maior resolução espacial, sem superioridade consistente entre MDEs e MDTs. Observou-se melhor desempenho na área do Bananal, associada a relevo mais suave e maior umidade, enquanto nas áreas do Ouro e Rolador, com relevo mais declivoso, houve maior limitação na identificação. Dessa forma, foi possível evidenciar o potencial do uso de modelos orbitais com maior resolução espacial. Com isso, põe-se uma perspectiva promissora na utilização de modelos altimétricos na seleção de áreas prioritárias para a identificação e o estudo dos sistemas ambientais das nascentes.

Palavras-chave: mapeamento; modelos altimétricos; resolução espacial.

ABSTRACT

Springs are essential hydrogeomorphological environments for hydrological dynamics, biodiversity conservation, and human water supply. Despite their environmental and social relevance, they remain largely underrepresented in spatial mapping, compromising management and conservation efforts. Discussions on spring mapping are often accompanied by the challenge of defining a reliable methodology for detecting these features in the landscape. In this context, this doctoral thesis aimed to evaluate the application of an automatic extraction method as a supporting tool for spring identification. Specifically, it analyzed the influence of spatial resolution and elevation model type on the automatic extraction of springs through the generation of Hydrologically Conditioned Digital Elevation Models (HCDEMs). Four Digital Elevation Models (NASADEM, COPDEM, SRTM/ASF, and TanDEM-X) and two Digital Terrain Models (ANADEM and FABDEM), all derived from radar interferometry, with spatial resolutions of 12 m, 12.5 m, and 30 m, were employed. The study was conducted in three experimental areas located in the Baturité Massif, Ceará State, Brazil. Automatic spring extraction was performed in the QGIS environment using the SAGA GIS tool. The results were evaluated based on an adapted completeness analysis, following the Technical Specification for Geospatial Data Quality Control (ET-CQDG), using georeferenced field survey data as reference. This approach enabled the assessment of both the spatial correspondence and the operational usefulness of the extracted data. The results indicated better performance for models with higher spatial resolution, although no consistent superiority was observed between Digital Elevation Models and Digital Terrain Models. The best performance was found in the Bananal area, associated with gentler relief and higher moisture conditions, whereas the Ouro and Rolador areas, characterized by steeper terrain, presented greater limitations for spring identification. These findings demonstrate the potential of high-resolution orbital elevation models for supporting automatic spring extraction. Therefore, this study highlights the promising application of altimetric models in identifying priority areas for the detection and investigation of spring environmental systems.

Keywords: springs; altimetric models; spatial resolution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hipóteses do estudo	20
Figura 2 - Contraste entre o setor úmido e seco do maciço de Baturité.....	23
Figura 3 - Intervenção antrópica.....	26
Figura 4 - Nascentes do tipo pontual na área do Ouro e Rolador	28
Figura 5 - Nascentes do tipo olho d'água no Bananal	29
Figura 6 - Localização das áreas experimentais	29
Figura 7 - Ilustração da área experimental do Bananal.....	31
Figura 8 – Nascentes encontradas na área do Bananal	32
Figura 9 - Ilustração das áreas do Ouro e Rolador	33
Figura 10 - Nascentes encontradas na área do Ouro e Rolador	34
Figura 11 - Uso e Ocupação das Áreas Experimentais	36
Figura 12 - Distribuição do Programa Produtor de Água.....	41
Figura 13 - Rotina para extração de dados hidrológicos	50
Figura 14 - Fluxo metodológico	54
Figura 15 - Localização da sub-bacia do rio Pacoti.....	55
Figura 16 - Extração automática por diferentes ferramentas.....	57
Figura 17 - Erros de completude adaptado para o estudo	62
Figura 18 - Validação MDEHC NASADEM.....	66
Figura 19 - Validação MDEHC COPDEM (A.E Bananal).....	67
Figura 20 - Validação MDEHC SRTM-ASF (A.E Bananal)	68
Figura 21 - Validação MDEHC TanDEM-X (A.E Bananal)	69
Figura 22 - Validação MDEHC FABDEM (A.E Bananal).....	70
Figura 23 - Validação MDEHC ANADEM (A.E Bananal)	71
Figura 24 - Validação MDEHC NASADEM (A.E Rolador)	73
Figura 25 - Validação MDEHC COPDEM (A.E Rolador)	74
Figura 26 - Validação MDEHC SRTM/ASF (A.E Rolador).....	75
Figura 27 - Validação MDEHC TanDEM-X (A.E Rolador).....	76
Figura 28 - Validação MDEHC FABDEM (A.E Rolador)	77
Figura 29 - Validação MDEHC ANADEM (A.E Rolador).....	78
Figura 30 - Validação MDEHC NASADEM (A.E Ouro).....	79
Figura 31 - Validação MDEHC COPDEM (A.E Ouro).....	80

Figura 32 - Validação MDEHC SRTM-ASF (A.E Ouro)	81
Figura 33 - Validação MDEHC TanDEM-X (A.E Ouro)	82
Figura 34 - Validação MDEHC FABDEM (A.E Ouro).....	83
Figura 35 - Validação MDEHC ANADEM (A.E Ouro)	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Precipitação mensal (mm) referente ao ano de 2025.	23
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação dos modelos altimétricos utilizados.....	60
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores fisiográficos da microbacia do rio Pacoti.....	56
Tabela 2 - Desempenho por Área Experimental: Bananal.....	64
Tabela 3 - Desempenho por Área Experimental: Rolador e Ouro	72
Tabela 4 - Síntese geral dos desempenhos observados	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Água e Saneamento Básico
APA	Área de Proteção Ambiental
APP	Áreas de Preservação Permanente
ASF	<i>Alaska Satellite Facility</i>
COGERH	Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico
ET-CQDG	Especificações Técnicas Controle de Dados Geoespaciais
GAB	<i>Great Artesian Basin</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRASS	<i>Geographic Resources Analysis Support System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
MDT	Modelo Digital do Terreno
PSA	Pagamentos por Serviços Ambientais
SAGA	<i>System for Automated Geoscientific Analyses</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	<i>Sthuttle Radar Topography Mission</i>
SSI	<i>Springs Stewardship Institute</i>
TAUDEM	<i>Terra Analysis Using Digital Elevation Models</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Hipóteses.....	19
1.2	Objetivo Geral.....	20
1.3	Objetivos Específicos.....	20
2	CONTEXTO AMBIENTAL E ECONÔMICO DO MACIÇO DE BATURITÉ.....	22
2.1	Localização e caracterização das áreas experimentais.....	27
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	37
3.1	Gestão de água e a invisibilidade das nascentes.....	37
3.2	Método de mapeamento de nascentes e modelos altimétricos.....	42
3.3	Extração automática de dados hidrológicos.....	49
4	METODOLOGIA.....	54
4.1	Delineamento metodológico geral.....	54
4.2	Sistematização das variáveis e testes preliminares.....	54
4.3	Aquisição e caracterização dos modelos altimétricos.....	58
4.4	Construção da base de dados em campo.....	60
4.5	Validação dos dados.....	61
5	RESULTADOS.....	64
5.1	Desempenho por área experimental.....	64
5.1.1	<i>Bananal</i>.....	64
5.1.2	<i>Ouro e Rolador</i>.....	72
6	DISCUSSÃO.....	86
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
	REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

As nascentes constituem ambientes hidrogeomorfológicos essenciais à manutenção da dinâmica hidrológica terrestre, uma vez que representam os pontos de emergência das águas subterrâneas responsáveis pela formação e alimentação da rede de drenagem superficial (Felippe, 2009; Leal *et al.*, 2017).

Esses ambientes desempenham papel central na modelagem da paisagem, na manutenção de sistemas aquáticos e no abastecimento de populações humanas (Hong, 2014; Ranjan *et al.*, 2021). Apesar de sua relevância ambiental, social e científica, as nascentes permanecem, em grande medida, invisibilizadas no planejamento territorial e na gestão dos recursos hídricos (Cartwright *et al.*, 2020; Romadhan *et al.*, 2020; Stevens *et al.*, 2021).

O conceito de nascente é amplo e multifacetado, refletindo a natureza interdisciplinar dos estudos que se debruçam sobre esse ambiente (Cantonati *et al.*, 2019, 2020). De modo geral, as nascentes são definidas como pontos de saída do fluxo de água subterrânea para a superfície terrestre, podendo ser classificadas, quanto à periodicidade do fluxo hídrico, como perenes, intermitentes ou efêmeras (Felippe, 2013).

No entanto, não há consenso quanto a tipologias ou classificações, uma vez que diferentes campos do conhecimento, como a hidrogeologia, a ecologia e a etnologia, enfatizam distintos aspectos funcionais e simbólicos desses ambientes (Stevens *et al.*, 2016; Cantonati *et al.*, 2020; Chauhan; Negi, 2023).

A compreensão e o debate das nascentes como sistemas ambientais ainda são escassos na produção científica nacional. Contudo, na literatura internacional existe amplo diálogo sobre identificação, proteção e catalogação de fontes de água, incluindo espécies animais e vegetais associadas a esses ambientes (Krapu *et al.*, 1983; Sada *et al.*, 2005; Stevens *et al.*, 2020).

Sob uma perspectiva técnica, Santa'Anna de Castro *et al.*, (2007) definem nascente como o resultado da interceptação do fluxo subterrâneo à superfície do terreno, caracterizando o ponto inicial de um curso d'água.

De forma semelhante, Jung *et al.*, (2024) compreendem as nascentes como manifestações das águas subterrâneas responsáveis pela manutenção de córregos, rios, lagos e reservatórios. Cantonati *et al.*, (2010), por sua vez, ampliam essa compreensão ao reconhecerem a nascente como um ambiente transicional,

simultaneamente pertencente aos sistemas hidrográficos subterrâneo e superficial, característica que confere elevada complexidade ecológica e funcional a esses ambientes.

Além de sua importância hidrológica, diversos estudos ressaltam o papel das nascentes como refúgios ecológicos e repositórios biológicos, particularmente relevantes em contextos de mudanças climáticas e variações históricas de temperatura (Stevens *et al.*, 2011; Stevens *et al.*, 2020).

Esses ambientes também assumem dimensões culturais e simbólicas, sendo frequentemente associados a práticas religiosas, identitárias e espirituais de diferentes populações humanas (Ceballos *et al.*, 2012; Knutsson, 2014; Hong, 2014; Aigo; Ladio, 2016; Ballesteros, 2019; Ranjan *et al.*, 2020; Pascual *et al.*, 2024).

Essa diversidade conceitual se estende à distinção entre nascentes e outras feições hidrogeológicas, como os olhos d'água. Santos e Sekula (2025) definem as nascentes como feições capazes de originar cursos d'água, enquanto os olhos d'água, embora resultantes da emergência do fluxo subterrâneo, não apresentam essa capacidade. Importante ressaltar que nesse estudo olhos d'água foram considerados um tipo de nascente.

Exposto isto e apesar de sua reconhecida relevância, as nascentes têm sido submetidas a intensos processos de degradação. A negligência institucional e a gestão desordenada favorecem o soterramento desses ambientes, especialmente em áreas urbanas (Hong, 2014).

Outros fatores, como o pisoteio por recreacionistas, o pastoreio de gado e o bombeamento excessivo de águas subterrâneas, figuram entre os principais vetores de degradação (Lewis *et al.*, 2023).

Em muitos contextos, as nascentes constituem fontes primárias de água potável para usos domésticos e agrícolas, reforçando sua importância para a manutenção do fluxo de base dos rios e para a subsistência de populações humanas (Ranjana; Pandeyb, 2019).

Um dos principais obstáculos à conservação e à gestão eficaz das nascentes é o desconhecimento de sua distribuição espacial. Essa lacuna é amplamente reconhecida na literatura científica (Tsinnajinnie *et al.*, 2021; Chauhana *et al.*, 2023; Stevens *et al.*, 2023), que destaca como a ausência de mapeamentos sistemáticos contribui para a falta de informações sobre o estado de conservação

dessas feições, invisibilizando ameaças locais e regionais e dificultando a implementação de programas de monitoramento contínuo (Stevens *et al.*, 2021).

No contexto brasileiro, tais desafios se assemelham àqueles enfrentados na gestão das águas subterrâneas, caracterizados pela invisibilidade desses sistemas e pelo conhecimento ainda incipiente de seu funcionamento (Villar; Hirata, 2022).

Nesse cenário, o sensoriamento remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm se consolidado como ferramentas fundamentais para a análise da paisagem e a produção de dados espaciais em estudos hidrológicos (Oliveira *et al.*, 2012; Cecílio *et al.*, 2013; Yogi; Stanganini, 2023; Sousa, 2023).

Modelos altimétricos, como os Modelos Digitais de Elevação (MDE) e os Modelos Digitais do Terreno (MDT), permitem a representação da superfície terrestre e constituem dados de entrada essenciais para a geração de Modelos Digitais Hidrológicamente Consistentes (MDEHC), a partir dos quais podem ser extraídas automaticamente variáveis como direções de fluxo, áreas de contribuição, redes de drenagem e pontos de origem dos cursos d'água, incluindo as nascentes.

Entretanto, a extração automática de dados hidrológicos a partir de MDEHCs requer cautela, uma vez que discrepâncias entre o relevo representado e o terreno real podem comprometer a confiabilidade dos resultados (Buarque *et al.*, 2009; Bosquilia *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2020; Faria *et al.*, 2023).

Ademais, parte significativa da literatura valida os resultados automáticos a partir de bases cartográficas que apresentam inconsistências já reconhecidas, o que limita sua confiabilidade como referência comparativa (Chorley; Dale, 1972; Marion *et al.*, 2013; Lima; Cunha, 2013; Souza; Almeida, 2014; Silva, 2021; Cava *et al.*, 2022).

Entre os principais desafios metodológicos associados a esse tipo de abordagem destacam-se a escolha das ferramentas de extração hidrológica, a definição de limiares adequados e a seleção da resolução espacial e do tipo de modelo altimétrico. Nesta pesquisa, após testes preliminares, foi possível fixar as variáveis dos ferramentais e do limiar, focando na influência da resolução espacial e do tipo de modelo.

As variáveis relacionadas à resolução espacial e ao tipo de modelo fundamentam-se na premissa de que resoluções mais refinadas tendem a proporcionar melhores resultados na extração automatizada de nascentes.

Nesse sentido, a resolução espacial define o nível de detalhamento do relevo representado, sendo que modelos mais refinados tendem a representar melhor as variações topográficas locais (Zhang; Montgomery, 1994; Wu et al., 2005; Ariza-Villaverdade *et al.*, 2015). O tipo de modelo também influencia os resultados, uma vez que o MDE incorpora elementos da superfície, enquanto o MDT busca representar exclusivamente o terreno, oferecendo, em princípio, base mais adequada para análises hidrológicas (Ribeiro; Ferreira, 2014).

Apesar dos avanços nas técnicas de geoprocessamento aplicadas à hidrologia, a extração automática voltada especificamente à identificação de nascentes ainda é menos explorada quando comparada à delimitação de redes de drenagem, bacias hidrográficas e outras feições (O'Callaghan; Mark, 1984; Tarboton *et al.*, 1991; Paz; Collischonn, 2008; Reddy., 2018). Além disso, os estudos existentes tendem a validar os resultados apenas por comparação entre modelos ou resoluções espaciais, sem utilizar dados de campo como referência, o que limita a avaliação da utilidade prática dessas ferramentas (Rana; Suryanarayana, 2019; Sousa, 2023; Yogi; Stanganini, (2023).

Paralelamente, observa-se, tanto na literatura quanto em espaços institucionais de gestão hídrica, como comitês de bacias hidrográficas, uma lacuna metodológica relacionada à etapa inicial de mapeamento de nascentes, especialmente em regiões onde há escassez de dados primários (Stevens *et al.*, 2011; Carmo *et al.*, 2014; Fensham *et al.*, 2015; Stevens *et al.*, 2021).

Nesse contexto, emerge a necessidade de compreender se a extração automática pode constituir um instrumento eficaz de apoio à prospecção prévia de nascentes para planejamento de atividades de campo.

Diante desse cenário, esta tese analisou a extração automatizada de nascentes a partir de modelos altimétricos orbitais, comparando diferentes resoluções espaciais (30 m, 12,5 m e 12 m) e tipos de modelos (MDE e MDT), com o propósito de verificar a capacidade dessa abordagem em apoiar a identificação de nascentes em campo.

Para a validação dos resultados, foram selecionadas três áreas experimentais localizadas no maciço de Baturité, nos municípios de Guaramiranga e Pacoti, estado do Ceará, região que abriga as nascentes formadoras do rio Pacoti, curso d'água estratégico para o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza.

O dado de referência foi construído em campo com apoio de mateiros locais, permitindo a elaboração de um banco de dados georreferenciado de nascentes.

A comparação entre os dados automatizados e os dados de campo foi realizada por meio de uma adaptação da análise de completude baseada na Especificação Técnica de Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais — ET-CQDG (DSG, 2016), permitindo avaliar tanto a correspondência espacial quanto a utilidade operacional do método para prospecção de nascentes.

O desempenho dos modelos altimétricos testados e validados foi analisado não apenas sob a perspectiva da precisão geométrica tradicional (acurácia posicional), mas também em termos de sua utilidade operacional para a prospecção de nascentes em campo, considerando cenários satisfatórios e insatisfatórios como parte da interpretação dos resultados.

Por fim, ressalta-se que o caráter inovador desta tese residiu na aplicação sistemática da extração automática direcionada especificamente às feições de nascentes, aliada ao confronto direto com uma base de dados de campo georreferenciada.

Essa abordagem permitiu avaliar de forma crítica a geração de dados automáticos frente à complexidade do terreno real, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre as origens da rede hidrográfica e oferecendo uma compreensão sobre a funcionalidade do método automático em iniciativas de mapeamento, monitoramento e proteção de nascentes.

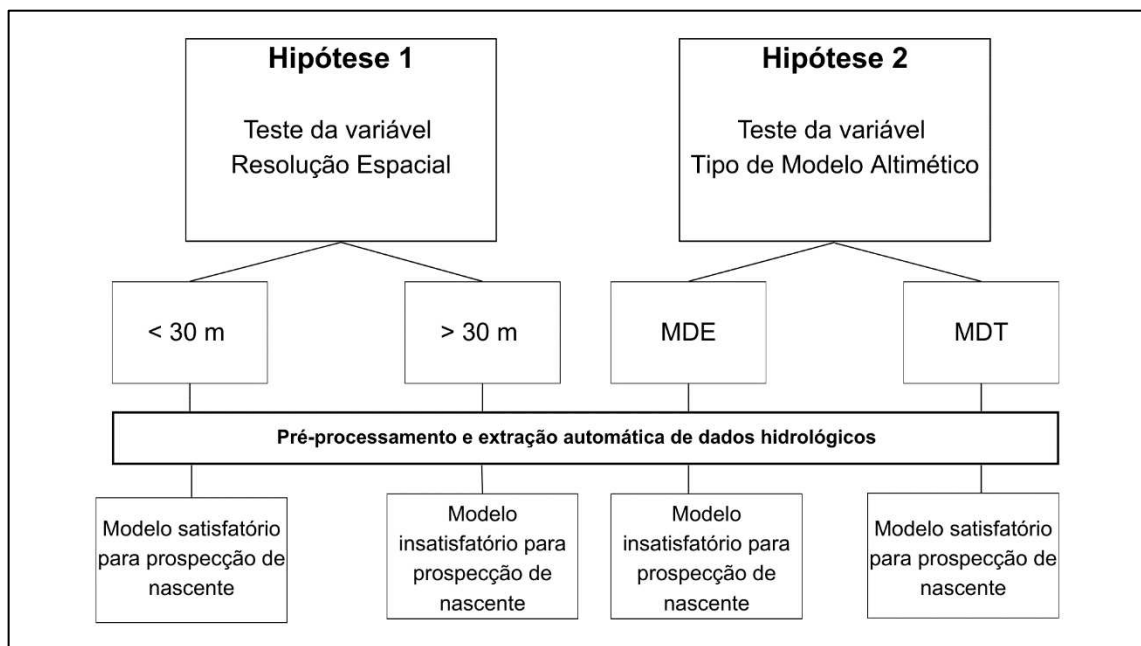
1.1 Hipóteses

A presente tese parte assim do pressuposto de que a extração automática de nascentes, através de MDEHCs, é influenciada por características inerentes aos modelos altimétricos utilizados. Assim, considera-se que tanto a resolução espacial quanto o tipo de modelo (MDE ou MDT) podem influenciar no desempenho da identificação dessas feições e que estes devem ser confrontados com uma base de dados consistente.

A primeira hipótese desta pesquisa postula que modelos altimétricos com maior resolução espacial, independentemente de serem nativos ou obtidos por reamostragem, apresentam desempenho superior na geração de resultados satisfatórios para a prospecção de nascentes em campo, no contexto da extração automática, quando comparados a modelos com resolução espacial de 30 m.

A segunda hipótese estabelece que os dados automatizados de nascentes derivados de Modelos Digitais de Terreno (MDTs) apresentam desempenho superior na obtenção de resultados satisfatórios para a prospecção de nascentes em campo em relação àqueles derivados de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), uma vez que os MDTs representam o modelado do relevo sem a interferência de elementos presentes na superfície terrestre, como vegetação e edificações (Figura 1).

Figura 1 - Hipóteses do estudo



Fonte: Elaboração própria (2026).

Essas hipóteses foram testadas por meio do confronto entre os dados extraídos automaticamente e uma base de referência de campo georreferenciada, permitindo avaliar a utilidade e as limitações desse método para o mapeamento de nascentes e para o suporte à gestão dos recursos hídricos.

1.2 Objetivo Geral

Analisar o método de extração automatizada de nascentes considerando as variáveis de resolução espacial e tipo de modelo altimétrico, avaliando sua utilidade como ferramenta de prospecção para identificação de nascentes em campo.

1.3 Objetivos Específicos

- Descrever os métodos utilizados pelas ferramentas hidrológicas para extração de dados automáticos;

- Avaliar a influência da remoção de elementos superficiais, por meio de testes com Modelos Digitais de Terreno (MDTs), na geração de dados automáticos;
- Comparar os dados automáticos obtidos a partir de modelos altimétricos com diferentes resoluções espaciais, tanto na resolução nativa quanto reamostrada;
- Interpretar os dados gerados automaticamente, confrontando-os com a base de referência obtida em campo;
- Avaliar a viabilidade da extração automatizada como método de apoio à identificação e ao mapeamento de nascentes.

2 CONTEXTO AMBIENTAL E ECONÔMICO DO MACIÇO DE BATURITÉ

O Maciço de Baturité é uma formação montanhosa de destaque no contexto geoambiental do estado do Ceará, por configurar-se como um importante enclave úmido. Localizado na porção centro-norte do território cearense, suas condições climáticas diferenciadas, marcadas por temperaturas mais amenas, altitudes que ultrapassam 1.000 metros e a presença de uma densa cobertura vegetal composta por remanescentes de Mata Atlântica, conferem-lhe uma paisagem singular em meio ao domínio semiárido da Caatinga (Bértard *et al.*, 2007).

Do ponto de vista climático e geomorfológico, o Maciço de Baturité apresenta uma clara diferenciação entre os setores de barlavento e sotavento (Neto, 2020). Essa distinção se associa à atuação das chuvas orográficas, que exercem papel fundamental na configuração climática do maciço. A vertente oriental, correspondente ao setor de barlavento, recebe a influência predominante de massas de ar úmidas provenientes do litoral, resultando em maiores volumes pluviométricos (Cavalcante *et al.*, 2014).

Desse modo, a distribuição das condições físicas, em termos de precipitação e umidade, pode ser compreendida a partir da diferenciação entre os setores de barlavento e sotavento do maciço.

O setor de barlavento, correspondente à vertente oriental, está associado a condições mais úmidas, caracterizando-se por maior pluviosidade e ambientes mais favoráveis do ponto de vista hídrico. Em contraste, o setor de sotavento apresenta um regime climático mais seco, com menor disponibilidade hídrica.

A altitude também se configura como um fator de influência que se destaca na própria paisagem, contribuindo para a diferenciação entre os setores úmido e seco. Essa condição se evidencia visualmente na paisagem, permitindo a distinção clara entre as áreas mais úmidas e as mais secas, conforme ilustrado na Figura 2.

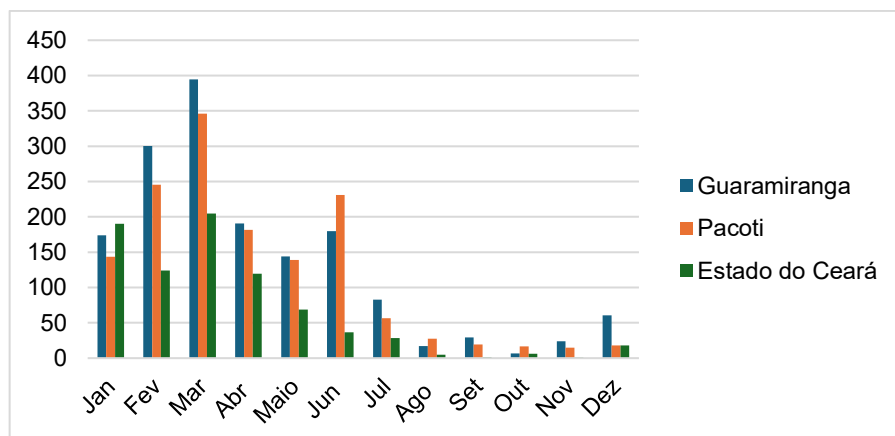
Figura 2 - Contraste entre o setor úmido e seco do maciço de Baturité



Fonte: Foto da autora, (2025).

Apesar da influência orográfica, o maciço segue o regime climático regional, caracterizado pela concentração das chuvas no primeiro semestre do ano e por uma acentuada redução da precipitação no segundo semestre, conforme dados da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2025). Contudo, em termos de precipitação, municípios que integram o maciço, como Guaramiranga e Pacoti, apresentam totais mensais superiores à média estadual, conforme apresentado no Gráfico 1, evidenciando o efeito orográfico no regime pluviométrico local.

Gráfico 1 - Precipitação mensal (mm) referente ao ano de 2025.



Fonte: Funceme, (2025).

Em meio a este cenário, essas características naturais favoreceram, historicamente, o desenvolvimento de diversos ciclos econômicos, promovendo significativas transformações na paisagem do maciço (Bastos *et al.*, 2017). Conforme destaca Souza (2011), as maciços, de modo geral, apresentam condições ambientais mais propícias, sobretudo em termos de clima, solo e recursos hídricos, o que amplia as possibilidades de uso da terra. A combinação desses fatores contribuiu para a formação de uma estrutura econômica mais consolidada e de um padrão de povoamento mais desenvolvido quando comparado às áreas sertanejas adjacentes (Freire; Souza, 2006; Braga; Campos, 2022).

Nesse contexto, a Maciço de Baturité destacou-se, sobretudo, pelo desenvolvimento de atividades agrícolas, como o ciclo do café no início do século XX, período que marcou uma fase de expressiva prosperidade econômica para a região (Soares, 2015; Braga; Campos, 2022).

Os vestígios desse ciclo econômico ainda se fazem presentes na paisagem atual, por meio da manutenção de sítios que continuam cultivando e comercializando o café. Com o declínio da cafeicultura, outras atividades agrícolas passaram a se consolidar, como a fruticultura, a floricultura e a horticultura, com destaque para a bananicultura, amplamente disseminada na paisagem contemporânea. A partir da década de 1980, o turismo passou a assumir protagonismo como principal atividade econômica, impulsionado pela valorização dos refúgios naturais, refletindo-se no aumento significativo da construção de segundas residências, hotéis, condomínios e empreendimentos de alto padrão (Campos, 2000; Souza, 2011; Fernandes; Silva; Pereira, 2011).

Segundo Santos *et al.*, (2012), no contexto geoambiental do enclave úmido da Maciço de Baturité, a disponibilidade de recursos naturais facilitou a inserção das atividades humanas. Contudo, essa mesma condição favoreceu a superutilização da terra, resultando na perda de remanescentes florestais e afetando diretamente a dinâmica hidroclimática e os processos erosivos, intensificados pelo desmatamento. Bastos e Azevedo (2011) acrescentam que a elevada densidade demográfica, aliada ao uso inadequado do solo, tem desencadeado intensos processos de degradação ambiental, como o cultivo em áreas íngremes associado à erosão, a especulação imobiliária, o aumento da produção de resíduos sólidos e a crescente demanda por infraestrutura. A bananicultura, em particular, destaca-se como uma atividade de forte

impacto, promovendo a descaracterização da paisagem e a substituição quase total da vegetação nativa.

No âmbito da bacia hidrográfica do rio Pacoti, Crispim e Souza (2016) apontam que as atividades desenvolvidas em seu interior extrapolam a capacidade de suporte ambiental, resultando em maior escoamento superficial e no aumento das cargas de erosão e sedimentos. Esse cenário tende a se agravar com a intensificação da construção de barragens artificiais, que ampliam as pressões sobre os sistemas hídricos da região. A implantação desses reservatórios reduz o fluxo hídrico a jusante, impacta a paisagem, favorece processos de assoreamento e pode comprometer o abastecimento humano.

Adicionalmente, observa-se uma exploração inadequada das águas subterrâneas, marcada pelo crescimento desordenado da perfuração de poços (Crispim; Souza, 2016). Conforme ressaltam Lins *et al.*, (2020), não há garantia de que todos esses poços estejam devidamente licenciados, o que evidencia um quadro preocupante de superexploração dos aquíferos, com reflexos diretos no ressecamento de fontes naturais.

A criação da Área de Proteção Ambiental (APA) do Maciço de Baturité, unidade de conservação de uso sustentável, teve como objetivo mitigar os impactos das atividades agrícolas e ordenar o uso do território (Bastos; Azevedo, 2011). Contudo, sua delimitação ocorre apenas a partir da cota altimétrica de 600 m, justamente na faixa de transição entre o setor mais úmido e o setor mais seco do maciço. Essa configuração territorial suscita preocupações relevantes, sobretudo em relação ao estado de conservação das nascentes localizadas nessa transição e no setor de sotavento, que já operam sob um regime hídrico mais restritivo e permanecem mais expostas às pressões antrópicas.

Dessa forma, evidencia-se que o Maciço de Baturité apresenta uma complexa dinâmica socioambiental, na qual as potencialidades naturais coexistem com intensos processos de uso e ocupação que comprometem a sustentabilidade dos recursos naturais.

Nesse contexto, as nascentes também se encontram submetidas a fortes pressões decorrentes do uso do solo. Conforme observado por Holanda (2022), por estarem majoritariamente inseridas em propriedades privadas, as nascentes são amplamente utilizadas por meio de mecanismos individuais de captação, como a instalação de manilhas, que alteram significativamente o fluxo da água e estrutura física natural (Figura 3).

Figura 3 - Intervenção antrópica



Fonte: Foto da autora, (2024, 2025).

Observa-se ainda a distribuição em larga escala de barragens e represamento de nascentes na região. De acordo com o Plano de Conservação de Nascentes do estado de Nevada, nos Estados Unidos, Abele (2011) traz que barragens e represas em áreas de nascentes prejudicam as espécies que dependem da integridade natural do ambiente. Ressalta ainda que a depender dos usos, a remoção dessas estruturas para restauração natural das nascentes pode ser muito mais custosa.

Esse conflito em torno do uso das nascentes possui implicações legais importantes. Ainda se observa a invocação do art. 96 do Decreto nº 24.643/1934 (Código das Águas), que permitia ao proprietário do terreno apropriar-se das águas subterrâneas existentes em sua propriedade. Contudo, com a promulgação da Lei nº 9.433/1997 (Lei das Águas), a água passou a ser reconhecida como bem de domínio público, tornando obrigatória a autorização dos órgãos competentes para intervenções que envolvam canalização, aterramento, desvios ou represamentos.

Em meio a esse conflito jurídico e aos usos desordenados, os impactos sobre as nascentes tendem a permanecer velados, sobretudo pela ausência de conhecimento espacial sistematizado. A falta de mapeamento dessas feições resulta

em desconhecimento quanto aos usos existentes, fontes potenciais de poluição, níveis de vulnerabilidade ambiental, riscos de contaminação, regimes de vazão e processos de superexploração, elementos essenciais para uma gestão adequada.

Assim, o que se observa é uma crescente pressão sobre o sistema hídrico do Maciço de Baturité, tanto em sua origem, nas nascentes, quanto ao longo da drenagem superficial, fortemente impactada pela construção de barragens.

Torna-se, portanto, urgente ampliar o debate em torno da gestão das águas do Maciço de Baturité, com especial atenção às nascentes, demandando uma integração mais efetiva entre a gestão hídrica e o ordenamento territorial, envolvendo, de forma participativa, os proprietários de terras que se utilizam diretamente desses recursos.

2.1 Localização e caracterização das Áreas Experimentais

A escolha das áreas experimentais teve como critério a diversidade paisagística, mas também à possibilidade de obtenção de autorização para acesso às propriedades privadas onde se situam as nascentes. Assim, foram selecionadas três áreas experimentais localizadas nos municípios de Pacoti e Guaramiranga.

No município de Pacoti, selecionaram-se as localidades do Ouro e Rolador, situadas em um interflúvio. Nessas áreas foram identificadas, ao todo, 23 nascentes, sendo 9 no Ouro e 14 no Rolador. As nascentes identificadas apresentaram uma distância média da ordem de 200 metros entre si, apontando para uma concentração de fontes de água.

Ademais, por se tratar de um interflúvio, a disposição das nascentes é fortemente condicionada pelo relevo. Assim, a distribuição da drenagem se dá com a vertente norte, contribuindo para o riacho do Rolador, e a vertente sul direcionada para o riacho do Ouro.

Na vertente voltada para o norte, as nascentes contribuem para a drenagem do Rolador, enquanto na vertente sul alimentam o vale do Ouro. Nesse interflúvio, as nascentes apresentam distribuição espacial concentrada, com distâncias médias da ordem de 200 metros entre si. No Ouro foram identificadas 9 nascentes, enquanto no Rolador foram registradas 14.

Nas áreas do Rolador e Ouro foi constatada a presença de densa cobertura vegetal, embora com características mais secas quando comparadas à área do Bananal. A tipologia predominante das nascentes é do tipo pontual, associada à exfiltração concentrada (Figura 4).

Figura 4 - Nascentes do tipo pontual na área do Ouro e Rolador



Fonte: Foto da autora, (2025).

De acordo com relatos de moradores locais, há percepção de diminuição na disponibilidade hídrica, acompanhada pelo secamento de algumas nascentes. Em meio a isso, observou-se ainda a ocorrência frequente de intervenções com manilhas diretamente nas nascentes, evidenciando a adoção intensa desse método na região.

Em termos quantitativos, das 9 nascentes encontradas no Ouro, 6 foram do tipo antropizadas com a instalação de manilhas. No Rolador, das 14 nascentes, 6 também foram encontradas com o mesmo método de intervenção estrutural.

No município de Guaramiranga, selecionou-se a localidade do Bananal, onde foram identificadas 11 nascentes, predominantemente do tipo olho d'água (Figura 5).

Figura 5 - Nascentes do tipo olho d'água no Bananal



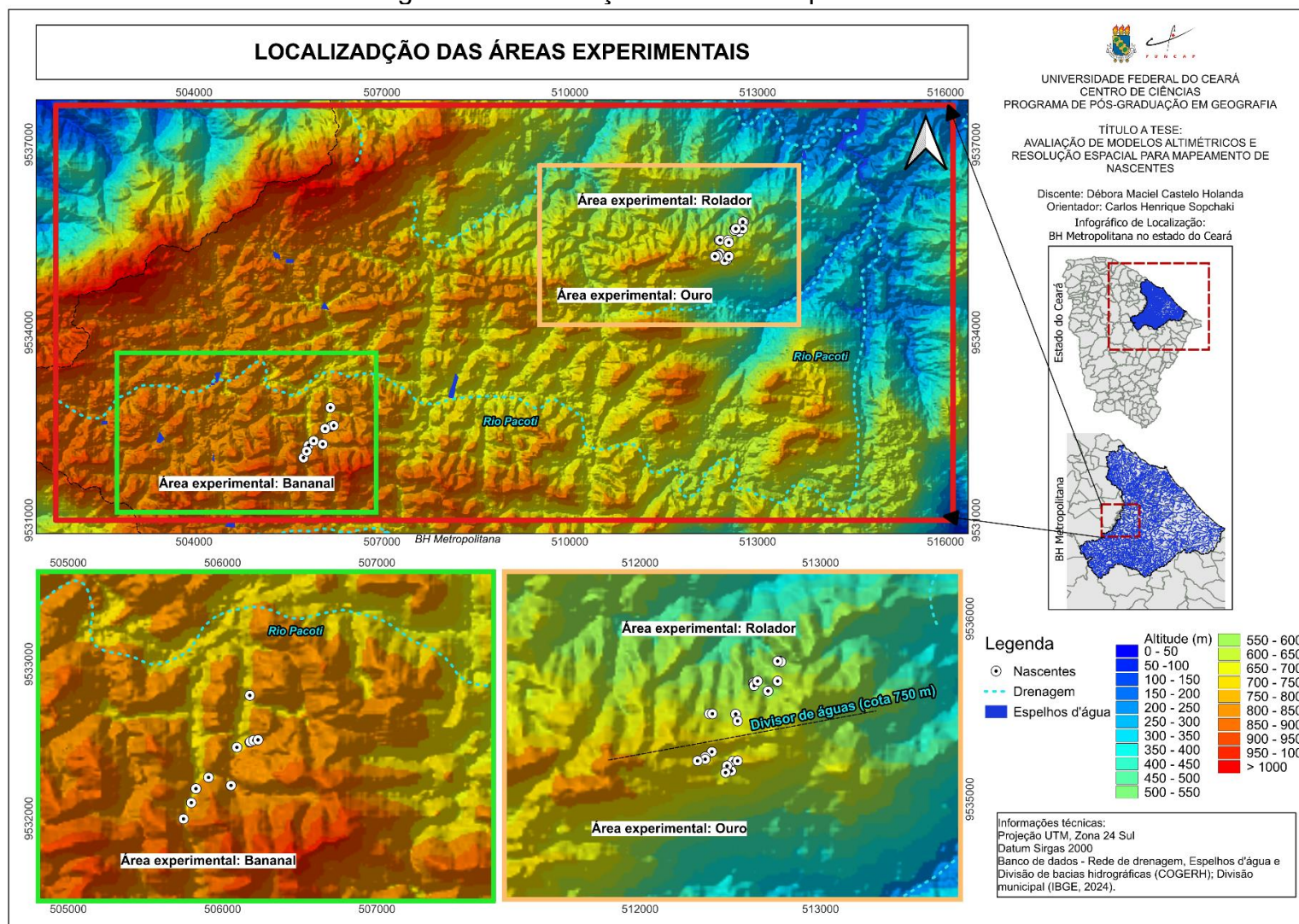
Fonte: Foto da autora, (2024, 2025).

Durante as atividades de campo, observou-se a preservação da mata úmida mesmo no período de menor precipitação. Na quadra chuvosa, verificou-se elevado volume de água, evidenciado pelo solo encharcado e pela ocorrência de diversos pequenos córregos e nascentes do tipo olho d'água.

Segundo moradores locais, o fluxo hídrico das nascentes é mantido mesmo no período seco, informação também constatada durante as visitas técnicas. Contudo, nessa área também foram identificadas nascentes com intervenção antrópica: das 11 nascentes mapeadas, 2 apresentaram esse tipo de alteração.

No que se refere à caracterização hipsométrica, representada na figura 6, as áreas experimentais apresentam uma moderada variação altimétrica. No interflúvio do Ouro e Rolador, as altitudes médias variam entre 650 e 750 metros, enquanto no Bananal situam-se em torno de 850 metros. Essa diferença altimétrica contribui para distinções microclimáticas e hidrológicas observadas em campo, influenciando a manutenção da umidade do solo, o volume hídrico das nascentes e a própria dinâmica de drenagem nas vertentes analisadas.

Figura 6 - Localização das áreas experimentais



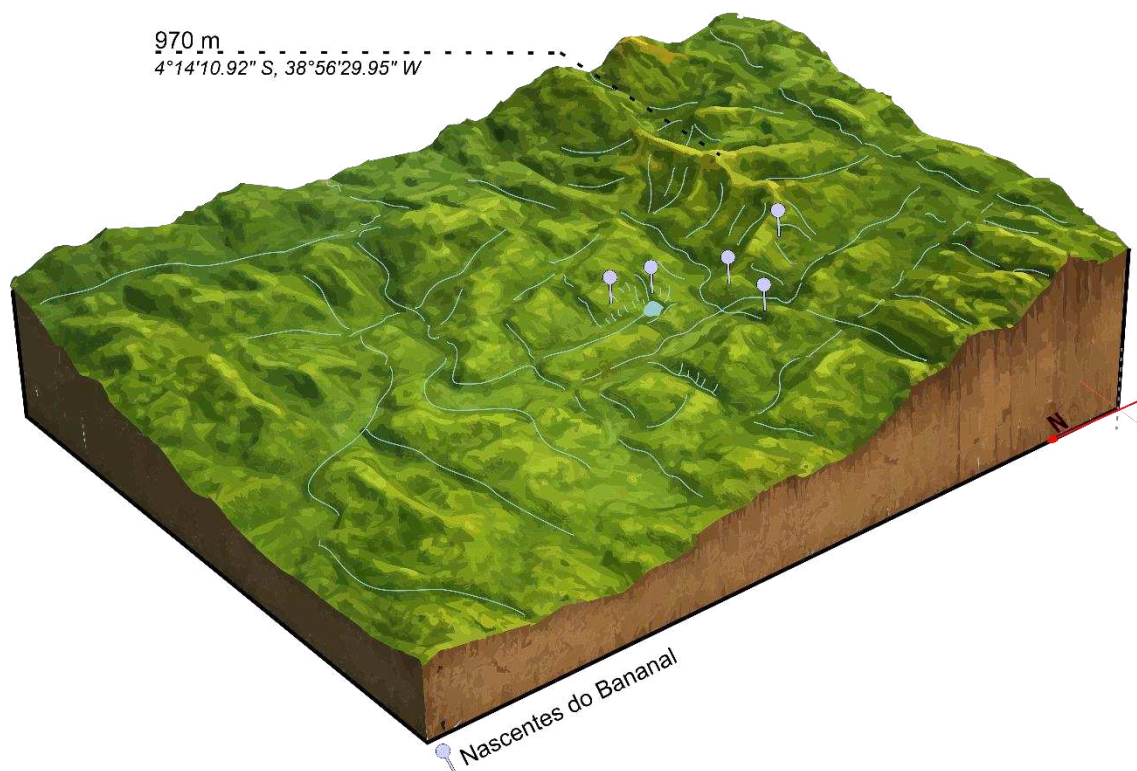
Fonte: Elaboração própria.

Em sequência, observa-se que as áreas selecionadas apresentam diferenças em suas características fisiográficas, especialmente no que se refere à altitude, à morfologia do terreno, à disponibilidade de água e à umidade da cobertura vegetal. Além dessas características naturais, há também variações no grau de ocupação antrópica nas proximidades das nascentes, as quais influenciam os usos associados a essas feições.

As nascentes identificadas na área do Bananal encontram-se associadas a um relevo moderadamente suavizado, com maior convergência de drenagens e condições geomorfológicas favoráveis ao acúmulo e à manutenção de água nos sistemas superficial. Nesse contexto, predominam nascentes do tipo morfológico olho d'água com padrão de exfiltração predominantemente difuso.

A Figura 7 ilustra a paisagem da área experimental do Bananal, evidenciando parte das nascentes mapeadas em campo. Observa-se uma cabeceira de drenagem situada a aproximadamente 970 metros de altitude, que atua como área de captação e direcionamento do fluxo hídrico superficial e subsuperficial, o qual converge para as porções mais rebaixadas do relevo, encontrando as nascentes nas zonas de menor cota altimétrica.

Figura 7 - Ilustração da área experimental do Bananal



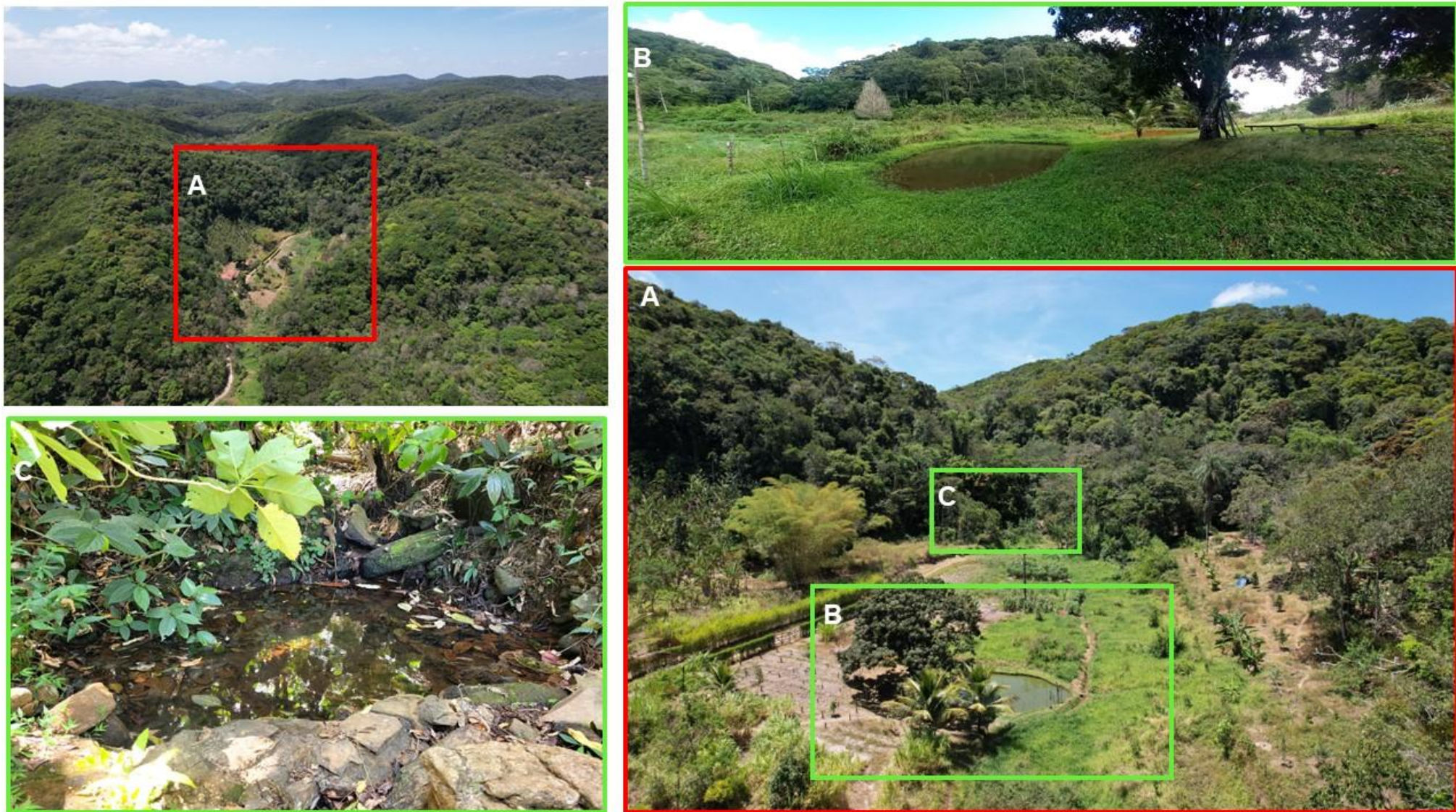
Fonte: Elaborado pela autora.

(Ilustração elaborada a partir do modelo Tandem-X de resolução espacial de 12 m)

Durante as campanhas de campo foi possível observar que mesmo durante o período seco, foi possível identificar áreas com solo saturado, que facilmente encharcaram diante de eventos pluviométricos isolados, comuns no segundo semestre do ano, demonstrando a elevada sensibilidade hidrológica desses ambientes.

Quanto à cobertura vegetal, observou-se a predominância de uma configuração aberta, o que favoreceu a identificação de parte das nascentes por meio de imageamentos aéreos, especialmente naquelas que apresentam espelhamento superficial mais expressivo, como representado na figura 8.

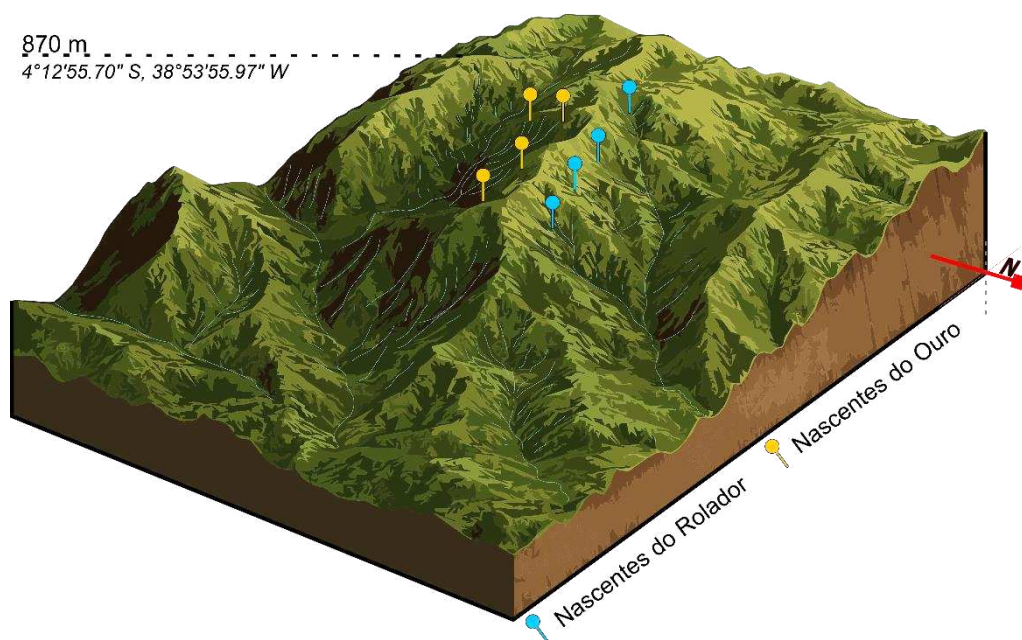
Figura 8 – Nascentes encontradas na área do Bananal



Fonte: Foto da autora, (2024, 2025). Legenda: A) Vista panorâmica da área do Bananal. B) Nascentes difusas. C) Nascente pontual.

Em contraste, nas áreas do Rolador e do Ouro (Figura 9), as nascentes encontram-se inseridas em um contexto morfoestrutural marcado por vertentes mais declivosas e vales mais encaixados, associados ao interflúvio que compartimenta as contribuições hídricas para os respectivos sistemas de drenagem (riacho do ouro e riacho do rolador).

Figura 9 - Ilustração das áreas do Ouro e Rolador



Fonte: Elaborado pela autora.

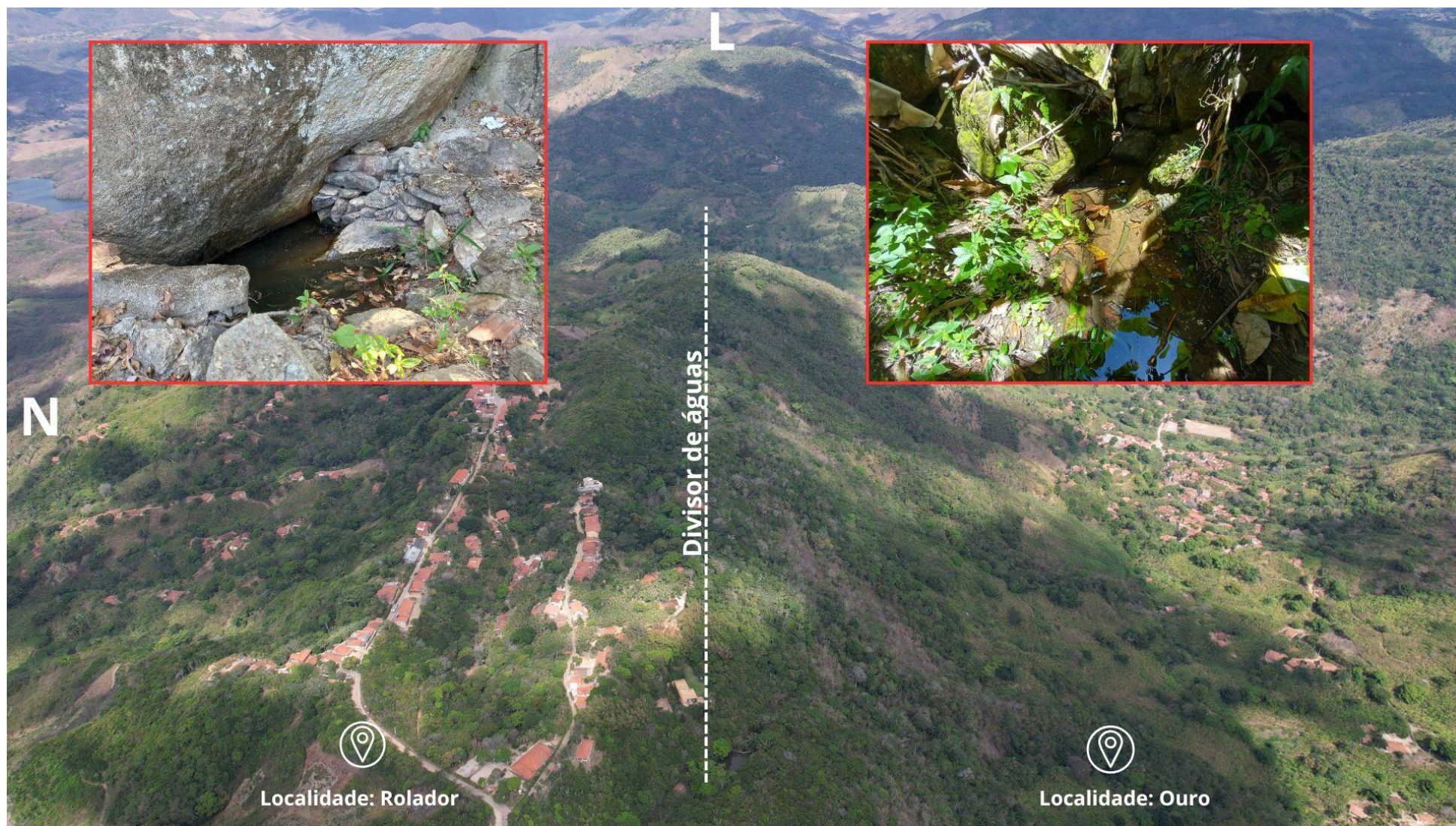
(Ilustração elaborada a partir do modelo Tandem-X de resolução espacial de 12 m)

Em campo foi possível observar que a maior energia do relevo condiciona a dinâmica hidrológica local, favorecendo o escoamento superficial e subsuperficial em direção aos talvegues.

Nesse contexto morfoestrutural, predominam ocorrência de nascentes em afloramento rochoso e exposta em ravinas/sulcos marcadas por exfiltração pontual. Nestas áreas não foram identificadas nascentes do tipo olho água caracterizadas por um espelhamento superficial.

Quanto à cobertura vegetal, verificou-se a predominância de uma formação mais fechada e com características mais secas, associada à localização no setor de sotavento. Essa condição limita a visualização detalhada do relevo e dificulta a identificação das nascentes por meio de imageamentos aéreos, uma vez que o dossel denso encobre as feições superficiais (Figura 10).

Figura 10 - Nascentes encontradas na área do Ouro e Rolador

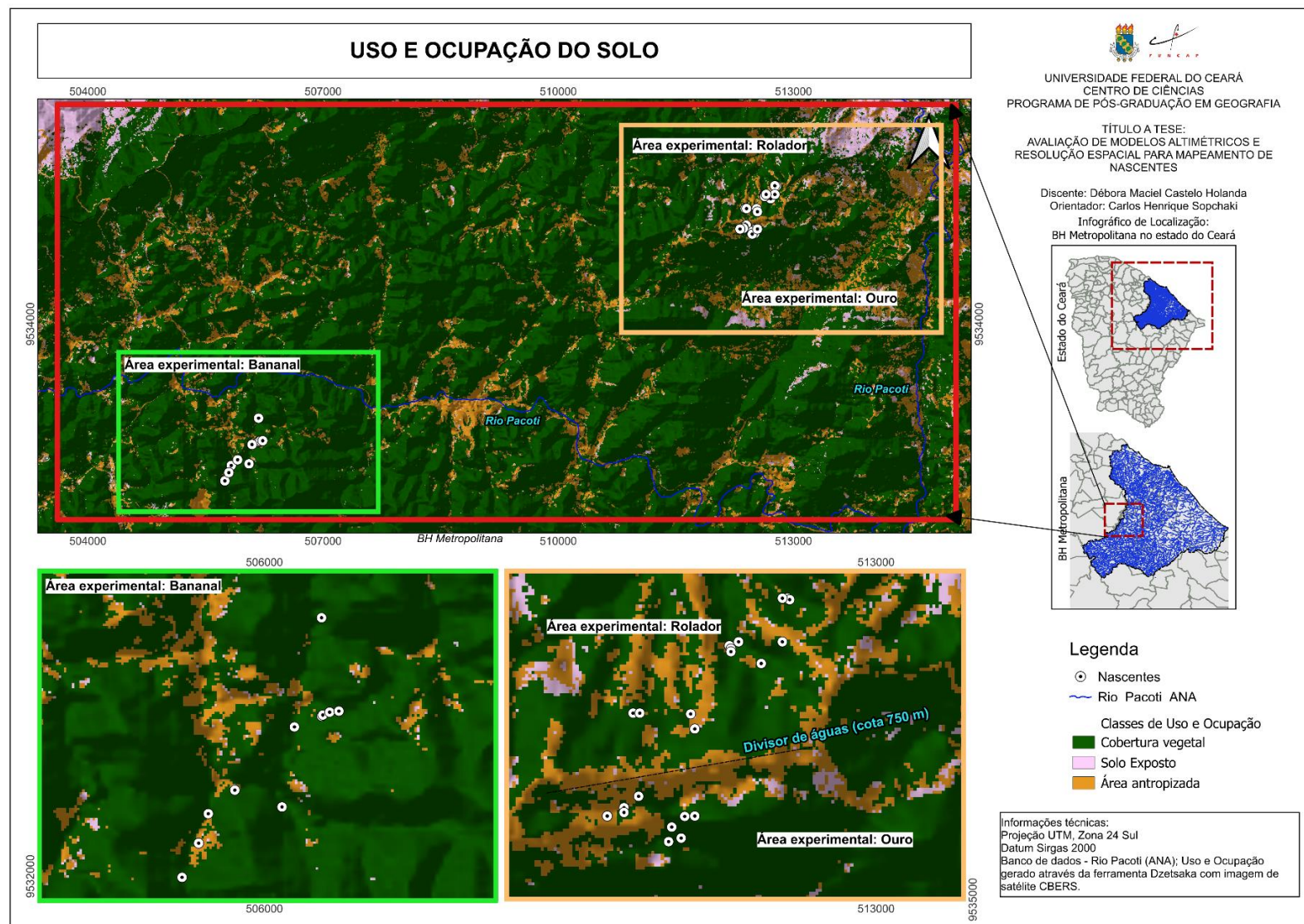


Fonte: Foto da autora, (2025).

Em termos de ocupação humana, também se observa uma diferença entre as áreas experimentais. No Bananal, em relação à localização das feições identificadas, predomina-se a presença de sítios, com nascentes relativamente isoladas e sem pressões antrópicas aparentes e imediatas que comprometam sua morfologia natural.

Por outro lado, nas nascentes identificadas nas áreas do Ouro e Rolador, verificou-se uma maior proporção de áreas antropizadas, com maior aglomeração de residências, sendo possível observar com maior frequência nascentes que apresentam alterações físicas em sua estrutura. Essa relação pode ser observada na Figura 11, que apresenta o mapa de uso e ocupação do solo das áreas experimentais.

Figura 11 - Uso e Ocupação das Áreas Experimentais



Fonte: Elaborado pela autora.

3 REVISÃO DE LITERATURA CIENTÍFICA

3.1 Gestão de água e a invisibilidade das nascentes

As nascentes desempenham papéis cruciais na manutenção da biodiversidade, no equilíbrio dos ciclos hidrológicos e no fornecimento de água para comunidades humanas e sistemas naturais. Apesar do valor intrínseco à sua natureza e importância eco-hidrológica, esses ambientes encontram-se continuamente ameaçados em escala global (Cantonati *et al.*, 2020; Stevens *et al.*, 2021; Currell *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o cenário alarmante é destacado por Stevens *et al.*, (2023), que reuniram contribuições de pesquisadores de todos os continentes, abrangendo 75 países e aproximadamente 300 mil nascentes. Os resultados evidenciaram que, apesar de sua relevância ecológica e social, esses ambientes permanecem amplamente negligenciados, enfrentando consequências severas, como poluição, redução de vazão e até o secamento total do fluxo hídrico, o que pode levar ao seu desaparecimento.

Além disso, o estudo demonstrou que as nascentes tendem a ser mais valorizadas apenas em períodos de escassez hídrica, sem que essa valorização sazonal se traduza em ações efetivas de conservação, mantendo-as vulneráveis às pressões antrópicas e às mudanças climáticas.

Paralelamente, uma das principais lacunas identificadas refere-se à ausência de informações espaciais confiáveis sobre a localização das nascentes, fator que dificulta a gestão, a representação cartográfica e a implementação de práticas adequadas de manejo (Faria, 1998; Gonçalves do Carmo *et al.*, 2014; Stevens *et al.*, 2021; Consentine *et al.*, 2022).

Observa-se, portanto, que a inexistência de dados consolidados compromete o desenvolvimento de políticas públicas eficazes e a promoção da conscientização social acerca da importância desses sistemas ambientais.

As nascentes são frequentemente consideradas um dos habitats aquáticos menos representados espacialmente, apresentando causas de ameaça desconhecidas ou mesmo ignoradas, apesar de sua abundância e relevância ecológica (Cantonati *et al.*, 2010, 2020; Stevens *et al.*, 2021, 2023).

Sob uma perspectiva socioambiental, as nascentes também possuem valores culturais, religiosos, medicinais e turísticos, além de representarem

fontes essenciais de abastecimento, especialmente para comunidades rurais (Luo *et al.*, 2020; Barman *et al.*, 2022).

Essa relação entre sociedade e fontes de água é evidenciada, por exemplo, por Fensham *et al.*, (2016), que ao mapear nascentes ativas e inativas na região da *Great Artesian Basin* (GAB), na Austrália, destacaram a importância do conhecimento local na localização dessas áreas e na reconstrução de históricos de vazão. Nesse estudo, artefatos de povos aborígenes foram utilizados como indicadores da presença de nascentes, demonstrando a conexão histórica entre populações originárias e os recursos hídricos.

Do ponto de vista ecológico, as nascentes abrigam flora e fauna específicas altamente dependentes das condições hidrológicas locais, sendo particularmente sensíveis a alterações ambientais. Entre os principais fatores de ameaça estão a captação direta de água, a poluição hídrica e a introdução de espécies invasoras (Suring, 2020).

Em regiões semiáridas, por exemplo, Orozco-Uribe *et al.*, (2021) identificaram a redução significativa do número de nascentes devido à superexploração de aquíferos, evidenciando a vulnerabilidade desses sistemas frente ao uso intensivo dos recursos hídricos.

Diante dessas ameaças, iniciativas de conservação e monitoramento têm sido desenvolvidas em diferentes partes do mundo com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre a localização, a dinâmica e os distúrbios ambientais associados às nascentes.

O estado de Nevada, nos Estados Unidos, e o estado de Queensland, na Austrália, destacam-se por possuírem amplo conhecimento cartográfico das áreas de nascentes. O plano de conservação de nascentes de Nevada, por exemplo, apresenta elementos que auxiliam na avaliação do estado ambiental e na projeção de cenários futuros, estabelecendo metas de representação, qualidade e cronogramas de monitoramento (Abele *et al.*, 2011).

De forma semelhante, na região do GAB, em Queensland, o monitoramento sistemático permitiu identificar expressivo rebaixamento da disponibilidade hídrica decorrente da captação excessiva de água. A partir desse diagnóstico, a gestão passou a incorporar proprietários de terra nos processos de regulação, restauração e proteção das fontes hídricas, evidenciando a importância da governança participativa (Powell *et al.*, 2015; Brake *et al.*, 2020).

Em consonância com esse movimento internacional, diversas iniciativas têm buscado soluções para o mapeamento de nascentes por meio da integração entre tecnologia, participação social e validação de campo. Projetos como a *Stewardship Initiative for Nature* (SPRING) e a abordagem *Springshed Management*, desenvolvida na região do Himalaia, demonstram que a combinação entre ferramentas tecnológicas e conhecimento territorial pode superar desafios relacionados à identificação espacial das fontes de água.

As experiências de mapeamento participativo (Nunes, 2017; Romano *et al.*, 2019; Ranjan; Pandey, 2021; Rathod *et al.*, 2021; Supangat *et al.*, 2023) também evidenciam que a articulação entre conhecimento local e sensoriamento remoto constitui uma alternativa eficaz, especialmente em contextos com escassez de dados geoespaciais.

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos é estruturada com base em bacias hidrográficas, modelo considerado adequado por promover gestão descentralizada e integração entre dimensões sociais, ambientais e econômicas (ANA, 2020).

No estado do Ceará, essa abordagem também é adotada, com planejamento voltado ao monitoramento e à implementação de instrumentos participativos de regulação do uso da água. Entretanto, historicamente, o desenvolvimento da política hídrica estadual ocorreu em paralelo às políticas de construção de açudes (Teixeira, 2015) resultando em uma infraestrutura fortemente orientada para o gerenciamento de reservatórios.

Conforme Chauhan *et al.*, (2023), o planejamento baseado em bacias hidrográficas tende a concentrar maior atenção em grandes reservatórios e corpos d'água, mostrando-se menos eficiente em escalas locais. Nesse sentido, embora as nascentes integrem o sistema hidrológico superficial, elas não recebem a mesma atenção que outros componentes da bacia hidrográfica.

Essa situação é reforçada pelo fato de que políticas públicas de gestão hídrica costumam atuar de forma mais significativa sobre águas superficiais (Jarvis *et al.*, 2005; Villar; Hirata, 2022), mantendo as nascentes, em grande medida, à margem das estratégias de planejamento.

Desse modo, observa-se que essas feições hidrológicas frequentemente se encontram em um limbo institucional, no qual não há clareza sobre qual órgão ou arranjo institucional deve atuar de forma efetiva em sua

gestão. Essa indefinição contribui para a ausência de instrumentos específicos, estudos técnicos, financiamento e orientações voltadas ao manejo das nascentes.

Consequentemente, a proteção desses ambientes no país vem ocorrendo de forma limitada e pontual, majoritariamente associada à Lei nº 12.651/2012 (Código Florestal), por meio da delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APP). No entanto, esse instrumento não se articula de maneira efetiva com políticas de identificação, monitoramento e gestão, restringindo-se à proteção normativa.

Além da APP, o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), consiste em um instrumento econômico baseado no princípio provedor-recebedor e usuário-pagador, no qual agentes responsáveis pela conservação ou recuperação de ecossistemas recebem compensações financeiras ou incentivos pelo benefício gerado à sociedade e ao meio ambiente (Brasil, 2021).

Estudos tem reconhecido o PSA como um instrumento promissor para a conservação e recuperação de nascentes, pois estabelece incentivos econômicos e compensações para produtores rurais que adotam práticas voltadas à manutenção desses sistemas hidrológicos (Marta *et al.*, 2015; Ikematsu *et al.*, 2016; Correia *et al.*, 2020).

Nesse contexto, iniciativas como o Programa Produtor de Água, coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, buscam incentivar a proteção de recursos hídricos, sobretudo nascentes, por meio do mecanismo do PSA. Entretanto, sua implementação ainda se concentra predominantemente na região Sudeste, apresentando menor abrangência em outras regiões do país, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Distribuição do Programa Produtor de Água



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo Ivey *et al.*, (2006), a capacidade institucional para a proteção de nascentes não depende exclusivamente do conhecimento técnico, mas resulta de arranjos multidimensionais que envolvem fatores políticos, mecanismos de financiamento, produção de conhecimento e redes de governança. Os principais desafios decorrem, sobretudo, da fragmentação institucional e da dependência de apoio proveniente de níveis superiores de governo.

Nesse contexto, evidencia-se a necessidade de investimentos na geração de dados geoespaciais que confirmem maior visibilidade às nascentes enquanto unidades ambientais estratégicas, ressaltando sua relevância tanto no campo científico quanto no âmbito da gestão de recursos hídricos.

Esse panorama reforça a importância de pesquisas voltadas ao aprimoramento de técnicas de detecção e representação espacial de nascentes, contribuindo para a redução das lacunas de informação existentes e para o fortalecimento das bases técnico-científicas que subsidiam a tomada de decisão.

Nesse sentido, a literatura converge ao indicar que o avanço do conhecimento sobre nascentes depende da ampliação de inventários espaciais confiáveis, do desenvolvimento de metodologias de mapeamento e da incorporação de abordagens integradas que articulem tecnologias geoespaciais, conhecimento local e validação em campo.

Tais elementos são fundamentais não apenas para a compreensão dos processos hidrológicos associados às áreas de nascente, mas também para subsidiar estratégias de conservação, planejamento territorial e gestão sustentável da água.

3.2 Métodos de mapeamento de nascentes e modelos altimétricos

Tomando como enfoque o uso de tecnologias, as técnicas oferecidas pelo sensoriamento remoto têm sido úteis para integrar a identificação de nascentes na paisagem (Stevens *et al.*, 2021). No entanto, sua aplicação apresenta desafios, pois depende tanto da resolução espacial dos produtos utilizados quanto da capacidade de detectar dados em áreas com densa cobertura vegetal (Fan *et al.*, 2013, Bosquillia *et al.*, Ribeiro., 2023, 2016, Faria *et al.*, 2023).

Buscando sanar essas limitações, diferentes estudos têm buscado integrar múltiplas abordagens para aprimorar o mapeamento e a caracterização de nascentes. Fensham *et al.*, (2016), por exemplo, ao investigar os impactos da exploração humana sobre as águas subterrâneas, realizaram um levantamento de nascentes responsáveis pelo abastecimento de comunidades locais.

Para isso, adotaram uma abordagem integrada, combinando documentos técnicos, como mapas históricos e relatórios governamentais, juntamente de evidências arqueológicas associadas a artefatos dos povos aborígenes. Também consideraram elementos da paisagem natural, incluindo assinaturas geomorfológicas, como cavidades de deflação, e a presença de determinadas espécies vegetais.

A articulação desses diferentes indicadores resultou na formulação de um protocolo que estabeleceu diretrizes para a realização de mapeamentos de nascentes ativas e inativas na região.

Seguindo uma linha semelhante, Chauhan *et al.*, (2023) conduziram um estudo sobre o estado ambiental das nascentes em áreas semiurbanas do Nepal. A pesquisa teve início com o mapeamento detalhado das nascentes, realizado com o apoio de moradores locais, destacando-se a participação de mulheres vinculadas a cooperativas, consideradas usuárias centrais e gestoras da água em suas comunidades. Cada município foi mapeado com o uso de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e colaboração comunitária, o que possibilitou a coleta de dados sobre o tipo morfológico das nascentes, seu estado ambiental, taxa de vazão, uso da terra, prioridade de uso da água e a distância em relação aos assentamentos humanos.

Isto posto, percebe-se que o trabalho de campo é uma etapa imprescindível para a identificação de nascentes. Contudo, é igualmente necessário considerar o uso das ferramentas tecnológicas disponíveis.

Nesse contexto, os Modelos Altimétricos constituem ferramentas essenciais para a análise do relevo, podendo ser gerados tanto por topografia convencional quanto por técnicas de sensoriamento remoto (Julzarika; Djurdjani, 2019). Com os avanços tecnológicos recentes, esses modelos têm aprimorado a representação da topografia terrestre e vêm sendo amplamente aplicados na extração automática de redes de drenagem (James *et al.*, 2012; Ariza-López *et al.*, 2018; Jamal; Ali, 2023).

De maneira geral, os Modelos Altimétricos (MDE e MDT) apareceram por volta das décadas de 50 e 60, onde a aquisição se dava por meio de técnicas que geravam dados de elevação a partir de fotografias aéreas. Como esses modelos eram gerados manualmente, apresentavam imprecisões decorrentes das limitações tecnológicas da época, além de incorporarem certo grau de subjetividade, influenciado pelas decisões e interpretações dos profissionais (Miller, 1958).

Com o avanço da tecnologia computacional e a utilização de cotas altimétricas digitalizadas, os Modelos Altimétricos passaram a ser aplicados em diversas áreas. Um marco significativo desse período foi o lançamento do *United States Geological Survey Digital Elevation Model* (Varanka, 2005), que, com o envio de satélites em missões espaciais, passou a incorporar a fotografia orbital como uma nova fonte para a geração de Modelos Altimétricos, ampliando consideravelmente as possibilidades de aplicação.

Nos finais dos anos 90, sob condução da NASA e da Agência Espacial Alemã, a missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), possibilitou a disponibilização de um MDE com uma cobertura quase que global com resolução de 90 metros (Farr *et al.*, 2007).

Com tecnologias de alta precisão, como o *Light Detection and Ranging* (LiDAR), as novas gerações de MDEs e MDTs têm possibilitado a obtenção de informações cada vez mais precisas, por meio de produtos de alta resolução. No que diz respeito à cobertura global, missões como o TanDEM-X, da Alemanha, e o programa ALOS, do Japão, têm fornecido dados em maior detalhe para a escala global (Rosenqvist *et al.*, 2007). Observa-se assim, que os diversos métodos e técnicas de aquisição de Modelos Altimétricos foram significativamente impulsionados pelos avanços tecnológicos e pela crescente disponibilização de dados espaciais.

No contexto dos estudos hidrológicos, estes produtos são utilizados como um dado de entrada para gerar os MDEHCs. Estes, por sua vez, são fundamentais para a extração automática de informações hidrológicas, tornando o processo mais eficiente e menos dependente das cartas topográficas tradicionais (Tarboton *et al.*, 1991; Santos *et al.*, 2011; Marques *et al.*, 2011; Cecílio *et al.*, 2013, Sousa, 2023; Yogi e Stanganini, 2023).

Para Garbrecht; Martz (2000), a derivação automatizada de dados topográficos a partir de MDEs é mais rápida, menos subjetiva e fornece medições mais reprodutíveis do que as técnicas manuais tradicionais.

De maneira geral, Modelos Altimétricos são utilizados em pesquisas envolvendo recursos hídricos para extrair informações fisiográficas de bacias hidrográficas como a configuração das redes de drenagem, localização dos divisores de água, comprimento e inclinação de canais e propriedades geométricas de sub-bacias (Garbrecht; Martz, 1994, 2000).

A utilização de MDEs e MDTs no contexto de identificação e mapeamento de nascentes ainda é pouco explorado, sendo mais comum seu uso em abordagens focadas nas cabeceiras. Esses estudos geralmente se concentram na morfologia, observando a relação estrutural como área-inclinação da vertente, curvatura da encosta e distribuição da água acumulada (Hancock; Evans, 2006; Wohl, 2018; Capoane, 2022).

Desse modo, é importante diferenciar o conceito de cabeceiras do conceito de nascentes. Embora as cabeceiras estejam frequentemente associadas às áreas onde ocorrem nascentes, tratam-se de conceitos distintos. As cabeceiras englobam um contexto mais amplo, fortemente caracterizado por terrenos íngremes em serras, onde há acúmulo de água por precipitação, derretimento de neve ou drenagem superficial, processos que alimentam os riachos formadores dos rios principais (Teodoro *et al.*, 2007; Felipe *et al.*, 2009). Por outro lado, as nascentes estão diretamente ligadas à exfiltração de águas subterrâneas, podendo emergir em diferentes posições do relevo.

De forma predominante, os trabalhos que utilizam MDEHCs nos estudos hidrológicos, direcionam atenção para testar e discutir a qualidade dos dados automatizados. Para isso, são explorados diversos métodos de aquisição de dados, produtos de satélites e a aplicação de múltiplas ferramentas integradas aos Sistemas de Informação Geográfica - SIGs para a extração dessas informações (Tarboton *et al.*, 1991; Buarque *et al.*, 2009; Bosquilia *et al.*, 2015; Monteiro *et al.*, 2015; Rana, Suryanarayana, 2019; Niipele; Chen, 2019; Li *et al.* 2020; Faria *et al.*, 2023).

Moreira (2012), discutindo a larga aplicação dos MDEs na hidrologia com a extração automática de informações, apresentou uma proposta de verificação da consistência hidrológica a partir da comparação de uma rede de

drenagem obtida numericamente e uma rede de referência. Para isso, utilizou o processo de otto-codificação para classificação de rios sob códigos numéricos gerados a partir do comprimento da rede. Com essa metodologia, a identificação de rios principais e a densidade das redes hidrográficas se tornou facilitada, uma vez que, permitiu discernir as inconsistências hidrológicas através de números ao invés de um recurso apenas visual.

Bosquillia *et al.*, (2015) utilizaram a extração automática baseado nos métodos D8 e D-*Infinity* para fins comparativos. Como referência, utilizaram uma carta topográfica de 1:10.000 do município de Piracicaba em São Paulo. A área de estudo compreendeu uma microbacia hidrográfica do Córrego do Ceveiro que ocupa um território de 21,8km² do município. Observaram os parâmetros relacionados ao comprimento de drenagens e número de nascentes. Concluíram que nenhum dos métodos serviram para quantificar o número de nascentes, uma vez que, os métodos automáticos não conseguiram distinguir os tipos de nascentes e superestimaram a quantidade englobando o escoamento lateral em cursos d'água mais espessos.

Em um estudo posterior Bosquillia *et al.*, (2016) realizaram uma comparação entre os produtos de imagens dos satélites SPOT, Landsat 8 e imagens do Google *Earth* para o mapeamento visual de drenagens e nascentes. Para avaliar a precisão dos resultados, utilizaram a rede de drenagem das cartas topográficas na escala 1:10.000 como referência. Ao final, os autores observaram semelhanças entre os resultados dos diferentes produtos e o mapa básico de referência.

No entanto, os autores destacaram que esses produtos foram insuficientes para a localização e o mapeamento completo de todas as nascentes. Ressalta-se aqui, portanto, que a utilização de cartas topográficas como dado de referência para validação de drenagens e nascentes extraídas de produtos digitais impõe limitações metodológicas, uma vez que esses mapas resultam de generalizações cartográficas e interpretações prévias, o que pode comprometer a localização real das feições.

Morais e Sales (2016) investigaram a geração automática de drenagem, comparando as ferramentas *Hydrology* e TauDEM, juntamente com as bases de dados SRTM, *Austrian Global Elevation Data Model* - AGEDM e *Advanced World 3D* - AW3D, todas com resolução de 30 metros. Como

referência de controle, utilizaram a drenagem disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Destacaram a ferramenta TauDEM como superior para a extração da drenagem. Por sua vez, o modelo derivado do AW3D mostrou melhor resultado na geração da drenagem, de acordo com a referência de controle utilizada.

Tasca *et al.*, (2021) avaliaram a aplicabilidade de um MDT na prospecção de nascentes em campo na área urbana de Cuiabá em Mato Grosso. A metodologia do estudo envolveu a utilização de dados altimétricos para gerar um MDT hidrologicamente consistente, com base em pontos cotados provenientes de um aerolevante realizado por uma empresa contratada pela Prefeitura Municipal de Cuiabá. Esses pontos foram obtidos por aerofotogrametria digital, corrigidos por pontos de controle no terreno e garantiram um padrão de precisão exigido para cartas classe A, na escala 1:1.000. A altimetria foi representada por curvas de nível com 1 metro de equidistância e pontos cotados com precisão de 0,5 m.

Para gerar o MDT, foi utilizado o algoritmo "*Topo to Raster*", baseado no *Australian National University's Digital Elevation Model* (ANUDEM), que permite a interpolação eficiente das superfícies de elevação, mantendo a continuidade da superfície e uma rede de drenagem conectada. A resolução do MDT foi ajustada considerando a densidade da malha de pontos cotados, com 1 ponto por 26,76 m², e adotou-se um tamanho de pixel de 5 x 5 m (25 m²), compatível com as características topográficas das zonas de cabeceira. Isso assegurou uma representação precisa das redes de drenagem e divisores de bacia.

Como resultado, obtiveram 62,8% indicativo de nascentes em um raio de até 300 metros, sendo que em 28,6% não foi possível localizar nenhuma nascente devido ao alto grau de antropização e em 8,6% não houve indicativo de nascente no entorno. De acordo com os autores, o método demonstrou ser eficaz, porém sua aplicação é viável apenas em áreas que possuam levantamentos altimétricos detalhados. Ainda assim, cabe perceber que o percentual obtido de indicativo de nascentes foi baixo considerando o uso de um produto de alta precisão cartográfica (Classe A), o que pode evidenciar limitações do método de extração automático.

Vélez-Nicolás *et al.*, (2021), avaliaram a contribuição dos Veículos Aéreos Não Tripulados – VANTs nos estudos aplicados a hidrologia. Apontaram que, o uso dessa tecnologia tem superado as deficiências apresentadas pelos produtos de satélites e preenchido lacunas quanto a representação terrestre em diferentes escalas. Dessa forma, com essas vantagens, e alcançando resoluções de ordem centimétrica, a construção de MDEs a partir de VANTs tem contribuído para um refinamento dos produtos digitais (Ruiz *et al.*, 2013; Hashemi-Bani *et al.*, 2018).

Capoane (2022), estudou a sensibilidade geomorfométrica a partir da drenagem extraída de Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Elevação (MDE). Segundo os autores, o MDS gerado a partir de sensoriamento remoto orbital (Alos, Aster, SRTM e Topodata) apresentou baixa capacidade de representação das características topográficas. Em contraponto, o MDE construído a partir de sensoriamento remoto aereofotogramétrico, com resolução de 5 m, permitiu uma melhor precisão e acurácia. Na definição das cabeceiras de drenagem, no entanto, todas as bases resultaram em incongruências atribuída ao método de extração D8.

Wohl (2018) abordou os desafios envolvidos na identificação da localização das cabeceiras de canais. A autora argumentou que essas áreas podem ser previstas a partir do escoamento superficial que caracteriza o início do canal, além de considerar a curvatura da encosta. Ela também enfatizou a importância de avaliar a consistência espacial das cabeceiras ao longo do tempo.

Hancock e Evans (2006), no intuito de mapear a posição da área hidrogeomorfológica dos sistemas de cabeceira, propuseram uma abordagem probabilística baseada em atributos e propriedades de campo, além de características relacionadas à área-declividade. Como resultado, constataram que a relação entre área e inclinação, juntamente com a distribuição de área acumulada, foi eficiente para determinar uma resolução espacial adequada para representar a transição da encosta para o canal.

Felippe *et al.*, (2009) empregaram a vegetação como indicador para localização espacial de nascentes com a identificação do tipo higrófilas e indicando a cabeceira de canal de drenagem com o uso de modelo digitais de elevação construído a partir de imagens do satélite *QuickBird*.

Dessa forma, inferiram que manchas de áreas úmidas em regiões mais secas, podem ser enquadradas como possíveis chaves de classificação para mapeamento de nascentes. Contudo, a aplicabilidade desse método tende a ser condicionada às características ambientais da área de estudo, podendo não ser diretamente replicável em regiões com densa cobertura vegetal ou em terrenos montanhosos, onde a complexidade do relevo e a resposta espectral da vegetação dificultam a distinção dessas características.

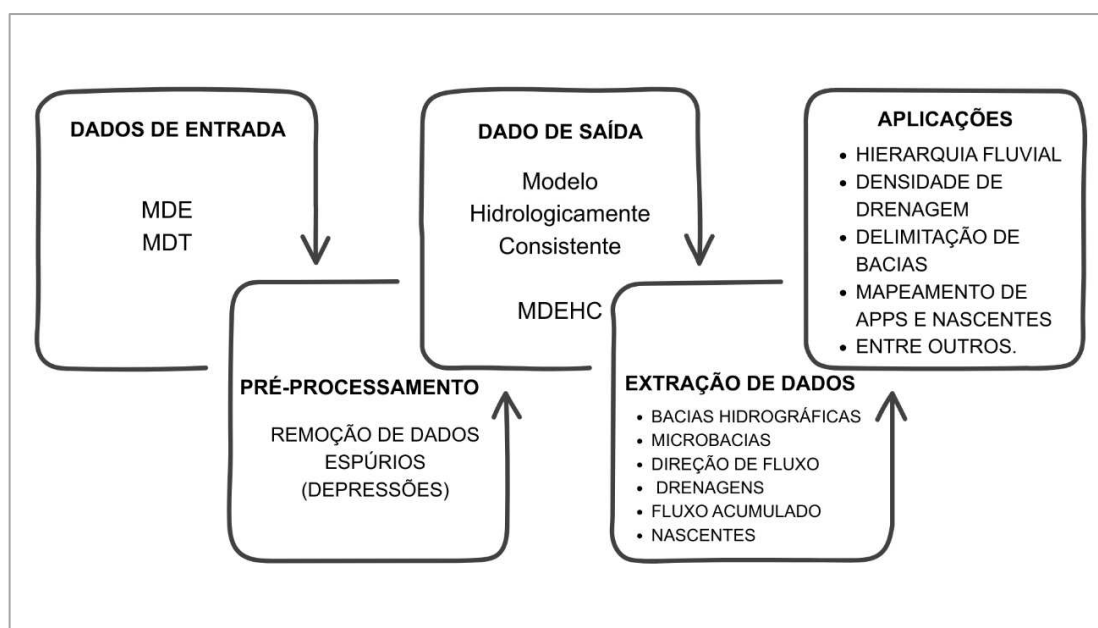
Fan *et al.*, (2013) ao comparar a hidrografia obtida por meio de MDEs, estabeleceram uma área mínima satisfatória como critério para o mapeamento do início dos canais. Para essa definição, mesmo com o uso de imagens de alta resolução espacial, foi necessário considerar outros elementos, como solo saturado, mata ciliar, pequenos reservatórios e estradas, para auxiliar na identificação visual de nascentes e cursos d'água.

Diante esses estudos, entende-se por que a utilização de Modelos Altimétricos para a extração automática de dados hidrológicos requer a consideração de diversos aspectos metodológicos. Destaca-se, assim, a diversidade de ferramentas hidrológicas integradas aos SIGs, as quais disponibilizam distintos algoritmos e abordagens para a derivação de feições hidrológicas, permitindo ao pesquisador selecionar aquelas mais adequadas aos objetivos do estudo e às especificidades da área analisada.

3.3 Extração automática de dados hidrológicos

A rotina de preparação e extração das informações hidrológicas (Figura 13) segue um padrão no qual se busca, inicialmente, tratar dos sumidouros existentes nos modelos altimétricos. Em seguida, realiza-se a elaboração do MDEHC e, por fim, a extração das informações hidrológicas de interesse.

Figura 13 - Rotina para extração de dados hidrológicos



Fonte: Elaborado pela autora.

Vários métodos têm sido elaborados para remover as “espúrias” que interferem nos procedimentos subsequentes de definição da drenagem (O’Callaghan; Mark, 1984; Jenson; Domingue, 1988; Garbrecht *et al.* 1996; Planchon; Darboux, 2001; Wang; Liu, 2006).

Há, contudo, desafios quanto a remoção dos sumidouros, particularmente em paisagens planas, entendidas, no contexto de modelos altimétricos, como extensas áreas onde células adjacentes apresentam elevações idêntica, resultando na ausência de gradientes topográficos discerníveis.

Conforme discutido por Garbrecht e Martz (1997), tais superfícies planas raramente representam um plano real na paisagem natural, sendo frequentemente associadas a resolução espacial do MDE ou ao próprio pré-processamento, especialmente após a aplicação de rotinas de remoção de depressões.

Assim, a remoção de sumidouros quando aplicada indiscriminadamente em áreas de baixo relevo, pode intensificar o problema ao planificar artificialmente o terreno, eliminando rebaixamentos topográficos reais. Como consequência, o escoamento passa a ser controlado por artefatos

numéricos em vez da topografia real, comprometendo a extração de direções de fluxo e a conectividade da rede de drenagem (Garbrecht; Martz, Taborton, 1997)

Após o tratamento dos pixels espúrios do modelo de entrada, os algoritmos executam os processos de extração dos dados hidrológicos. Dessa forma, em geral, configuram como arquivos de saída desse procedimento produtos como o delineamento da bacia hidrográfica e microbacias, definição da rede de drenagem superficial e nascentes, acumulação e direção de fluxos e ordem dos canais.

Essa automatização de rede de drenagem derivada requer a observação quanto ao método de extração utilizada pelas ferramentas, bem como a definição de um limiar dado para o início dos canais.

O método D8 é o mais comumente utilizado e caracteriza-se por atribuir a cada célula um fluxo único, orientado para a direção descendente (Fairfield; Leymarie, 1991; Garbrecht; Martz, 2000).

O limiar é uma variável subjetiva que não possui um consenso sobre um valor ótimo. Dessa forma, a adoção para esse parâmetro segue o método de tentativa e erro que, por vezes, é estabelecido através de testes e combinações com outros aspectos físicos da paisagem estudada ou mesmo por meio de relações numéricas que resulte na representação da drenagem mais próxima da realidade (Buarque *et al.*, 2009; Fan *et al.* 2013; Bosquillia *et al.*, 2015; Reddy *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020).

No QGIS, quatro caminhos principais permitem a extração de informações hidrológicas a partir de modelos altimétrico (MDE/MDT): SAGA GIS, GRASS GIS, TauDEM e WhiteboxTools. Ainda que sigam uma rotina de fluxo semelhante (inserção do modelo de entrada, tratamento dos sumidouros, definição do limiar de contribuição e geração de feições hidrológicas) cada ferramenta utiliza métodos específicos tanto para a correção dos sumidouros quanto para geração da rede de drenagem.

O SAGA GIS oferece dois métodos amplamente utilizados para o tratamento dos dados espúrios. O algoritmo de Wang; Liu (2007) propõe uma alternativa mais eficiente ao método convencional de Jenson; Domingue (1988), integrando em um único processo o preenchimento das depressões, a determinação da direção de fluxo e a delimitação das bacias hidrográficas. Esse método destaca-se pela agilidade, sobretudo em grandes áreas e em modelos

de maior resolução espacial. Outro método disponibilizado por esta ferramenta é o proposto por Planchon; Darboux (2001), que opera de forma iterativa, inicialmente inundando toda a superfície e, em seguida, removendo o excesso de água. Essa abordagem permite gerar superfícies horizontais, úteis para estudos de armazenamento, ou ligeiramente inclinadas para a extração da rede de drenagem. Para gerar a drenagem, o SAGA utiliza principalmente os algoritmos D8 e MFD (*Multiple Flow Direction*), e sugere como limiar padrão o valor 5, sendo que valores maiores resultam em redes mais densas.

O GRASS GIS utiliza o método clássico elaborado por Jenson; Domingue (1988) para o preenchimento das depressões, elevando gradualmente as células contidas nos sumidouros. Após a correção, o GRASS calcula a direção de fluxo utilizando a abordagem D8, delimitando automaticamente bacias e trechos de drenagem com base na acumulação. O limiar utilizado, *denominado minimum flow accumulation for streams*, adota o valor padrão 1, e segue a mesma lógica presente no SAGA onde valores maiores produzem redes com maior densidade.

O *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (TauDEM) é uma ferramenta amplamente reconhecida para análises hidrológicas e que pode ser operada via linha de comando. O método utilizado para o tratamento das depressões também se baseia em Jenson e Domingue (1988). No entanto, a grande particularidade do TauDEM está nos algoritmos utilizados para geração da drenagem, especialmente o *D-Infinity*, que possibilita a representação contínua e múltipla das direções de fluxo, além do algoritmo D8.

O WhiteboxTools, além de oferecer diversas ferramentas em sensoriamento remoto e análise espacial, possui rotinas modernas voltadas especificamente para a análise hidrológica. O tratamento de sumidouros é baseado nos algoritmos de Lindsay (2015, 2016), que possibilitam o preenchimento completo, seletivo ou parcial das depressões. Entre os métodos disponíveis, destaca-se o *Breach Depressions*, um algoritmo híbrido (*breach-first, fill-second*) que cria cortes na superfície onde a drenagem naturalmente deveria ocorrer. Para a geração da drenagem, o WhiteboxTools disponibiliza algoritmos como D8, *D-Infinity* e FD8, além da extração da rede com a ferramenta *Extract Streams*, dependente de um limiar indicado pelo usuário.

Exposto os métodos observam-se que as ferramentas se diferem parcialmente quanto aos algoritmos utilizados, sobretudo, para tratar sumidouros e gerar a rede de drenagem. Essas diferenças refletem na forma e na densidade da rede extraída. Os limiares, por sua vez, não são diretamente comparáveis entre as plataformas. Valores superiores a 100 são comuns no TauDEM (via linhas de comando) e no WhiteboxTools, que, além disso, não apresentam de imediato nas suas interfaces um valor recomendado ao usuário. Em contraste, o GRASS GIS e o SAGA GIS já oferecem sugestões iniciais de limiar, de 1 e 5, respectivamente. Essa variabilidade reforça que a escolha do limiar é subjetiva e deve ser ajustada iterativamente, combinando testes preliminares com a observação dos resultados.

Deste modo tem-se que a construção de um MDEHC exige ajustes no pré-processamento, incluindo a seleção do MDE /MDT de entrada, a escolha da ferramenta e o método de tratamento de sumidouros, além da definição de um limiar adequado.

Todavia, o pós-processamento também requer controle, sendo indispensável a realização de análises de validação que considerem a compatibilidade dos dados digitais com as características hidrológicas reais da área, garantindo que os produtos gerados representem o comportamento da paisagem.

4 METODOLOGIA

4.1 Delineamento metodológico geral

A pesquisa foi estruturada a partir de uma abordagem integrada, combinando levantamento bibliográfico, processamento de dados altimétricos em ambiente de SIG e validação em campo. O fluxo metodológico adotado foi concebido de forma sequencial e complementar, permitindo avaliar a influência da resolução espacial e do tipo de modelo altimétrico (MDE e MDT) na extração automática de drenagens e no mapeamento de nascentes.

As atividades envolveram etapas simultâneas de revisão teórica, aquisição e processamento de dados orbitais, campanhas de campo e análise comparativa dos resultados, conforme sintetizado no fluxograma metodológico (Figura 14).

Figura 14 - Fluxo metodológico



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Sistematização das variáveis e testes preliminares

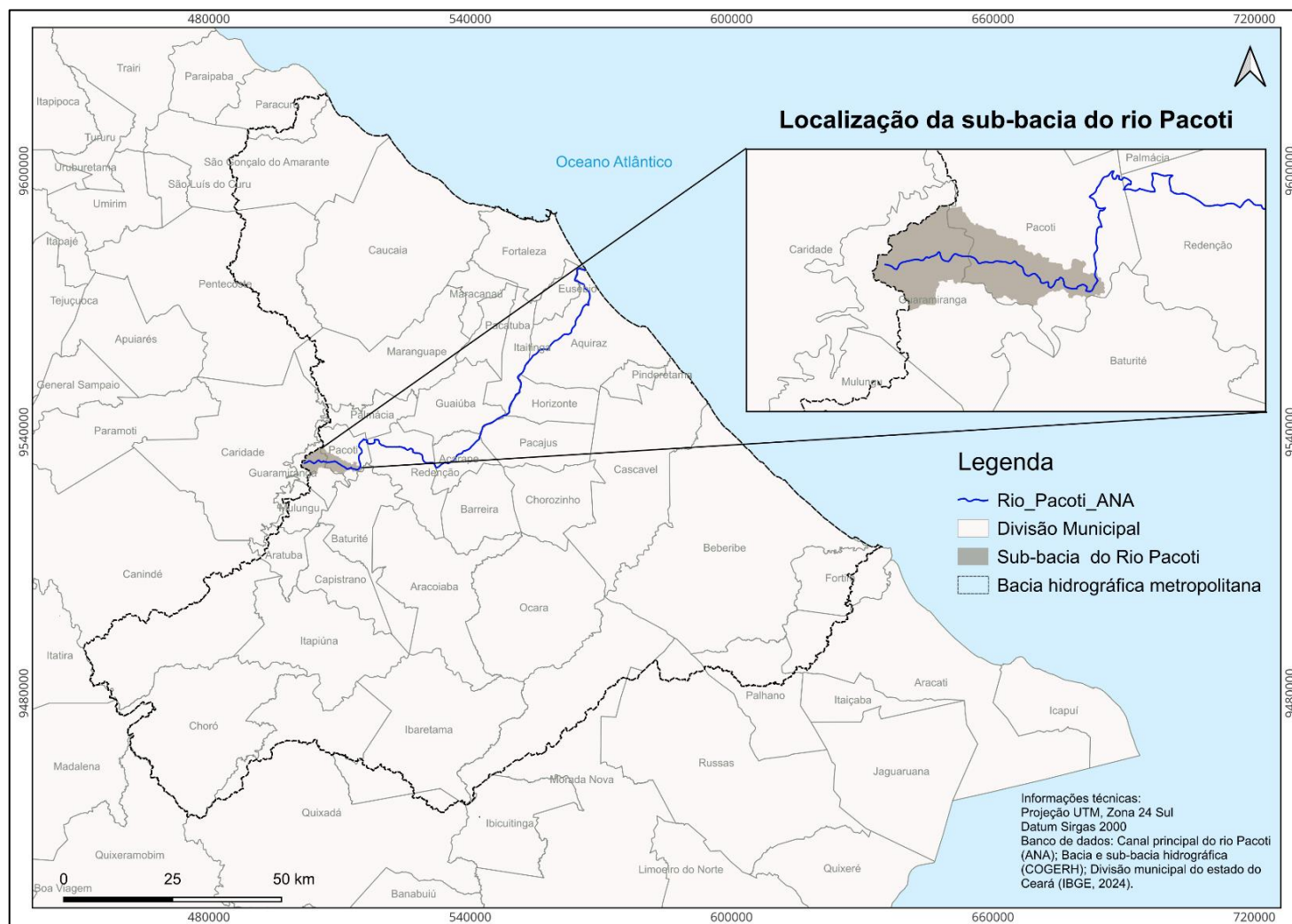
Considerando a ampla variedade de combinações possíveis nas ferramentas hidrológicas disponíveis no QGIS, optou-se por uma sistematização metodológica que permitisse controlar as variáveis, concentrando a análise exclusivamente nas diferenças associadas à resolução espacial e ao tipo de modelo altimétrico (MDE ou MDT).

Nesse sentido, foram fixados os parâmetros hidrológicos adotando-se os limiares padrão sugeridos por cada ferramenta, bem como o método D8 para a determinação da direção de fluxo e geração da rede de drenagem, de modo a reduzir interferências metodológicas decorrentes da parametrização e garantir maior comparabilidade entre os resultados.

Para verificar a adequação dessa abordagem, foram realizados testes preliminares com diferentes ferramentas hidrológicas (SAGA GIS, GRASS GIS, TauDEM e WhiteboxTools) utilizando como dado de entrada o MDE Copernicus, com resolução espacial de 30 metros.

Os testes concentraram-se na microbacia do rio Pacoti, avaliando a capacidade das ferramentas em representar o canal principal do rio Pacoti e as drenagens contribuintes verificadas em campo (Figura 15).

Figura 15 - Localização da sub-bacia do rio Pacoti



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados dos testes evidenciaram diferenças significativas associadas ao algoritmo empregado na extração da rede de drenagem, conforme indicado pelos valores de densidade de drenagem (Dd), densidade hidrográfica (Dh) e número de nascentes (Nn), conforme organizado na tabela 1.

Tabela 1 - Valores fisiográficos da microbacia do rio Pacoti

Ferramenta	Dd	Dh	Nn
GRASS	7,33	2,10	116
TauDEM	2,82	1,66	63
Whitebox	1,45	2,13	49
SAGA	1,75	1,20	41

Fonte: Elaboração própria.

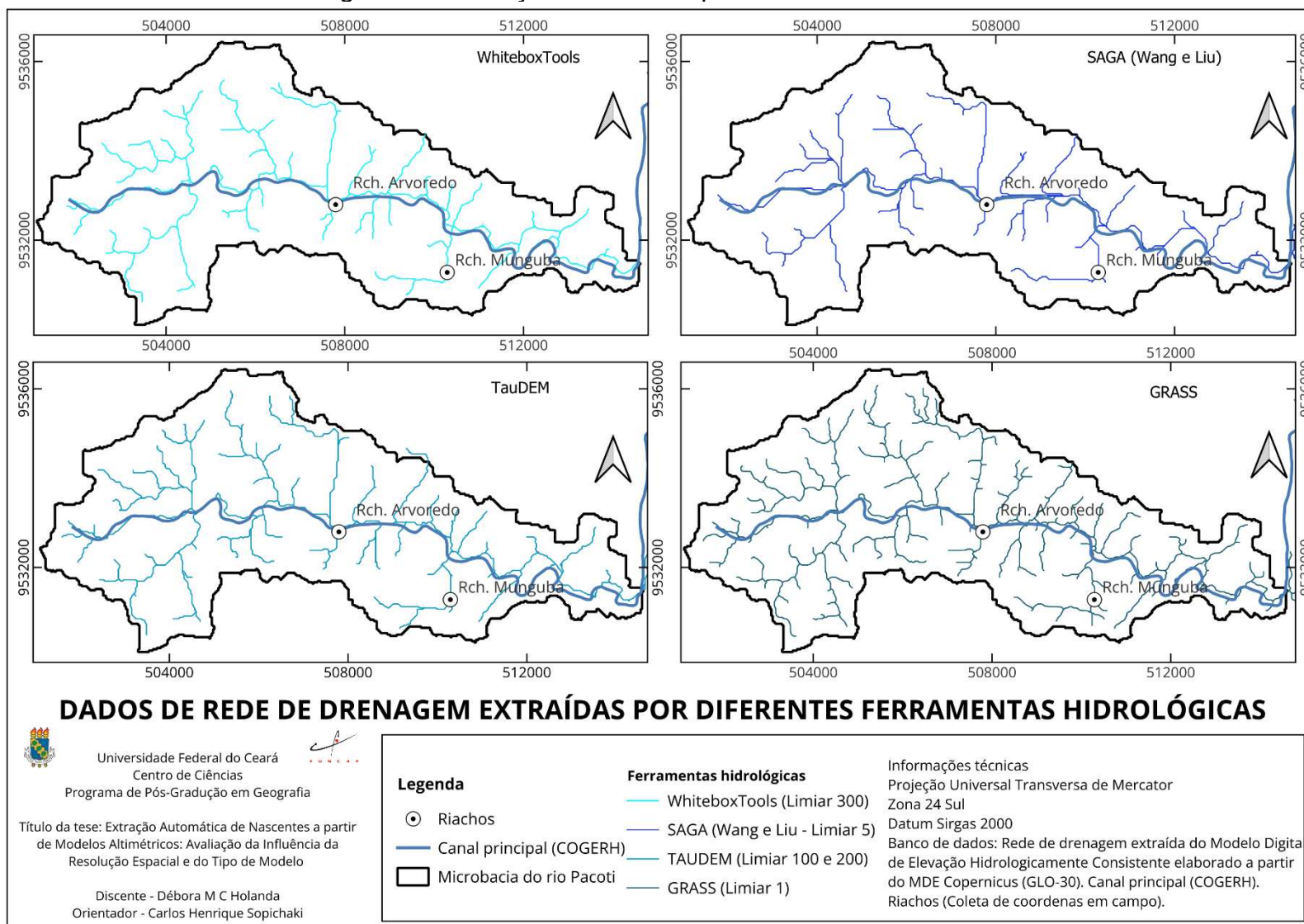
O GRASS GIS apresentou os maiores valores para todos os indicadores, refletindo elevada sensibilidade na geração de canais de primeira ordem, o que pode indicar uma possível superestimação das feições hidrológicas.

Os algoritmos TauDEM e WhiteboxTools apresentaram comportamento intermediário, com resultados semelhantes entre si, enquanto o SAGA GIS demonstrou um comportamento mais conservador, resultando em menores valores de densidade hidrográfica e de drenagem.

Com base nesses testes preliminares, o SAGA foi adotado como ferramenta padrão para a execução metodológica, em razão de seu comportamento mais conservador e da maior coerência hidrológica observada em comparação com as referências de campo nos riachos Arvoredo e Munguba, como ilustrado na figura 16.

Assim, isolando-se o fato algoritmo, a partir da adoção do SAGA, as análises foram concentradas na avaliação da influência da resolução espacial e do tipo de modelo altimétrico sobre os produtos hidrológicos gerados, buscando compreender de que forma essas variáveis interferem na extração automática de nascentes.

Figura 16 - Extração automática por diferentes ferramentas



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 Aquisição e caracterização dos modelos altimétricos

A seleção dos modelos altimétricos utilizados neste estudo priorizou dados gratuitos, obtidos por sensores orbitais de radar, contemplando diferentes resoluções espaciais e variações quanto ao tipo de modelo (MDE e MDT).

Foram utilizados seis produtos altimétricos: ANADEM, FABDEM, NASADEM, Copernicus DEM, TanDEM-X e SRTM/ASF. Os critérios de escolha envolveram a disponibilidade gratuita, a diversidade de resolução espacial (original ou reamostrada) e a possibilidade de comparação entre modelos que representam a superfície (MDE) e o terreno com remoção de objetos superficiais (MDT).

Os MDTs utilizados no estudo (ANADEM e FABDEM) possuem resolução espacial de 30 metros e são derivados do Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model, submetidos a processos de pós-tratamento voltados à remoção de objetos superficiais, como edificações e vegetação.

O FABDEM (*Forest And Buildings removed DEM*) é um produto disponibilizado gratuitamente sob licença *Creative Commons* CC BY-NC-SA 4.0. O modelo foi desenvolvido com o objetivo de fornecer uma representação mais próxima da topografia do terreno, por meio da remoção sistemática de cobertura vegetal e estruturas artificiais, sendo amplamente empregado em estudos hidrológicos e geomorfológicos (Hawker *et al.*, 2022).

O ANADEM, por sua vez, consiste em um MDT desenvolvido especificamente para a América do Sul, resultado de uma parceria entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e a ANA. Assim como o FABDEM, o ANADEM é derivado do Copernicus GLO-30, porém incorpora ajustes regionais voltados às características fisiográficas sul-americanas (Laipelt *et al.*, 2024), o que o torna particularmente relevante para aplicações hidrológicas em áreas tropicais.

No conjunto dos MDEs, foram utilizados quatro produtos com diferentes resoluções espaciais: NASADEM, Copernicus DEM, TanDEM-X e SRTM/ASF.

O NASADEM é um modelo global com resolução espacial de 30 metros, desenvolvido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) a partir do aprimoramento do SRTM original. O produto incorpora

correções de falhas (vazios de dados), refinamentos altimétricos e a integração de informações auxiliares não presentes na versão original do SRTM, resultando em maior consistência geométrica (Buckley, 2020).

O Copernicus DEM (COPDEM), também com resolução espacial de 30 metros, é disponibilizado pela *European Space Agency* (ESA) e representa a superfície terrestre global. Trata-se de um produto derivado da missão TanDEM-X/TerraSAR-X, amplamente reconhecido pela elevada consistência altimétrica e pela qualidade dos dados, sendo frequentemente apontado como uma das principais referências entre os modelos orbitais gratuitos (Bielski *et al.*, 2024).

O TanDEM-X destaca-se como o modelo de maior refinamento espacial utilizado neste estudo, com resolução nativa de 12 metros. Trata-se de um produto gerado a partir de radar interferométrico em banda X, operado pelo German Aerospace Center (DLR), por meio da formação controlada dos satélites TerraSAR-X e TanDEM-X. Essa configuração possibilitou a geração de um Modelo Digital de Elevação global homogêneo, conhecido como WorldDEM, com elevada acurácia altimétrica (Wessel, 2018). De acordo com as especificações técnicas oficiais, o TanDEM-X apresenta erro vertical absoluto inferior a 10 metros (90% de confiança) e erro relativo inferior a 2 metros em áreas de relevo suave.

O SRTM/ASF consiste em uma versão reamostrada dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), disponibilizada pela *Alaska Satellite Facility* (ASF) com resolução espacial de 12,5 metros. Esse produto resulta de procedimentos de correção topográfica aplicados aos dados SRTM originais, com apoio de modelos de maior resolução, buscando aprimorar a representação espacial sem alterar substancialmente a natureza do dado original (ASF, 2015).

Com relação ao SRTM clássico, optou-se por não incluí-lo diretamente nas análises. Estudos comparativos recentes indicam que o Copernicus DEM e seus derivados apresentam desempenho superior ao SRTM em diferentes métricas de qualidade altimétrica (Bielski *et al.*, 2024). Ademais, o NASADEM, também utilizado neste estudo, constitui uma evolução direta do SRTM, incorporando correções de falhas, preenchimento de vazios e refinamentos geométricos que ampliam a consistência do modelo (NASA JPL, 2021). Dessa forma, a inclusão simultânea do SRTM clássico configuraria

redundância metodológica, sem acréscimo analítico relevante aos objetivos da pesquisa.

O Quadro 1 apresenta a síntese das principais características dos modelos altimétricos empregados na pesquisa, destacando a resolução espacial e a fonte dos dados.

Quadro 1 - Relação dos modelos altimétricos utilizados

MODELO	RESOLUÇÃO ESPACIAL	FONTE DO DADO
ANADEM	30 metros	COPDEM processado
FABDEM	30 metros	COPDEM processado
NASADEM	30 metros	Radar interferométrico
COPDEM	30 metros	Radar (TanDEM-X/TerraSAR-X)
TanDEM-X	12 metros	Radar interferométrico
SRTM/ASF	12,5 metros	Radar interferométrico (SRTM reamostrado)

Fonte: Elaborado pela autora.

4.4 Construção da base de dados em campo

Os trabalhos de campo constituíram etapa fundamental da metodologia, subsidiando tanto a validação dos produtos derivados dos modelos altimétricos quanto a definição e caracterização das áreas experimentais. As atividades de campo foram realizadas ao longo de cinco campanhas, com objetivos específicos que incluíram: (a) identificação e mapeamento de novas nascentes; (b) validação da rede de drenagem extraída automaticamente; (c) definição das áreas experimentais; (d) ampliação do número de amostras de nascentes; e (e) registro fotográfico das feições, com apoio de veículo aéreo não tripulado (VANT).

Como base inicial para a seleção das nascentes, utilizou-se o banco de dados georreferenciado oriundo da dissertação de mestrado de Holanda (2022), o qual foi posteriormente complementado por novas campanhas de campo, visando ampliar a representatividade espacial e o número de amostras. A coleta de dados contou com o uso de receptores GNSS para o registro das coordenadas das nascentes e de aplicativos de mapeamento offline, como o QField, que possibilitaram a verificação em campo da correspondência entre as feições observadas e os dados digitais.

A partir dos levantamentos realizados, foram definidas três áreas experimentais localizadas nos municípios de Pacoti e Guaramiranga, no Maciço de Baturité, denominadas, para fins de identificação, como Nascentes Rolador (Pacoti), Nascentes Ouro (Pacoti) e Nascentes Bananal (Guaramiranga), conforme apresentado na Figura 7. No total, foram mapeadas 34 nascentes, sendo 14 na área do Rolador, 9 na área do Ouro e 11 na área do Bananal, todas com contribuição direta para o rio Pacoti.

4.5 Validação dos dados

A validação dos dados gerados automaticamente a partir dos modelos altimétricos foi conduzida sob a perspectiva de um mapeamento exploratório de nascentes, cujo objetivo principal consistiu em avaliar a capacidade dos modelos em indicar áreas potencialmente associadas à ocorrência dessas feições hidrológicas, e não em determinar com exatidão a posição pontual ou o número absoluto de nascentes existentes.

Desse modo, a validação buscou analisar o desempenho relativo dos diferentes modelos e resoluções espaciais quanto à sua aptidão para reconhecer padrões espaciais compatíveis com a presença de nascentes.

Optou-se, portanto, pela utilização da análise de completude, conforme as diretrizes da ET-CQDG por se tratar de uma métrica adequada à avaliação da presença ou ausência de feições em produtos cartográficos derivados de dados orbitais (DSG, 2016). A análise de completude permite identificar a ocorrência de feições em excesso (erros de comissão) ou ausentes (erros de omissão).

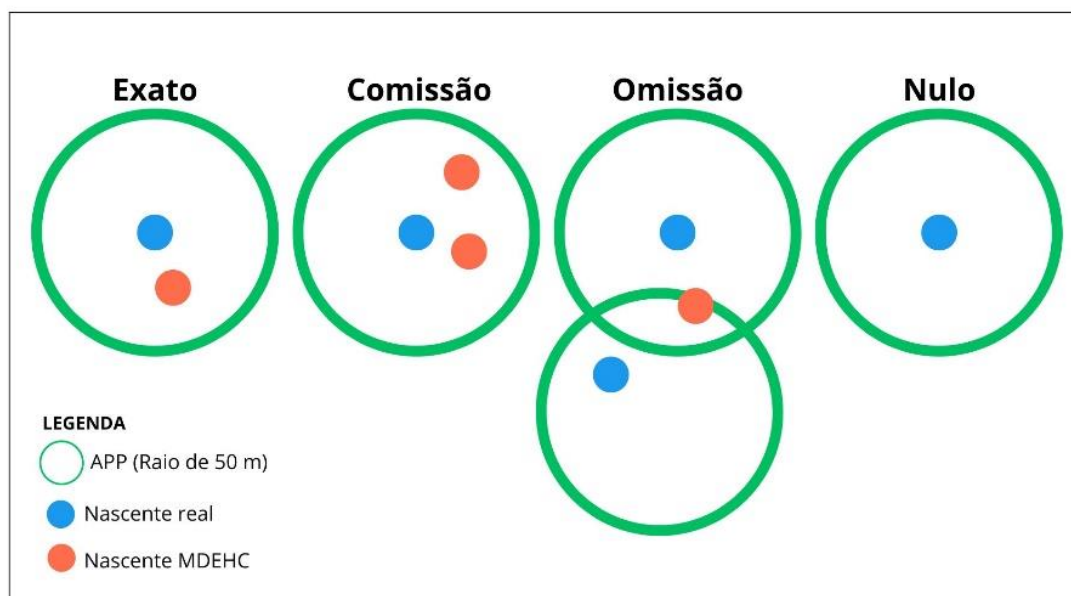
No contexto específico do mapeamento de nascentes desta tese, a aplicação dos erros de comissão e omissão foi metodologicamente adaptada. A validação não se baseou na coincidência exata entre o ponto digital extraído automaticamente e a posição pontual da nascente observada em campo, mas na capacidade do modelo em identificar ao menos uma nascente dentro de uma área de influência previamente definida.

Como área de controle para a validação, adotou-se um raio de observação equivalente ao raio 50 metros da Área de Preservação Permanente (APP) de nascentes, conforme estabelecido pela Lei nº 12.651/2012. Apenas as detecções automáticas localizadas dentro desse raio foram consideradas na

análise, sendo desconsideradas aquelas externas à área de controle.

A partir da comparação entre os dados automáticos e a base de referência georreferenciada construída a partir dos levantamentos de campo, foram definidos quatro cenários de avaliação do desempenho dos modelos altimétricos, sintetizados na Figura 17:

Figura 17 - Erros de completude adaptado para o estudo



Fonte: Elaboração pela autora.

O cenário exato corresponde à equivalência entre o número de nascentes automáticas e reais dentro da área de controle; o de comissão ocorre quando há superestimação das nascentes automáticas; o de omissão refere-se à subestimação das nascentes reais, sendo aplicável apenas nos casos de sobreposição da área de observação (APP); e o cenário nulo caracteriza-se pela ausência de qualquer detecção automática dentro da área analisada.

A interpretação desses cenários foi orientada pelo caráter inédito do estudo. Os cenários de exatidão e comissão foram classificados como satisfatórios, pois ambos indicam que o modelo reconhece a área analisada como hidrologicamente ativa, mantendo elevada a probabilidade de existência de ao menos uma nascente real dentro da área de controle. Mesmo em situações de elevada superestimação, a resposta comissionada representa um erro de quantificação, e não de ausência espacial da feição, preservando o principal objetivo de identificar áreas potenciais de ocorrência de nascentes.

Por outro lado, os cenários de omissão e nulo foram considerados

insatisfatórios, uma vez que representam a incapacidade do modelo em indicar a ocorrência de nascentes em áreas onde estas efetivamente existem.

Dessa forma, a metodologia de validação priorizou a capacidade de detecção espacial dos modelos altimétricos em detrimento da exatidão quantitativa. Modelos com respostas comissionadas foram considerados mais úteis do que aqueles com altas taxas de omissão ou cenários nulos, por manterem a indicação de áreas potencialmente associadas à ocorrência de nascentes. Essa estratégia possibilitou classificar os resultados de forma objetiva, considerando as limitações dos dados orbitais e das resoluções espaciais analisadas, e subsidiou a interpretação crítica apresentada no tópico de resultados.

5 RESULTADOS

5.1 Desempenho por área experimental

No conjunto das áreas experimentais foram identificadas 34 nascentes constituindo a base de referência para a avaliação dos resultados da extração automática. A distribuição dessas ocorrências apresentou variação entre as áreas experimentais selecionadas, com 11 nascentes registradas no Bananal, 14 no Rolador e 9 no Ouro.

Cada nascente extraída automaticamente foi confrontada com a localização das nascentes reais dentro de um raio de 50 metros. A partir da análise de completude, considerando as categorias omissão, comissão, acerto e nulo, os resultados foram classificados como satisfatórios (comissão + acertos), quando o modelo demonstrou capacidade de subsidiar a localização de nascentes em campo, e insatisfatórios (omissão + nulo), quando não apresentou suporte adequado para essa finalidade.

Essa categorização permitiu compreender o desempenho dos modelos em função das variáveis analisadas, a resolução espacial e o tipo de modelo altimétrico, no contexto do método de extração automática de nascentes.

5.1.1 Bananal

No contexto paisagístico da área experimental do Bananal, marcado pela dispersão de olhos d'água e por zonas saturadas, os resultados evidenciaram variações expressivas entre os modelos altimétricos analisados.

O modelo TanDEM-X apresentou o melhor desempenho, com seis ocorrências satisfatórias (soma de Comissão e Acertos) e ausência de resultados negativos (Omissões e Nulos). Em contrapartida, os modelos ANADEM e FABDEM revelaram desempenho inferior, registrando a mesma pontuação de desempenho satisfatório e insatisfatório (Tabela 2, Figuras 18 a 23).

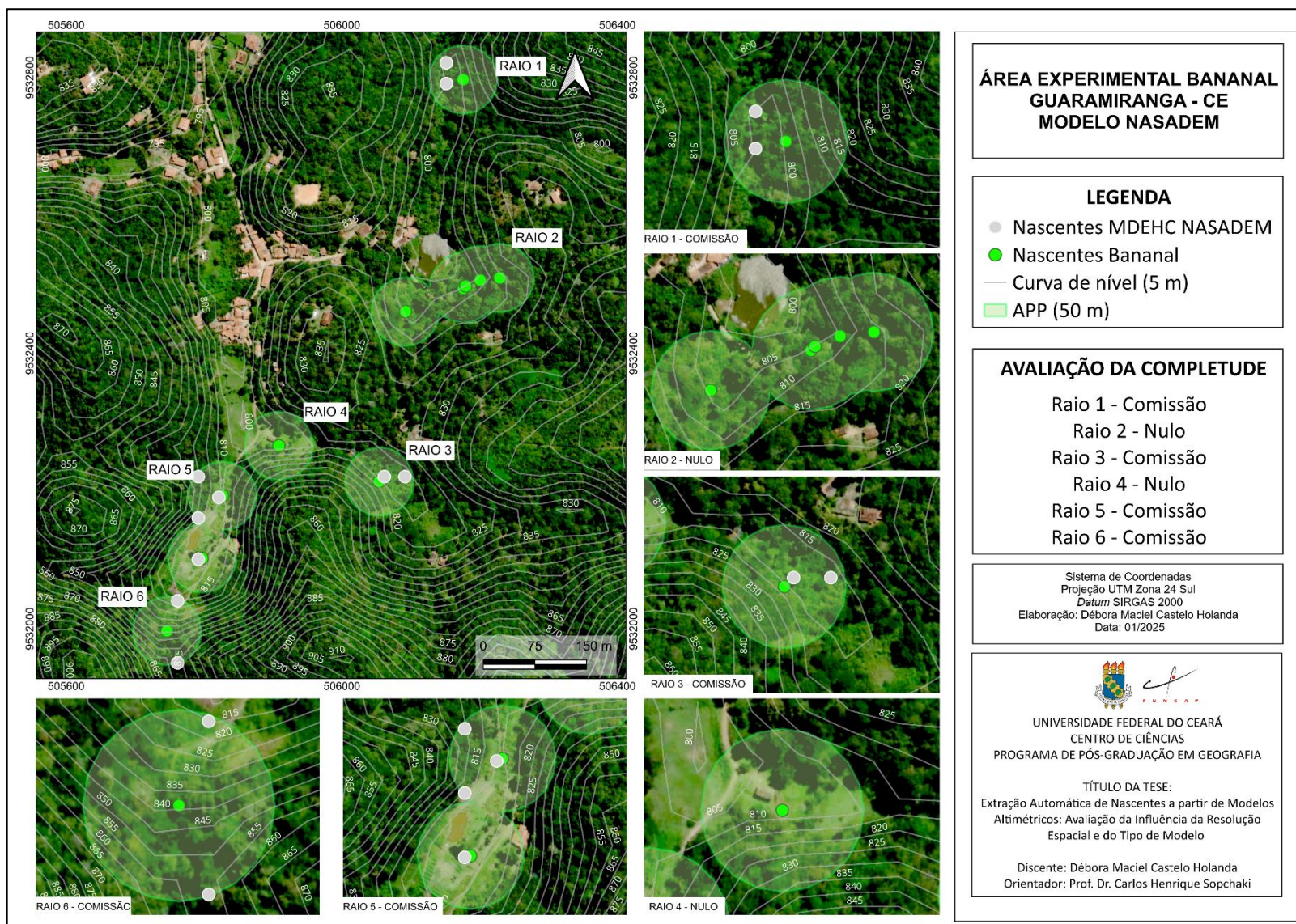
Tabela 2 - Desempenho por Área Experimental: Bananal

Modelo (n=6 raios observados)	Desempenho Satisfatório (%)	Desempenho Insatisfatório (%)
NASADEM	4 (66,7%)	2 (33,3%)
COPDEM	4 (66,7%)	2 (33,3%)

SRTM/ASF	4 (66,7%)	2 (33,3%)
TDEM-X	6 (100%)	0 (0%)
FABDEM	3 (50%)	3 (50%)
ANADEM	3 (50%)	3 (50%)

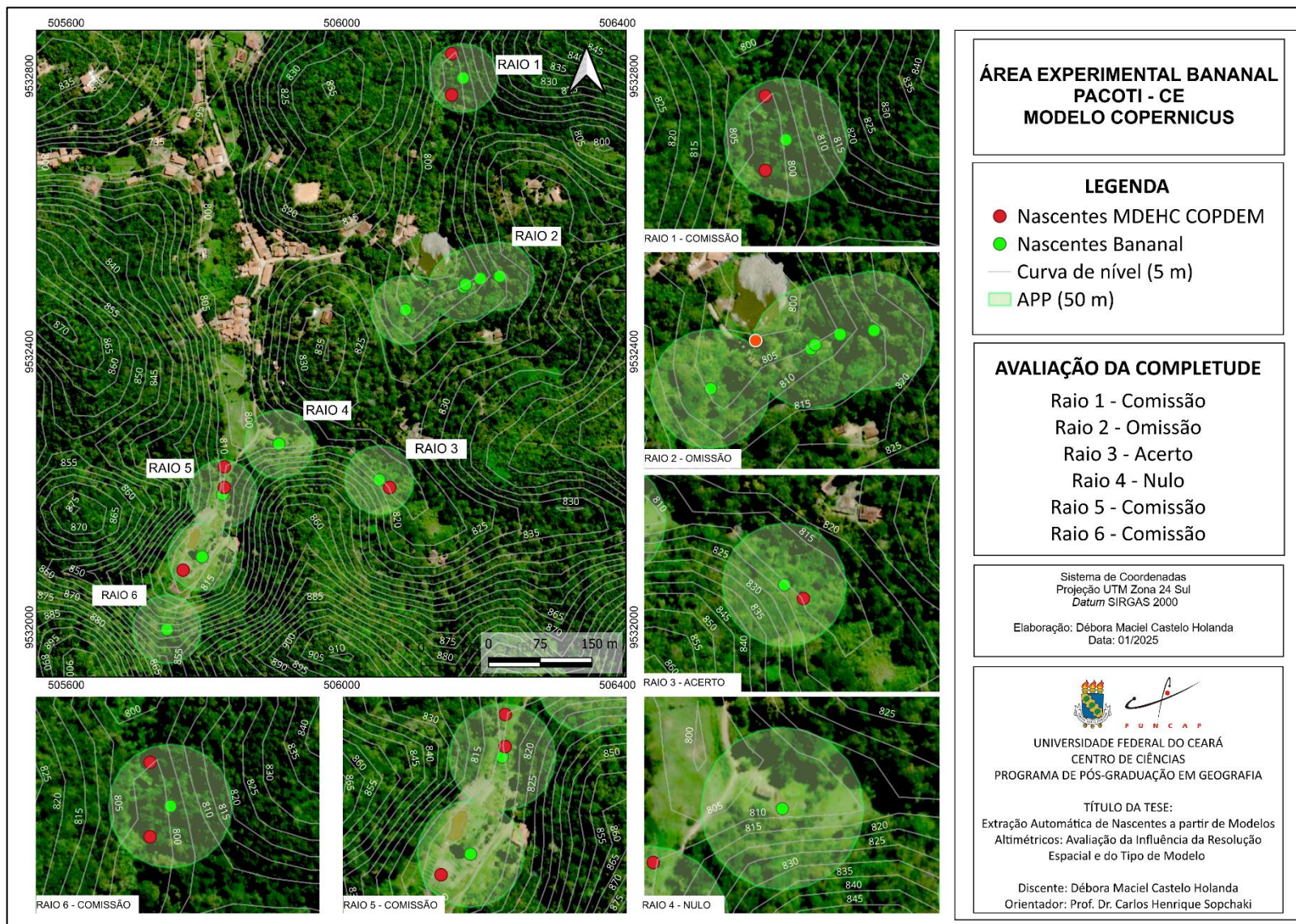
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 - Validação MDEHC NASADEM



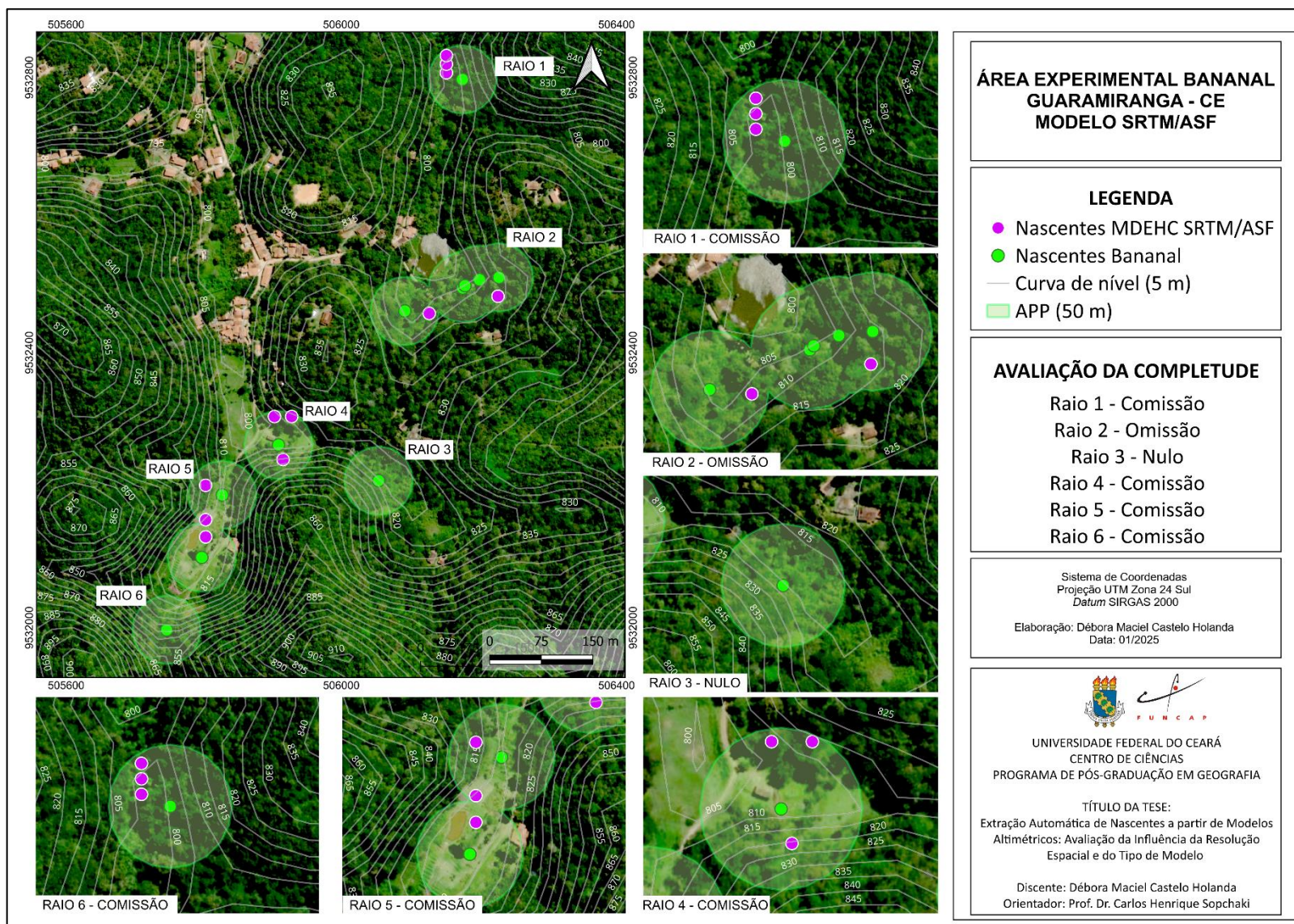
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 - Validação MDEHC COPDEM (A.E Bananal)



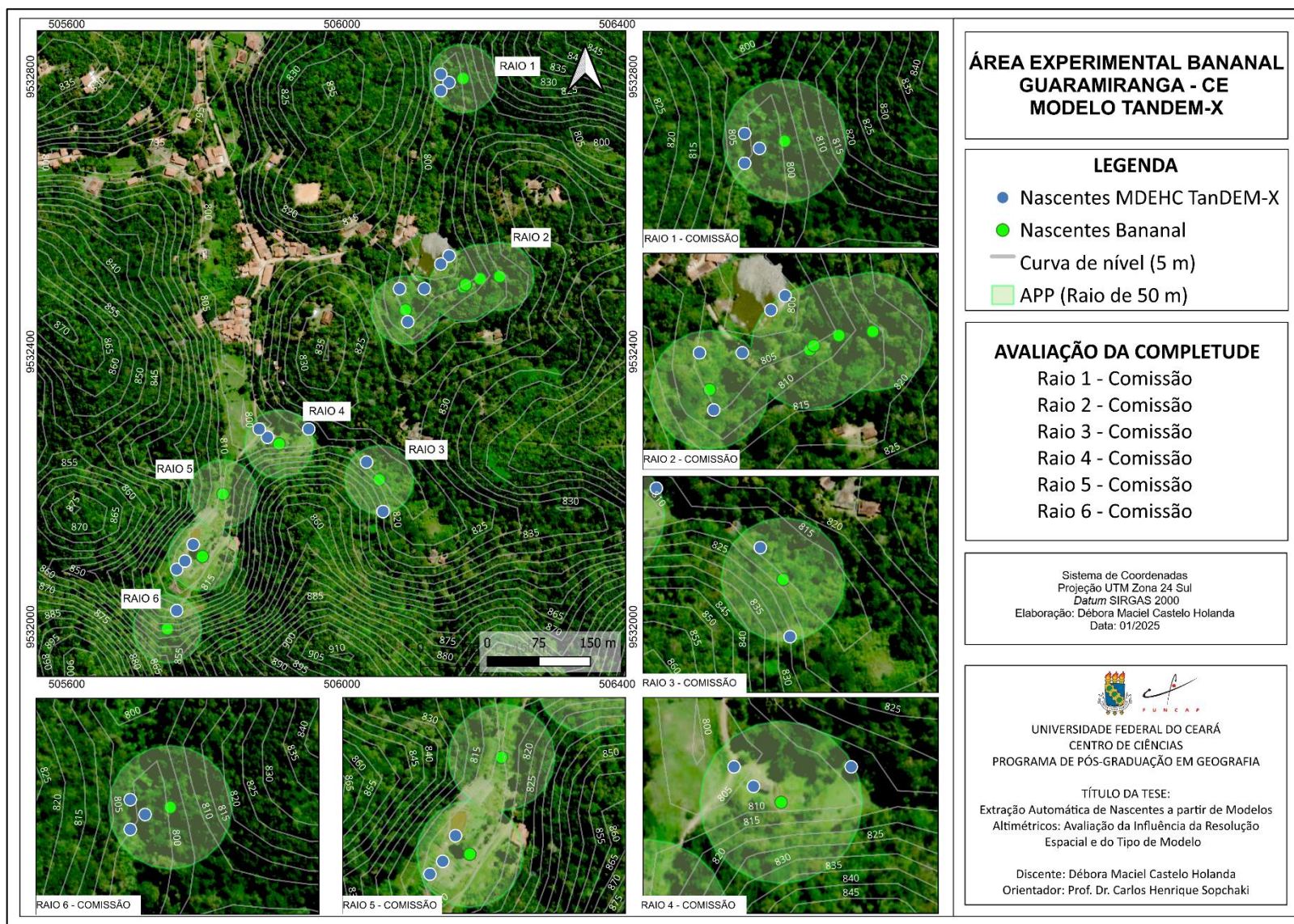
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 - Validação MDEHC SRTM-ASF (A.E Bananal)



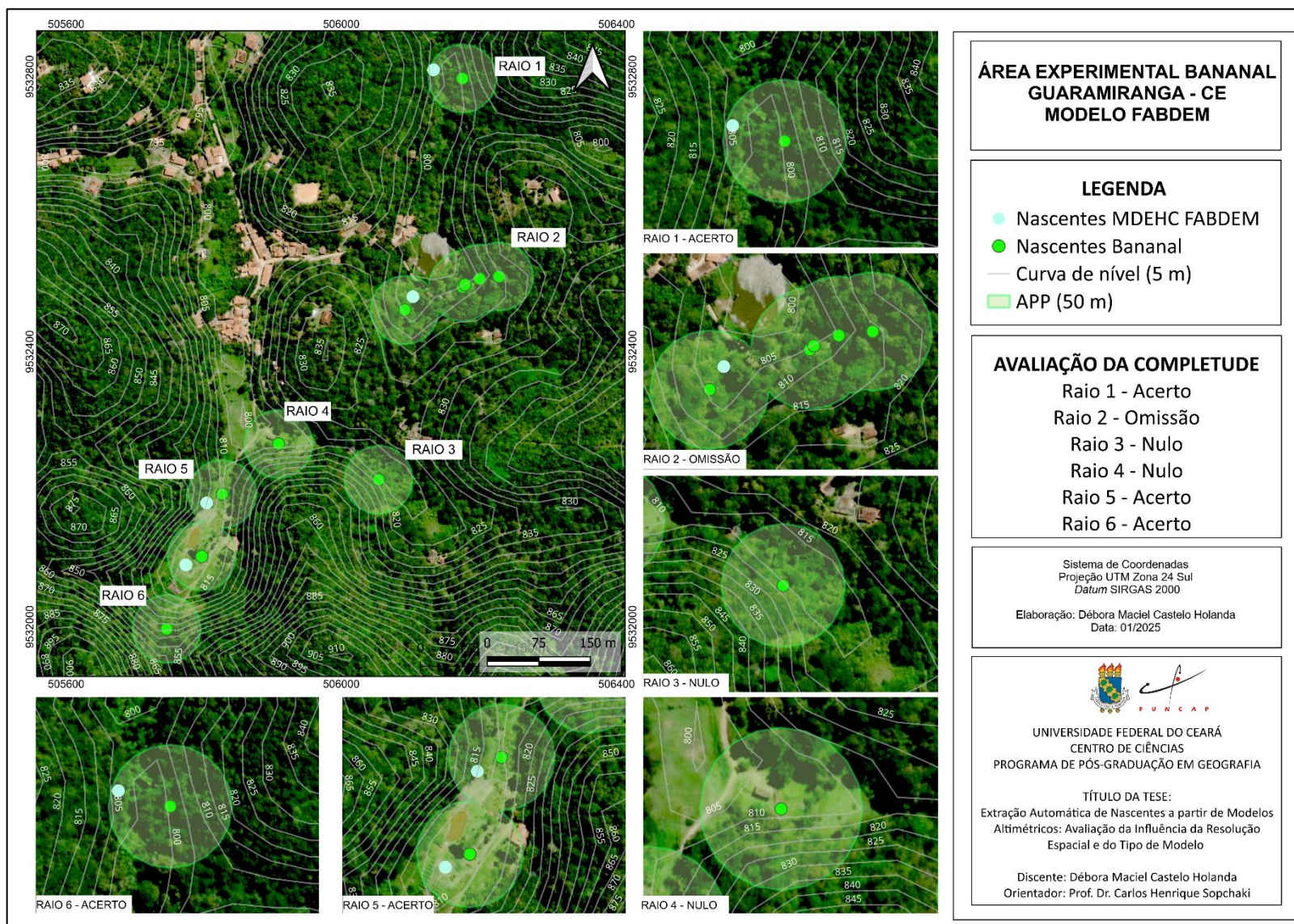
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 - Validação MDEHC TanDEM-X (A.E Bananal)



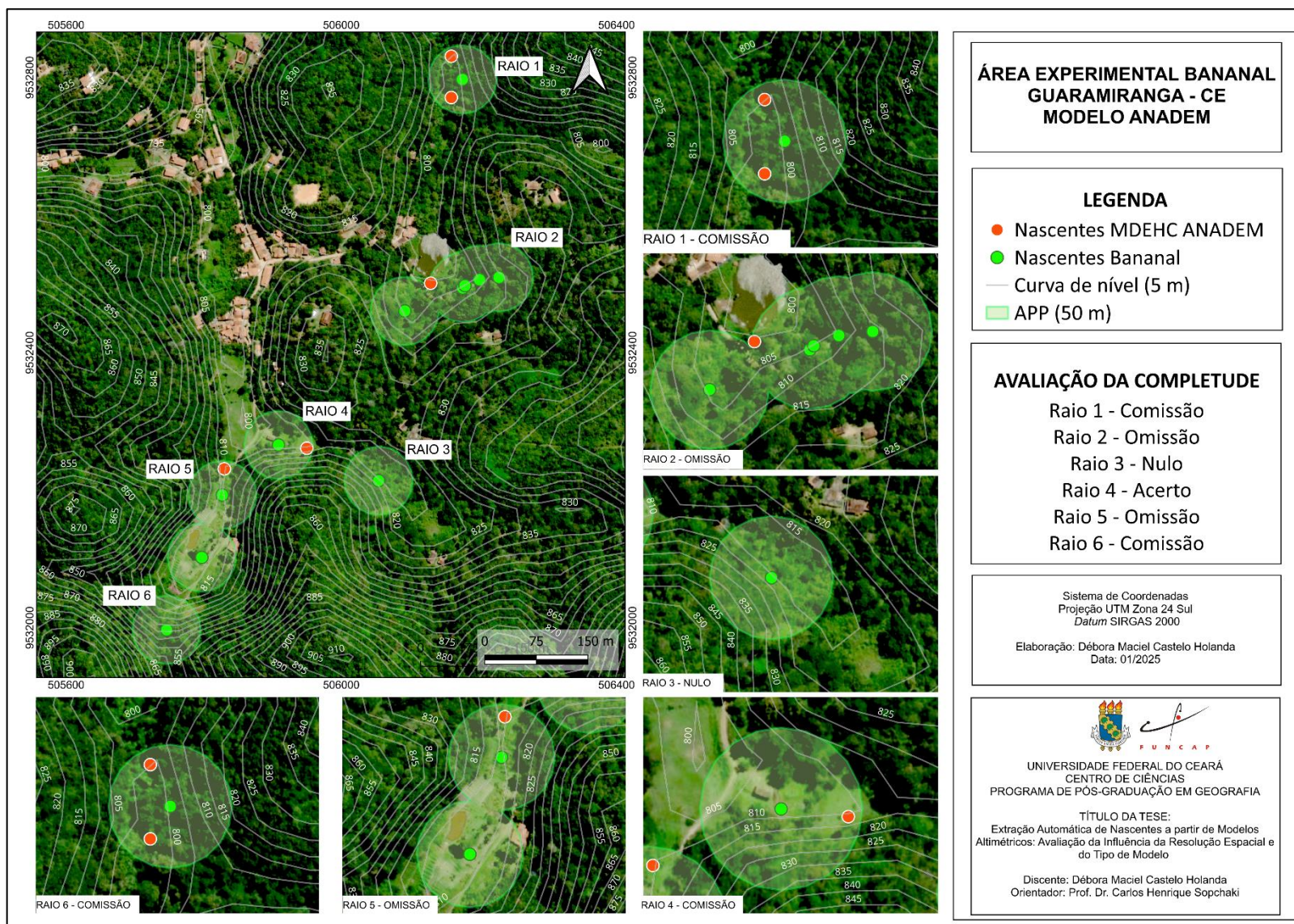
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 - Validação MDEHC FABDEM (A.E Bananal)



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23 - Validação MDEHC ANADEM (A.E Bananal)



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.2 Ouro e Rolador

Diferentemente do observado na área experimental do Bananal, onde predominam nascentes difusas associadas ao tipo olho d'água, as nascentes identificadas nas localidades do Ouro e do Rolador são do tipo pontual, caracterizadas por exfiltração de água bem definida e facilmente identificável em campo.

O desempenho dos modelos altimétricos revelou um padrão semelhante entre as duas localidades analisadas. Os MDEs com maior resolução espacial, especialmente o TanDEM-X e o SRTM/ASF, apresentaram resultados satisfatórios na identificação das nascentes. Por outro lado, os demais MDEs, assim como os MDTs, apresentaram desempenho predominantemente insatisfatório, indicando menor capacidade de subsidiar a localização dessas feições em campo.

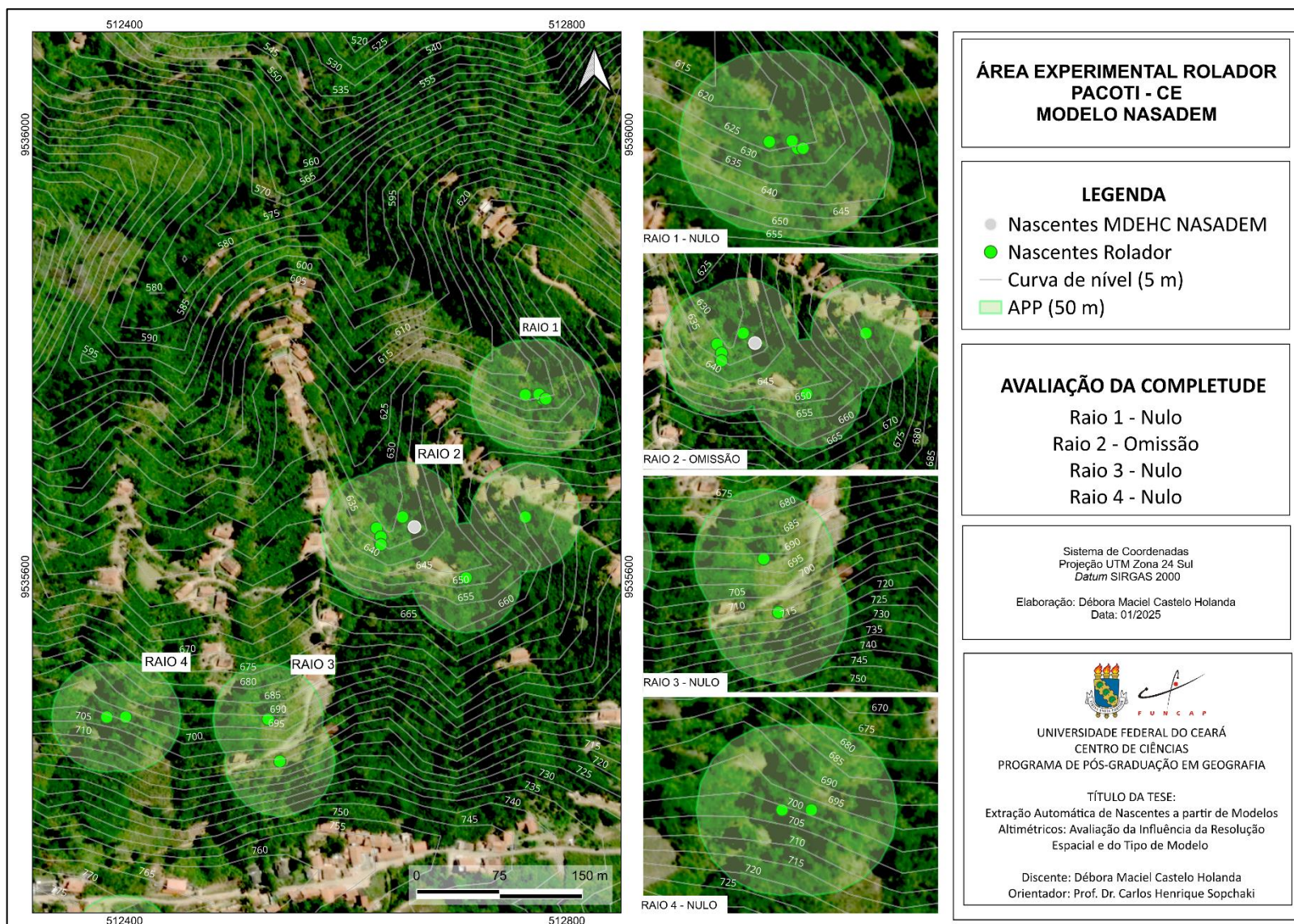
O desempenho dos MDTs apresentou piora nas áreas do Rolador e Ouro (Tabela 3, Figuras 24 a 35), registrando exclusivamente resultados insatisfatórios. Situação semelhante foi observada para os MDEs de melhor resolução espacial, que também tiveram um desempenho inferior em relação ao Bananal. No entanto, apesar dessa queda de desempenho, os modelos TanDEM-X e SRTM/ASF ainda superaram os demais MDEs testados.

Tabela 3 - Desempenho por Área Experimental: Rolador e Ouro

Área Experimental	Modelo	Desempenho Satisfatório (%)	Desempenho Insatisfatório (%)
Rolador (n=4 raios)	NASADEM	0	4 (100%)
	COPDEM	0	4 (100%)
	SRTM/ASF	2	2 (50%)
	TanDEM-X	2	2 (50%)
	FABDEM	0	4 (100%)
	ANADEM	0	4 (100%)
Ouro (n=2 raios)	NASADEM	0	2 (100%)
	COPDEM	0	2 (100%)
	SRTM/ASF	1	1 (50%)
	TanDEM-X	1	1 (50%)
	FABDEM	0	2 (100%)
	ANADEM	0	2 (100%)

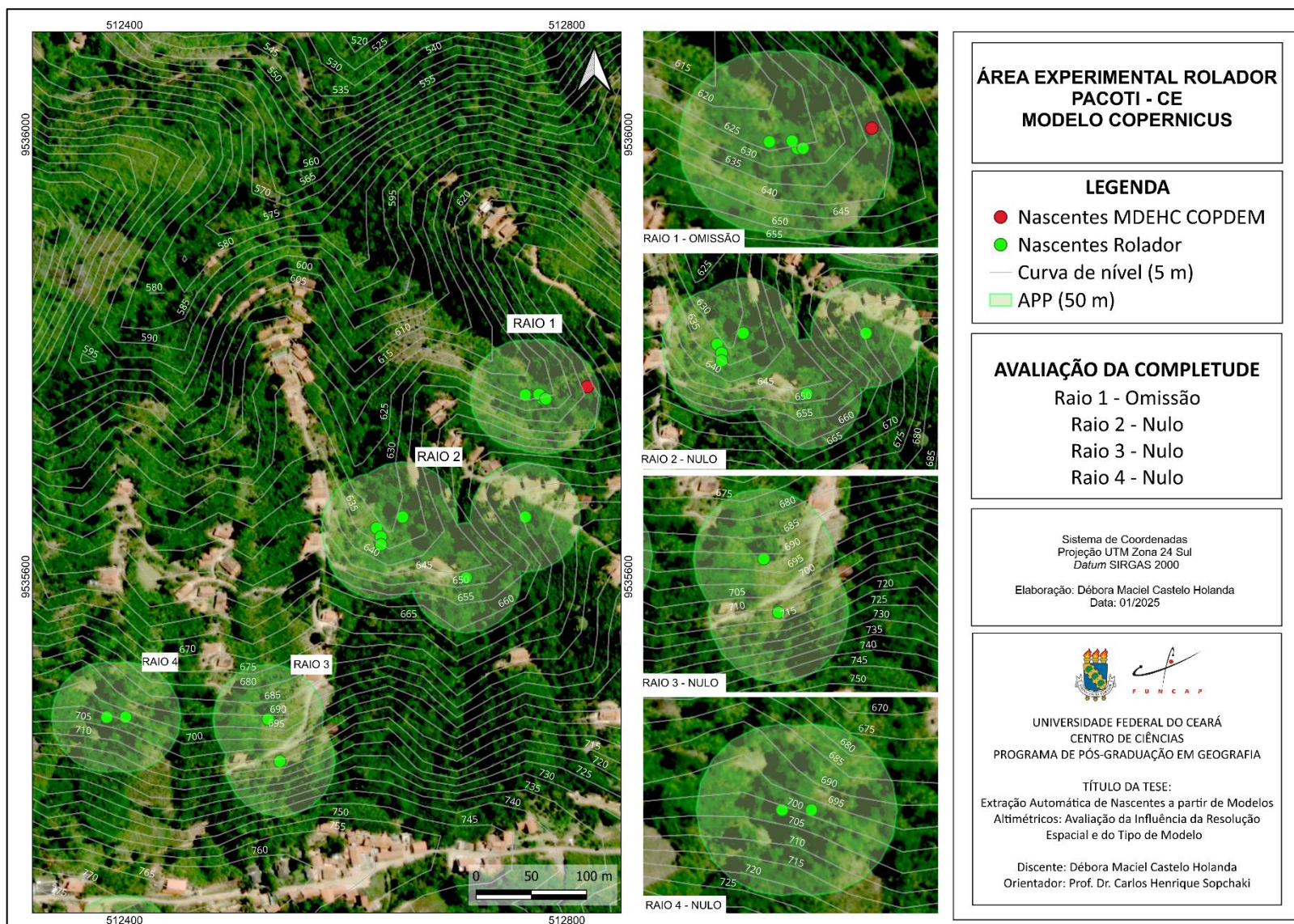
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 - Validação MDEHC NASADEM (A.E Rolador)



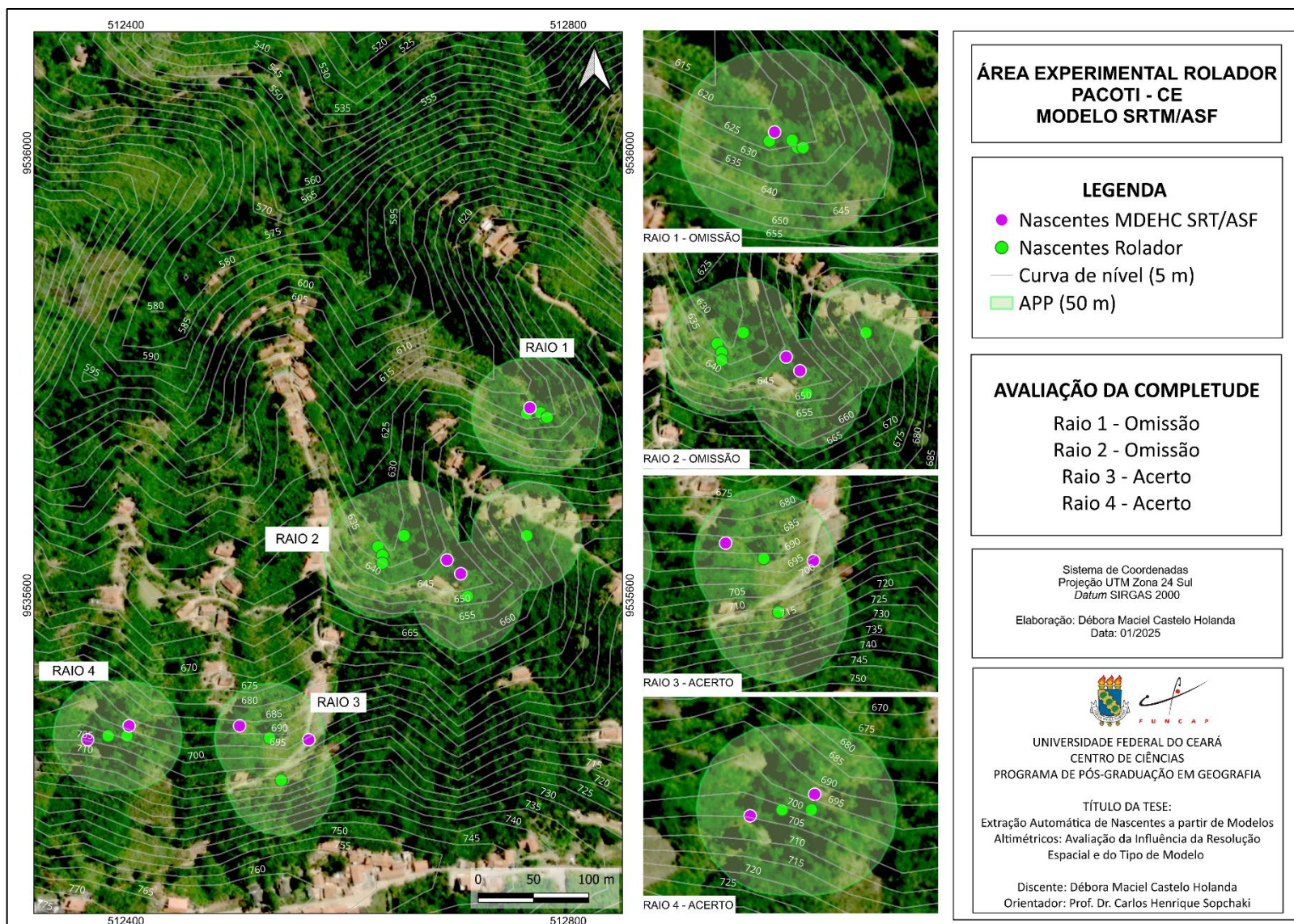
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 25 - Validação MDEHC COPDEM (A.E Rolador)



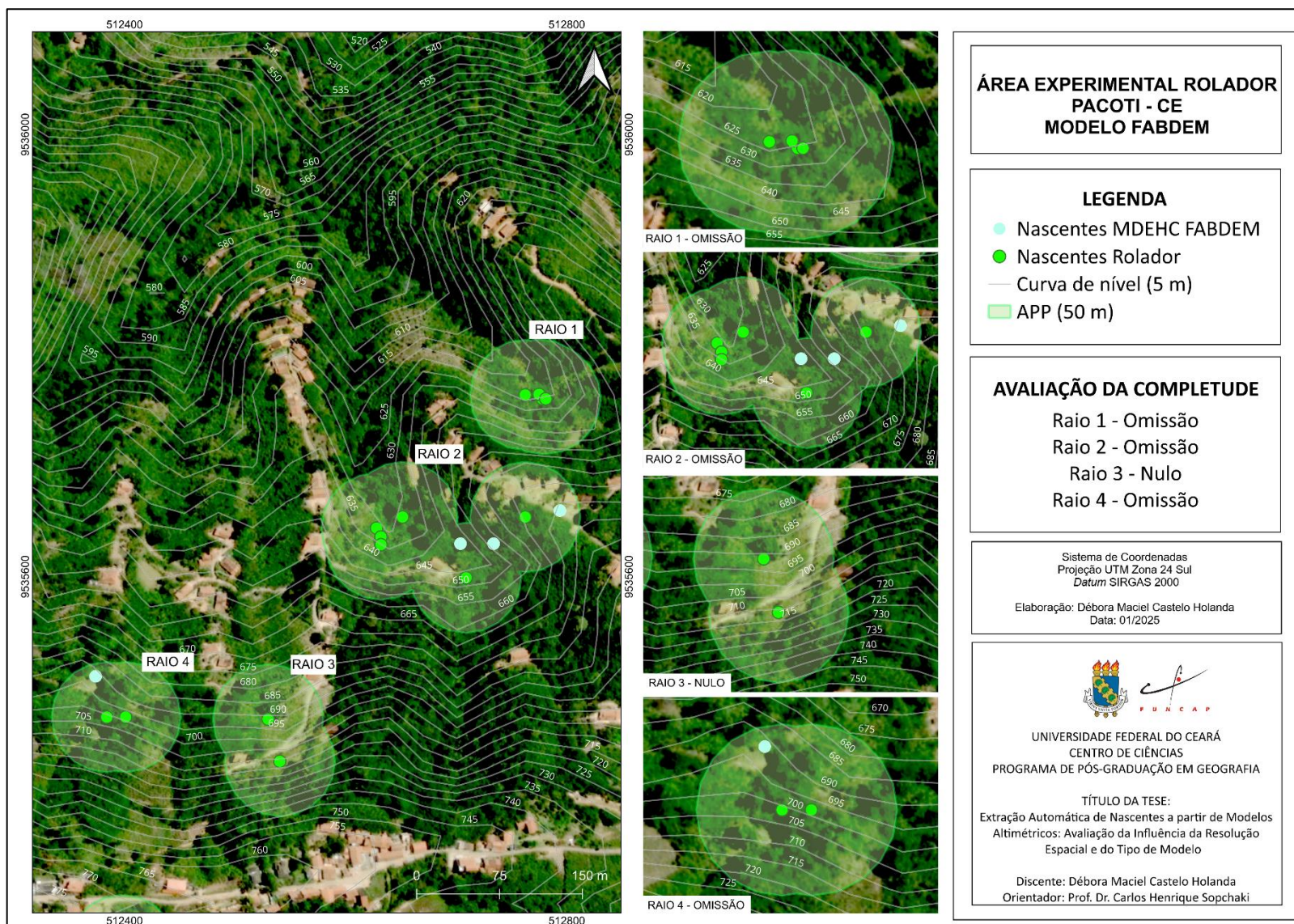
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 - Validação MDEHC SRTM/ASF (A.E Rolador)



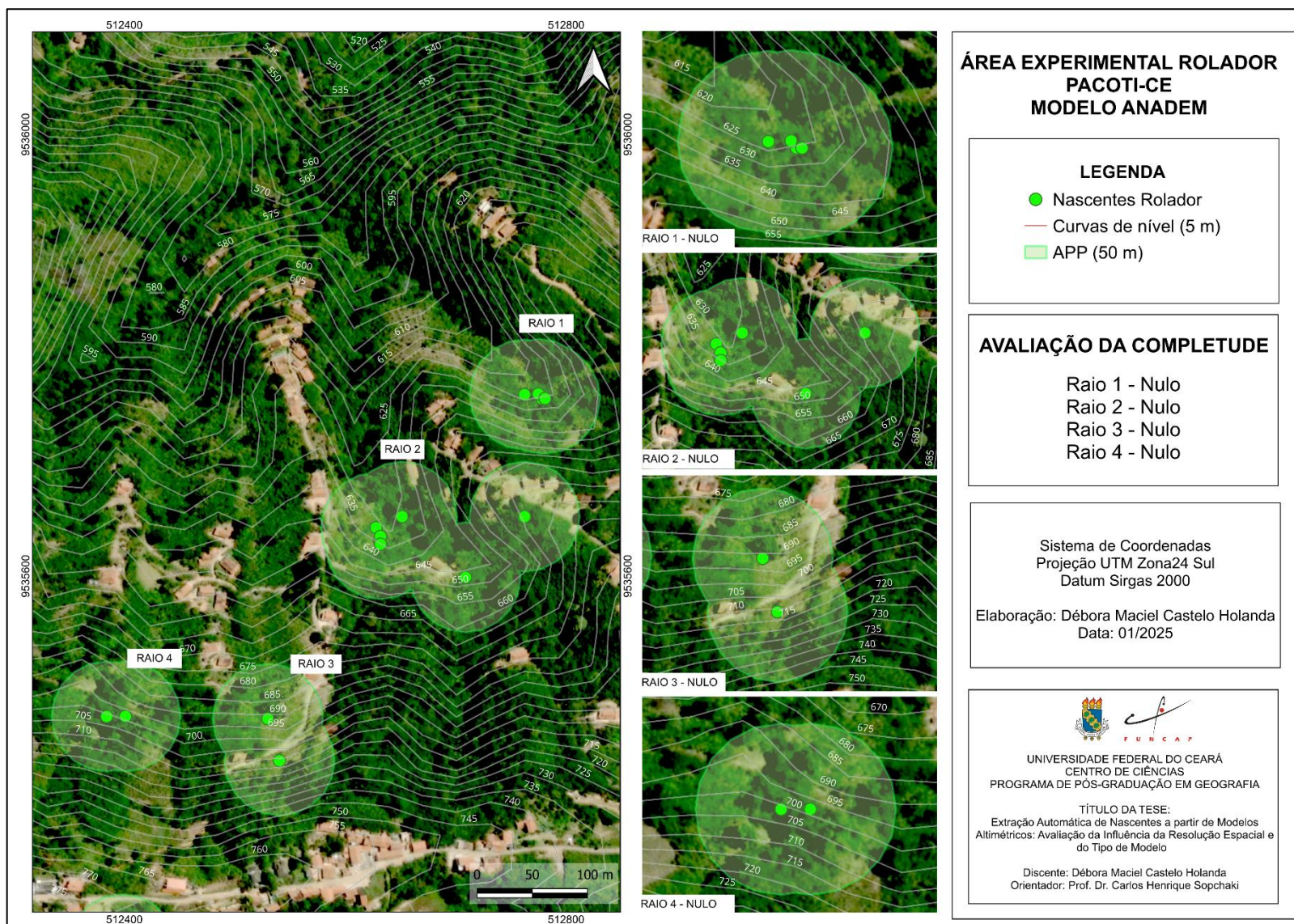
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 28 - Validação MDEHC FABDEM (A.E Rolador)



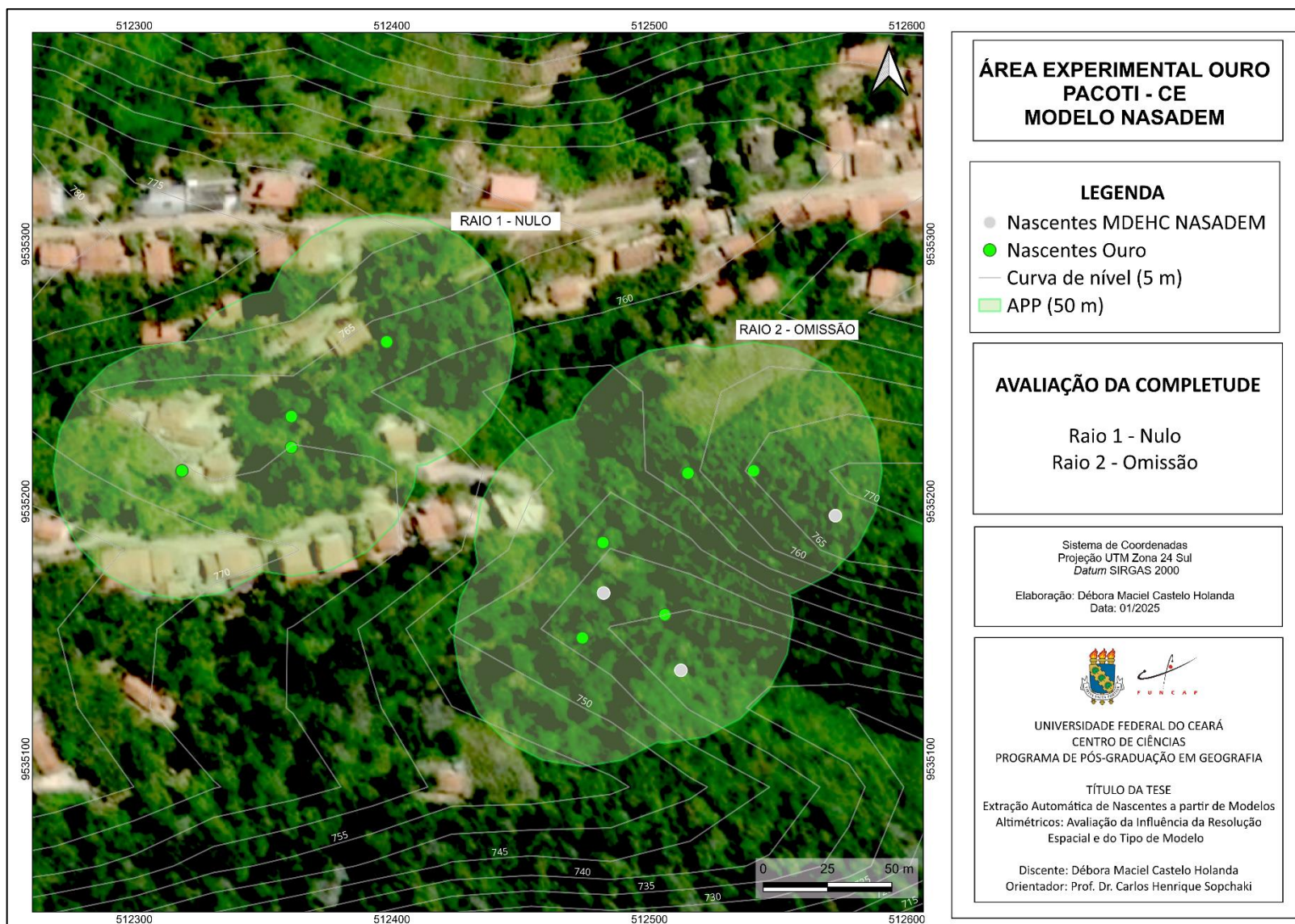
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 29 - Validação MDEHC ANADEM (A.E Rolador)



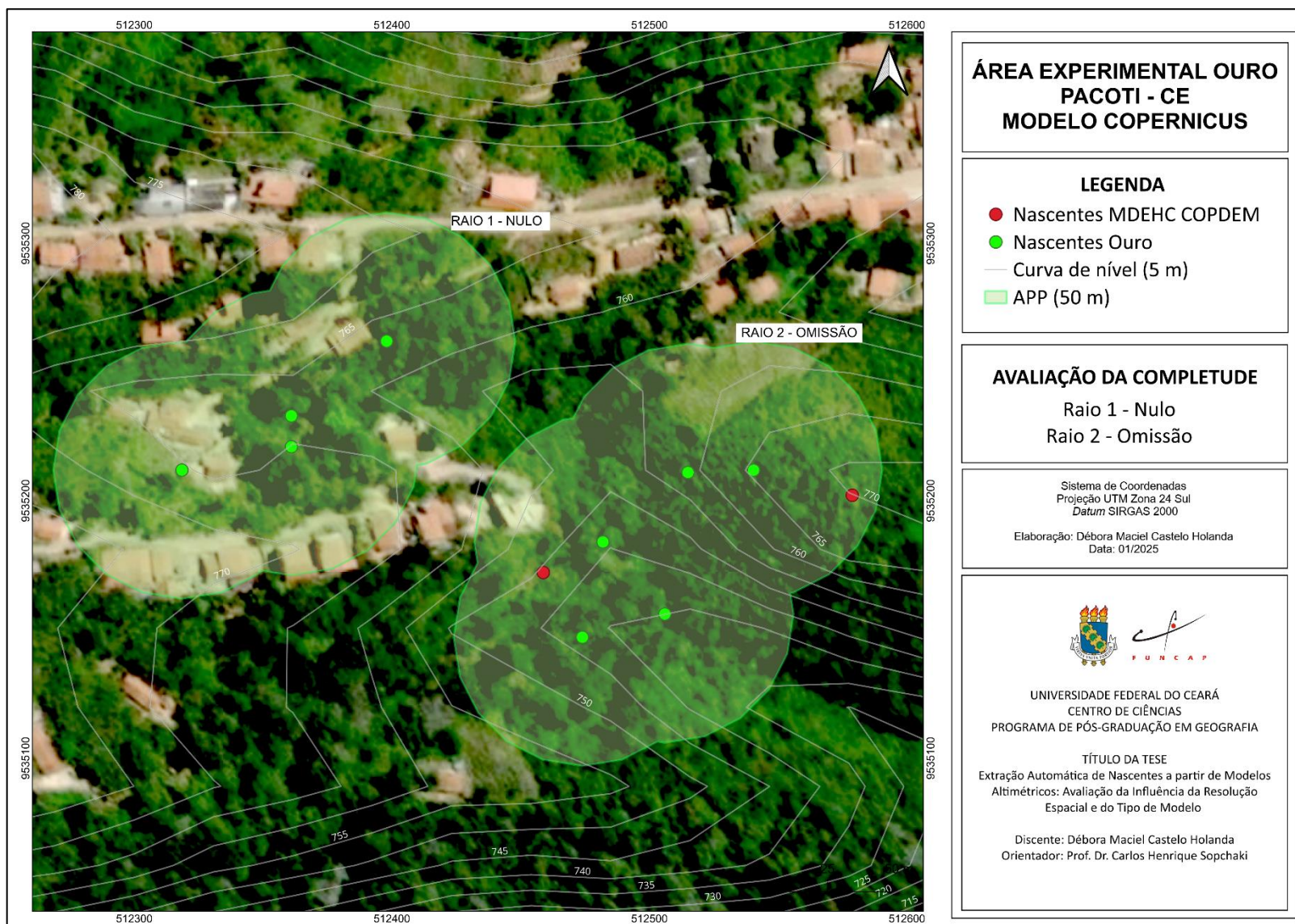
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30 - Validação MDEHC NASADEM (A.E Ouro)



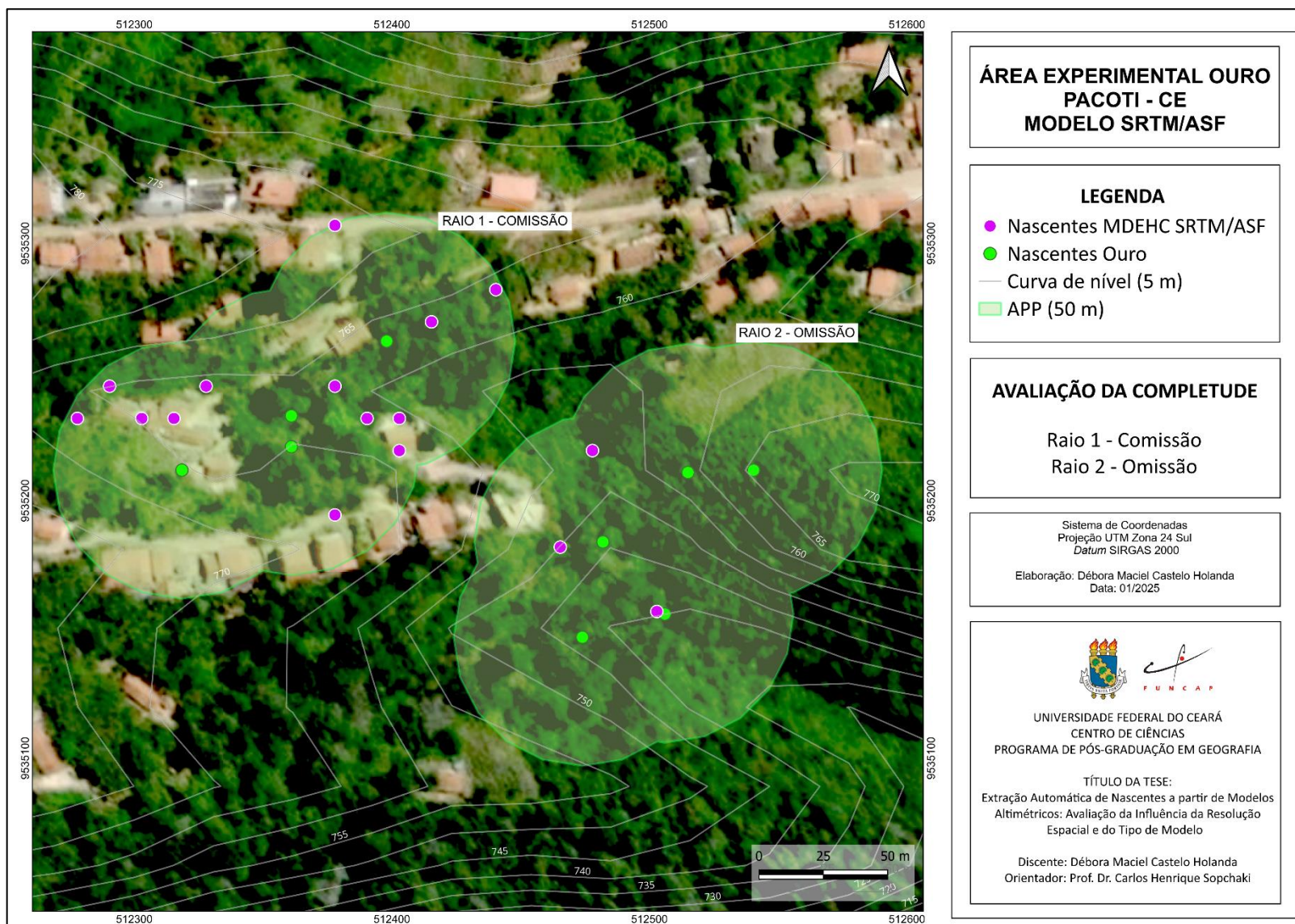
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 31 - Validação MDEHC COPDEM (A.E Ouro)



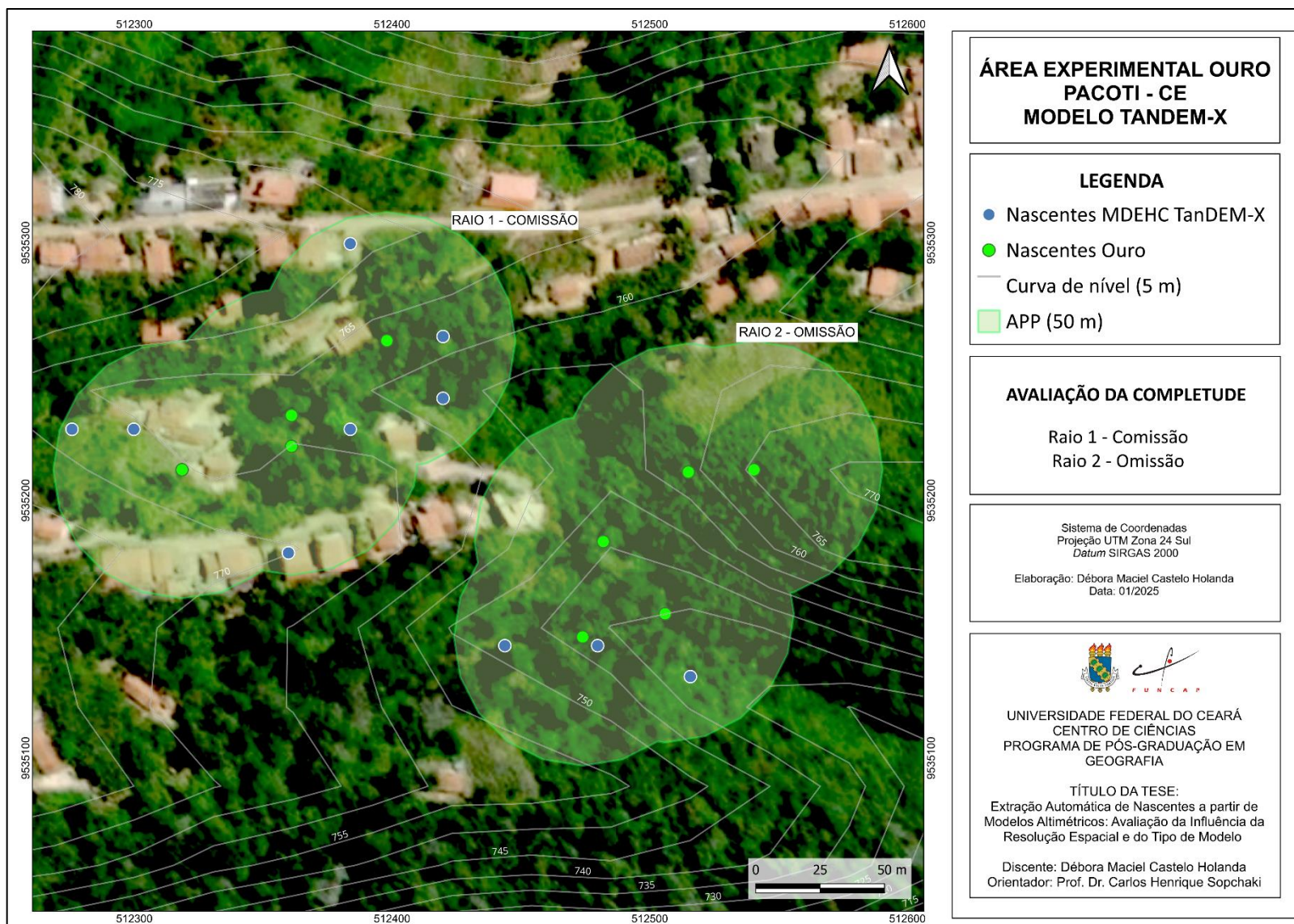
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 32 - Validação MDEHC SRTM-ASF (A.E Ouro)



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 - Validação MDEHC TanDEM-X (A.E Ouro)



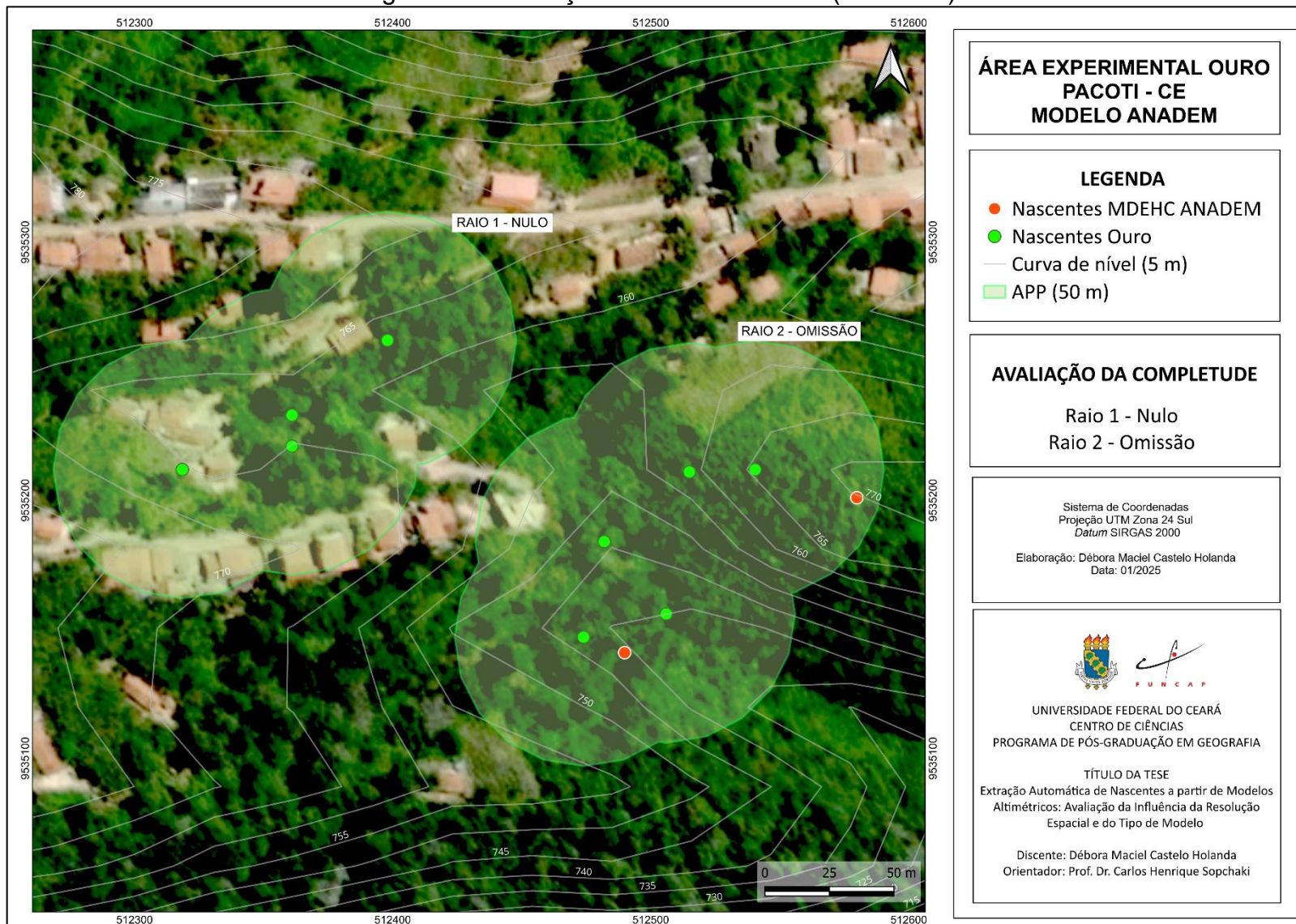
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34 - Validação MDEHC FABDEM (A.E Ouro)



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35 - Validação MDEHC ANADEM (A.E Ouro)



Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 4 sintetiza os resultados obtidos em cima dos desempenhos de cada modelo altimétrico avaliado. Observou-se assim que o TanDEM-X apresentou o melhor desempenho, com 75% de avaliações satisfatórias, destacando-se como o modelo com maior potencial para aplicação no mapeamento de nascentes. Em sequência o SRTM/ASF alcançou o percentual de 58,3% de desempenho satisfatório, indicando também ser um modelo promissor em comparação aos demais modelos altimétricos analisados.

Os modelos NASADEM e COPDEM apresentaram desempenho semelhante, com apenas 33,3% de resultados satisfatórios, enquanto FABDEM e ANADEM exibiram os piores desempenhos, com 25% de sucesso e elevada taxa de insatisfatoriedade.

Tabela 4 - Síntese geral dos desempenhos observados

Modelo	Desempenho Satisfatório	% Satisfatório	Desempenho Insatisfatório	% Insatisfatório
NASADEM	4	33,3%	8	66,7%
COPDEM	4	33,3%	8	66,7%
SRTM/ASF	7	58,3%	5	41,7%
TanDEM-X	9	75,0%	3	25,0%
FABDEM	3	25,0%	9	75,0%
ANADEM	3	25,0%	9	75,0%

Fonte: Elaborado pela autora.

6 DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa demonstram que o uso de MDEHCs constitui uma abordagem promissora para se integrar a metodologias para o mapeamento automatizado de nascentes, sobretudo quando associados a dados altimétricos de maior resolução espacial.

De maneira geral, verificou-se que os desempenhos mais satisfatórios estiveram vinculados aos modelos de maior resolução espacial, enquanto os modelos derivados de MDT não apresentaram superioridade consistente em relação aos MDE, contrariando a hipótese inicial de que a remoção de elementos superficiais pudesse favorecer a identificação das nascentes.

No que se refere à primeira hipótese, os resultados indicaram que modelos com resoluções espaciais mais refinadas, como o TanDEM-X (12 m) e o SRTM/ASF reamostrado (12,5 m), apresentaram desempenho superior quando considerada a soma dos resultados satisfatórios, em comparação aos modelos de 30 m, independentemente de se tratarem de MDEs ou MDTs.

Esse comportamento reforçou o entendimento consolidado na literatura de que a resolução espacial exerce influência direta sobre a qualidade da extração automática de feições hidrológicas, uma vez que maior detalhamento tende a reduzir generalizações do relevo e inconsistências no direcionamento do fluxo. Assim, os achados corroboraram com estudos clássicos, como McMaster (2002) e Garbrecht e Martz (2003), que apontam justamente para essa condição de que um modelo com maior resolução espacial tende a reduzir divergências na extração automática de feições hidrológicas.

Destaca-se ainda, nesse contexto, o desempenho do MDE SRTM/ASF reamostrado. Conforme indicado na documentação técnica desse modelo, o processo da reamostragem melhorou a representação geométrica da superfície terrestre, reduzindo depressões artificiais em relação ao SRTM original de 30 m. Nesse sentido, embora esse processo não incorpore nova informação altimétrica, a melhoria geométrica da reamostragem pode ter proporcionado uma maior coerência hidrológica do modelo, justificando seu bom desempenho nos testes deste estudo.

Essa constatação pode evidenciar que o tratamento através de processamentos de correção e limpeza da superfície pode ser tão relevante quanto a resolução espacial original de um modelo, sugerindo que produtos adequadamente

processados podem alcançar desempenho comparável ou superior a modelos altimétricos de resolução espacial mais refinada, dependendo do fluxo e da qualidade metodológica executada.

Em relação à segunda hipótese, os resultados demonstraram que a utilização de MDTs não resultou em desempenho superior ao dos MDEs. Ao contrário, os modelos TanDEM-X e SRTM/ASF mantiveram desempenho superior em comparação aos MDTs FABDEM e ANADEM em todas as áreas analisadas. Esse comportamento sugere que, no contexto dos testes realizados nesta tese, a resolução espacial permaneceu como variável mais influente do que o tipo de modelo altimétrico em si.

Do ponto de vista metodológico, a padronização do fluxo de processamento hidrológico no ambiente SAGA GIS, utilizando o limiar padrão da ferramenta, associada à validação por análise de completude, mostrou-se adequada para permitir uma comparação objetiva entre diferentes modelos altimétricos e resoluções espaciais, mantendo essas variáveis fixas nos testes realizados com todos os modelos.

Diferentemente de estudos que utilizaram cartas topográficas ou bases secundárias como referência (Bosquilia *et al.*, 2015; Moraes; Sales, 2016), esta pesquisa adotou uma base de referência georreferenciada obtida em campo, construída a partir de levantamentos *in loco*, o que conferiu maior confiabilidade à avaliação dos resultados automáticos em relação à realidade hidrológica das áreas analisadas.

Ainda sobre as inovações apostadas pela pesquisa, um dos principais aportes conceituais residiu na ressignificação dos erros de comissão, tradicionalmente tratados como inconsistências cartográficas. Neste estudo, os erros de comissão foram interpretados como indicadores positivos de áreas com maior probabilidade de ocorrência de nascentes reais.

Essa mudança de perspectiva deslocou o enfoque da precisão estritamente geométrica para uma interpretação funcional e aplicada, mais coerente com as demandas do trabalho de campo e com a lógica de prospecção territorial.

Assim, a partir dessa adaptação metodológica e da análise do comportamento dos modelos altimétricos em relação aos erros de completude, considera-se que, em cenários de etapas iniciais de prospecção de nascentes, o uso

de modelos altimétricos que apresentam erros de comissão mostra-se mais adequado, em comparação a modelos que apresentam maior ocorrência de erros omissos e nulos.

Nesse sentido, abre-se espaço para um processo de seleção e filtragem de modelos altimétricos, priorizando aqueles que apontam para uma maior probabilidade de encontrar nascentes no terreno real, em detrimento do uso de modelos com maior frequência de erros omitidos e nulos.

Nesse sentido, a preocupação central da pesquisa não foi quantificar acertos e erros como um fim em si mesmo, mas identificar qual modelo altimétrico orbital, considerando as variáveis de resolução espacial e tipo de modelo (MDE ou MDT), apresenta maior utilidade operacional para subsidiar os processamentos de extração automática e apoio na prospecção em campo.

Assim, os cenários classificados como comissão passaram a ser interpretados como áreas prioritárias para verificação em campo, reforçando o papel dos MDEHCs como ferramentas de apoio ao reconhecimento territorial, e não como representações finais ou definitivas da realidade hidrológica.

Desse modo, o apoio a identificação espacial de nascentes possibilita também a detecção indireta de pressões ambientais, como desmatamento em áreas de preservação permanente, captações irregulares de água e intervenções inadequadas nas fontes. Assim, o mapeamento automatizado assume uma função diagnóstica, contribuindo para o planejamento de campanhas de campo e para a gestão de recursos hídricos em escala local.

Ademais, além da análise das variáveis testadas pelas hipóteses, a comparação dos resultados entre as áreas experimentais revelou nuances importantes sobre a detecção automática no Bananal e nas áreas do Rolador e Ouro.

No Bananal, os modelos altimétricos apresentaram maior correspondência espacial com as nascentes de referência, indicando condições mais favoráveis à detecção das feições nessa área. Esse comportamento pode estar associado às características ambientais e de uso do solo, sem a presença de uma densa cobertura vegetal, além de um relevo relativamente menos complexo, com menores declividades acentuadas e superfícies moderadamente onduladas.

Percebe-se então que a planície alveolar, que configura geomorfologicamente a área do Bananal, eleva a capacidade armazenamento e

exfiltração de água. Mesmo no período seco, observou-se a manutenção da umidade do solo e das nascentes. Essa característica reforça assim a importância dessa área como região natural de retenção hídrica, que atuam como reguladoras das drenagens próximas.

Em contraste, nas áreas do Rolador e do Ouro, observou-se maior dispersão entre os resultados automáticos e a base de campo, com menores taxas de coincidência espacial das nascentes identificadas. Por encontrarem-se inseridas em um contexto geomorfológico mais complexo, com vertentes íngremes, presença do interflúvio e cobertura vegetal densa, fatores que podem ter dificultado a representação altimétrica e, conseqüentemente, a extração automática.

Além dos condicionantes físicos naturais, o grau de ocupação humana e os usos das nascentes também se mostraram elementos potencialmente explicativos para os resultados obtidos. Assim, tem-se que das 11 nascentes identificadas no Bananal, apenas 2 apresentam intervenção direta com manilhas, enquanto no Rolador 6 das 14 nascentes apresentam esse tipo de intervenção, e no Ouro 6 das 9 nascentes também possuem modificações estruturais.

Paralelamente, a substituição da cobertura vegetal por atividades agrícolas, expansão urbana e outras formas de uso intensivo da terra reduz a infiltração da água no solo, diminui a recarga dos aquíferos e favorece o aumento do escoamento superficial. Essas alterações tendem a reduzir a disponibilidade hídrica nas áreas de nascente, agravando processos já relatados pelos moradores locais, como a diminuição da vazão e o desaparecimento de algumas fontes naturais.

Em vista disso, observa-se que o uso inadequado, as alterações na morfologia natural do sistema da nascente e o eventual secamento das fontes deve impactar diretamente na sua localização. Assim, a presença de pressões antrópicas recorrentes pode ter contribuído para a alteração da posição espacial dos pontos de exfiltração ao longo do tempo.

Essa dinâmica, portanto, compromete a correspondência direta entre a localização observada em campo e aquela derivada automaticamente, resultando em maiores taxas de omissão e valores nulos nos processamentos. Nesse sentido, os resultados menos satisfatórios observados no Ouro e no Rolador podem não indicar limitações intrínsecas dos modelos altimétricos, mas refletir condições ambientais mais sensíveis ou degradadas, associadas a alterações hidrológicas locais.

Esses achados reforçam a importância da validação em campo e demonstram que a eficiência da extração automática de nascentes com dados orbitais está condicionada não apenas à qualidade dos modelos, mas também ao contexto paisagístico e ao uso do ambiente de nascente.

Expandindo a análise para a perspectiva das mudanças climáticas, tem-se que a tendência de aumento da temperatura média, maior irregularidade das chuvas e prolongamento dos períodos secos, são condições que podem comprometer significativamente a dinâmica das nascentes, especialmente aquelas de menor vazão ou fortemente dependentes da recarga sazonal dos aquíferos.

Nesse cenário, a identificação e o monitoramento sistemático das nascentes tornam-se ainda mais relevantes, uma vez que essas áreas representam os primeiros indicadores das alterações no funcionamento hidrológico das bacias hidrográficas.

Destaca-se, portanto, que o mapeamento automatizado, ao tornar visível o conjunto das nascentes, contribui para evidenciar suas condições ambientais e ampliar o debate sobre essas feições hidrológicas.

Assim, o reconhecimento espacial sistemático dessas feições reforça a necessidade de criação e implementação de programas de monitoramento contínuo, capazes de acompanhar tendências de degradação, avaliar o estado de conservação e subsidiar ações de recuperação ambiental ao longo do tempo.

Isto posto, compreende-se que a efetividade das políticas voltadas à conservação de nascentes está condicionada à construção de arranjos de governança multinível (local, regional e nacional) que assegurem clareza na definição de responsabilidades institucionais e promovam a participação social, especialmente por meio da integração efetiva dos proprietários de terra.

Nesse sentido, evidencia-se que iniciativas baseadas exclusivamente em instrumentos normativos tendem a apresentar limitações quando dissociadas das dinâmicas territoriais e institucionais locais.

Assim, conforme apontado por diferentes estudos (Ivey *et al.*, 2006; Powell *et al.*, 2015 e Brake *et al.*, 2020), a articulação entre incentivos, participação e coordenação institucional emerge como condição central para o fortalecimento da governança de ambientes de nascentes e para a consolidação de políticas públicas mais eficazes.

Dessa forma, a integração de proprietários rurais constitui elemento fundamental para a conservação de nascentes, considerando que grande parte desses sistemas se encontra localizada em áreas privadas. Nesse contexto, o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) destaca-se como instrumento estratégico, pois incentiva a adoção de práticas conservacionistas e reconhece os produtores rurais como provedores de serviços ecossistêmicos (Marta *et al.*, 2015; Ikematsu *et al.*, 2016; Correia *et al.*, 2020).

Portanto, a aplicação de metodologias de prospecção automática de nascentes pode fortalecer esse e outros programas ao subsidiar a seleção de áreas prioritárias e otimizar o direcionamento de recursos, ampliando a efetividade de iniciativas como o citado Projeto Produtor de Água.

Desse modo, o uso de dados altimétricos gratuitos assume relevância estratégica, ao favorecer a democratização da informação e permitir a replicação metodológica em diferentes escalas de análise, especialmente no âmbito municipal e local, onde frequentemente existem limitações técnicas e financeiras para a produção de dados primários.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A invisibilidade espacial das nascentes tem sido pauta central em estudos internacionais, evidenciando preocupações relacionadas aos usos, ao estado de preservação e às consequências do ressecamento, especialmente em regiões áridas e sob os efeitos das mudanças climáticas.

No âmbito da gestão hídrica, observou-se a existência de fragilidades institucionais e operacionais que contribuem para a marginalização dessas áreas, apesar de sua relevância para a dinâmica integrada das águas superficiais e subterrâneas.

Esse “esquecimento” espacial também tem dificultado a identificação de intervenções que alteram a morfologia das nascentes, bem como das fontes de poluição, da superexploração hídrica e do planejamento inadequado de atividades agrícolas e pecuárias, fatores que comprometem diretamente sua dinâmica hidrológica.

Nesse contexto, a presente tese foi desenvolvida com foco na análise de métodos de extração automática de dados hidrológicos por meio de modelos digitais hidrologicamente consistentes. O principal diferencial do estudo, além do enfoque específico nas nascentes, consistiu no uso de uma base de dados de validade, permitindo testar variáveis dos modelos altimétricos e confrontar os resultados automatizados com a realidade observada no terreno.

Os resultados demonstraram que a aplicabilidade dos MDEHCs é governada por um conjunto integrado de variáveis, destacando-se, neste estudo, a resolução espacial e o tipo de modelo altimétrico.

Assim, em relação à resolução espacial, modelos com maior refinamento espacial, como o TanDEM-X e o SRTM/ASF reamostrado, apresentaram desempenho superior na prospecção de áreas potenciais de nascentes quando comparados aos modelos de 30 m.

O destaque do desempenho satisfatório do modelo reamostrado foi relevante, contribuindo para a compreensão de que processamentos robustos voltados à correção geométrica e radiométrica, bem como à remoção de distorções, podem produzir representações do terreno compatíveis com a realidade.

Nessa perspectiva, o teste sobre a resolução espacial confirmou a hipótese 1 e corroborou com a literatura ao evidenciar que o refinamento espacial constitui um

fator importante para o desempenho dos algoritmos associados à definição do ponto inicial da drenagem.

Por outro lado, a segunda variável testada, relacionada aos MDTs, refutou a hipótese inicialmente proposta. Os MDTs analisados, como FABDEM e ANADEM, não apresentaram superioridade consistente em relação aos MDEs. A justificativa desse resultado pode ser pautada pela escala utilizada ou pelas características do terreno em que foi realizado os testes.

Contudo, esse resultado abre perspectivas para investigações futura envolvendo MDTs derivados por outros métodos como lidar e comparar com os produtos orbitais, para assim averiguar as variações na obtenção dos dados.

Assim que, diante dos resultados apresentados, destaca-se que o método de extração automática possui potencial como ferramenta de prospecção prévia de áreas com probabilidade de ocorrência de nascentes, podendo subsidiar o planejamento de campanhas de campo mais direcionadas, eficientes e com redução de custos operacionais.

Para tanto, um aporte conceitual relevante desta tese foi a ressignificação dos chamados “erros de comissão”. Tradicionalmente interpretados como inconsistências cartográficas, esses resultados foram compreendidos, neste estudo, como indicadores positivos de áreas com probabilidade de ocorrência de nascentes reais. Essa mudança de perspectiva desloca o enfoque da precisão geométrica estrita para uma interpretação funcional, transformando o mapeamento automatizado em uma ferramenta de prospecção territorial e diagnóstico ambiental.

A análise comparativa entre as áreas experimentais revelou ainda que fatores ambientais, como a densidade da cobertura vegetal e a complexidade do relevo, especialmente vertentes íngremes e interflúvios, influenciam na detecção automática. Além disso, intervenções antrópicas, como a instalação de manilhas e barramentos, modificam a morfologia natural das nascentes e podem alterar sua localização, dificultando sua identificação por métodos remotos.

Apesar dos avanços obtidos, o campo do mapeamento de nascentes ainda apresenta amplas oportunidades de investigação. Para estudos futuros, recomenda-se o uso de modelos derivados de tecnologia LiDAR, cuja maior capacidade de penetração na vegetação permite revelar detalhes do terreno não captados por sensores orbitais. Também se sugere a aplicação dos métodos em áreas com

diferentes configurações geomorfológicas e coberturas vegetais mais esparsas, de modo a compreender como essas variações influenciam no desempenho dos modelos.

Por fim, o método automático aqui discutido mostra-se fundamental para ampliar a visibilidade das nascentes, constituindo suporte científico que deve ser necessariamente associado à verificação em campo e ao ordenamento territorial. Nesse sentido, os produtos gerados possuem potencial para orientar a prospecção preliminar de áreas prioritárias, otimizando o planejamento de atividades de campo e contribuindo para estratégias de monitoramento e gestão ambiental.

Os modelos altimétricos gratuitos e de ampla cobertura espacial podem subsidiar a localização e o diagnóstico dessas fontes hídricas; contudo, ressalta-se a importância de campanhas de campo ou do uso de bases de dados confiáveis para a adequada interpretação das informações geradas automaticamente.

Esta pesquisa, portanto, representa um avanço metodológico no estudo das nascentes ao demonstrar a viabilidade da aplicação da extração automática direcionada especificamente à prospecção dessas feições, tema ainda pouco explorado quando comparado às aplicações tradicionais voltadas à delimitação de drenagens e bacias hidrográficas.

O caráter inovador não reside apenas na utilização dos modelos altimétricos, mas principalmente na validação sistemática dos resultados por meio de uma base de referência construída em campo, permitindo testar hipóteses sob condições reais e avaliar a utilidade operacional do método para atividades de prospecção.

A integração entre dados automatizados, observações de campo e análise das condições ambientais possibilitou uma compreensão mais ampla da distribuição espacial das nascentes e das relações entre relevo, cobertura vegetal, intervenções antrópicas e dinâmica hidrológica.

Os resultados também evidenciaram que a produção de informações espaciais confiáveis pode contribuir para o fortalecimento das políticas públicas voltadas à gestão das águas. O método proposto constitui um instrumento capaz de apoiar programas de inventário, monitoramento e proteção de nascentes, reduzindo custos de prospecção em campo e direcionando ações de fiscalização, recuperação ambiental e planejamento ambiental.

Em um contexto de crescente pressão sobre os recursos hídricos e de intensificação das mudanças climáticas, metodologias dessa natureza tornam-se relevantes para ampliar a capacidade de resposta dos órgãos gestores.

Sob a perspectiva regional, esta pesquisa conferiu visibilidade às nascentes formadoras do rio Pacoti, colocando-as no centro das discussões sobre a gestão dessas feições hídrica no estado do Ceará.

Mais do que localizar nascentes, esta pesquisa demonstrou que torná-las visíveis constitui o primeiro passo para sua conservação. Em um cenário de crescente escassez hídrica e intensificação das mudanças climáticas, mapear as origens dos rios extrapola o exercício cartográfico, tornando-se também uma estratégia básica para a segurança hídrica e a conservação dos sistemas hidrológicos.

Espera-se, assim, que esta pesquisa contribua para o fortalecimento da visibilidade científica e institucional das nascentes, ampliando sua inserção nos debates sobre gestão de recursos hídricos, ordenamento territorial e conservação ambiental.

REFERÊNCIAS

Algo, J. Traditional Mapuche ecological knowledge in Patagonia, Argentina: fishes and other living beings inhabiting continental waters as a reflection of processes of change. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, [s.l.], v. 12, 2016.

ASF. **ASF Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR Products: Product Guide**. Fairbanks: ASF Engineering, 2015. Disponível em: https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2023/06/rtc_product_guide_v1.2-1.pdf. Acesso em: 20 jun. 2024.

ARIZA-VILLAYERDE, A. B. *et al.* Influence of DEM resolution on drainage network extraction: a multifractal analysis. **Geomorphology**, v. 241, p. 243-254, 2015.

ABELE, Susan L. **Nevada Springs Conservation Plan**. Reno: The Nature Conservancy, 2011.

ASPIAZO, C. *et al.* Modelos digitais de terrenos: conceituação e importância. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 21, p. 27-36, dez. 1990.

BARMAN, P. *et al.* Study of water quality, socio-economic status and policy intervention in spring ecosystems of Tripura, Northeast India. **Discover Water**, v. 2, n. 1, 2022.

BRAGA, Francisco Laercio Pereira; CAMPOS, Kilmer Coelho. Análise espacial do desenvolvimento econômico relativo da região do Maciço de Baturité, Ceará. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 11, n. 1, p. 149, 2022. DOI: 10.3895/rbpd.v10n1.12056.

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; altera as Leis nº 8.212, de 24 de julho de 1991, nº 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 jan. 2021.

BASTOS, Frederico de Holanda; CORDEIRO, Abner Monteiro Nunes; SILVA, Edson Vicente da. Aspectos geoambientais e contribuições para estratégias de planejamento ambiental da Serra de Baturité/CE. **Revista da ANPEGE**, v. 13, n. 21, p. 163-198.

BALLESTERO, A. The anthropology of water. **Annual Review of Anthropology**, v. 48, n. 1, p. 405-421, 2019.

BOSQUILIA, R. W. D. *et al.* Diferentes imagens de satélite no mapeamento visual de drenagens e nascentes em amostras circulares. **Interciencia**, v. 41, n. 4, p. 254-259, 2016.

BOSQUILIA, Raoni Wainer Duarte *et al.* Comparação entre métodos de mapeamento automático de rede de drenagem utilizando SIG. **Irriga**, v. 20, n. 3, p. 445-457, 2015.

BIELSKI, Conrad *et al.* Novel approach for ranking DEMs: Copernicus DEM improves one arc second open global topography. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 62, p. 1-22, 2024. DOI: 10.1109/TGRS.2024.3368015.

BUARQUE, Diogo Costa *et al.* Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 91-103, 2009.

BRAKE, L. *et al.* **Great Artesian Basin Springs: A Plan for the Future: Evidence-Based Methodologies for Managing Risks to Spring Values**. 2020. Disponível em: https://cdn.environment.sa.gov.au/landscape/docs/saal/6008_gab_final_jan_2020.pdf. Acesso em: 6 jun. 2024.

BUCKLEY, Sean. **NASADEM: Creating a New NASA Digital Elevation Model and Associated Products**. 2020. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CAVALCANTE, D. R.; BASTOS, F. H.; CORDEIRO, A. M. N. Os relevos cársticos da vertente oriental do Maciço de Baturité (CE): uma abordagem geral. In: **SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA**, 10., 2014, Manaus. **Anais [...]** Manaus: União da Geomorfologia Brasileira, 2014. p. 185-190.

CAVA, Mário Guilherme de Biagi *et al.* Representação cartográfica da rede hidrográfica e suas limitações na quantificação de áreas de preservação permanente. **Geografia**, v. 47, n. 1, p. 1-32, 2022.

CARVALHO, P. G. M. *et al.* Gestão local e meio ambiente. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 1-19, 2005.

CANTONATI, Marco *et al.* Urgent plea for global protection of springs. **Conservation Biology**, v. 35, n. 1, p. 378-382, 2021.

CAPOANE, Viviane. Sensibilidade geomorfométrica da drenagem e da superfície do terreno à fonte e à resolução espacial de modelos digitais de superfície e elevação. **Geotextos**, Salvador, v. 18, n. 1, p. 163-192, 2022.

CECÍLIO, R. A. *et al.* Delimitação de bacia hidrográfica em região montanhosa a partir de diferentes modelos digitais de elevação. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 5, p. 2007-2023, 2013.

CHAUHAN, Neha; NEGI, M. S. An integrated study of natural springs to sustain water security: case study of three villages from a Himalayan State of India. **Sustainability, Agri, Food and Environmental Research**, Temuco, v. 12, n. 1, p. 1-17, 2023.

CEBALLOS, Z. *et al.* Espacios ecológico-culturales en un territorio mapuche de la Región de La Araucanía en Chile. **Chungará: Revista de Antropología Chilena**, v. 44, p. 313-323, 2012.

FARR, Tom G.; ROSEN, Paul A.; CARO, Edward; CRIPPEN, Robert; DUREN, Riley; HENSLEY, Scott; KOBRICK, Michael; PALLER, Mimi; RODRIGUEZ, Ernesto; ROTH, Ladislav. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007. DOI: 10.1029/2005RG000183.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 27, n. 5, p. 709-717, 1991. DOI: 10.1029/90WR02658.

FREIRE, L. M.; SANTIAGO, Joselito. Caracterização geomorfológica da Serra de Baturité – Ceará. **Geonorte**, v. 5, n. 19, p. 88-94, 2014.

FREIRE, Luciana Martins; SOUZA, Marcos José Nogueira de. Geografia e questão ambiental no estudo de paisagens de exceção: o exemplo da Serra de Baturité. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 26, n. 2, p. 130-150, 2006.

GARBRECHT, Jurgen; MARTZ, Lawrence W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Journal of Hydrology**, v. 193, n. 1-4, p. 204-213, 1997. DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03138-1.

GARBRECHT, Jurgen; MARTZ, Lawrence W. Paper 1: digital elevation model issues in water resources modeling. In: **Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2000. p. 1-28.

GONÇALVES DO CARMO, L. *et al.* Áreas de preservação permanente no entorno de nascentes: conflitos, lacunas e alternativas da legislação ambiental brasileira. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 34, n. 2, p. 275-293, 2014.

GUTH, Peter L. *et al.* Digital elevation models: terminology and definitions. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, 2021.

HAWKER, L. *et al.* A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 2, p. 024016, 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.

HONG, Chang-yu. Freshwater springs preservation in Jejudo: reinterpretation of springs as an ethnological and environmental resource. **International Journal of Geospatial and Environmental Research**, v. 1, n. 2, 2014.

HANCOCK, G. R.; EVANS, K. G. Channel head location and characteristics using digital elevation models. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 7, p. 809-824, 2006.

HOLANDA, Débora Maciel Castelo. **Espacialização e avaliação ambiental das nascentes de drenagens do alto curso da bacia hidrográfica do rio Pacoti (Ceará, Brasil)**. 2022. 94 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

INSTITUTO OCA DO SOL. **Guardiões das Nascentes: metodologia de mapeamento comunitário de nascentes em ambientes periurbanos**. 2. ed. Brasília: Fundação Banco do Brasil, 2022. Disponível em: https://transforma.fbb.org.br/storage/socialtecnologias/530/files/Cartilha_Guardioes_das_nascentes_2%C2%AA_Edicao.pdf. Acesso em: 20 jun. 2024.

IBGE. **Avaliação da qualidade de dados geoespaciais**. Rio de Janeiro: Coordenação de Cartografia, 2017.

IVEY, J. L.; LOË, R. de; KREUTZWISER, R.; FERREYRA, C. An institutional perspective on local capacity for source water protection. **Geoforum**, v. 37, n. 6, p. 944-957, 2006. DOI: 10.1016/j.geoforum.2006.05.001.

IKEMATSU, Priscila *et al.* Aspectos técnicos para priorização de recursos em recuperação e conservação de nascentes. **Águas Subterrâneas**, 2016.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

LEAL, Mariana Santos; TONELLO, Kelly Cristina; DIAS, Herly Carlos Teixeira; MINGOTI, Rafael. Caracterização hidroambiental de nascentes. **Ambiente & Água**, v. 12, n. 1, p. 146, 2017. DOI: 10.4136/ambi-agua.1909.

LIMA, K.; CUNHA, C. M. L. Atualização cartográfica da rede de drenagem para estudo geomorfológico de rios intermitentes e efêmeros do semiárido. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 1, p. 127-136, 2014. DOI: 10.14393/rbcv66n1-43901.

LUO, Qiankun *et al.* Spring protection and sustainable management of groundwater resources in a spring field. **Journal of Hydrology**, v. 582, art. 124498, 2020.

LINDSAY, John B. Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 6, p. 846-857, 2016. DOI: 10.1002/hyp.10648.

MARQUES, Helder Gustavo *et al.* Comparação entre os modelos SRTM, TOPODATA e ASTER na delimitação automática de rede de drenagem e limite de bacia hidrográfica. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1271-1278.

MARTA, J.; MENDES, Ronaldo; FARIAS, André. Recuperação de nascentes e pagamentos por serviços ambientais: reflexões ambientais e normativas. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 21., 2015. **Anais...** 2015.

MATSUNAGA, Kohei *et al.* Simple DEM-based methods to delineate channel networks for hydrogeomorphological mapping. **Transactions in GIS**, v. 13, n. 1, p. 87-103, 2009.

MCMASTER, Kevin J. Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions. **Water Resources Research**, v. 38, n. 4, 2002. DOI: 10.1029/2000WR000150.

MARION, Fabiano A. *et al.* Parâmetros e incongruências no processo de mapeamento da rede de drenagem: o caso da bacia do Rio Santa Rosa/PR. **Synergismus Scyentifica UTFPR**, v. 8, n. 1, 2013.

MARQUES, Helder Gustavo *et al.* Comparação entre os modelos SRTM, TOPODATA e ASTER na delimitação automática de rede de drenagem e limite de bacia hidrográfica. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1271-1278.

MORAIS, R. C. S.; SALES, M. C. L. Extração automática de drenagem: uma análise comparativa a partir de diferentes ferramentas e bases de dados. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, p. 1849-1860, 2016. DOI: 10.26848/rbgf.v9.6.p1849-1860.

MOREIRA, G. T. G. **Métrica para avaliação da inconsistência hidrológica de terrenos representados por MDE**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

NUNES, Carina. **Avaliação do estado de conservação de nascentes em um território quilombola: estudo de caso no Quilombo Boa Esperança, Areal-RJ**.

2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017. Disponível em: <https://portal1.iff.edu.br/o-iffuminense/pesquisa/pos-graduacao-stricto-sensu/mestrado-em-engenharia-ambiental/dissertacoes-de-mestrado/2017/avaliacao-do-estado-de-conservacao-de-nascentes-em-um-territorio-quilombola-estudo-de-caso-no-quilombo-boia-esperanca-areal-2013-rj>. Acesso em: 20 jun. 2024.

OLIVEIRA, A. H. *et al.* Consistência hidrológica de modelos digitais de elevação (MDE) para definição da rede de drenagem na sub-bacia do Horto Florestal Terra Dura, Eldorado do Sul, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1259-1268, 2012.

OROZCO-URIBE, Landy. Change of groundwater manifestations and characteristics of associated ecosystems in the Mexican semi-arid region. **Hidrobiológica**, v. 30, n. 3, p. 1-15, 2021. DOI: 10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n1/orozco.

O'CALLAGHAN, John F.; MARK, David M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 28, n. 3, p. 323-344, 1984.

PASCUAL, Roger; PIANA, Lucia; BHAT, Sami Ullah; CASTRO, Pedro Fidel; CORBERA, Jordi; CUMMINGS, Dion; DELGADO, Cristina; EADES, Eugene; FENSHAM, Roderick J.; FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, Marcos. The cultural ecohydrogeology of Mediterranean-climate springs: a global review with case studies. **Environments**, v. 11, n. 6, art. 110, 2024. DOI: 10.3390/environments11060110.

PASSOS, J. B. *et al.* Controle de qualidade de dados geoespaciais na fase de reambulação: abordagem da completude. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 19., 2019, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2019. p. 1104-1107.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, n. 2, p. 84-95, 2008.

PLANCHON, Olivier; DARBOUX, Frédéric. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. **Catena**, v. 46, n. 2-3, p. 159-176, 2002. DOI: 10.1016/S0341-8162(01)00164-3.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos**

Avançados, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008. DOI: 10.1590/S0103-40142008000200004.

POWELL, Owen *et al.* Oases to oblivion: the rapid demise of springs in the south-eastern Great Artesian Basin, Australia. **Groundwater**, v. 53, n. 1, p. 171-178, 2015.

RANJAN, Prem; PANDEY, Pankaj Kumar; PANDEY, Vanita; LEPCHA, Pema Tshering. Development of seepage spring for rural water security. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1070, n. 1, art. 012047, 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1070/1/012047.

ROMANO, R. L. *et al.* **Mapeamento e análise ambiental de nascentes na sub-bacia hidrográfica do Tuá – BA**. Brasília: Embrapa, 2019. (Documentos, 229). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1109721/1/Documento229RomuloRomanoAinfo2.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2024.

RATHOD, Roshan *et al.* **Resource Book on Springshed Management in the Indian Himalayan Region: Guidelines for Policy Makers and Development Practitioners**. New Delhi: International Water Management Institute; NITI Aayog; Swiss Agency for Development and Cooperation, 2021.

RANJAN, P.; PANDEY, P. K. Spring protection: step towards water security and sustainable rural water supply. **Annals of the Romanian Society for Cell Biology**, v. 25, n. 2, p. 1216-1222, 2021.

RANA, V. K.; SURYANARAYANA, T. M. V. Visual and statistical comparison of ASTER, SRTM, and Cartosat digital elevation models for watershed. **Journal of Geovisualization and Spatial Analysis**, v. 3, 2019.

REDDY, G. O. *et al.* Evaluation of automatic drainage extraction thresholds using ASTER GDEM and Cartosat-1 DEM: a case study from basaltic terrain of Central India. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 21, n. 1, p. 95-104, 2018.

RIBEIRO, L. C. *et al.* Avaliação do efeito de diferentes MDEs na delimitação de bacia hidrográfica em região plana amazônica. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 20., 2023, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2023.

ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; ITO, N.; WATANABE, M. ALOS PALSAR: a pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. **IEEE**

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 45, n. 11, p. 3307-3316, 2007. DOI: 10.1109/TGRS.2007.901027.

ROMADHAN, Ach *et al.* Political ecology protection spring water in Batu. **Journal of Local Government Issues (LOGOS)**, v. 3, n. 1, p. 75-85, 2020.

RUIZ, J. J. *et al.* Evaluating the accuracy of DEM generation algorithms from UAV imagery. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-1/W2, p. 333-337, 2013. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-333-2013.

SANTOS, L. C. S. *et al.* Avaliação dos modelos digitais de elevação aplicados à extração automática de redes de drenagem. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1311-1318.

SAMPAIO, Tony Vinicius Moreira; ROCHA, Jorge. On the quality of the drainage network cartographic representation. **Ecological Indicators**, v. 143, art. 109350, 2022.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Variáveis auxiliares para o mapeamento da rede de drenagem: correlação espacial entre nascentes, unidades de relevo e litotipos na bacia hidrográfica do rio Benevente-ES. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, v. 18, n. 3, p. 624-634, 2014.

SILVA NETO, José Augusto da. **Dinâmica hidroclimática e tipos de clima da Serra de Baturité (CE)**. 2020. 216 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

SOUSA, M. S.; SAMPAIO, T. V. M. Influência da acurácia de completude na delimitação de áreas de preservação permanente. **Confins**, n. 35, 2018.

SOUSA, T. M. I. **Avaliação da qualidade em redes de drenagem processadas a partir de modelos digitais de elevação**. 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/11678>. Acesso em: 1 ago. 2023.

SOUZA, J. O. P.; ALMEIDA, J. D. M. de. Modelo digital de elevação e extração automática de drenagem: dados, métodos e precisão para estudos hidrológicos e geomorfológicos. **Boletim de Geografia**, v. 32, n. 2, p. 134-150, 2014. DOI:

10.4025/bolgeogr.v32i2.20470.

SOARES, Igor de Menezes. **Uma via para a prosperidade: a estrada de Baturité e o Ceará (1836-1872)**. 2015. 347 f. Dissertação (Mestrado em História) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SILVA, C. M. **Efeito da escala na delimitação de áreas de preservação permanente de nascentes e cursos de água a partir de redes de drenagem de bases e escalas distintas: um estudo de caso em Itajaí/SC**. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Perícias Criminais Ambientais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

SPRINGER, Abraham E.; STEVENS, Lawrence E. Spheres of discharge of springs. **Hydrogeology Journal**, v. 17, n. 1, p. 83-93, 2009.

STEVENS, L. E. *et al.* **Inventory and Monitoring Protocols for Springs Ecosystems**. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Lawrence-Stevens/publication/267245755_INVENTORY_AND_MONITORING_PROTOCOLS_FOR_SPRINGS_ECOSYSTEMS. Acesso em: 6 maio 2023.

STEVENS, L. E. *et al.* Springs ecosystem classification. **Ecological Applications**, v. 31, n. 1, e02218, 2021.

STEVENS, L. E. *et al.* The ecological integrity of spring ecosystems: a global review. In: **Imperiled: The Encyclopedia of Conservation**. Amsterdam: Elsevier, 2022. p. 436-451. DOI: 10.1016/B978-0-12-821139-7.00111-2.

SURING, L. H. Lotic freshwater: springs. In: **Encyclopedia of the World's Biomes**. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 131-133. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.12075-5.

SUPANGAT, A. B. *et al.* Sustainable management for healthy and productive watersheds in Indonesia. **Land**, v. 12, n. 11, art. 1963, 2023. DOI: 10.3390/land12111963.

TARBOTON, David G. *et al.* On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 81-100, 1991.

TASCA, B. F. C. *et al.* Localização de nascentes ameaçadas em áreas urbanas: uma estratégia preventiva de conservação ambiental com auxílio de modelo digital do terreno (MDT). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 2186-2203, 2021.

TEODORO, Valter Luiz Iost; TEIXEIRA, Denilson; COSTA, Daniel Jadyr Leite; FULLER, Beatriz Buda. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007. DOI: 10.25061/2527-2675/ReBraM/2007.v11i1.236.

VARANKA, D. Analytical concepts in early computer cartography and late national topographic mapping in the United States. In: **INTERNATIONAL CARTOGRAPHIC CONFERENCE**, 22., 2005. **Mapping Approaches into a Changing World: Proceedings...** 2005. p. E1.

VILLAR, P. C.; HIRATA, R. Governança das águas subterrâneas e a construção de indicadores jurídicos para os estados brasileiros. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, e00371, 2022.

VOGT, J. V. *et al.* Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. **Geomorphology**, v. 53, n. 3-4, p. 281-298, 2003.

WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 2, p. 193-213, 2006. DOI: 10.1080/13658810500433453.

WU, S.; LI, J.; HUANG, G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 10, p. 33-42, 2005. DOI: 10.1007/s10666-004-6595-4.

WESSEL, B. **TanDEM-X Ground Segment – DEM Products Specification Document**. Issue 3.2. Oberpfaffenhofen, Germany: German Aerospace Center (DLR), Earth Observation Center (EOC), 2018. (Public Document TD-GS-PS-0021).

WOHL, E. The challenges of channel heads. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 649-664, 2018.

YOGI, F.; STANGANINI, F. N. Comparison and evaluation of digital elevation models of SRTM, ASTER, TanDEM-X/TerraSAR-X, NASADEM, Copernicus DEM and ALOS PALSAR sensors for digital land analysis for applications in basic sanitation. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, 2023.