UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS DADOS HIDROLÓGICOS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA) COM OS *NODES* DO SATÉLITE *SURFACE WATER AND OCEAN TOPOGRAPHY* (SWOT), COM BASE EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP)

BEATRIZ BRITO DA SILVA

ORIENTADOR: REJANE ENNES CICERELLI
COORIENTADOR: THIAGO LAPPICY LEMOS GOMES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL 2

BRASÍLIA/DF: 16 DE DEZEMBRO DE 2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS DADOS HIDROLÓGICOS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA) COM OS *NODES* DO SATÉLITE *SURFACE WATER AND OCEAN TOPOGRAPHY* (SWOT), COM BASE EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP)

BEATRIZ BRITO DA SILVA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

_____

REJANE ENNES CICERELLI, DR. (PROFESSORA, P.E IG/UNB)
(ORIENTADORA)

_____

RICARDO TEZINI MINOTI, DR. (PROFESSOR, P.E ENC/UNB)
(EXAMINADOR INTERNA)

_____

TATI DE ALMEIDA, DR. (PROFESSORA, P.E IG/UNB)
(EXAMINADORA INTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 16 DE DEZEMBRO DE 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, BEATRIZ
CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS DADOS HIDROLÓGICOS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA) COM OS *NODES* DO SATÉLITE *SURFACE WATER AND OCEAN TOPOGRAPHY* (SWOT), COM BASE EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP)

71 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2025)
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
1. Monitoramento hidrológico 2. Satélite SWOT
3. Estações fluviométricas 4. Rio Grande do Sul
I. ENC/FT/UnB II. Monografia (graduação em Engenharia Ambiental)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, B.B. (2025). *CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS DADOS HIDROLÓGICOS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA) COM OS NODES DO SATÉLITE SURFACE WATER AND OCEAN TOPOGRAPHY (SWOT), COM BASE EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP)*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 72 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Beatriz Brito da Silva
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Correspondência entre os dados hidrológicos das estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas E Saneamento Básico (ANA) com os *nodes* do satélite *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), com base em análise multicritério (AHP)
GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2025

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

NOME Beatriz Brito da Silva
EMAIL trizbritt@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, sou grata a Deus, meu fiel escudeiro e salvador. Que por tantas vezes me acolheu e me fez enxergar a grandeza Dele em meio às minhas dificuldades. Que colocou em meu caminho pessoas que foram verdadeiros anjos na minha vida.

A primeira delas, é claro, é minha mãe: Monia Cardoso de Brito. O seu nome precisa ser lembrado pela mulher guerreira que a senhora é e pela mãe leoa que sempre foi. Obrigada por ter se sacrificado tanto para me ver formar. Por ter me apoiado tanto nos meus estudos e tentado de tudo para que eu precisasse me dedicar somente a eles. A senhora é tão parte disso quanto eu.

Eu sou eternamente grata às minhas amigas de graduação Samara e Leticia por sofrerem comigo nesse período acadêmico, mas ao mesmo tempo, por trazerem leveza e conforto. Obrigada pelo companheirismo. Digo o mesmo aos meus amigos Bruna e Lucas.

À minha irmã do coração, Gabrielly, toda a minha compaixão por ouvir às minhas murmurações.

Ao meu noivo, Igor, toda a minha admiração por ter me apoiado nos momentos mais difíceis, nos que quase desisti. Você é um dos poucos que sabe das minhas dores e às acolheu da melhor forma possível.

Sou grata pela professora Rejane Ennes Cicerelli pelo apoio e disponibilidade desde a primeira parte desse estudo, por ter confiado no meu trabalho e ter me proposto esse desafio. Obrigada também por ter confiado no Thiago Lappicy para essa coorientação, que foi simplesmente impecável.

Thiago, meu coorientador, obrigada pela sua objetividade, paciência e colaboração nesse trabalho. Você foi essencial tanto para esse projeto se desenvolver quanto para eu me desenvolver como profissional. Não tenho dúvidas que será um ótimo lecionador.

Sou grata aos professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental por me ensinarem tanto e me desafiarem a ser uma profissional não só boa tecnicamente, mas também consciente social e ambientalmente. Destaco os seguintes nomes: Prof. Nestor Campaña, Prof. Carlos Lima, Profª Cristina Brandão, Profª Yovanka Ginoris, Profª Ariuska Amorim, Prof. Ricardo Minoti e Prof. Francisco Pineda.

Grata à banca examinadora, composta pela Profª Tati de Almeida e pelo Prof. Ricardo Minoti. pelas preciosas contribuições que tornaram este trabalho mais consistente e significativo.

Grata à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) pelo suporte técnico e pela valiosa cooperação.

Ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e ao Instituto de Geociências.

À Universidade de Brasília e às pessoas que fazem dela uma academia de excelência.

RESUMO

Palavras-chave: Monitoramento hidrológico; Satélite SWOT; Estações fluviométricas; ANA; Rio Grande do Sul

O monitoramento hidrológico no Brasil depende majoritariamente da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), operada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Embora extensa, essa rede apresenta desigualdades regionais de cobertura, o que reforça o interesse em avaliar o potencial de fontes complementares de informação, como o satélite *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT). Este trabalho propõe e aplica uma metodologia sistemática para verificar a correspondência entre os dados orbitais do SWOT e os registros hidrológicos das estações fluviométricas da ANA, utilizando o estado do Rio Grande do Sul como estudo de caso. A metodologia envolve o pré-processamento das bases, o cálculo da distância euclidiana entre estações e *nodes*, a comparação entre áreas de drenagem derivadas do MDE e do produto SWORD, e uma análise multicritério baseada no método AHP para definir um índice de confiabilidade da associação. Os resultados demonstram que a combinação dos critérios de distância e área de drenagem, ponderados pela AHP, é capaz de identificar associações consistentes entre as duas fontes, inclusive quando testada em uma estação localizada em outra bacia hidrográfica. A análise também evidencia limitações estruturais da integração, especialmente em trechos influenciados por intervenções antrópicas ou incongruências geomorfológicas entre as redes. Ainda assim, a metodologia proposta se mostra eficaz para avaliar a compatibilidade entre ANA e SWOT, oferecendo subsídios para estudos que busquem explorar dados orbitais como apoio à verificação, validação e complementaridade de informações hidrológicas em escala regional.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 7

2. OBJETIVOS 9

2.1. OBJETIVO GERAL 9
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 9

3. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 10

3.1. CONTEXTO DO MONITORAMENTO DE RIOS NO BRASIL 10
3.2. SWOT (*SURFACE WATER AND OCEAN TOPOGRAPHY*) 12
3.2.1. Missão 12
3.2.2. Fundamentos do Radar de Abertura Sintética (SAR) 14
3.2.2.1. O conceito de interferometria 15
3.2.2.2. Funcionamento do radar 16
3.2.2.3. Resolução em azimute 17
3.2.2.4. Interferometria de radar na banda Ka 17
3.2.3. Banco de dados e produtos fornecidos pelo SWOT 19
3.2.3.1. Produtos SWOT 19
3.2.3.2. SWORD (*SWOT River Database*) 20

4. METODOLOGIA 22

4.1. COLETA E PRÉ PROCESSAMENTO DOS DADOS 22
4.1.1. Dados de entrada 23
4.1.1.1. Estações fluviométricas da ANA 23
4.1.1.2. ANADEM 24
4.1.1.3. Conceituação dos Nodes no Produto SWORD 25
4.2. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS 27
4.2.1. Distância euclidiana mínima 27
4.2.2. Área de drenagem 28
4.2.2.1. Cálculo da área de drenagem 28
4.2.2.2. Diferença entre as áreas de drenagem 31
4.3. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS (MULTICRITÉRIO) 32

4.4. ESTUDO DE CASO – RIO GRANDE DO SUL 36

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 38

5.1. ÁREA ESTUDADA..... 38

5.2. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA CÁLCULO DA ÁREA DE DRENAGEM 40

5.3. RELAÇÃO ENTRE OS DADOS DO SWOT E DA ANA 44

5.4. ÍNDICE DE ASSOCIAÇÃO ENTRE OS DADOS DA ANA E DO SWOT UTILIZANDO AHP..... 49

5.5. APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE ASSOCIAÇÃO PARA O RS PARA ESTABELECIMENTO DE CORRESPONDÊNCIA..... 57

5.5.1. Exemplo de associação dos dados entre a ANA e SWOT para uma estação fora do RS 61

5.6. DESAFIOS NO ESTABELECIMENTO DE CORRESPONDÊNCIA 63

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de curva-chave 11
Figura 2 - Fases da missão SWOT (NASA, 2025) 14
Figura 3 - Visão geral dos sistemas de medição do SWOT (JPL, 2024) 15
Figura 4 – Distribuição dos *reaches* do produto RiverSP do SWOT derivados do SWORD no Brasil 21
Figura 5 - Fluxograma da metodologia empregada 22
Figura 6 - Distribuição das estações fluviométricas da ANA 24
Figura 7 - Representação de um "*reach*" de rio pelo SWORD. 26
Figura 8 - Representação de um "*node*" de rio pelo SWORD 26
Figura 9 - Estações fluviométricas com e sem área de drenagem no Brasil 29
Figura 10 - Procedimento do cálculo de área de drenagem das estações 31
Figura 11 - Área de estudo 37
Figura 12 - Densidade das estações em operação da ANA 39
Figura 13 - Densidade dos *nodes* do SWOT no Brasil 40
Figura 14 - Deslocamento da estação 70200000 (menor deslocamento) 41
Figura 15 - Deslocamento da estação 74500000 (maior deslocamento) 41
Figura 16 - Deslocamento da estação 85610000 42
Figura 17 - *Boxplot* de diferenças de área de drenagem estimada pelo estudo e as consolidadas na base de dados da ANA 44
Figura 18 - Distância da estação 85610000 com o *node* mais próximo 46
Figura 19 – (a) Relação entre distância euclidiana e diferença de drenagem e (b) zoom dos pontos densificados 47
Figura 20 - Distância da estação 74610000 ao *node* mais próximo 48
Figura 21 - *Boxplot* das diferenças percentuais das áreas de drenagem entre a ANA e o SWOT 48
Figura 22 – Zoom do *Boxplot* das diferenças percentuais das áreas de drenagem 49
Figura 23 - Dados primários da AHP, incluindo nodes, estações e distâncias euclidianas (a) e exemplos pontuais de como as estações podem ser associadas ao SWOT (b, c e d) 50
Figura 24 - Áreas de drenagem geradas para utilização com a AHP 51

Figura 25 - Classificação hierárquica 52
Figura 26 - Distribuição dos índices de associação no RS 61
Figura 27 - Localização da estação 42395000 62
Figura 28 - Exemplo de problema de associação por ausência de marcação geodésica 63
Figura 29 - Exemplo de problema de associação por interferências locais 65
Figura 30 - Exemplo de desafio na associação por quantidade de *nodes* do SWOT (cor laranja) e de estações ANA (cor branca). 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da missão SWOT (modificado JPL, 2024) 14
Tabela 2 - Características do radar interferométrico (modificado JPL, 2024) 19
Tabela 3 - Escala Fundamental de Saaty. Fonte: Adaptado de Saaty & Vargas (2012). 33
Tabela 4 - Índices Aleatórios (IA) utilizados no cálculo da Razão de Consistência (RC). Fonte: Adaptado de Saaty & Vargas (2012). 36
Tabela 5 - Comparativo entre as áreas de drenagem calculada no estudo e ANA 43
Tabela 6 – Dados das associações entre a ANA e o SWOT 45
Tabela 7 – Cálculos dos quartis dos dados 53
Tabela 8 – Prioridade relativa dos critérios 53
Tabela 9 – Prioridade relativa dos critérios de distância 54
Tabela 10 – Prioridade relativa dos critérios de área de drenagem 54
Tabela 11 – Matriz de comparação paritária dos critérios 54
Tabela 12 – Matriz de comparação paritária de distância 55
Tabela 13 – Matriz de comparação paritária de área de drenagem 55
Tabela 14 – Prioridade composta 55
Tabela 15 – Avaliação da consistência das prioridades 56
Tabela 16 – Vetores de prioridade 56
Tabela 17 – Índice de associação 56
Tabela 18 – Estações que não são compatíveis 58
Tabela 19 – Estações levemente compatíveis 59
Tabela 20 – Estações que são medianamente compatíveis 59
Tabela 21 – Estações que são fortemente compatíveis 60
Tabela 22 – Representatividade dos dados 61

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 16
Equação 2 16
Equação 3 17
Equação 4 17
Equação 5 18
Equação 6 34
Equação 7 35
Equação 8 35
Equação 9 35
Equação 10 35

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ADCP	*Acoustic Doppler Current Profiler*
AirSWOT	*Airborne SWOT Mission*
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CNES	Centro Nacional de Estudos Espaciais da França
CSA	Agência Espacial Canadense
GDR	Produtos de maior fidelidade
GRWL	*Global River Widths from Landsat*
JPL	Laboratório de Propulsão a Jato
KaSPAR	*Ka-band SWOT Phenomenology Airborne Radar*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
NASA PO.DAAC	*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*
OGDR	Produtos com menor latência
POE	*Precise Orbit Ephemeris*
MDE	Modelos Digitais de Elevação
MOE	*Medium-accuracy Orbit Ephemeris*
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
RMSE	Erro Médio Quadrático
SAR	Radar de Abertura Sintética
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SRC	Sistema de Referência de Coordenadas
SRTM	*Shuttle Radar Topography Mission*
SSH	*Sea Surface Height*
SWOT	*Surface Water and Ocean Topography*
SWORD	*SWOT River Database*
TED	Termo de Execução Descentralizada
UKSA	Agência Espacial do Reino Unido
WSE	*Water Surface Elevation*

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de rios é um componente essencial para a gestão dos recursos hídricos no Brasil, viabilizando o acompanhamento contínuo do comportamento hidrológico dos cursos d'água e subsidiando decisões relacionadas aos usos múltiplos da água, ao enfrentamento de eventos extremos como cheias e estiagens, e ao planejamento ambiental (ANA, 2023a). Em um país de dimensões continentais e marcado por forte variabilidade climática e hidrológica, falhas na cobertura ou na continuidade das observações podem comprometer tanto a segurança hídrica quanto a capacidade de resposta a desastres naturais (ANA, 2023b).

Nesse contexto, a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), gerenciada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), constitui o principal instrumento para esse monitoramento, contando com milhares de estações que registram dados de nível, vazão, qualidade da água e sedimentos (ANA, 2022). Apesar de sua relevância estratégica, a RHN apresenta limitações operacionais conhecidas, como distribuição espacial desigual, interrupções temporárias de séries históricas e ausência de dados em tempo oportuno em determinadas regiões, o que afeta as análises hidrológicas em escala regional e nacional (Tucci, 2002).

Diante dessas limitações, a possibilidade de estimar variáveis hidrológicas de forma remota representa um avanço significativo. Em particular, o satélite SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*), lançado em 2022 pela NASA, em cooperação internacional, amplia a capacidade de observação de águas superficiais continentais (NASA, s.d.). Diferentemente de abordagens anteriores, o SWOT fornece dados de alta resolução sobre múltiplas variáveis hidrológicas, como elevação da superfície da água (*Water Surface Elevation – WSE*), largura de canais, declividade da superfície líquida, área da superfície da água e estimativas de vazão (Yao *et al*., 2025).

Essa diversidade de parâmetros ampliam o potencial de monitoramento de rios, lagos e reservatórios em tempo quase real, com aplicações relevantes para o controle de cheias (Biancamaria *et al*., 2016), por exemplo, em regiões como a Amazônia, o Pantanal e o Rio Grande do Sul, bem como para o apoio à gestão de usos múltiplos da água em bacias intensamente ocupadas, como as dos rios São Francisco, Paraná e Tocantins. No âmbito institucional, o SWOT apresenta potencial para fortalecer o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), apoiando a ANA, os comitês de bacia e

os órgãos gestores estaduais no acompanhamento da disponibilidade hídrica e no planejamento de políticas públicas.

Entretanto, embora a literatura recente reporte desempenho promissor do SWOT para aplicações hidrológicas, persiste um desafio metodológico central para sua utilização operacional no Brasil: a correspondência confiável entre as observações orbitais e os dados obtidos pelas estações fluviométricas da RHN (Frappart *et al*. 2020). As diferenças na representação da rede de drenagem, as inconsistências espaciais entre bases de dados, intervenções antrópicas locais e divergências entre áreas de drenagem estimadas a partir de diferentes fontes dificultam o estabelecimento de correspondências diretas entre os produtos do SWOT e as estações da ANA. A ausência de procedimentos sistemáticos, reprodutíveis e transparentes para avaliar a confiabilidade dessa associação limita a incorporação dos dados orbitais em aplicações de gestão em escala regional e nacional.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe uma metodologia sistemática para associar os dados do satélite SWOT às informações hidrológicas das estações fluviométricas operadas pela ANA. A proposta baseia-se na associação entre observações orbitais e estações in situ a partir de critérios espaciais e hidrológicos, como distância euclidiana e área de drenagem, combinados por meio de análise multicritério, com o objetivo de classificar o grau de compatibilidade entre as duas fontes. Busca-se, assim, estabelecer um procedimento replicável e tecnicamente sustentado que indique, de forma objetiva, quando a incorporação de dados do SWOT é adequada para o fortalecimento do monitoramento hidrológico nacional.

Este estudo acadêmico integra o projeto TED – Termo de Execução Descentralizada nº 04687620240003, estabelecido entre o Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília (UnB) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A iniciativa é intitulada "*Risco de eventos extremos: drenagem urbana e monitoramento hidrológico SWOT*" e tem como foco a análise do potencial do SWOT para gestão de riscos associados a eventos hidrológicos.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver e aplicar uma metodologia para avaliar a correspondência espacial e hidrológica entre estações fluviométricas da ANA e *nodes* do produto SWOT RiverSP derivados do banco de dados SWORD, visando classificar o grau de compatibilidade entre observações orbitais e medições in situ.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Organizar e padronizar os dados espaciais das estações fluviométricas da ANA e dos *nodes* do produto SWOT RiverSP, garantindo consistência de sistemas de referência, metadados e representatividade espacial;
- Calcular a distância euclidiana mínima entre cada estação fluviométrica da ANA e os nodes do SWOT, como critério espacial preliminar de associação;
- Delimitar automaticamente as áreas de drenagem associadas às estações fluviométricas da ANA a partir do modelo digital de elevação ANADEM e comparar esses valores com as áreas de drenagem disponibilizadas pela ANA;
- Avaliar a concordância entre os parâmetros espaciais (distância) e hidrológicos (diferença de área de drenagem) por meio de uma análise multicritério baseada no método AHP;
- Classificar o grau de compatibilidade entre estações fluviométricas da ANA e nodes do SWOT, identificando associações confiáveis e limitações estruturais do processo de integração.

3. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONTEXTO DO MONITORAMENTO DE RIOS NO BRASIL

O monitoramento de cursos d'água é um componente essencial da gestão dos recursos hídricos no Brasil, sendo realizado principalmente por meio de estações fluviométricas distribuídas ao longo das principais bacias hidrográficas. Essas estações fornecem observações pontuais no espaço, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento hidrológico dos rios, subsidiando desde o planejamento de usos múltiplos da água até o gerenciamento de eventos críticos, como cheias e estiagens (ANA, 2023a).

No contexto nacional, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) é responsável pela coordenação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), composta por milhares de estações distribuídas em todo o território brasileiro. Essas estações realizam, de forma contínua, a medição do nível da água (cota), que constitui a variável hidrológica fundamental observada in situ. A partir dessa medição, outras variáveis, como a vazão, são estimadas de maneira indireta, geralmente por meio de curvas-chave previamente ajustadas (ANA, 2023b).

É importante destacar que as estações fluviométricas não realizam medições diretas e contínuas de variáveis geométricas e espaciais do canal fluvial. Características como largura do rio, área inundada, declividade da superfície líquida e geometria da seção transversal não são observadas diretamente pelas estações pontuais. Essas informações dependem de campanhas de campo esporádicas, levantamentos topobatimétricos ou produtos derivados de técnicas de sensoriamento remoto, não fazendo parte da rotina operacional da maioria das estações da RHN (ANA, 2016).

A vazão, por sua vez, é tradicionalmente estimada a partir da relação empírica entre a cota observada continuamente e medições diretas de descarga realizadas em campanhas de campo sob diferentes condições hidrológicas. Essa relação, conhecida como curva-chave (Figura 1), permite transformar a série temporal de níveis em uma série estimada de vazões. Contudo, trata-se de uma abordagem local, válida apenas para a seção de controle monitorada, e sensível a alterações morfológicas do leito, como assoreamento, erosão ou presença de vegetação, o que exige revisões periódicas para garantir a confiabilidade dos dados (Tucci, 2002; ANA, 2016).

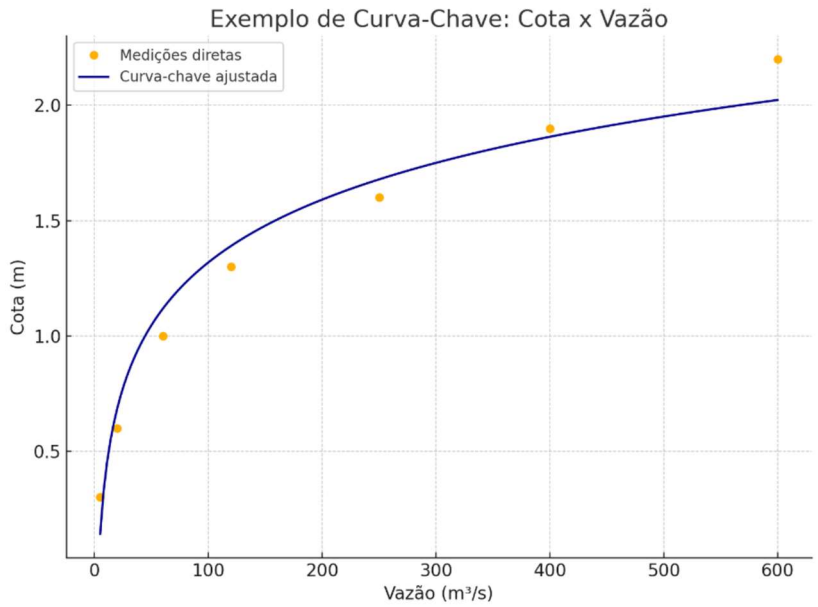


Figura 1 - Exemplo de curva-chave

Segundo dados da ANA, em 2020 a RHN contava com aproximadamente 23 mil estações sob responsabilidade de diferentes entidades. A ANA administrava diretamente 4.841 estações, sendo 2.717 pluviométricas, voltadas ao monitoramento das chuvas, e 2.024 fluviométricas, destinadas ao acompanhamento dos rios.

No conjunto das estações fluviométricas, 1.485 realizavam medições de vazão de água (descarga líquida), 1.542 monitoravam a qualidade da água e 463 registravam sedimentos em suspensão (descarga sólida). Essas estações desempenham um papel fundamental no fornecimento de séries históricas de dados hidrológicos, que sustentam estudos técnicos, planejamento de recursos hídricos e operação de reservatórios (ANA, 2023).

Vale destacar que, embora a rede nacional seja fundamental, ela possui limitações estruturais que afetam todo o conjunto de variáveis hidrológicas que descrevem a dinâmica de um sistema aquático. Entre essas limitações destacam-se:

- Segundo ANA (2023), há uma distribuição espacial desigual, com densidade elevada no Sudeste e Sul, mas baixa representatividade em regiões remotas como Amazônia, Pantanal e áreas interioranas do Nordeste (Figura 9);

- Ausência de medições diretas de variáveis geométricas, como largura e área inundada, que são críticas para estimativas mais precisas de volume e armazenamento (Tucci, 2002);
- Dependência de dados de cota para estimar vazão, restringindo outros aspectos do comportamento hidrológico;
- Descontinuidades nas séries históricas, provenientes de falhas de operação, manutenção ou eventos extremos que danificam equipamentos (ANA, 2016).

Assim, ferramentas de integração e complementação sistemática entre medições in situ e dados de sensoriamento remoto podem contribuir consideravelmente para o aprimoramento da rede e garantir o aumento da confiabilidade, distribuição espacial uniforme e frequência na disponibilização de dados (Biancamaria *et al.,* 2016).

3.2. SWOT (*SURFACE WATER AND OCEAN TOPOGRAPHY*)

3.2.1. Missão

O lançamento do satélite SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) efetuado pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos (NASA) em 16 de dezembro de 2022 a partir da Base da Força Espacial de Vandenberg, na Califórnia, visa fornecer dados e informações sobre os oceanos do mundo e suas águas superficiais terrestres, como lagos, rios e zonas úmidas (NASA, 2025). A missão SWOT foi desenvolvida em conjunto com o Centro Nacional de Estudos Espaciais da França (CNES), com contribuições da Agência Espacial Canadense (CSA) e da Agência Espacial do Reino Unido (UKSA), sendo a primeira observação de radar construído para a análise de águas (JPL, 2024).

Os dados obtidos pela missão SWOT, disponibilizados para os usuários a partir de 2024, desempenham um papel crucial na melhoria da compreensão dos processos hidrológicos, tanto em águas continentais como rios, lagos e reservatórios, assim como para observações oceânicas (JPL, 2024). Ao fornecer medições detalhadas e de alta precisão da altura da superfície da água, a missão permite uma melhor estimativa do armazenamento de água e das variações nos fluxos hídricos em grande escala (Biancamaria *et al.*, 2016).

Essas informações são essenciais para monitorar os ciclos hidrológicos, detectar mudanças temporais e espaciais nos corpos d'água e entender os impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos. Além disso, a precisão dos dados do SWOT apoia a gestão

sustentável dos recursos hídricos, fornecendo subsídios valiosos para a previsão e mitigação de eventos extremos, como secas e inundações, e ajudando no planejamento do uso da água para a agricultura, abastecimento urbano e conservação ambiental (Biancamaria *et al*., 2016).

Após o lançamento, o SWOT foi inserido em uma órbita de repetição de 1 dia, a uma altitude de 857 km e inclinação de 77,6° em relação ao plano equatorial. Nos primeiros três meses em órbita, ocorreu a fase de verificação e comissionamento, durante a qual a plataforma da espaçonave, os sistemas de solo e os instrumentos foram totalmente caracterizados e avaliados pelas equipes responsáveis. Ao término desta fase, todos os subsistemas foram verificados como plenamente operacionais e com desempenho satisfatório para o início da etapa de calibração (Peral *et al*., 2023).

A fase de calibração, também com duração aproximada de três meses, teve foco principal ajustar e validar os instrumentos do satélite, além de medir o desempenho deles em órbita. Paralelamente, essa fase também teve o objetivo de entender os processos de mesoescala e submesoescala no oceano, basicamente, estudar como se comportam as correntes e outras variações nessas escalas temporais e espaciais (JPL, 2024).

Em julho de 2023, o SWOT mudou para a chamada órbita científica (Figura 2), que tem repetição de aproximadamente 20,86 dias, com uma altitude de 890,58 km e mantendo a inclinação de 77,6° (Tabela 1). Nessa nova órbita, o satélite começou sua missão principal de três anos em 26 de julho de 2023, indo até o presente momento. Essa órbita foi escolhida especialmente porque não é heliossíncrona, ou seja, não segue a iluminação do Sol, o que ajuda a evitar distorções causadas pelas marés nos dados de topografia oceânica. Além disso, ela permite que o SWOT continue observando áreas polares importantes para a ciência (Peral et al., 2023).

A Figura 2 resume, cronologicamente, as fases realizadas para a missão SWOT e a Tabela 1 demonstra algumas características relevantes da missão SWOT.

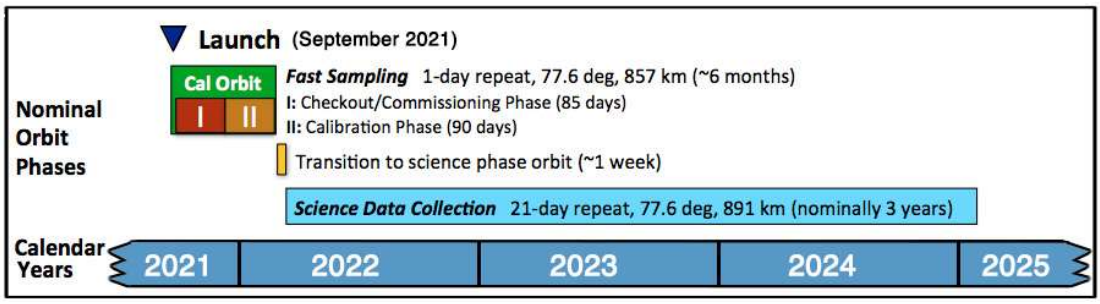


Figura 2 - Fases da missão SWOT (NASA, 2025)

Tabela 1 - Características da missão SWOT (modificado JPL, 2024)

Parâmetros	Valores
Altitude de referência (km)	890,582
Número de órbitas por ciclo (adimensional)	292
Duração exata do ciclo de repetição (dias)	20,86455

Pesquisas recentes reforçam a robustez da missão SWOT. O estudo de Pritam Das *et al.* (2025) avaliou mais de 100 reservatórios globais e demonstrou alta correlação (R^2 próximo a 1) e baixo erro médio quadrático (RMSE) em comparação com técnicas anteriores, evidenciando a confiabilidade do satélite para monitorar a dinâmica de armazenamento. De forma complementar, Zhao *et al.* (2025) validaram os produtos SWOT (L2_HR_RiverSP, L2_HR_LakeSP e L2_HR_PIXC) no rio Yangtzé, concluindo que o satélite já apresenta capacidade operacional concreta para monitorar corpos d'água continentais com boa precisão e ampla cobertura espacial. Além disso, Yao *et al.* (2025) destacam que o SWOT permite avaliar a dinâmica global das águas superficiais, integrando variáveis como largura, declividade e elevação em análises hidrológicas de escala continental. Por sua vez, Jiaqi *et al.* (2024) ressaltam que o SWOT inaugura uma nova geração de satélites voltados ao monitoramento de recursos hídricos, com aplicações que vão desde a previsão de eventos extremos até o suporte à gestão integrada.

3.2.2. Fundamentos do Radar de Abertura Sintética (SAR)

O processamento de imagens de radares de abertura sintética (SAR) constitui a base tecnológica para a obtenção de dados de topografia da superfície da água na missão SWOT. Para compreender como o satélite SWOT é capaz de medir com alta precisão a elevação de corpos hídricos continentais e oceânicos, é necessário explorar os princípios físicos e operacionais que sustentam a tecnologia SAR e sua aplicação na interferometria radar, sendo o seu sistema exemplificado na Figura 3. As subseções a seguir detalham os fundamentos

essenciais do radar e como esses conceitos são aproveitados pela missão para produzir observações espaciais hidrologicamente relevantes.

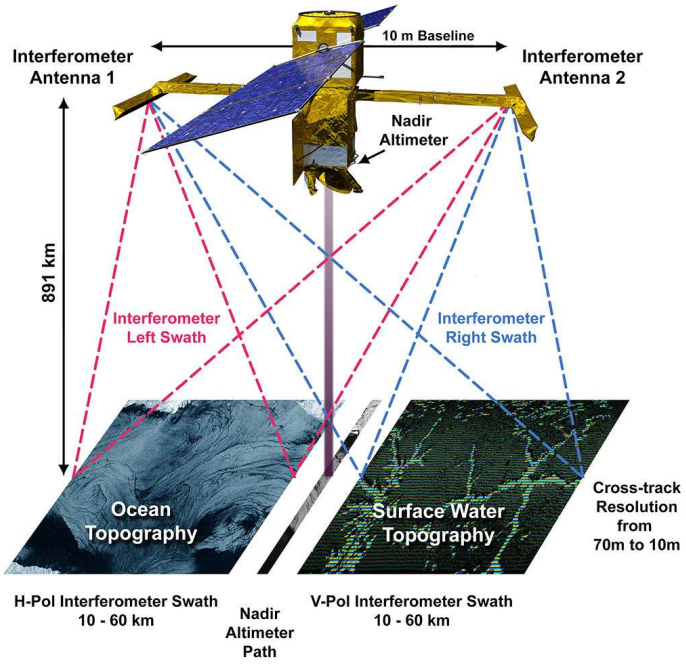


Figura 3 - Visão geral dos sistemas de medição do SWOT (JPL, 2024)

3.2.2.1. O conceito de interferometria

O estudo de como as ondas interferem, conhecido como "interferometria", é usado pelo SWOT para medir os níveis de água com alta precisão em todo o mundo. Esse fenômeno ocorre de duas formas principais, uma sendo a interferência construtiva, que acontece quando os picos de duas ondas se encontram, gerando uma onda de maior amplitude. A outra é pela interferência destrutiva, que se dá quando os picos de uma onda coincidem com os vales de outra, fazendo com que se anulem parcial ou totalmente (Woodford, 2023).

O interferômetro divide um feixe de luz (como um laser) em dois caminhos, que ao se recombinarem criam padrões de interferência (interferogramas). Esses padrões permitem medições precisas de distâncias (MIT, 2012). O SWOT adapta esse princípio usando radares de micro-ondas na banda Ka, capazes de penetrar nuvens e operar em diferentes condições climáticas. Ao medir o tempo que as ondas levam para retornar após refletirem na superfície da Terra, o satélite é capaz de calcular a distância com base no deslocamento de fase entre os sinais recebidos. Essa técnica permite medições de alta precisão da altura da superfície da água, como demonstrado nos experimentos simulados por Li *et al.* (2019), que avaliaram,

baseado em simulações, o desempenho da missão SWOT na representação das variações físicas da superfície oceânica.

3.2.2.2. Funcionamento do radar

De acordo com Van Zyl *et* Kim (2011), o radar, a base do funcionamento do SAR, é um sensor ativo que emite pulsos de micro-ondas e calcula a distância até um alvo ao medir o tempo de ida e volta do sinal. Este princípio é fundamental porque permite ao satélite SWOT determinar a posição vertical da superfície da água em relação à sua órbita. Portanto, a equação básica de alcance (*slant range*) é dada pela Equação 1:

$$R = \frac{ct}{2} \qquad \text{Equação 1}$$

em que:

R: distância entre o radar e o alvo (m);

c: velocidade da luz no vácuo (m/s);

t: tempo de propagação total do pulso (s).

A interpretação precisa desse tempo de retorno permite que o SWOT obtenha dados altimétricos com resolução espacial e temporal adequadas ao monitoramento hidrológico.

A resolução no domínio do alcance refere-se à capacidade do radar de distinguir dois alvos próximos na direção perpendicular à linha de voo do satélite. Essa distinção é determinada pela duração do pulso de radar τ, conforme Equação 2.

$$\Delta x_r = \frac{c\tau}{2} \qquad \text{Equação 2}$$

Ao projetar essa medida sobre a superfície da Terra, leva-se em conta o ângulo de incidência θ, vista na Equação 3.

$$\Delta x_g = \frac{c\tau}{2sin\theta}$$ Equação 3

Segundo Van Zyl et Kim (2011), para que o SWOT alcance alta resolução mesmo em grandes altitudes, ele emprega pulsos modulados por frequência (chirp), permitindo compressão do sinal no receptor sem perda de energia. Isso garante detalhamento suficiente para detectar variações em corpos d'água de pequena escala, como rios estreitos ou reservatórios locais.

3.2.2.3. Resolução em azimute

A resolução na direção do voo (azimute) é obtida pelo princípio da abertura sintética, no qual o radar coleta ecos de retorno de um mesmo ponto ao longo de seu deslocamento. Isso permite simular uma antena muito maior que a física, aumentando drasticamente a resolução lateral da imagem. Esse princípio é essencial para gerar produtos que descrevem com clareza as margens e a geometria dos corpos hídricos. A resolução azimutal é dada pela Equação 4.

$$\Delta x_a = \frac{L}{2}$$ Equação 4

Em que *L* é o comprimento da antena. No caso da SWOT, a antena KaRIn possui 10 m de extensão, alcançando resolução em azimute até 5 m (Van zyl et Kim, 2011).

3.2.2.4. Interferometria de radar na banda Ka

O diferencial do SWOT é o uso da técnica interferométrica SAR em banda Ka. Duas antenas separadas lateralmente recebem os sinais refletidos da superfície da Terra. A diferença de fase entre esses sinais, captada com extrema precisão, permite calcular a elevação da superfície com base em geometrias triangulares. Este método é capaz de detectar variações na altura da água da ordem de centímetros ou menos (Biancamaria et al., 2016). Sendo imprescindível para a altimetria de superfícies hídricas continentais (Van zyl et Kim, 2011). A Equação 5 descreve essa diferença de fase.

$$\phi(s) = -\frac{4\pi}{\lambda} R(s) \qquad \text{Equação 5}$$

em que:

$\phi(s)$: ângulo de fase do sinal em função do tempo de observação s (radianos);

λ: comprimento de onda na banda Ka (cm);

R(s): distância entre o radar e o alvo (m).

Embora os princípios fundamentais do radar de abertura sintética se apliquem à missão SWOT, é importante destacar que o instrumento KaRIn não opera como um SAR convencional de imageamento lateral. Em vez disso, o SWOT utiliza uma configuração interferométrica de larga faixa (*wide-swath altimetry*), composta por duas antenas separadas por um baseline de 10 m, que observam a superfície quase no nadir. Essa geometria permite reconstruir a elevação da superfície da água com precisão centimétrica ao longo de um swath de aproximadamente 120 km, algo inédito em missões altimétricas (JPL, 2024).

Diferentemente de missões SAR clássicas, cujo objetivo principal é formar imagens de retroespalhamento, o KaRIn foi projetado especificamente para derivar variáveis hidrológicas como a elevação da superfície líquida (WSE), a largura do canal, a área inundada e a declividade da superfície da água. Essas estimativas dependem não apenas da precisão interferométrica, mas também da acurácia orbital, da calibração geométrica e da qualidade do mascaramento de água no produto PIXC. Em superfícies muito lisas ou muito rugosas, efeitos como ruído speckle, vento e rugosidade superficial podem alterar o padrão de coerência do sinal, exigindo técnicas de multi-looking e medidas de filtragem espacial para reduzir incertezas (Lappicy *et al*, 2025).

Por fim, os fundamentos apresentados sustentam as escolhas de engenharia da missão SWOT, como a configuração interferométrica com duas antenas e a operação na banda Ka, que oferece alta resolução espacial e sensibilidade a pequenas variações de altura. Essas características são fundamentais para a geração de produtos altimétricos de alta precisão, voltados à previsão de eventos extremos, ao monitoramento dinâmico de reservatórios e à modelagem hidrológica de bacias (Moghaddam *et al*., 2024).

Tabela 2 - Características do radar interferométrico (modificado JPL, 2024)

Parâmetros	Valores
Duração do pulso do radar (μs)	4.5
Resolução em azimute (m)	5
Largura da banda (MHz)	200
Faixa de alcance terrestre (km)	10 a 60

3.2.3. Banco de dados e produtos fornecidos pelo SWOT

3.2.3.1. Produtos SWOT

O SWOT fornece uma ampla gama de produtos científicos derivados de suas medições por radar interferométrico. De acordo com o Manual do Usuário do SWOT (JPL, 2024), esses produtos são organizados conforme o nível de processamento (nível 1 – L1 e nível 2 – L2), a taxa de amostragem (Low Rate – LR, voltada à oceanografia, e High Rate – HR, voltada à águas continentais) e sua finalidade temática.

Os produtos orbitais e de altitude, como o *Precise Orbit Ephemeris* (POE) e o *Medium-accuracy Orbit Ephemeris* (MOE), fornecem as efemérides orbitais com diferentes graus de precisão e latência. Outros produtos dessa categoria incluem o SAT_COM, que apresenta a posição do centro de massa da espaçonave, e o ATTD_RECONST, que reconstrói sua atitude a partir de sensores a bordo. Complementarmente, os produtos L1_DORIS_RINEX e L1_GPSP_RINEX oferecem os dados brutos de rastreamento dos sistemas DORIS e GPS, respectivamente (JPL, 2024).

Aplicados à oceanografia, os principais produtos são o L2_LR_SSH, que fornece informações sobre a topografia da superfície oceânica, medindo a altura da superfície do mar (*Sea Surface Height* – SSH) e suas anomalias, e os produtos derivados do altímetro de nadir (L2_NALT_OGDR, IGDR, GDR), que registram a altura da superfície do mar e de corpos d'água ao longo da linha do nadir do satélite. Complementam esse conjunto os produtos radiométricos L2_RAD_OGDR, IGDR e GDR, que disponibilizam informações sobre o vapor d'água, o conteúdo líquido de nuvens, o vento e correções atmosféricas aplicáveis às medições altimétricas (JPL, 2024).

Já os produtos voltados a águas continentais, derivados do instrumento KaRIn em alta taxa de amostragem, incluem a nuvem de pixels (L2_HR_PIXC) com valores de elevação da

superfície da água, as máscaras de água (L2_HR_MASK), e os produtos vetoriais L2_HR_RiverSP e L2_HR_LakeSP, que descrevem rios e lagos com base em bancos de dados hidrológicos previamente estabelecidos, como o SWORD, por exemplo. Este banco de dados servirá de dados de entrada neste estudo.

Além disso, o SWOT disponibiliza produtos em formato matricial (L2_HR_Raster), ideais para visualizações contínuas da altura da água e da área inundada, e o ainda não disponível modelo digital de elevação das planícies de inundação (L2_HR_FPDEM). Também há produtos derivados por ciclo orbital, como o L2_HR_RiverAvg e o L2_HR_LakeAvg, que agregam informações ao longo de várias passagens do satélite (JPL,2024).

A distribuição dos produtos ocorre principalmente por meio do portal da NASA PO.DAAC (*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*) e da plataforma francesa CNES AVISO/Hydroweb.next, com latências variáveis conforme o tipo e a finalidade do produto. Produtos com menor latência, como o OGDR, estão disponíveis em menos de sete horas, enquanto os produtos de maior fidelidade (GDR) são disponibilizados em até 90 dias após a coleta. Todos seguem uma convenção padronizada de nomenclatura, que inclui o nome do produto, identificadores de arquivo, tempo de início e fim da aquisição, além do código de processamento (NASA, 2025).

3.2.3.2. SWORD (*SWOT River Database*)

O SWORD (*SWOT River Database*) é uma base de dados essencial para os produtos vetoriais da missão SWOT, sendo responsável por estruturar e padronizar as informações de rios observáveis via satélite. Segundo Altenau *et al.* (2021), essa estrutura é fundamental para que os dados do SWOT possam ser organizados em unidades coerentes chamadas de "*reach*" (trecho de rio) com aproximadamente 10 km de extensão (Figura 4), e "*node*" (nós) com espaçamento de aproximadamente 200 metros, garantindo compatibilidade com os requisitos científicos e operacionais da missão.

Para a construção do SWORD, foram integradas diversas bases de dados hidrológicas e de sensoriamento remoto, como:

i) *Global River Widths from Landsat* (GRWL), que fornece os eixos fluviais e medidas de largura;
ii) MERIT Hydro, que oferece dados de elevação e acumulação de fluxo; e

iii) HydroBASINS, que organiza a hierarquia das bacias hidrográficas usando o sistema de codificação Pfafstetter.

A combinação dessas fontes permitiu a criação de um banco de dados topologicamente consistente, com 213.485 trechos de rio e 10,7 milhões de nós ao redor do mundo, desenhados para otimizar a cobertura espacial dos sensores SWOT e já prontos para análises hidrológicas globais, mesmo antes do lançamento do satélite. Com isso, o SWORD não apenas apoia os produtos da missão SWOT, mas também serve como estrutura de referência para integração com outros sensores e modelos hidrológicos em larga escala (Altenau *et al.,* 2021).

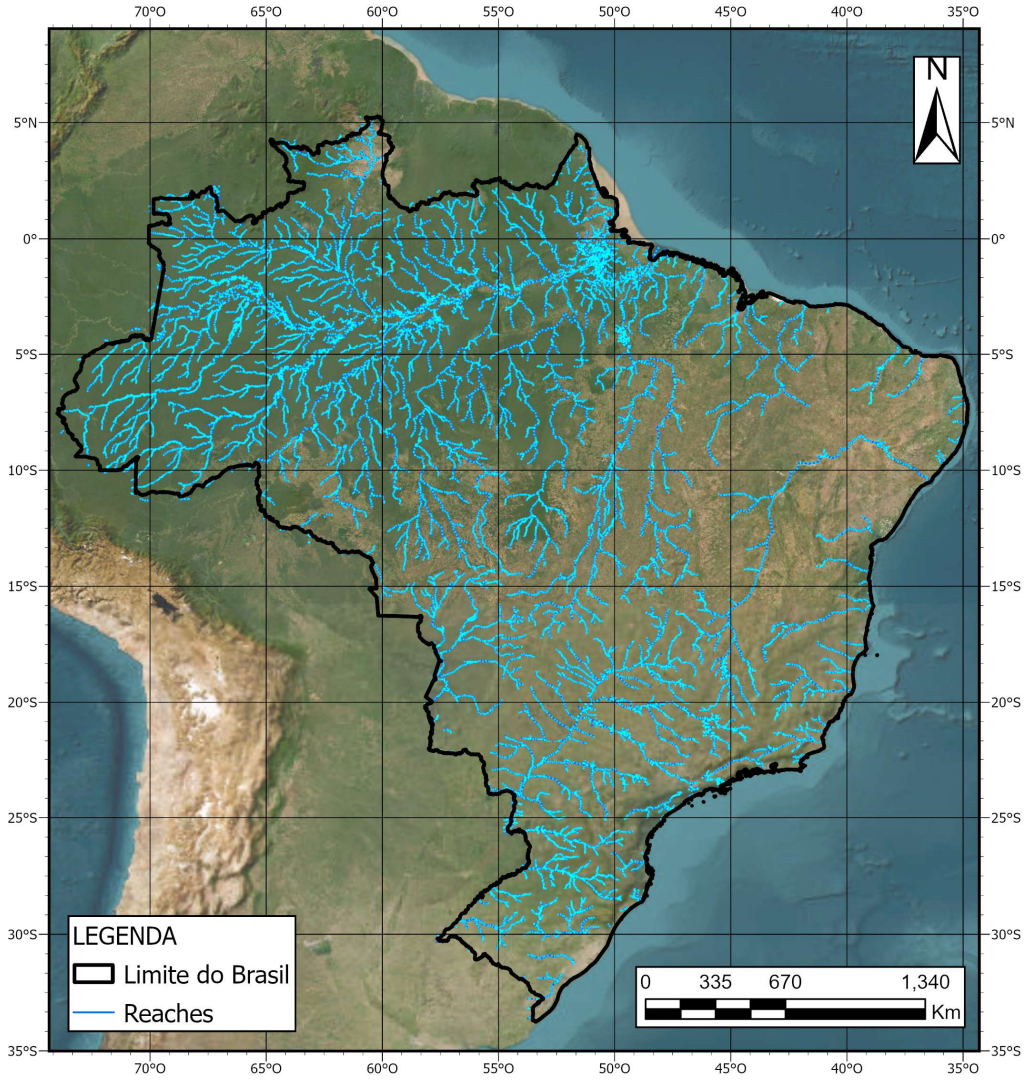


Figura 4 – Distribuição dos *reaches* do produto RiverSP do SWOT derivados do SWORD no Brasil

4. METODOLOGIA

O processo metodológico para associar aos dados hidrológicos como WSE, declividade da superfície líquida; largura do canal; área da superfície da água e estimativas de vazão do SWOT às estações fluviométricas da ANA segue uma abordagem estruturada e iterativa, compostas pelas etapas elencadas na Figura 5.

Em resumo, a primeira fase correspondeu à coleta e ao pré-processamento dos dados brutos, que incluem os vetores das estações fluviométricas da ANA e o *nodes* do SWOT. Em seguida, realiza-se a definição e estimativa dos parâmetros necessários para a associação dos dados das estações com os dados do SWOT, tais como a distância euclidiana e a área de drenagem. Com esses parâmetros estimados, é realizada a etapa de análise e verificação que permite estruturar uma correspondência semiautomática por análise multicritério. Por fim, é avaliada se a correspondência é considerada adequada e se os dados do SWOT podem ser incorporados à base da ANA. Caso contrário, são identificados os fatores limitantes e, se solucionado essa limitação, o dado pode retornar à etapa de estimativa para devidos ajustes.

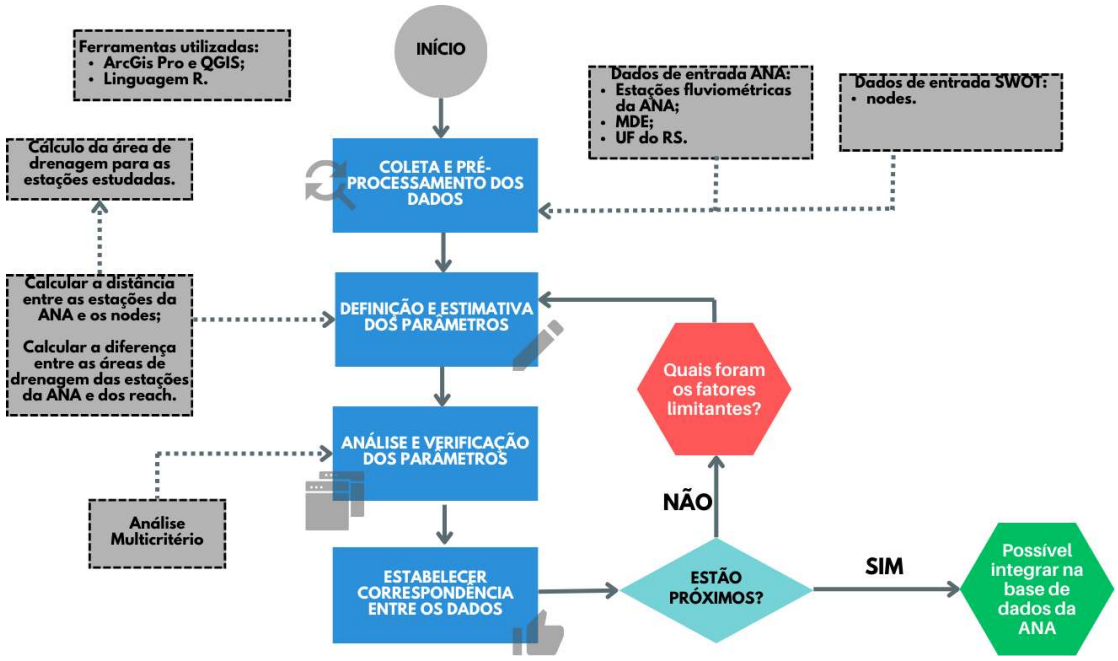


Figura 5 - Fluxograma da metodologia empregada

4.1. COLETA E PRÉ PROCESSAMENTO DOS DADOS

A etapa inicial é fundamental para assegurar a qualidade e a confiabilidade dos dados empregados na análise. Esse cuidado prévio é indispensável para mitigar inconsistências e

limitações metodológicas que possam comprometer os resultados ao longo do estudo. Assim, a coleta dos dados foi realizada exclusivamente por meio das plataformas oficiais da ANA e do satélite SWOT, garantindo que os metadados associados sejam rastreáveis e compatíveis com os objetivos propostos. Isso implica, no mínimo, a identificação clara da origem, da localização geográfica e da resolução espacial dos dados, de modo a viabilizar sua integração e tratamento adequado no escopo metodológico deste trabalho.

4.1.1. Dados de entrada

4.1.1.1. Estações fluviométricas da ANA

Do total de aproximadamente 23 mil estações, existem 16.370 que estão distribuídas por todo o território brasileiro, conforme ilustrado na Figura 6, abrangendo tanto as que se encontram atualmente em operação quanto aquelas que já foram desativadas. Essas estações fora de operação também são importantes, uma vez que séries históricas anteriores ao início do satélite SWOT podem contribuir para a calibração e validação da associação, bem como para a regionalização de parâmetros em áreas sem medições diretas.

A distribuição espacial das estações fluviométricas ajudou a compreender a abrangência e a representatividade das estações no Brasil, além de evidenciar uma futura possibilidade de expansão da metodologia proposta em escala nacional.

Nota-se uma predominância de pontos de monitoramento nas regiões Sudeste e Sul, especialmente ao longo do litoral e em áreas de maior densidade populacional. Isso reflete como, historicamente, foi priorizado o monitoramento de bacias próximas a grandes centros urbanos e zonas de desenvolvimento econômico.

Por outro lado, a região Amazônica, embora contemple uma extensa rede de rios mapeada pelo SWOT, apresenta cobertura significativamente inferior em termos de estações fluviométricas. Essa disparidade evidencia os desafios de implementar e manter infraestrutura de medição em campo em áreas remotas e de difícil acesso, reforçando a importância do monitoramento remoto por satélite como complemento às medições convencionais.

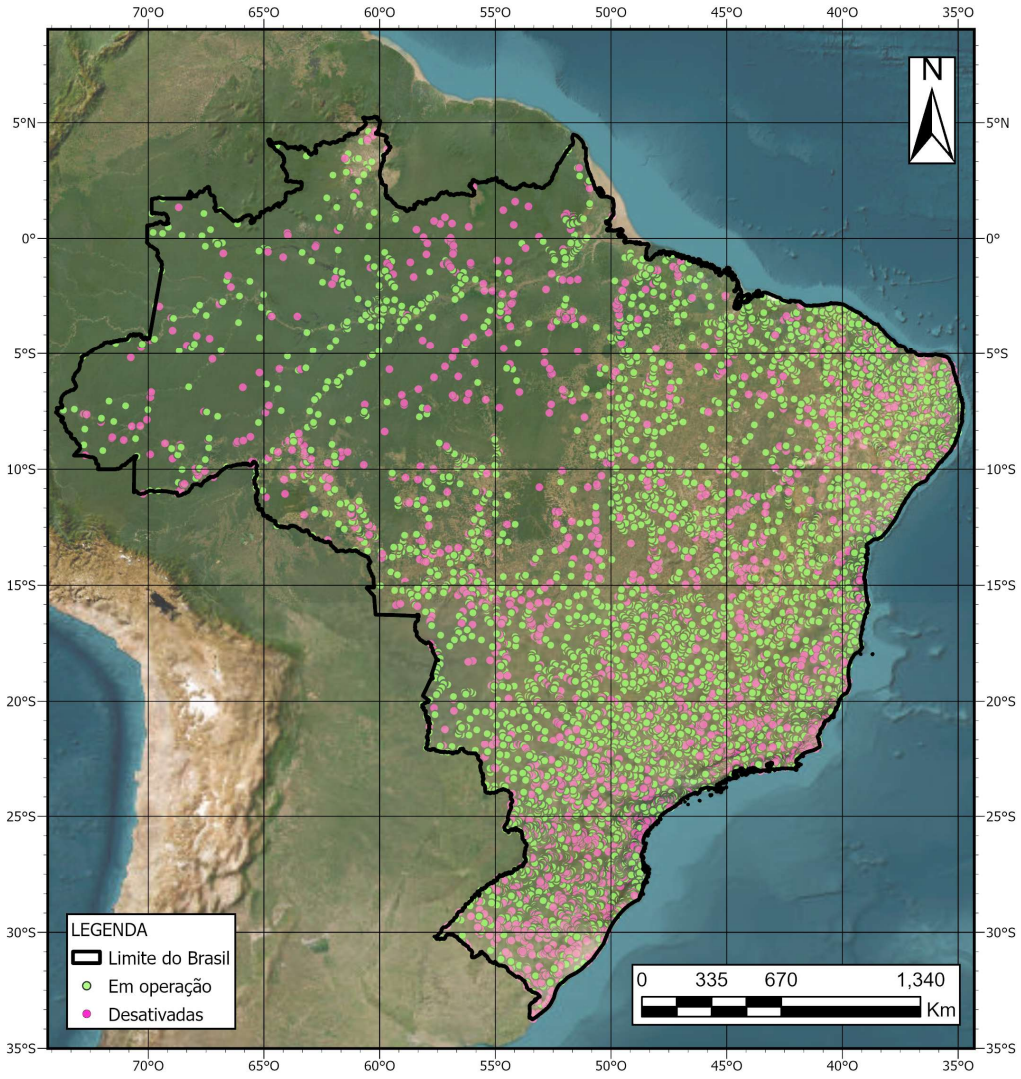


Figura 6 - Distribuição das estações fluviométricas da ANA

Os dados da ANA são de acesso público e estão disponíveis online no endereço: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156. No entanto, as informações referentes às 23 estações fluviométricas do RS com referencial altimétrico definido foram obtidas internamente em razão do TED.

4.1.1.2. ANADEM

Foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado pela ANA, o ANADEM – Modelo Digital de Elevação da ANA. O ANADEM foi desenvolvido por meio de uma colaboração entre a ANA e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do

Rio Grande do Sul – IPH com o objetivo de resolver limitações em regiões tropicais e de alta biodiversidade, onde a vegetação interfere na medição da elevação (Laipelt *et al*., 2024).

O ANADEM fornece resolução espacial de 30 metros e cobre toda América do Sul, sendo adequado para a delimitação automatizada de bacias hidrográficas e suas áreas contribuintes, sendo especialmente vantajoso para aplicações em grandes áreas geográficas (ANA, 2025). O MDE utilizado no âmbito deste estudo se encontra disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/06eb254d-e45a-4c2b-9226-8e30d6afaa0d.

4.1.1.3. Conceituação dos Nodes no Produto SWORD

O produto SWOT_L2_HR_RiverSP_D, também chamado de RiverSP (versão D), é um dos principais conjuntos de dados vetoriais derivados das observações do radar interferométrico KaRIn a bordo do satélite SWOT. Esse produto fornece estimativas hidrológicas em alta resolução espacial para rios ao redor do mundo, estruturadas a partir de uma rede fluvial pré-definida pelo SWORD, o qual codifica a geometria e a topologia dos cursos d'água em bacias hidrográficas globais.

Os dados são disponibilizados em formato *shapefile* compatível com Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o que favorece a integração com as estações fluviométricas da ANA. O SWORD inclui duas camadas principais: uma para os *reaches*, representados como polilinhas com cerca de 10 km de extensão, conforme Figura 7, e outra para *nodes*, representados como pontos espaçados a cada 200 metros, de acordo com a Figura 8. Ambas as camadas são centralizadas entre as bordas do rio.

É importante lembrar que os rios nesses produtos do SWOT são apenas aqueles existentes na base de dados utilizada *a priori* (SWORD). Dessa forma, o produto RiverSP está dividido em duas subcoleções, a SWOT_L2_HR_RiverSP_node_D e SWOT_L2_HR_RiverSP_reach_D, que detalham, respectivamente, os atributos em nível de nó e de trecho.



Figura 7 - Representação de um "*reach*" de rio pelo SWORD.



Figura 8 - Representação de um "*node*" de rio pelo SWORD.

Para cada trecho (*reach*), são fornecidos parâmetros hidrológicos como elevação da superfície da água (WSE), com valor altimétrico referenciado ao modelo EGM2008; declividade da superfície líquida; largura do canal (ou área da superfície da água); e estimativas de vazão (ainda não disponibilizadas). Para cada nó, são atribuídos os mesmos parâmetros hidrológicos, além de identificadores que indicam a qual trecho aquele nó pertence e sua posição ao longo do curso do rio. Também são fornecidas medidas de incerteza e indicadores de qualidade (por bandeiras), que auxiliam na avaliação da confiabilidade das observações (JPL, 2022).

De acordo com o Manual do Usuário do SWOT (2022), essas medições são computadas com o uso de um algoritmo que determina quais pixels do produto L2_HR_PIXC devem ser atribuídos a cada trecho do SWORD e, em seguida, agrega as medições de pixels conforme

necessário. Essas medições são atribuídas a feições hidrológicas com o auxílio do produto auxiliar PIXCVec. Embora o satélite SWOT tenha capacidade de observar corpos d'água em escala global, ele só consegue gerar o produto RiverSP para os rios que estão previamente definidos no banco de dados SWORD. Esse banco delimita, levando em consideração características como confluências e represas, quais rios são largos o suficiente para serem considerados no processamento, bem como sua extensão.

Neste estudo, optou-se por utilizar exclusivamente os nodes como dados de entrada, devido à sua maior densidade espacial e à relação direta com as estações fluviométricas, o que permite uma análise mais precisa da correspondência entre os dados orbitais e os registros da ANA. Essa escolha também favorece o cálculo da distância euclidiana entre os pontos e a estimativa da área de drenagem com maior resolução.

4.2. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS

Foram estabelecidos como parâmetros para a associação dos dados do SWOT às estações da ANA, a distância euclidiana mínima entre uma estação da ANA e um *node* do SWORD, bem como a diferença mínima da área de drenagem associada a ambos (estação e *node*).

4.2.1. Distância euclidiana mínima

Para determinar a distância mínima entre as estações e os *nodes* do SWORD, foi utilizada a ferramenta de geoprocessamento denominada “Distância para o ponto central mais próximo (linha para ponto central)”, disponível no QGIS. Esse algoritmo realiza o cálculo da distância planimétrica (Equação 6) entre cada elemento da camada de origem e o elemento mais próximo da camada de destino, considerando como referência os respectivos centroides dos elementos. Como as feições utilizadas são pontuais, o próprio ponto é tomado como centro.

$$d(A,B) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \qquad \text{Equação 6}$$

Então, o processamento no QGIS gera uma nova camada vetorial composta de linhas que permite visualizar e medir qual é o destino mais próximo de cada origem. Contudo, para garantir a precisão dos resultados, é necessário que ambas as camadas estejam projetadas no mesmo sistema geodésico de referência e sistema de projeção. No caso desta pesquisa, foram

adotados os sistemas de referência SIRGAS 2000, nas zonas UTM 21S e 22S que correspondem às faixas de projeção cartográfica que abrangem o estado do RS.

A medida utilizada corresponde apenas à distância planimétrica entre os pontos, não considerando as características hidrológicas da bacia. Por esse motivo, foi realizada uma avaliação complementar baseada na área de drenagem, de modo a incorporar aspectos mais representativos da compatibilidade entre as estações.

4.2.2. Área de drenagem

4.2.2.1. Cálculo da área de drenagem

As áreas de drenagem são um espaço delimitado por divisores topográficos, que toda a água precipitada tende a escoar para um único sistema hídrico. Essas regiões reúnem processos de infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração e armazenamento hídrico que determinam o comportamento do ciclo hidrológico e influenciam a disponibilidade hídrica (Tucci, 2002).

Vale destacar que a área de drenagem associada às estações fluviométricas da ANA não é uma variável medida diretamente, mas um atributo derivado por meio de técnicas de geoprocessamento. Essa área é obtida a partir da Base Hidrográfica Ottocodificada do Brasil, a qual é construída com base em modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes, utilizados para a delimitação automática de bacias hidrográficas e áreas de contribuição a montante de um ponto de exutório. Assim, o valor da área de drenagem depende da resolução do modelo topográfico, da base hidrográfica utilizada e da posição do ponto de controle, podendo variar conforme a metodologia adotada (ANA, 2015).

Entre essas 16.370 estações no território brasileiro da ANA, 4.005 estações não possuem a área de drenagem como informação registrada. Essa lacuna pode ser percebida na Figura 9. As regiões Norte e Nordeste apresentam um número expressivo de estações fluviométricas sem estimativa de área de drenagem, o que faz sentido pela baixa densidade de pontos monitorados na região norte. Especialmente entre os estados do Pará e Tocantins é notável a baixa densidade de estações com medidas de área de drenagem. Já nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, o cenário é mais equilibrado, com proporções semelhantes entre estações com e sem essa informação. Em contrapartida, a região Sul se destaca por contar com poucas estações que não possuem estimativa de área de drenagem, evidenciando maior completude

nos dados disponíveis. Isso se deve ao longo histórico de pesquisa e contribuição em hidrologia dessa região.

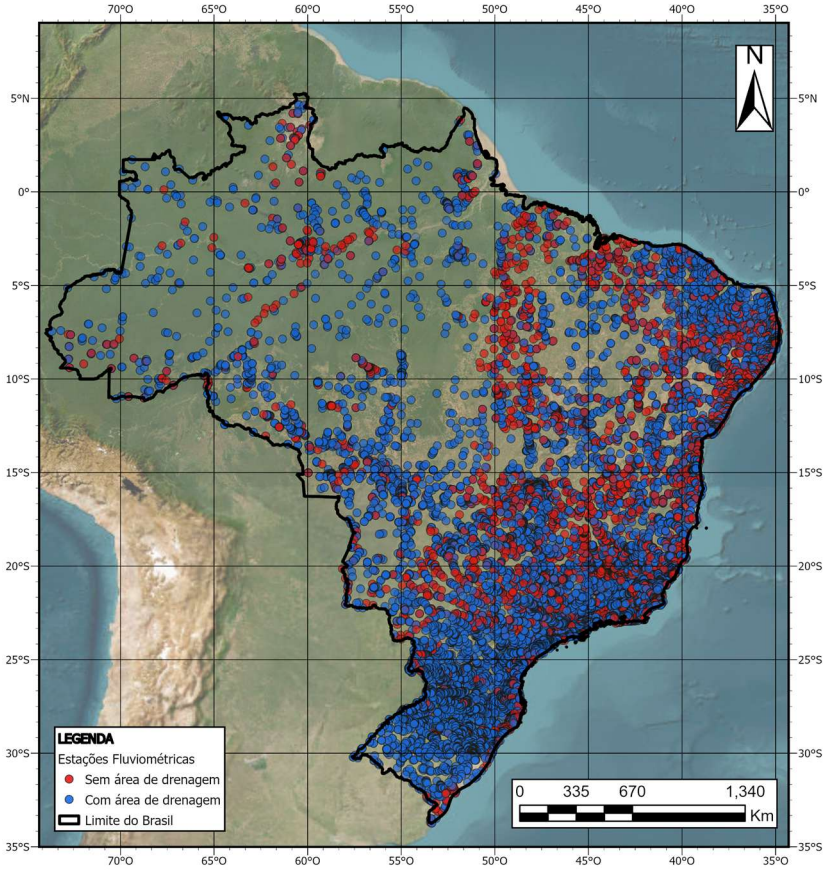


Figura 9 - Estações fluviométricas com e sem área de drenagem no Brasil

Tendo em vista a necessidade de estabelecer uma associação confiável entre os dados da ANA e os dados do SWOT, seria necessário calcular a área de drenagem para todas as 4.005 estações em escopo nacional. No entanto, isso demandaria elevado tempo de processamento e maior disponibilidade de recursos computacionais, especialmente em termos de memória e capacidade de processamento.

Por isso optou-se por realizar esse procedimento apenas para algumas estações localizadas no Rio Grande do Sul (RS), conforme detalhado no item 4.4. Isso permitiu um teste metodológico para verificar se o cálculo das áreas de drenagem é viável e utilizar o local como estudo de caso.

A determinação das bacias de drenagem foi realizada de forma automatizada utilizando o software R (versão 4.5.1), com apoio dos pacotes *terra, sf* e *whitebox*. Para tal, é necessário

ter, como dado de entrada, o MDE em formato raster (.tif) e as estações em formato GeoPackage (.gpkg) ou shapefile (shp).

O MDE foi carregado em seu sistema de referência espacial nativo SAD 1969 / South America Albers Equal Area Conic (ESRI:102033) e o ponto do exutório foi lido a partir do arquivo vetorial e transformado para o sistema geográfico SIRGAS 2000 (EPSG:4326) para determinação da longitude e latitude centrais. A partir dessas coordenadas, foi possível calcular a zona UTM correspondente ao exutório, seguindo a variação delas. O ponto de exutório foi definido a partir da localização das estações fluviométricas da ANA, sendo posteriormente ajustado para coincidir com o curso principal do rio, de modo a representar corretamente o escoamento. A partir dessas coordenadas, calculou-se a zona UTM correspondente e, em seguida, o MDE e o ponto de exutório foram reprojetados para essa zona utilizando interpolação bilinear, assegurando coerência espacial entre os dados e permitindo o cálculo da área em metros quadrados. Esse procedimento é fundamental porque a distância euclidiana, por si só, não reflete a conectividade hidrológica; ao considerar a área de drenagem associada a cada estação, é possível avaliar de forma mais precisa a contribuição real das bacias e a compatibilidade entre elas.

A partir do MDE condicionado, foram gerados os modelos raster de direção de fluxo (*D8 Pointer*) e acumulação de fluxo (*Flow Accumulation*), representando respectivamente o sentido do escoamento e o número de células contribuindo para cada pixel da grade.

Com base no raster de acumulação de fluxo, foi executado um procedimento de *snap* para ajustar o ponto exutório à célula de drenagem mais representativa nas proximidades. O algoritmo avaliou um raio inicial de 1000 m, e priorizou pixels com valores de contribuição superiores a 99% do máximo local. Caso nenhum candidato adequado fosse identificado, foi aplicado um limiar alternativo com base no quantil 0,99 da distribuição de acumulação de fluxo. O ponto ajustado foi então salvo em formato *shapefile*.

Utilizando o algoritmo *Watershed* do *whitebox*, foi delineada a bacia de contribuição a partir da direção de fluxo e do ponto exutório ajustado. O resultado raster foi posteriormente vetorizado e dissolvido, resultando em um polígono único representando a área de drenagem.

A área da bacia foi calculada a partir do polígono vetorial em metros quadrados e convertida para quilômetros quadrados. Os valores obtidos foram registrados em uma tabela contendo

o código da estação, a área total (km²) e a distância de ajuste do ponto da estação inicial ao centro do canal (m).

Todo esse procedimento, com suas etapas principais e interações entre os dados, está sintetizado de forma mais clara e visual na Figura 10, permitindo uma compreensão mais intuitiva do fluxo metodológico adotado nessa etapa.

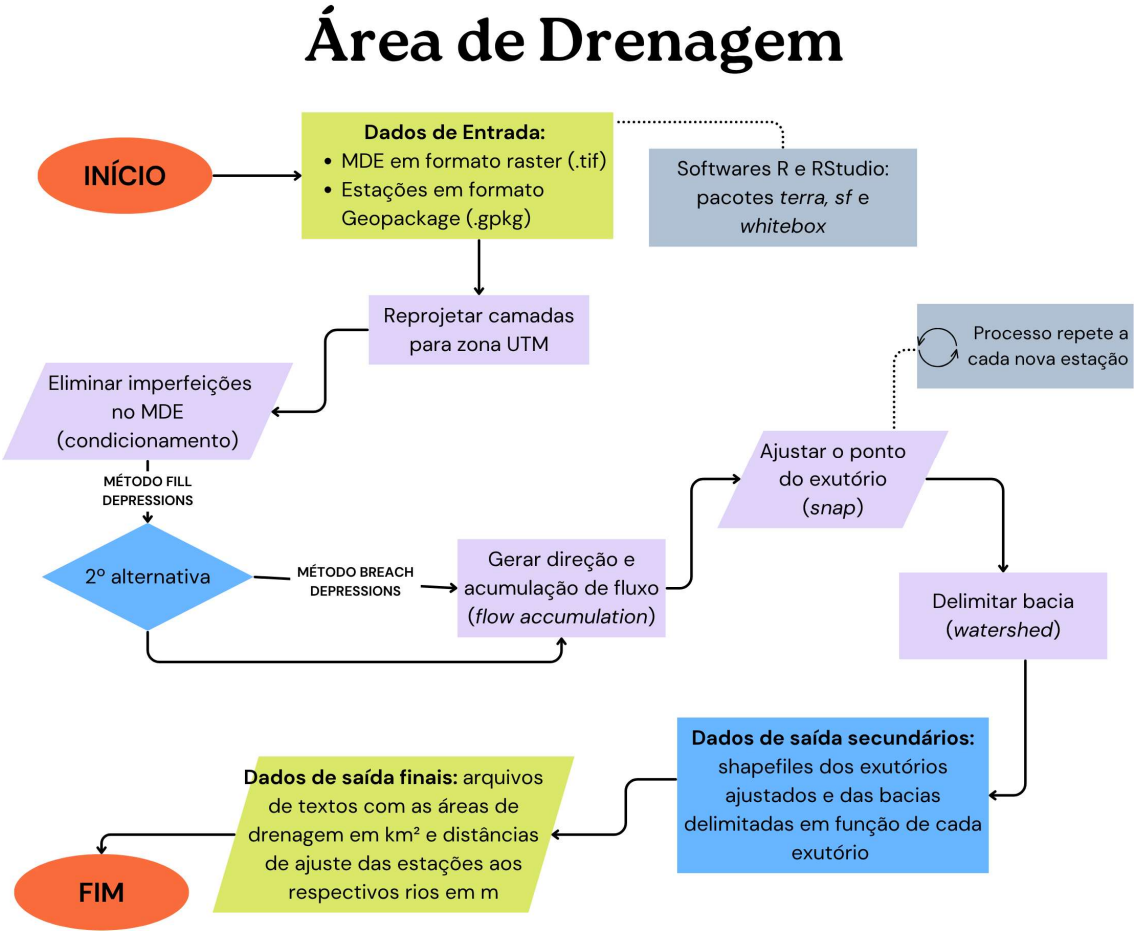


Figura 10 - Procedimento do cálculo de área de drenagem das estações

4.2.2.2. Diferença entre as áreas de drenagem

Para avaliar a diferença de área de drenagem, foi utilizada a razão entre os valores calculados para aa ANA e dos medidos pelo SWOT (ANA/SWOT). Nesse procedimento, a ANA é considerada como referência oficial, por se tratar da base nacional consolidada, enquanto os dados provenientes do SWOT encontram-se em processo de validação. A razão calculada corresponde à relação entre a área de drenagem calculada para a estação da ANA e aquela derivada do nó do SWOT. Quando essa razão se aproxima de 1, significa que o nó do SWOT

apresenta elevada compatibilidade com a estação da ANA, reforçando sua confiabilidade e evidenciando o potencial de uso complementar das informações derivadas do satélite.

Para facilitar a interpretação, optou-se pela utilização da diferença percentual, isso significa que uma diferença percentual negativa indica que os valores da ANA são menores do que os do SWOT, enquanto uma diferença percentual positiva indica que os valores da ANA são maiores do que os do SWOT.

4.3. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS (MULTICRITÉRIO)

Para a análise multicritério foi adotado o Processo de Análise Hierárquica (AHP), desenvolvido por Thomas Saaty em 1980 e posteriormente detalhado em obras mais recentes. A redação metodológica apresentada a seguir segue os procedimentos descritos por Saaty & Vargas (2012), referência consolidada na aplicação do método. Esse processo é amplamente utilizado em problemas de decisão complexos, pois permite estruturar o problema em diferentes níveis hierárquicos e realizar comparações entre eles por meio de julgamentos de pares.

O AHP utiliza escalas numéricas para quantificar preferências e aplica cálculos matemáticos para obter pesos relativos, ajudando na escolha mais racional. Sua importância está na capacidade de combinar fatores qualitativos e quantitativos, garantindo decisões mais objetivas e fundamentadas.

A aplicação do AHP consiste em dividir o problema de decisão em algumas etapas. A primeira etapa refere-se à construção da estrutura hierárquica que é feita pela divisão de uma decisão em pelo menos três níveis hierárquicos, sendo estes divididos em objetivo, critérios e alternativas. A partir dessa estrutura consegue-se visualizar o problema de forma organizada e compará-los entre si, garantindo uma decisão mais racional e justificada.

A segunda etapa requer a comparação entre os elementos da hierarquia por meio de uma matriz de comparação binária, ou seja, a comparação é feita a pares. Saaty (1980) definiu uma Escala Fundamental de valores baseada nos fatores detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 - Escala Fundamental de Saaty. Fonte: Adaptado de Saaty & Vargas (2012).

Escala	Valor	Recíproco	Interpretação
Igual importância	1	1	Os elementos contribuem igualmente para o objetivo.
Importância moderada	3	1/3	Um elemento é favorecido moderadamente em relação ao outro.
Mais importante	5	1/5	Um elemento é favorecido significativamente em relação ao outro.
Muito importante	7	1/7	Um elemento é fortemente favorecido em relação ao outro.
Importância extrema	9	1/9	A evidência favorece um elemento em relação ao outro.
Valores intermediários	2, 4, 6, 8	½, ¼, 1/6, 1/8	Quando a importância relativa entre dois elementos está entre dois níveis.

A análise em pares deve ser feita tanto para cada nível da hierarquia quanto para os elementos dentro de cada nível em relação ao nível imediatamente superior. Ou seja, cada critério é comparado par-a-par em relação ao objetivo principal, depois cada subcritério é comparado em relação ao critério ao qual pertence e, por último, cada alternativa é comparada em relação a cada critério ou subcritério.

Para essa etapa a área de drenagem foi considerada mais relevante que a distância euclidiana por representar uma variável estruturante da dinâmica fluvial, diretamente associada à escala do sistema hidrológico e ao regime de escoamento, sendo amplamente reconhecida como um dos principais descritores de bacias hidrográficas (Chow *et al.*, 1988; Pavelsky *et al.*, 2014). A distância euclidiana foi utilizada como critério complementar de proximidade espacial, sendo considerado que menores distâncias indicam maior probabilidade de correspondência espacial entre as observações orbitais e as estações in situ (Burrough & McDonnell, 1998). De forma análoga, adotou-se que menores diferenças relativas entre áreas de drenagem indicam maior compatibilidade hidrológica entre os pontos comparados,

uma vez que bacias de dimensões semelhantes tendem a apresentar comportamento hidrológico e geomorfológico comparável (Montgomery & Buffington, 1997).

A terceira etapa de prioridade relativa de cada critério consiste em identificar a ordem de importância de cada critério, para isso é necessário igualar todos os critérios na mesma unidade por meio de normalização. Essa normalização pode ser realizada através da divisão de cada elemento pela somatória das prioridades dos elementos. Com isso, a média desses valores normalizados são calculados resultando nos pesos relativos de cada critério, chamados de vetores de prioridades. É importante ressaltar que a média aritmética apesar de ser muito utilizada, pode também ser substituída por uma média geométrica caso exista informações suficientes que permitem estabelecer diretamente uma ordem de preferência (Saaty; Vargas, 2012).

Com os vetores de prioridades obtidos na etapa anterior, segue-se para a etapa na qual é construída uma matriz de prioridades. Essa matriz é essencial para multiplicar as prioridades relativas pelos vetores de prioridades e, assim, determinar os valores da etapa de prioridade composta, que servirão de base para a análise de consistência dos julgamentos, que pode ser realizada nesse momento ou ao final da análise de prioridades.

Finalmente é realizada a escolha da alternativa com maior prioridade em função dos critérios definidos e de suas respectivas importâncias. Sendo assim, obtém-se uma decisão fundamentada, capaz de refletir de forma consistente os julgamentos realizados em cada nível da hierarquia e garantindo que a alternativa selecionada seja a mais adequada ao objetivo estabelecido.

A avaliação da consistência dos julgamentos realizados nas comparações par-a-par é fundamental para verificar se os resultados obtidos são confiáveis e representem decisões racionais. Para isso, é necessário o cálculo da Razão de Consistência (RC) que envolve obter o maior autovalor da matriz não normalizada, podendo ser representado por meio das equações:

$$M_p \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \qquad \text{Equação 7}$$

Em que:

M_p é a matriz comparação paritária não normalizada;

w representa o vetor de prioridades médias dos critérios;

λ_{max} representa o maior autovalor da matriz.

Para calcular o λ_{max} multiplica-se a matriz M_p pelo vetor de prioridades:

$$M_p \cdot w = v \qquad \text{Equação 8}$$

Depois, é dividido cada elemento do vetor resultante v pelo correspondente w:

$$\frac{v_i}{w_i} \qquad \text{Equação 9}$$

Calculando a média desses valores obtém-se λ_{max}, utilizado para calcular Índice de Consistência (IC) pela fórmula:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \qquad \text{Equação 10}$$

Onde *n* é o número de elementos comparados.

Finalmente, obtém-se a RC dividindo o IC pelo Índice Aleatório (IA), que é um valor tabelado baseado em simulações de julgamentos aleatórios demonstrados na Tabela 4:

$$RC = \frac{IC}{IA} \qquad \text{Equação 11}$$

Se o valor de RC for inferior ou igual a 0,1 (10%), os julgamentos são considerados consistentes. Caso contrário, recomenda-se revisar as comparações realizadas, pois os resultados podem não refletir uma lógica decisória confiável.

Tabela 4 - Índices Aleatórios (IA) utilizados no cálculo da Razão de Consistência (RC). Fonte: Adaptado de Saaty & Vargas (2012).

Número de critérios (n)	Índice Aleatório (IA)
1	0,00
2	0,00
3	0,52
4	0,89
5	1,11
6	1,25
7	1,35
8	1,40
9	1,45
10	1,49

Ao final do processo, foi possível determinar um índice de confiabilidade para a associação entre os dados da ANA e os do SWOT, identificar os valores mínimos e máximos utilizados na definição dos intervalos correspondentes e estruturar esses resultados em classes de índices. Ademais, esses índices foram aplicados para fins de teste tanto às estações do RS selecionadas quanto a uma estação aleatória, para a qual foram calculados os critérios definidos na análise, isto é, a diferença euclidiana e a diferença de área de drenagem.

4.4. ESTUDO DE CASO – RIO GRANDE DO SUL

A escolha do estado do Rio Grande do Sul (RS) como local para o estudo de caso se justifica por uma combinação de fatores técnicos e contextuais para validação da metodologia proposta. Um dos principais motivadores para a seleção do RS foi a disponibilidade de dados de estações fluviométricas providos pela ANA que apresentam referencial altimétrico preciso, contabilizando 23 estações, conforme ilustrado na Figura 11. Essa característica minimiza incertezas relacionadas à localização das estações e à correta identificação dos trechos de rio monitorados, um desafio comum em análises em escala nacional. Dessa forma, a precisão desses dados é fundamental para garantir a fidedignidade dos resultados dessa pesquisa.

Além disso, a região do RS possui um histórico consolidado de produção e sistematização de dados hidrológicos, resultado de longo período de pesquisa por instituições renomadas, como é o caso do IPH/UFRGS, que está em atividade desde 1953 (IPH/UFGS, 2003). Com isso, os resultados obtidos neste estudo podem ser comparados, servindo como uma base sólida para a validação do método desenvolvido. Essa constatação é corroborada pelo item 5.1, que apresenta uma análise preliminar da distribuição espacial das estações

fluviométricas da ANA, evidenciando que, de modo geral, a região Sul dispõe de maior disponibilidade de dados.

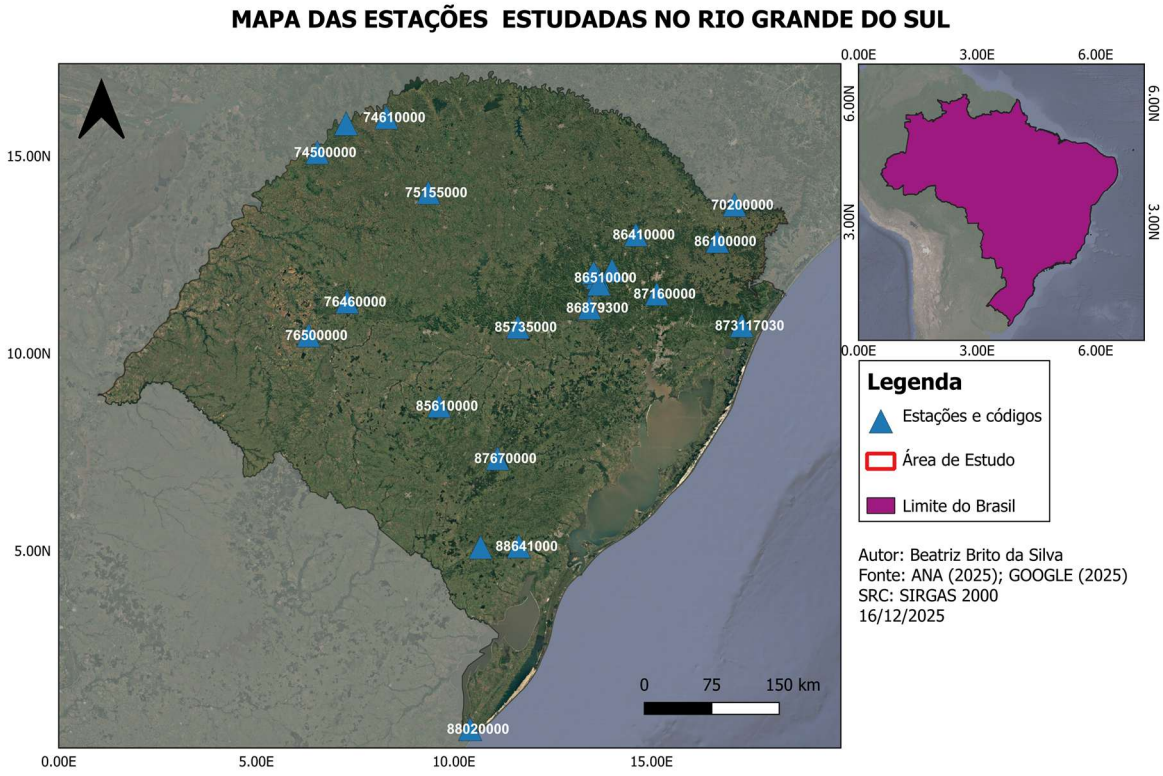


Figura 11 - Área de estudo

Além dessa disponibilidade, o RS é um dos estados brasileiros que mais demandam monitoramento hidrológico contínuo pela recorrência de eventos extremos. Conforme exposto por publicação da ANA (2025), o evento de 2024 evidenciou a importância de uma resposta coordenada diante de desastres naturais, bem como a necessidade de infraestruturas resilientes e sistemas de alerta precoce. Foi identificado que lacunas na rede de monitoramento e ausência de dados em tempo real ampliaram os impactos observados (ANA, 2025).

Com isso, os eventos hidrológicos extremos recentes evidenciaram a necessidade de atualização das séries históricas e da modernização da rede de monitoramento do RS. Para isso, a eficácia do monitoramento hidrológico depende da manutenção adequada das estações, da modernização dos equipamentos e da ampliação da cobertura espacial da rede.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ÁREA ESTUDADA

Os resultados apresentados neste tópico têm como objetivo contextualizar a análise, oferecendo uma visão inicial da distribuição espacial das estações fluviométricas e da cobertura dos dados do SWOT. Essa etapa não apenas fundamenta a escolha metodológica do estudo de caso, mas também estabelece a base para compreender a representatividade e as limitações das associações realizadas. Ao evidenciar padrões gerais e apontar tendências de disponibilidade de dados, os resultados referentes a área estudada funcionam como ponto de partida para as análises mais detalhadas desenvolvidas nas seções seguintes, onde se aprofunda a comparação entre as áreas de drenagem da ANA e do SWOT e se valida o índice de associação proposto.

A Figura 12 ilustra a densidade atual das estações fluviométricas em operação no país. É notável a alta densidade nas regiões Sudeste e Sul, evidenciando forte presença de dados para gestão hídrica em áreas críticas. O Centro-Oeste, embora menos denso, apresenta uma rede razoável, onde há relevante interesse em abastecimento e conservação dos mananciais. Já as regiões Norte e partes do Nordeste apresentam baixa densidade revelando lacunas no monitoramento hidrológico, apesar da relevância ambiental da Amazônia e das vulnerabilidades climáticas do semiárido nordestino.

De forma análoga, a Figura 13 apresenta a densidade dos nodes do produto SWORD, representando a cobertura espacial do SWOT sobre a rede hidrográfica brasileira. Em escala nacional existem 1.068.239 *nodes*, bem como uma extensão total de aproximadamente 223.536,85 km de *reaches*, compondo uma malha hidrológica de grande complexidade.

Diferentemente do padrão observado na rede da ANA, nota-se que os nodes são mais densos na Amazônia e em grandes sistemas fluviais do Norte e Centro do país. Esse comportamento decorre das características geomorfológicas propícias à detecção orbital, uma vez que rios largos, contínuos e bem definidos tendem a gerar maior segmentação durante o processamento do SWORD. Em contrapartida, regiões de cabeceira, bacias menores e áreas de relevo acentuado, frequentes no Sudeste e Sul, apresentam menor densidade de nodes, refletindo limitações da missão SWOT na representação de canais estreitos ou fragmentados

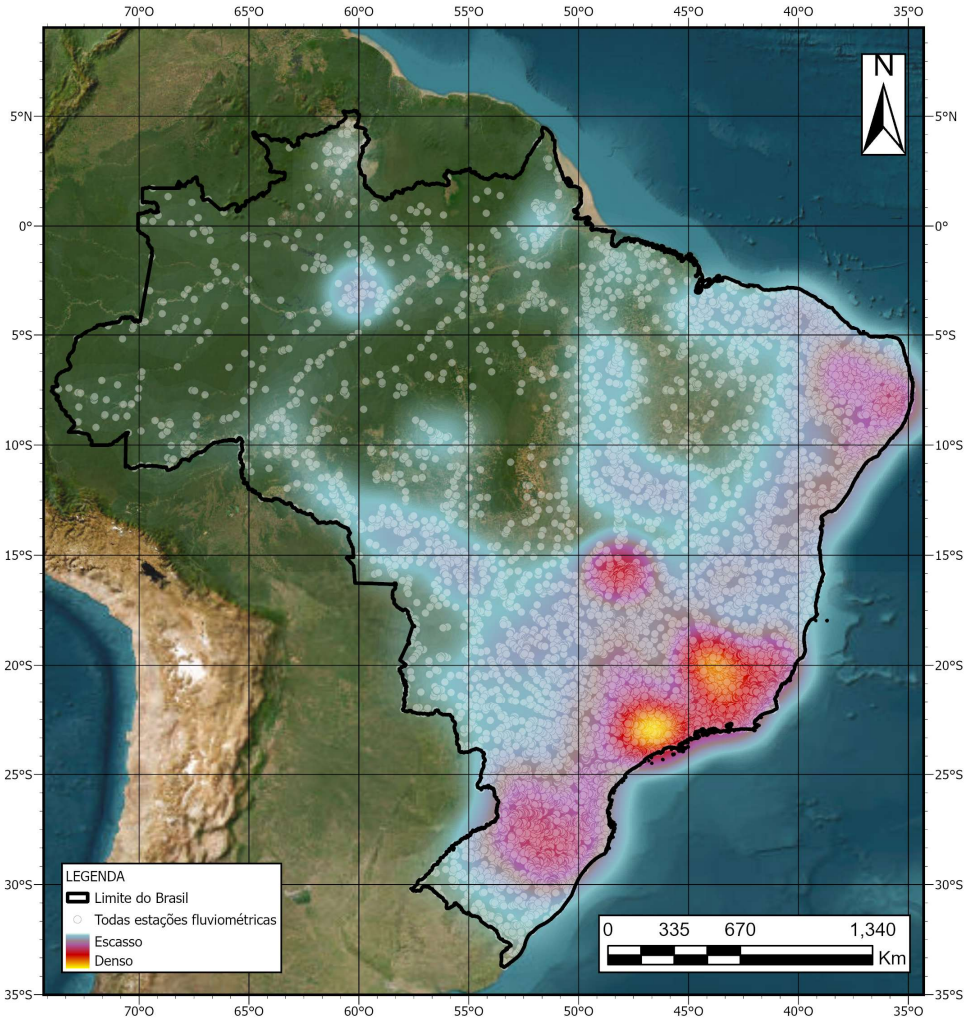


Figura 12 - Densidade das estações em operação da ANA

A comparação entre as Figuras 12 e 13 evidencia padrões complementares entre as duas fontes de dados. Enquanto a rede da ANA se mostra mais densa exatamente onde a cobertura do SWOT é reduzida, o satélite apresenta maior detalhamento espacial em áreas onde as estações fluviométricas são escassas. Essa relação inversa destaca o potencial integrador das duas bases, permitindo que falhas ou lacunas em uma fonte sejam parcialmente compensadas pela outra. Essa complementaridade também justifica a escolha do RS como estudo de caso, uma vez que o estado reúne boa disponibilidade de dados in situ e um contexto hidrológico recente que demanda análises mais precisas, permitindo avaliar a aplicabilidade das associações entre ANA e SWOT.

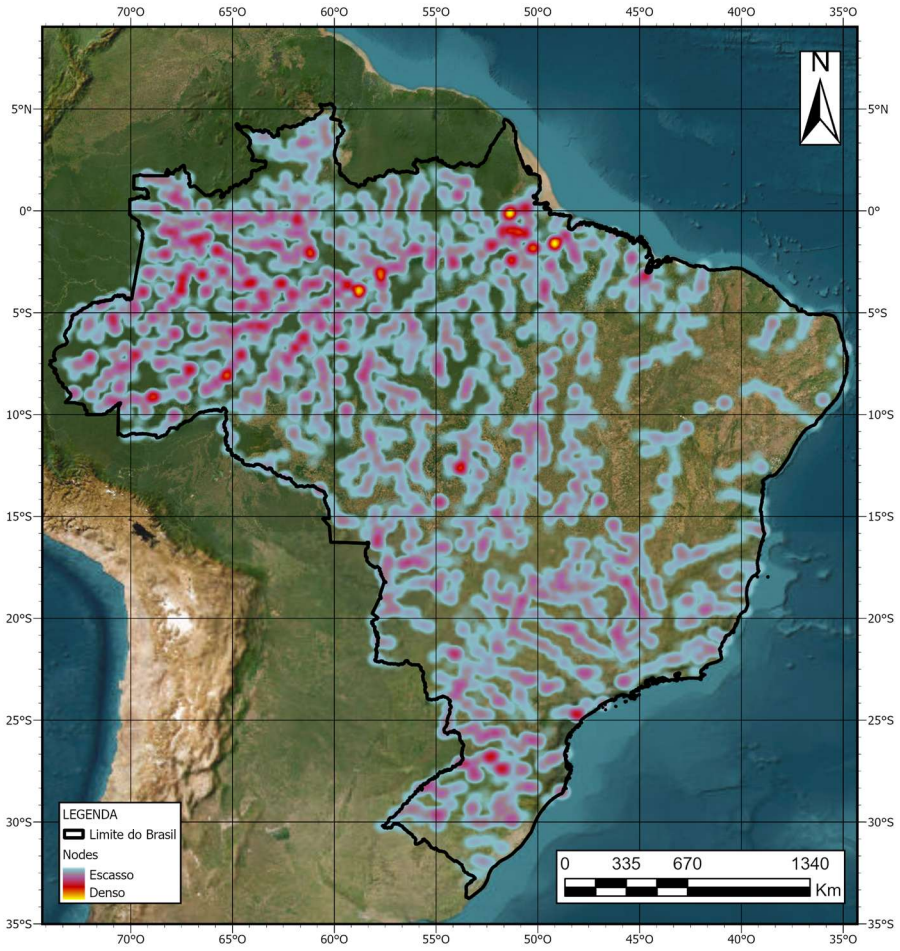


Figura 13 - Densidade dos *nodes* do SWOT no Brasil

5.2. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA CÁLCULO DA ÁREA DE DRENAGEM

A Figura 14, a Figura 15 e a Figura 16 ilustram o procedimento utilizado para reposicionar automaticamente as estações fluviométricas sobre o eixo principal do curso d'água. Em ambas as imagens, o marcador vermelho indica o ponto original da estação e o marcador verde representa o ponto ajustado. Observa-se que, em alguns casos, como o da estação 70200000, a posição original encontrava-se ligeiramente afastada do leito principal do rio, já em outros como o da estação 74500000 observa-se um deslocamento mais expressivo.

Isso ocorre, pois, as estações físicas da ANA estão nas laterais do rio, enquanto o modelo utilizado neste trabalho possui uma tendência a atrair o ponto para células com maior acúmulo de fluxo, que usualmente correspondem ao centro do trecho do leito representado

em imagens de alta resolução por conta das características geomorfológicas locais, como foi o caso desse rio muito largo.



Figura 14 - Deslocamento da estação 70200000 (menor deslocamento)



Figura 15 - Deslocamento da estação 74500000 (maior deslocamento)

A menor distância de deslocamento observada foi de aproximadamente 57 metros, enquanto a maior correspondeu a cerca de 478 metros. Esses valores demonstram que o deslocamento aplicado aos pontos é proporcionalmente pequeno em relação à escala das bacias analisadas, possivelmente tendo pouco impacto no cálculo das áreas de drenagem e, portanto, podendo ser realizado sem prejuízos à consistência dos resultados.

A Figura 16 ilustra um caso em que o deslocamento automático da estação pode, à primeira vista, sugerir um erro, pois o movimento não ocorre em linha reta entre o ponto original e o ponto ajustado. Entretanto, esse comportamento é esperado porque o algoritmo não busca a menor distância euclidiana, mas sim a célula mais próxima que apresenta o maior valor de acumulação de fluxo dentro da janela de busca. Assim, mesmo que o deslocamento pareça curvo ou diagonal, o ponto final corresponde a uma posição que é hidrologicamente coerente, localizada diretamente sobre o eixo de drenagem principal.

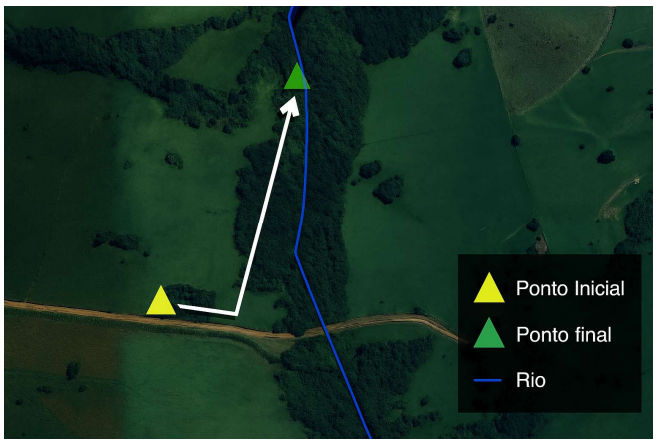


Figura 16 - Deslocamento da estação 85610000

Segundo Tabela 5, a comparação entre as áreas de drenagem obtidas neste estudo e as disponibilizadas pela ANA revelou, em geral, uma boa concordância entre os valores. A maior parte das estações apresenta diferenças percentuais inferiores a 5%, considerado adequado para análises hidrológicas em escala regional e está de acordo com os deslocamentos espaciais observados entre os pontos ajustados e o talvegue do rio. Esses desvios relativamente pequenos sugerem que o procedimento de *snap* e o alinhamento aos *reaches* do SWOT não introduziram distorções significativas no cálculo das bacias conforme anteriormente citado.

Para além dos casos extremos, alguns pequenos desvios também sugerem pequenas inconsistências entre a rede hidrográfica do MDE e a rede oficial da ANA. Contudo, quando se integram produtos construídos a partir de escalas, resoluções e metodologias possivelmente distintas, tais diferenças representam um erro mínimo e esperado dentro do processo. Todavia segundo o *boxplot*, representado na Figura 17, a faixa de variação é relativamente estreita com os dados distribuídos entre aproximadamente -5% e +5%, com a maioria concentrada ainda mais perto de zero. Isso mostra que a metodologia de cálculo está altamente alinhada com os dados oficiais da ANA.

Tabela 5 - Comparativo entre as áreas de drenagem calculada no estudo e ANA

Código da estação	Deslocamento (m)	Área ESTUDO (km²)	Área ANA (km²)	Diferença percentual ESTUDO/ANA
70200000	57	2.824	2.820	0,14%
75155000	166	2.008	1.940	3,51%
85610000	240	65	62	4,84%
85735000	131	1.321	1.340	-1,42%
8610000	64	1.763	1.820	-3,13%
86100000	133	1.763	-	-
86410000	61	2.820	2.820	0,00%
86472000	138	12.915	13.000	-0,65%
86510000	290	15.972	16.000	-0,18%
86580000	78	2.455	2.470	-0,61%
86720000	125	19.052	19.100	-0,25%
86879300	233	23.120	22.472	2,88%
87160000	88	2.019	2.030	-0,54%
873117030	250	465	-	-
87670000	162	7.557	7.540	0,23%
88020000	245	371	390	-4,87%
88575000	220	1.053	1.050	0,29%
88641000	211	4.701	4.700	0,02%
74500000	478	85.982	82.300	4,47%
74610000	73	2.256	2.260	-0,18%
74720000	306	91.108	90.700	0,45%
76460000	291	931	926	0,54%
76500000	244	27.795	27.800	-0,02%

* Nos casos em conta apenas um traço (“-”), significa que os dados não foram disponibilizados pela ANA

Dessa forma, com a mediana próxima de 0% e quase simetria do *boxplot* não houve tendência sistemática de superestimativa ou subestimativa dos dados, sugerindo que a área calculada coincidiu muito bem com a da ANA. Até mesmo os seis pontos que estão fora da faixa interquartil e podem ser considerados como outliers possuem diferenças aceitáveis e não comprometem a tendência geral da distribuição dos dados.

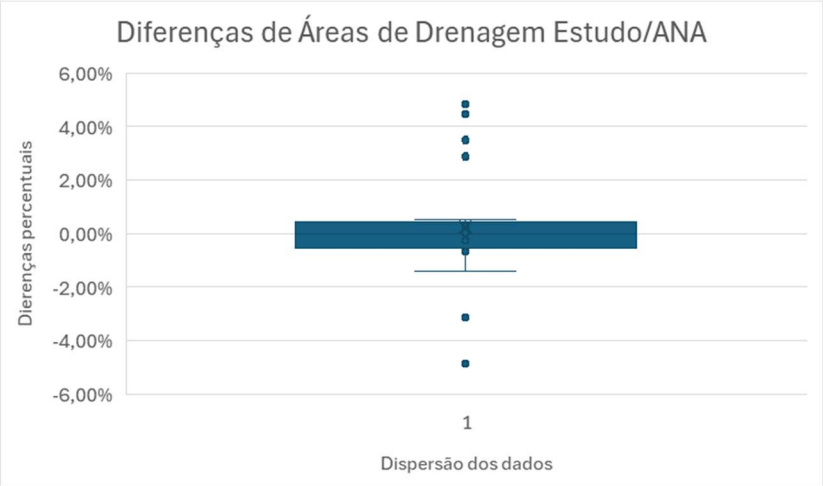


Figura 17 - *Boxplot* de diferenças de área de drenagem estimada pelo estudo e as consolidadas na base de dados da ANA

5.3. RELAÇÃO ENTRE OS DADOS DO SWOT E DA ANA

Tendo em vista que a comparação entre as áreas de drenagem obtidas neste estudo e as disponibilizadas pela ANA revelou boa concordância entre os valores, além do deslocamento das estações coincidirem com os *nodes*, decidiu-se por utilizar os pontos ajustados para associação com os dados do SWOT. A partir desse momento, a área de drenagem anteriormente calculada pelo estudo passa a ser referida como área de drenagem da ANA corrigida, enquanto a da ANA sem modificação passa a ser nomeada de ANA original, alinhando a nomenclatura às informações oficiais utilizadas. A Tabela 6 demonstra a distância euclidiana mínima entre as estações deslocadas da ANA corrigida e os *nodes* do SWOT, assim como as diferenças de drenagem.

De antemão, já é possível perceber que as estações da ANA de códigos 85610000, 85735000, 8610000, 86100000 e 88020000 não coincidem com nenhum *node* do SWOT, tendo em vista a grande diferença de distância entre eles como o exemplo demonstrado na Figura 18. Essa afirmativa é confirmada pela discrepância entre as áreas de drenagem que resultaram em diferenças percentuais de mais de 25% e quase chegaram a 100% em alguns casos. É importante ressaltar que essa incompatibilidade não decorre de erros de posicionamento ou falhas na etapa de *snapping*, mas está associada, sobretudo, aos critérios do SWORD para representar uma rede de drenagem, significando que o *node* mais próximo a estação a ANA não representa um mesmo rio. Espera-se que a análise multicritério adotada afirme que estas estações não estão associadas entre si.

Tabela 6 – Dados das associações entre a ANA e o SWOT

Código da estação	Distância euclidiana mínima(m)	Área ANA corrigida (km²)	Área SWOT (km²)	Diferença percentual ANA/SWOT
85610000	45.166	65	5.536	-98,83%
88020000	20.188	371	612	-39,38%
85735000	30.828	1.321	2.083	-36,58%
8610000	40.595	1.763	2.443	-27,83%
86100000	40.539	1.763	2.443	-27,83%
87670000	46	7.557	8.756	-13,69%
88641000	50	4.701	5.377	-12,57%
87160000	89	2.019	2.273	-11,17%
74500000	124	85.982	93.815	-8,35%
76460000	87	931	1.013	-8,09%
88575000	108	1.053	1.124	-6,32%
76500000	91	27.795	28.469	-2,37%
74610000	4.232	2.256	2.306	-2,17%
74720000	84	91.108	91.310	-0,22%
86510000	100	15.972	15.951	0,13%
86720000	36	19.052	18.969	0,44%
86472000	81	12.915	12.775	1,10%
86580000	17	2.455	2.419	1,49%
86410000	45	2.820	2.750	2,55%
75155000	91	2.008	1.920	4,58%
873117030	27	465	440	5,68%
86879300	124	23.120	21.704	6,52%
70200000	32	2.824	2.386	18,36%

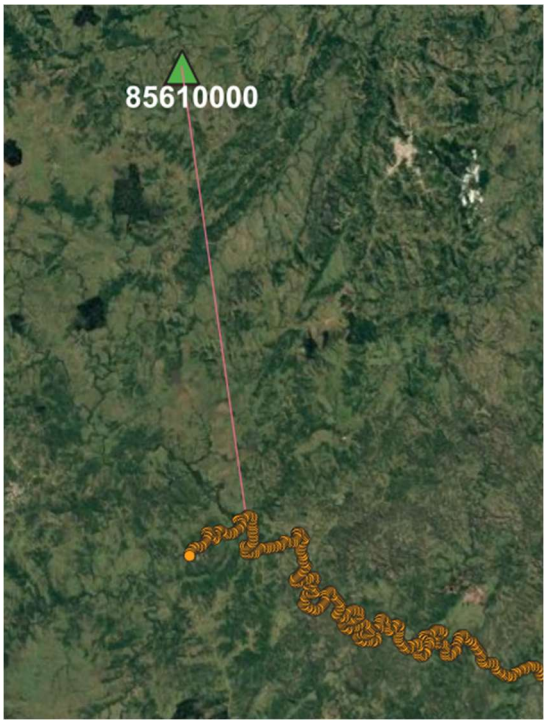
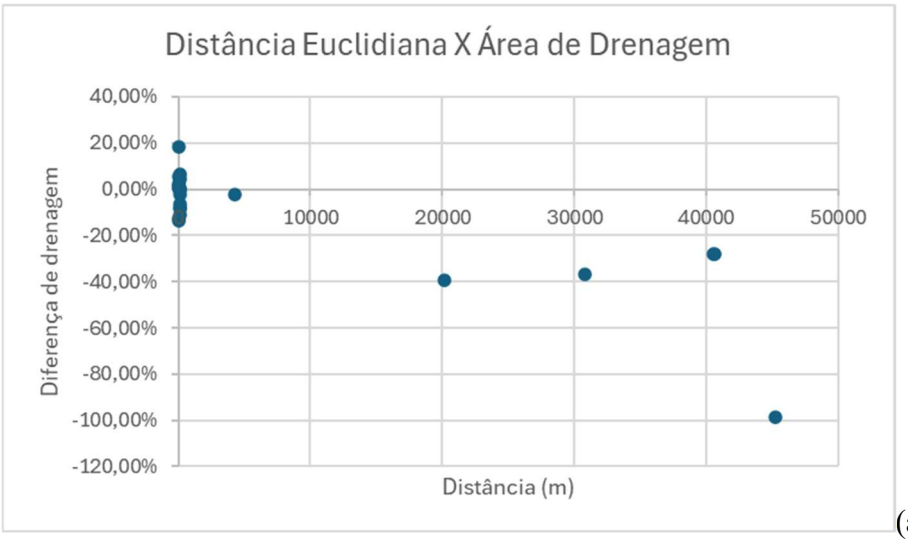


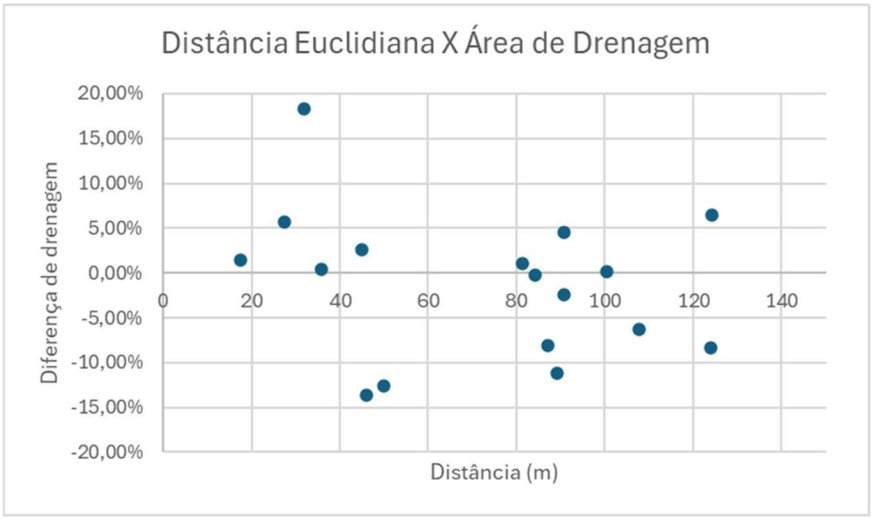
Figura 18 - Distância da estação 85610000 com o *node* mais próximo

Quando se analisa o gráfico de dispersão entre a distância euclidiana das estações com os nodes mais próximo e a diferença percentual das áreas de drenagem, na Figura 19a, observa-se que, à medida que a distância entre a estação e o node do SWOT aumenta, a diferença percentual na área de drenagem tende a se tornar mais negativa e com valores absolutos mais altos (acima de 20%). Isso indica que quanto mais afastado o ponto de comparação, maior a chance de incompatibilidade entre os dados.

A maioria dos dados está concentrada em distâncias menores (até 5.000 m) e com diferenças de drenagem entre 0% e 20%, sugerindo que associações mais próximas tendem a ser mais confiáveis. No entanto, ao se analisar o gráfico em maior detalhe (Figura 19b) percebe-se a variação da diferença de drenagem em distâncias distintas é bastante significativa em menor escala, o que revela que a distância euclidiana, por si só, não é um bom indicador da compatibilidade entre áreas de drenagem.



(a)



(b)

Figura 19 – (a) Relação entre distância euclidiana e diferença de drenagem e (b) zoom dos pontos densificados

Embora essa distância possibilite localizar o node com área de drenagem mais próxima da estação, ela não assegura que distâncias menores ou maiores correspondam proporcionalmente a diferenças menores ou maiores na área de drenagem. Um exemplo que ilustra essa inconsistência é a estação 74610000 demonstrada na Figura 20, que apresenta uma distância euclidiana elevada, mas uma diferença percentual de área de drenagem surpreendentemente baixa. Isso reforça a importância de considerar a área de drenagem como um critério de maior peso na análise.

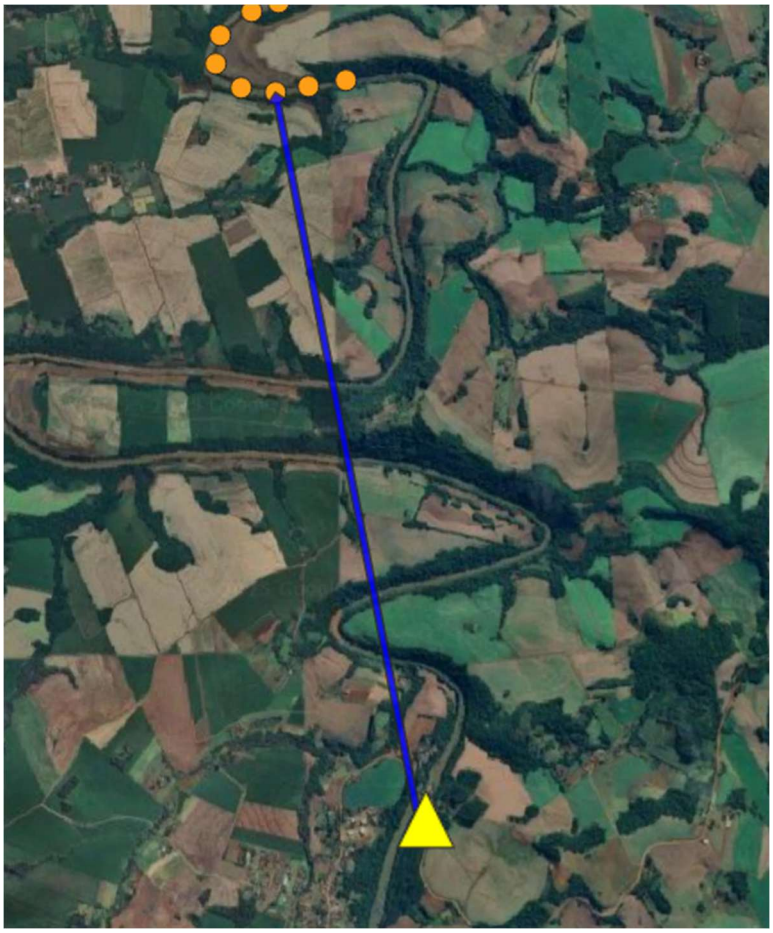


Figura 20 - Distância da estação 74610000 ao *node* mais próximo

Os *outliers* de diferença de drenagem citados anteriormente evidenciam que o problema só se tornou perceptível quando a distância euclidiana atingiu valores extremamente elevados. Porém, a confirmação da inconsistência só foi possível ao se observar a falta de equivalência entre as áreas de drenagem medida pelo SWOT e calculada por esse estudo. A partir do *boxplot* representado pela Figura 21, foram trazidos alguns pontos de discussão.

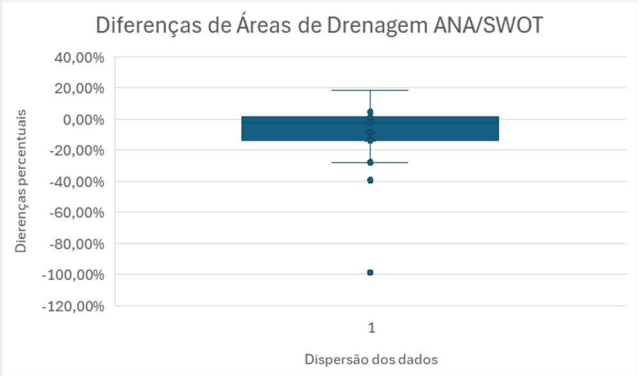


Figura 21 - *Boxplot* das diferenças percentuais das áreas de drenagem entre a ANA e o SWOT

O primeiro ponto é que há evidências de que a área de drenagem medida pelo SWOT tende a ser ligeiramente maior que a da ANA, como indicado pela mediana próxima de -10% e pela assimetria negativa representada pela cauda inferior mais longa do *boxplot*. O segundo ponto é que a maior parte dos dados está concentrada no intervalo interquartil (IQR), que demonstra que 75% das estações apresentam diferenças de drenagem dentro de uma faixa considerada aceitável para comparação.

O terceiro aspecto se refere à presença de *outliers*, já discutida anteriormente, que refletem casos pontuais de erro de associação. Ao excluir, por exemplo, esses valores extremos na Figura 22, foi observado uma maior concentração dos dados entre -10% e +5% aproximadamente, com a mediana se aproximando de 0%. Isso indica que a maioria dos dados, em média, são muito semelhantes, reforçando a confiabilidade da associação.

Todavia, a significativa dispersão e a leve assimetria indicam que, mesmo após a remoção dos *outliers*, a substituição direta de um dado pelo outro exige cautela. Por isso, torna-se essencial estabelecer um limiar mínimo de compatibilidade entre as áreas de drenagem para validar a associação entre estação e *node* de forma segura e metodologicamente sólida.

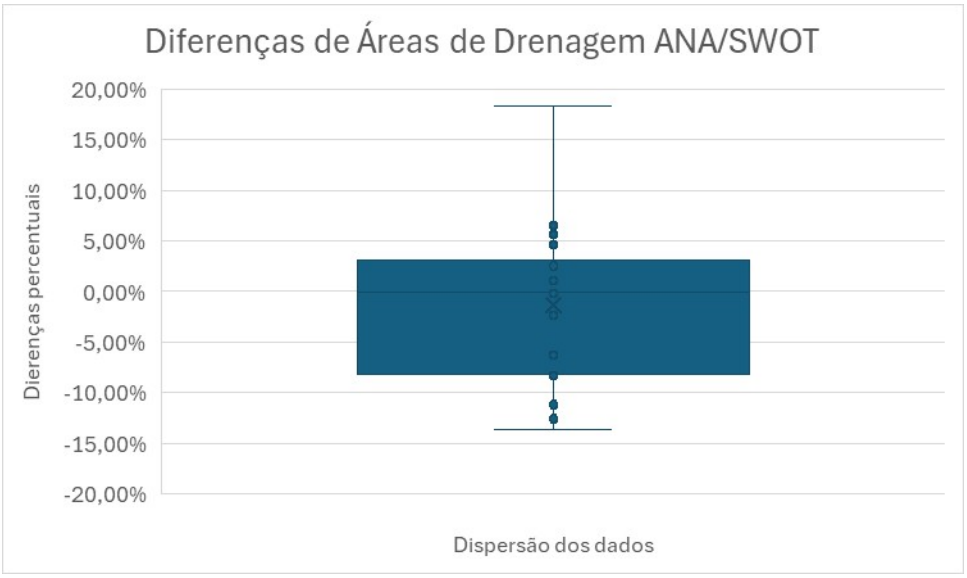
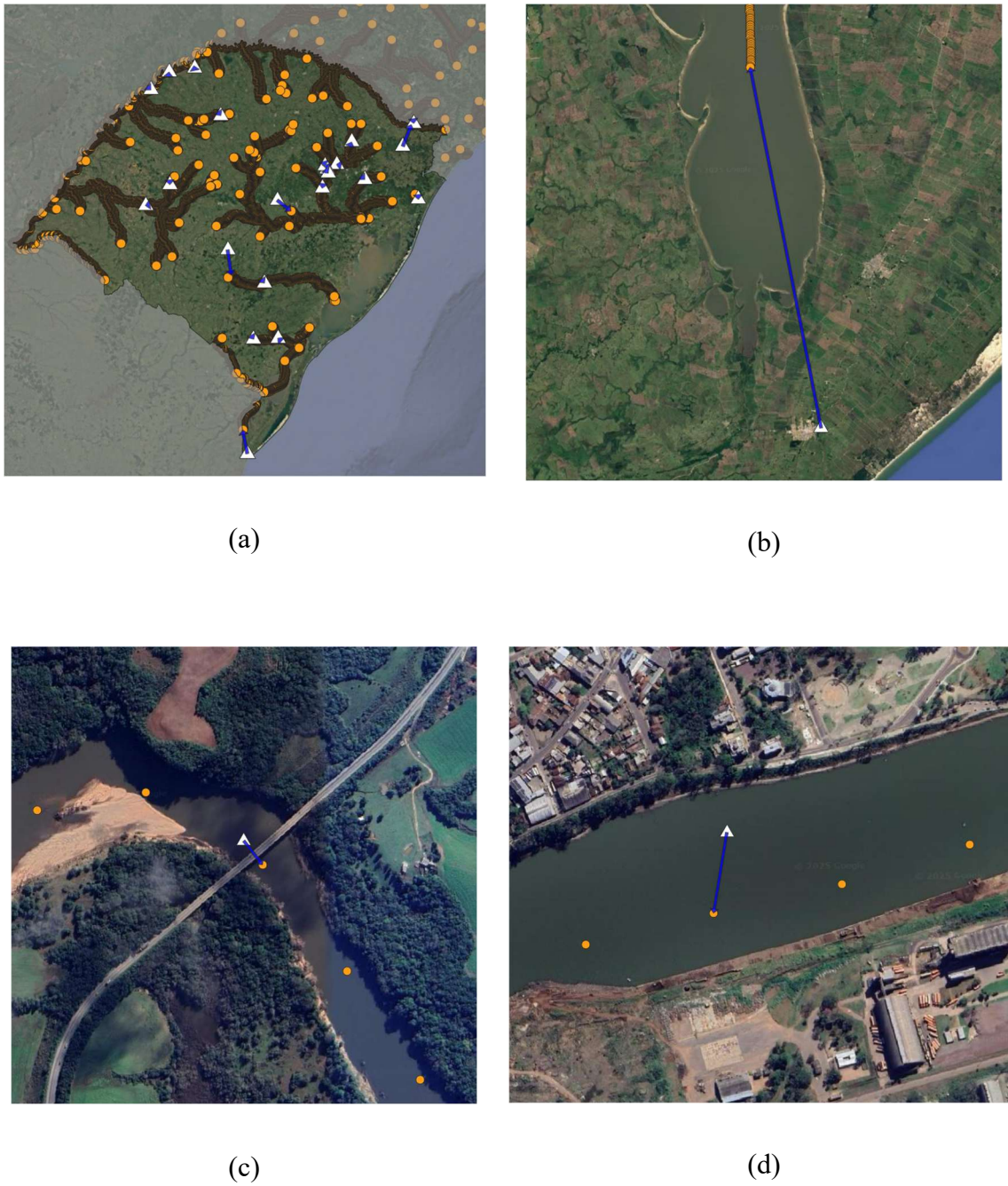


Figura 22 – Zoom do *Boxplot* das diferenças percentuais das áreas de drenagem

5.4. ÍNDICE DE ASSOCIAÇÃO ENTRE OS DADOS DA ANA E DO SWOT UTILIZANDO AHP

A Figura 23 representa os dados primários da AHP, incluindo nodes, estações e distâncias euclidianas, além de exemplos pontuais de associação entre as estações e os nós do SWOT,

para uma melhor visualização. A camada com as distâncias euclidianas foi gerada a partir de ferramenta SIG conforme mencionado no item 4.3.1.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 23 - Dados primários da AHP, incluindo nodes, estações e distâncias euclidianas (a) e exemplos pontuais de como as estações podem ser associadas ao SWOT (b, c e d)

A camada com as áreas de drenagem calculadas, produzidas a partir do código do R, conforme descrito no item 4.3.2.1, está apresentada na Figura 24. A diferença de área de drenagem não gerou uma camada adicional, uma vez que esse valor pode ser obtido

diretamente por meio de uma operação matemática entre os campos de área de drenagem presentes na camada das estações da ANA e nos nodes do SWORD (campo facc).

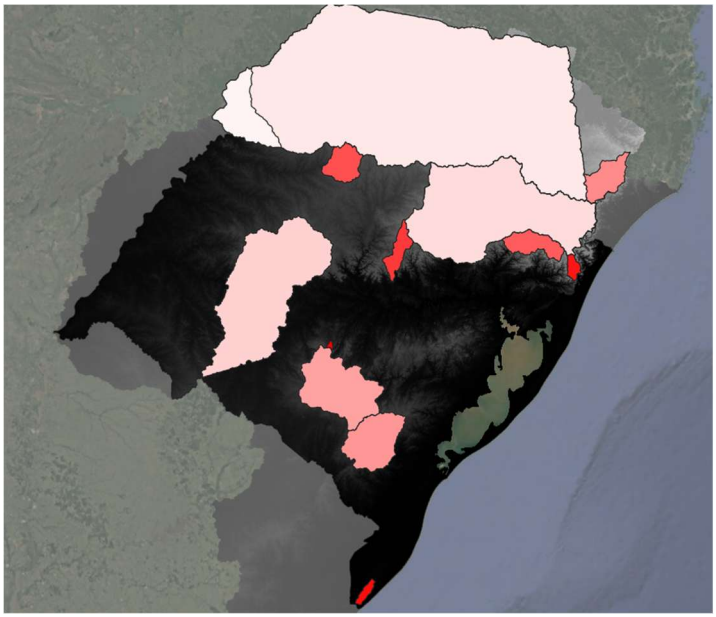


Figura 24 - Áreas de drenagem geradas para utilização com a AHP

Em resumo, essas são as áreas de drenagem geradas pelo ANADEM, nas quais a intensidade da cor vermelha representa áreas relativamente menores em comparação às demais. Assim, cada ponto correspondente à estação deslocada define o exutório da bacia hidrográfica associada. Esse procedimento permite identificar, para cada estação fluviométrica, a área contribuinte calculada a partir do MDE, estabelecendo a relação espacial entre o ponto monitorado e sua bacia de drenagem derivada.

Essas figuras permitem compreender o procedimento SIG associado à aplicação do AHP. Entretanto, cabe ressaltar que, devido ao número reduzido de estações (23), foi possível utilizar recursos do Microsoft Excel para facilitar a dissolução e manipulação dos dados, sem necessidade de automações complexas nesta etapa do AHP.

A estrutura de decisão foi organizada em níveis hierárquicos conforme apresentado na Figura 25. O primeiro nível corresponde ao objetivo geral da análise, que neste caso é a associação entre os dados dos *nodes* do SWOT e os dados das estações fluviométricas da ANA.

No segundo nível estão os critérios utilizados para avaliar essa associação, sendo eles a Distância (C1) e a Área de drenagem (C2). Cada critério foi selecionado por sua relevância na identificação da correspondência espacial e hidrológica entre as duas bases de dados.

O terceiro nível é composto pelos subcritérios, que representam faixas discretizadas de cada variável. Para o critério de distância, foram considerados os intervalos 0–48 m (C11), 48–91 m (C12), 91–2178 m (C13) e 2178–5000 m (C14). Para o critério de área de drenagem, foram utilizados os intervalos 0% a 1% (C21), –2% a 0% (C22), –13% a –2% (C23) e –25% a –13% (C24). Esses subcritérios representam as categorias avaliadas pelo AHP no processo de atribuição de pesos relativos entre as alternativas.

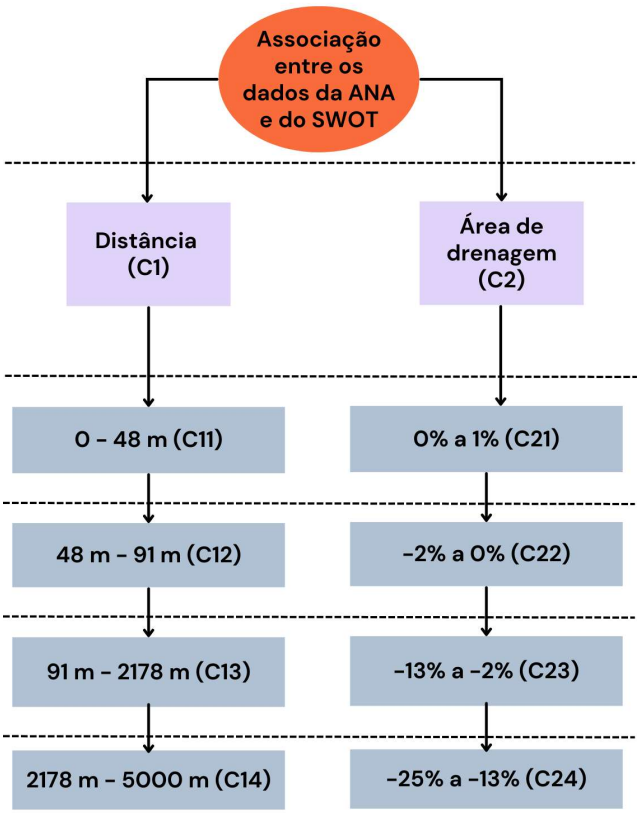


Figura 25 - Classificação hierárquica

A Tabela 7 mostra os resultados encontrados no cálculo dos quartis que serviram como parâmetro para a definição desses intervalos de forma que representasse adequadamente o comportamento da distribuição dos dados. No entanto, os limiares máximos de distância (5.000 m) e de diferença relativa de área de drenagem (-25%) foram definidos como critérios preliminares para descartar combinações evidentemente incompatíveis antes da aplicação da AHP. Esses limites foram estabelecidos a partir da análise exploratória dos dados,

observando-se que, acima desses valores, ocorriam discrepâncias marcantes entre as duas fontes, indicando ausência de correspondência real. Dessa forma, a AHP definir uma compatibilidade mínima e avaliar também associações inválidas.

Tabela 7 – Cálculos dos quartis dos dados

Quartis	Distância (m)	Diferença Percentual de Área
Q1 (25%)	48	-13%
Q2 (50%)	91	-2%
Q3 (75%)	2178	1%

Embora a diferença relativa de área de drenagem possa assumir valores positivos ou negativos, optou-se por manter os valores conforme observados na amostra durante a etapa de classificação por quartis. Isso ocorre porque a distribuição empírica dos dados apresentou predominância de diferenças negativas discutidas anteriormente, indicando uma tendência sistemática que faz parte do comportamento real da variável. A utilização de valores absolutos nesse momento alteraria artificialmente essa distribuição, produzindo intervalos que não refletiriam adequadamente a variabilidade original dos dados e comprometeriam a coerência metodológica da classificação. O uso de módulo é adequado apenas em análises voltadas exclusivamente para a magnitude do erro, conforme ocorreu na seção 5.5.

A definição da ordem de prioridade de cada critério e de suas respectivas alternativas, estabelecida por meio da Escala Fundamental de Saaty, encontra-se apresentada nas Tabela 8,Tabela 9 e Tabela 10.

- O critério em relação a área de drenagem (C1) tem maior peso que o critério de distância (C2), ou seja, C1 > C2.

Tabela 8 – Prioridade relativa dos critérios

Critérios	C1	C2
C1 – Distância	1	3
C2 – Área de drenagem	1/3	1

- Quanto menor a distância entre a estação e o node maior a chance de compatibilização dos dados, então, C11 > C12 > C13 > C14.

Tabela 9 – Prioridade relativa dos critérios de distância

C1 - Distância	C11	C12	C13	C14
C11	1,00	3,00	5,00	9,00
C12	0,33	1,00	3,00	8,00
C13	0,20	0,33	1,00	5,00
C14	0,11	0,13	0,20	1,00

- De forma análoga, quanto menor for a diferença entre as áreas de drenagem calculadas pela ANA e pelo SWOT, maior será a possibilidade de associação. Assim, estabelece-se a seguinte ordem de prioridade: C21 > C22 > C23 > C24.

Tabela 10 – Prioridade relativa dos critérios de área de drenagem

C2 – Área de drenagem	C21	C22	C23	C24
C21	1,00	3,00	6,00	9,00
C22	0,33	1,00	6,00	8,00
C23	0,17	0,17	1,00	4,00
C24	0,11	0,13	0,25	1,00

Como a valoração desses critérios é quantitativa e seus valores absolutos não permitem, isoladamente, definir a compatibilidade entre os dados, procedeu-se à normalização das matrizes paritárias. Esse processo permitiu converter os julgamentos relativos em pesos proporcionais, conforme apresentado nas Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13. A obtenção dos vetores de prioridade para cada critério e para seus respectivos níveis de desempenho foi realizada por meio da média aritmética das linhas das matrizes normalizadas, em conformidade com o procedimento padrão do AHP.

Tabela 11 – Matriz de comparação paritária dos critérios

Critérios	C1	C2	Média
C1 – Distância	0,25	0,75	0,75
C2 – Área de drenagem	0,75	0,25	0,25
Soma	1,00	1,00	1,00

Tabela 12 – Matriz de comparação paritária de distância

C1 - Distância	C11	C12	C13	C14	Média
C11	0,61	0,67	0,54	0,39	0,55
C12	0,20	0,22	0,33	0,35	0,28
C13	0,12	0,07	0,11	0,22	0,13
C14	0,07	0,03	0,02	0,04	0,04
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 13 – Matriz de comparação paritária de área de drenagem

C1 - Distância	C11	C12	C13	C14	Média
C11	0,62	0,70	0,45	0,41	0,55
C12	0,21	0,23	0,45	0,36	0,31
C13	0,10	0,04	0,08	0,18	0,10
C14	0,07	0,03	0,02	0,05	0,04
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

A Tabela 14 apresenta a prioridade composta, obtida pela multiplicação entre o peso global de cada critério e o peso de cada nível de desempenho derivado das matrizes paritárias. Essa tabela sintetiza a contribuição final de cada classe no cálculo do índice de associação ANA–SWOT.

Tabela 14 – Prioridade composta

Critério	Código	Intervalo	Peso local do nível	Peso do critério	Prioridade composta
Distância euclidiana (C1)	C11	0 – 48 m	0,55	0,25	**0,14**
Distância euclidiana (C1)	C12	48 – 91 m	0,28	0,25	**0,07**
Distância euclidiana (C1)	C13	91 – 2.178 m	0,13	0,25	**0,03**
Distância euclidiana (C1)	C14	2.178 – 5.000 m	0,04	0,25	**0,01**
Diferença de área (C2)	C21	0% a 1%	0,55	0,75	**0,41**
Diferença de área (C2)	C22	–2% a 0%	0,31	0,75	**0,23**
Diferença de área (C2)	C23	–13% a –2%	0,10	0,75	**0,08**
Diferença de área (C2)	C24	menor que –13%	0,04	0,75	**0,03**

A consistência dos julgamentos foi avaliada pelo cálculo da Razão de Consistência (RC). Conforme a Tabela 15, todos os índices obtidos apresentaram valores inferiores a 0,1, sendo, portanto, considerados consistentes.

Tabela 15 – Avaliação da consistência das prioridades

Critérios	Λ máx	IC	RC
C1	4,13	0,04	0,05
C2	4,26	0,09	0,09

Dessa forma, a síntese dos vetores de prioridade dos critérios encontra-se organizada na Tabela 16.

Tabela 16 – Vetores de prioridade

Critério	Alternativas	Preferência
Distância euclidiana (C1)	0 - 48 m (C11)	0,55
	48 m - 91 m (C12)	0,28
	91 m – 2.178 m (C13)	0,13
	2.178 m- 5.000 m (C14)	0,04
Diferença de área de drenagem (C2)	0% a 1% (C21)	0,55
	-2% a 0% (C22)	0,31
	-13% a -2% (C23)	0,10
	menor que -13% (C24)	0,04

Com isso, foi possível estabelecer uma proposição de índice de confiabilidade de associação entre os dados da ANA e do SWOT. Considerando os pesos relativos de 0,25 para a distância e de 0,75 para a área de drenagem, foram definidos os valores mínimo e máximo para encontrar os intervalos correspondentes, organizados em três classes de índices, conforme demonstrado pela Tabela 17.

Tabela 17 – Índice de associação

Classes	Índice de Associação
Fracamente Compatível	0,04 – 0,21
Medianamente Compatível	0,21 – 0,38
Fortemente Compatível	0,38 – 0,55

Essas classificações de compatibilidade foram estruturadas em três níveis para representar os seguintes graus de associação entre os dados:

- Levemente compatível: quando o índice indica associação fraca, mas ainda aceitável entre os dados. O gestor poderia optar por incorporar o dado com ressalvas para que seja revisado ou validado posteriormente. Porém, se usado sem cautela, pode gerar interpretações enviesadas ou pouco robustas. Também ficaria ao critério técnico do gestor simplesmente descartar o dado.
- Medianamente compatível: quando o índice demonstra associação moderada, com maior proximidade entre os valores. Dessa forma, o gestor tenderia a incorporar o dado, mas com algum nível de verificação adicional, como cruzamento com outras fontes. Pode aumentar a riqueza da base sem comprometer significativamente a confiabilidade.
- Fortemente compatível: quando o índice confirma elevada associação e confiabilidade entre os dados comparados. Com o isso, o gestor incorporaria o dado imediatamente, tendo em vista, a alta similaridade entre os dados da ANA e do SWOT.

É importante destacar que os valores classificados como incompatíveis não se enquadram em nenhuma das três categorias de compatibilidade. Eles representam situações em que não há associação confiável entre os dados da ANA e do SWOT. Nesses casos, o gestor deve optar pelo descarte dos valores, evitando que informações inconsistentes comprometam a qualidade da base de dados.

5.5. APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE ASSOCIAÇÃO PARA O RS PARA ESTABELECIMENTO DE CORRESPONDÊNCIA

Foi realizado um teste de aplicação do índice de associação para as estações localizadas no Rio Grande do Sul, foi possível validar o método proposto e, ao mesmo tempo, identificar eventuais inconsistências nos resultados. Para automatizar a classificação dos valores obtidos, utilizou-se uma função Excel que permitisse atribuir condições lógicas aos valores e retornar diferentes resultados conforme os critérios definidos. Dessa forma, a análise pôde ser realizada de maneira sistemática e padronizada.

Nos casos em que os dados apresentaram diferenças positivas, estes foram avaliados segundo sua ordem de grandeza, sendo atribuídos valores negativos para representar essa condição

de forma consistente dentro da classificação. Já os valores que se encontraram fora dos limites estabelecidos pelo índice de associação foram considerados incompatíveis (Tabela 18), indicando ausência de associação confiável entre os dados comparados.

Tabela 18 – Estações que não são compatíveis

Código	Índice de associação	Classe
85610000	Fora do intervalo	Incompatível
88020000	Fora do intervalo	Incompatível
85735000	Fora do intervalo	Incompatível
8610000	Fora do intervalo	Incompatível
86100000	Fora do intervalo	Incompatível

Conforme já discutido anteriormente, era esperado que determinados valores fossem classificados como incompatíveis em razão da elevada distância entre a estação e o *node* do SWOT (Figura 18), bem como da significativa diferença de área de drenagem observada. Essa incompatibilidade não decorre de falhas no modelo proposto, mas sim de uma limitação do cadastro do SWORD, que, atualmente, tem um foco em rios com larguras superiores a 100 metros. Dessa forma, quando a estação analisada não corresponde a um trecho de rio presente nesse banco, a associação torna-se inviável, resultando naturalmente em valores incompatíveis.

A Tabela 19 apresenta as estações classificadas como de associação fraca, no qual existe alguma compatibilidade, mas limitada em alguma diferenciação nos valores de distância ou área de drenagem. De todo modo, são consideradas relevantes para a análise tendo em vista que mostra que o índice consegue identificar algum nível de correspondência. Isso pode servir de complemento aos dados de regiões onde há escassez de informações, por exemplo.

A A Tabela 21 apresenta as estações caracterizadas como de associação elevada, em que os dados do SWOT podem ser utilizados com mais confiança como complemento aos dados da ANA. Nessas estações, as diferenças observadas são mínimas, o que reforça a confiabilidade do método e confirma sua aplicabilidade em contextos reais. Essas associações são especialmente relevantes porque demonstram o potencial do SWOT em complementar de

forma segura os dados da ANA, ampliando a cobertura e a precisão das informações hidrológicas disponíveis.

Tabela 20 apresenta as estações classificadas como de associação moderada, que indica uma correspondência razoável entre os dados, com boa chance da associação entre os dados da ANA e do SWOT terem mais consistência. Esse parâmetro permite avaliar cenários em que a compatibilidade não é máxima, mas ainda suficientemente robusta para complementação.

Tabela 19 – Estações levemente compatíveis

Código	Índice de associação	Classe
87670000	0,17	Levemente Compatível
88641000	0,14	Levemente Compatível
87160000	0,14	Levemente Compatível
74500000	0,11	Levemente Compatível
76460000	0,14	Levemente Compatível
88575000	0,11	Levemente Compatível
76500000	0,11	Levemente Compatível
75155000	0,11	Levemente Compatível
86879300	0,11	Levemente Compatível
70200000	0,17	Levemente Compatível

A Tabela 21 apresenta as estações caracterizadas como de associação elevada, em que os dados do SWOT podem ser utilizados com mais confiança como complemento aos dados da ANA. Nessas estações, as diferenças observadas são mínimas, o que reforça a confiabilidade do método e confirma sua aplicabilidade em contextos reais. Essas associações são especialmente relevantes porque demonstram o potencial do SWOT em complementar de

forma segura os dados da ANA, ampliando a cobertura e a precisão das informações hidrológicas disponíveis.

Tabela 20 – Estações que são medianamente compatíveis

Código	Índice de associação	Classe
74610000	0,25	Medianamente Compatível
74720000	0,30	Medianamente Compatível
86580000	0,37	Medianamente Compatível
86410000	0,21	Medianamente Compatível
873117030	0,21	Medianamente Compatível

Tabela 21 – Estações que são fortemente compatíveis

Código	Índice de associação	Classe
86510000	0,44	Fortemente Compatível
86720000	0,55	Fortemente Compatível
86472000	0,48	Fortemente Compatível

Segundo a Tabela 22, há uma predominância de associações levemente compatíveis, isso mostra que maior parte dos dados apresenta algum nível de compatibilidade, mesmo que não muito elevado. Ou seja, o método consegue captar correspondência mesmo em condições menos favoráveis, podendo ampliar o alcance da análise. A Figura 26 ilustra a distribuição dessas associações.

Também é possível observar que quase metade dos dados se divide entre resultados intermediários e casos sem associação confiável, permitindo o método de reconhecer os limites em que a associação é inviável. Os casos de estações classificadas como fortemente compatíveis, embora em menor número, demonstram que o satélite pode reproduzir com precisão os dados da ANA.

Tabela 22 – Representatividade dos dados

Classe de associação	Número de estações	Representação
Incompatível	5	22%
Levemente Compatível	10	43%
Medianamente Compatível	5	22%
Fortemente Compatível	3	13%
Total	23	100%

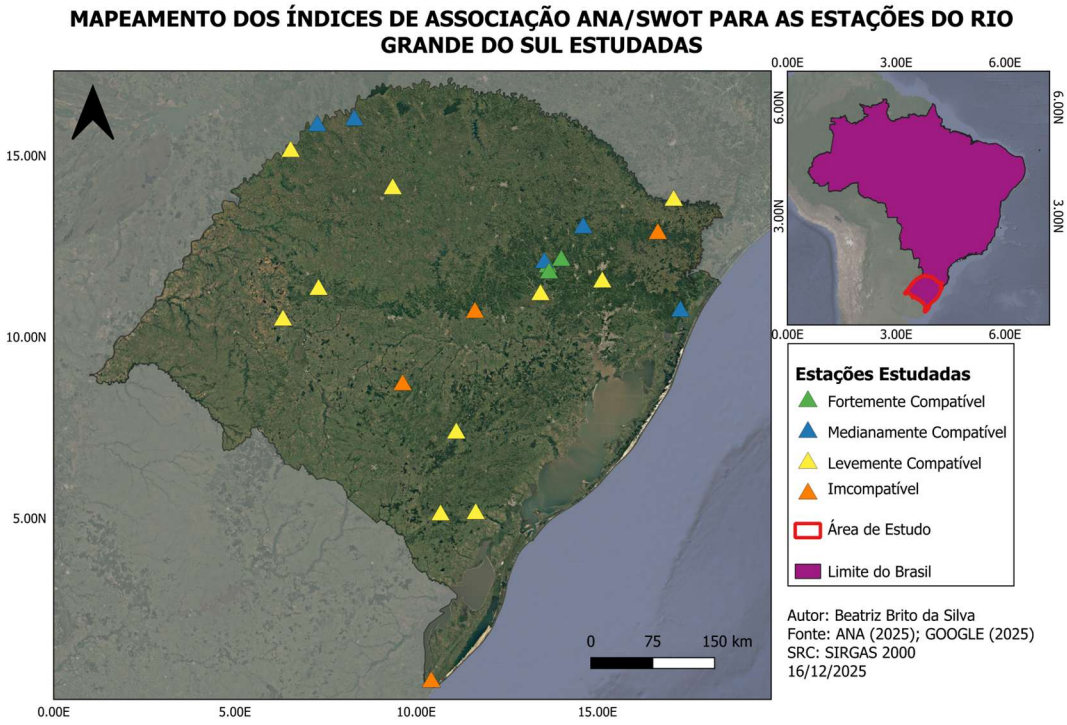


Figura 26 - Distribuição dos índices de associação no RS

Dessa forma, conclui-se que os índices obtidos para as estações testadas apresentaram valores compatíveis com a associação esperada, demonstrando que o método é consistente.

5.5.1. Exemplo de associação dos dados entre a ANA e SWOT para uma estação fora do RS

A Figura 27 apresenta a estação Santa Rosa, de código 42395000, localizada na bacia do rio São Francisco, especificamente no rio Paracatu. Apesar de estar localizada fora do estado do Rio Grande do Sul, observa-se que essa estação possui grande potencial de compatibilidade

com o SWOT, uma vez que se encontra próxima ao curso principal do rio, que possui dados disponíveis do banco SWORD, como o *node*, além de, visualmente, estarem próximos.



Figura 27 - Localização da estação 42395000

Considerando esse cenário, foi aplicado o mesmo teste de associação com o objetivo de confirmar a aplicabilidade do método em um contexto distinto daquele em que os dados originais foram obtidos. A distância entre a estação e o node do SWOT foi estimada em aproximadamente 160 metros (intervalo de 91 a 2178 m, com preferência 0,13), enquanto a área de drenagem da estação foi calculada em cerca de 12.720 km². Comparando com a área medida pelo SWOT no respectivo node, de aproximadamente 12.767 km², obteve-se uma diferença percentual de -0,37% (intervalo de -2% a 0%, com preferência 0,55).

Aplicando a ponderação definida (0,25 para distância e 0,75 para área de drenagem), obteve-se o seguinte índice de confiabilidade:

$$0{,}13 \cdot 0{,}25 + 0{,}55 \cdot 0{,}75 = 0{,}45$$

Esse valor comprova uma associação fortemente compatível, validando o método proposto. Assim, os dados do node do SWOT podem ser utilizados como complemento às informações da ANA para a estação Santa Rosa, fortalecendo a confiabilidade da integração entre os dois conjuntos de dados e indicando o potencial de aplicação da metodologia para todo o Brasil.

5.6. DESAFIOS NO ESTABELECIMENTO DE CORRESPONDÊNCIA

O objetivo dessa etapa foi identificar quais critérios comprometeram a pontuação final e avaliar se é necessário ajustes metodológicos ou a exclusão justificada do dado. O cenário em que o índice final atribuído a uma associação atinge um patamar considerado satisfatório, permite concluir que essa correspondência pode ser integrada à base de dados da ANA, dependendo do grau de compatibilidade. Já demais associações cujos índices permanecerem abaixo do limiar definido, podem significar a incompatibilidade entre os dados e, portanto, a associação não é concluída.

De antemão, é possível reconhecer algumas limitações estruturais que podem impactar diretamente a qualidade das associações. Um dos principais entraves refere-se à ausência de marcação geodésica formal em muitas estações da ANA, o que pode acarretar deslocamentos significativos em relação à posição real da estação na calha do rio. Esse desalinhamento prejudica a estimativa da distância mínima em relação aos nodes do SWOT, compromete o cálculo da área de drenagem e, consequentemente, a coerência hidrológica da associação. A Figura 28 exemplifica esse evento.



Figura 28 - Exemplo de problema de associação por ausência de marcação geodésica

Além disso, interferências locais não representadas nas bases vetoriais, como represamentos, canais artificiais, estruturas de captação ou afluentes omitidos, podem modificar substancialmente o comportamento do regime hidrológico em campo. Essas alterações afetam diretamente a correspondência entre as variáveis observadas pelo satélite SWOT e

os registros históricos da ANA, sobretudo no que diz respeito às séries de vazão, nível d'água e área drenada.

A Figura 29 evidencia a influência direta de um barramento, possivelmente associado a uma estrutura hidrelétrica, sobre o comportamento hidrodinâmico do rio. A operação da barragem introduz uma condição artificial no curso hídrico, fragmentando o sistema em dois compartimentos hidrológicos com dinâmicas distintas: montante (represado) e jusante (regulado). Consequentemente, a correspondência entre as variáveis observadas pelo SWOT, como elevação da superfície da água e área inundada, e os dados coletados pelas estações fluviométricas in situ pode ser comprometida, principalmente em termos de sincronia temporal e consistência hidráulica, tendo em vista que, enquanto o SWOT realiza revisitas com periodicidade de aproximadamente 21 dias e coleta dados altimétricos de superfície, as estações da ANA operam com frequência diária ou horária e realizam medições pontuais. Assim, discrepâncias entre os dados não refletem falha na associação, mas sim diferenças inerentes às naturezas das duas fontes de informação.

Essas situações evidenciam uma limitação inerente ao método proposto: embora a associação espacial entre ANA e SWOT seja válida, o procedimento não é capaz de prever ou corrigir alterações locais provocadas por interferências humanas. Isso significa que podem ocorrer casos em que a associação seja correta, mas os dados hidrológicos comparados não apresentem coerência plena devido às modificações existentes em campo, um nível de detalhamento que somente observações locais conseguem captar (Wongchuig-Correa et al., 2020).

Apesar disso, o objetivo do trabalho permanece atendido. A proposta busca oferecer uma alternativa de monitoramento em situações nas quais as estações fluviométricas apresentam falhas ou registros incompletos. Nessas condições, as informações do SWOT continuam úteis, ainda que não sejam completamente representativas das particularidades locais. Para fins de monitoramento de eventos extremos, essa limitação torna-se pouco significativa, pois a magnitude do fenômeno costuma superar os efeitos de pequenas intervenções antrópicas, permitindo que o satélite capture adequadamente a resposta hidrológica em escala regional.



Figura 29 - Exemplo de problema de associação por interferências locais

Um outro exemplo de desafio para a associação dos dados entre a ANA e SWOT está evidenciado na Figura 30, que mostra situações em que uma estação pode estar equidistante de dois nodes, um a montante e outro a jusante. Nesses casos, ambos os nodes podem ser considerados potenciais representantes da estação, o que gera uma associação múltipla. Uma solução simples seria utilizar a média entre os dois valores, porém essa abordagem ignora características hidrológicas relevantes.

Uma alternativa mais consistente é utilizar a área de drenagem como critério de escolha. A área de contribuição de um node reflete a porção da bacia que efetivamente escoa para aquele trecho do rio; portanto, quanto maior a área associada ao node, maior tende a ser sua representatividade hidrológica. Assim, entre dois nodes equidistantes, aquele com maior área de drenagem tende a reproduzir com maior fidelidade a dinâmica observada na estação fluviométrica. Não se trata de identificar o "node correto" de forma determinística, mas de adotar um critério hidrológico que aumenta a probabilidade de selecionar o node que melhor expressa o comportamento do curso d'água naquele ponto.



Figura 30 - Exemplo de desafio na associação por quantidade de *nodes* do SWOT (cor laranja) e de estações ANA (cor branca).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos demonstraram que o procedimento de ajuste espacial das estações fluviométricas e a comparação das áreas de drenagem calculadas neste estudo com as disponibilizadas pela ANA apresentaram boa concordância, com diferenças percentuais inferiores a 5%. Uma análise estatística por *boxplot* confirmou que a faixa de variação é estreita, com mediana próxima de zero, indicando ausência de tendência sistemática de super ou subestimativa. Isso confere consistência ao procedimento adotado.

Na etapa de comparação com os dados do SWOT, observou-se que a distância euclidiana, isoladamente, não é um bom indicador de compatibilidade, já que há casos com distâncias elevadas que apresentaram diferenças pequenas. Por isso, a área de drenagem foi considerada critério de maior peso na análise. A aplicação do índice de associação baseado em AHP permitiu estruturar a classificação das estações em diferentes níveis de compatibilidade no qual cerca de 43% foram levemente compatíveis, 22% medianamente compatíveis e 13% fortemente compatíveis, enquanto 22% foram incompatíveis. Essa distribuição mostra que o método consegue identificar tanto correspondências confiáveis quanto limites de aplicação.

Em termos de impacto, os resultados reforçam que o SWOT pode ser utilizado como complemento aos dados da ANA, ampliando a cobertura espacial e a precisão das informações hidrológicas, desde que consideras as limitações neste estudo. A metodologia proposta contribui para a integração entre essas bases distintas e abre caminho para análises em maior escala, com potencial de aplicação nacional. Além disso, o índice de associação fornece uma ferramenta objetiva para avaliar a confiabilidade da correspondência entre os dados dessas duas diferentes fontes, o que pode apoiar futuras pesquisas e políticas de monitoramento hidrológico.

No entanto, apesar do método demonstrar viabilidade e consistência, ele apresenta exigências relevantes em termos de tempo de processamento e memória computacional. A etapa de cálculo das áreas de drenagem, o ajuste espacial das estações e a aplicação do índice de associação demandam recursos significativos, especialmente quando se considera a possibilidade de ampliar a análise para grandes áreas. Portanto, embora os resultados sejam satisfatórios, a escalabilidade do método depende de otimizações técnicas e do uso de ferramentas computacionais mais avançadas.

Além dos critérios utilizados neste estudo, distância euclidiana e diferença de área de drenagem, a metodologia proposta pode ser ampliada para incluir outras variáveis hidrológicas e geomorfológicas que influenciam a correspondência entre os dados do satélite SWOT e as estações fluviométricas da ANA. Parâmetros como largura do canal, declividade da superfície líquida, variabilidade sazonal da área inundada, coerência temporal entre séries de nível e vazão, bem como a presença de interferências antrópicas (barramentos, desvios, estruturas hidráulicas), podem refinar significativamente o índice de associação. A incorporação desses fatores tende a tornar o processo de integração mais robusto, especialmente em regiões com alta complexidade hidrológica, contribuindo para uma representação mais fiel do comportamento fluvial observado pelo SWOT.

Nesse sentido, recomenda-se que trabalhos futuros explorem a aplicação do índice de associação em outras regiões do Brasil, não necessariamente refazendo todo o processo, mas testando diretamente os índices em diferentes contextos regionais para verificar sua consistência. Também é relevante avançar além da validação pontual em estações, buscando associar trechos inteiros de rios, o que pode aumentar a robustez da análise.

Além disso, a automatização de etapas que hoje exigem ajustes manuais, como a atribuição de valores negativos para diferenças de grandeza, deve ser explorada por meio de linguagens de programação, o que pode otimizar tempo e memória e aumentar a reprodutibilidade do método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTENAU, E. H. et al. *The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission river database (SWORD): A global river network for satellite data products*. Water Resources Research, [S. l.], v. 57, n. 7, e2021WR030054, 2021. DOI: 10.1029/2021WR030054.

BIANCAMARIA, Sylvain; LETTENMAIER, Dennis P.; PAVELSKY, Tamlin M. *The SWOT mission and its capabilities for land hydrology*. Surveys in Geophysics, v. 37, n. 2, p. 307–337, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). Manual de construção da Base Hidrográfica Ottocodificada do Brasil. Brasília: ANA, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). *Manual de Instalação de Estações Fluviométricas*. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/monitoramento-hidrologico-do-setor-eletrico/resolucao-conjunta-ana-aneel-127-2022/ManualInstalaoEstaesFluviomtricas.pdf. Acesso em: 12 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). *As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente*. Brasília: ANA, 2025. 57 p.: il.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). HidroWeb: apresentação. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 30 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). *Manual de procedimentos para instalação, operação e manutenção de estações fluviométricas*. Brasília: ANA, 2016. 67 p. il.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). *Nota Técnica nº 62/2023/SGH: estrutura e operação da Rede Hidrometeorológica Nacional*. Brasília: ANA, 2023a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). *Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2023b.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem*. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT/IPR, 2005. 133 p. (IPR. Publicação, 715).

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. Principles of geographical information systems. Oxford: Oxford University Press, 1998.

CHALAK, M. et al. *Estimation of river discharge solely from remote-sensing derived data: an initial study over the Yangtze River*. Remote Sensing, v. 10, n. 9, p. 1385, 2018.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988.

DURAND, M. et al. *A framework for estimating global river discharge from the Surface Water and Ocean Topography satellite mission*. Water Resources Research, v. 59, n. 4, 2023.

FRAPPART, F. et al. *Challenges and opportunities in using SWOT data for hydrological applications in large river basins*. Water, v. 12, n. 10, p. 2746, 2020.

JPL (2024). JPL D-109532. *SWOT Science Data Products User Handbook*. Jet Propulsion Laboratory. Internal Document, Pasadena, CA, 2024.

Laipelt, L., Comini de Andrade, B., Collischonn, W., de Amorim Teixeira, A., Paiva, R. C. D. D., & Ruhoff, A. (2024). *ANADEM: a digital terrain model for South America. Remote Sensing*, 16(13), 2321.

LAPPICY, T.; BELTRÃO, D.; SALES, L.; ALMEIDA, T.; PESSOA, G. G.; SOUZA, S. A.; FRASSON, R. P. M.; CICERELLI, R. E. *A large-scale evaluation of the Surface Water and Ocean Topography Mission measurements of lake water surface elevations: accuracy drivers and data quality strategies to enhance data availability and reliability*. Manuscrito submetido a: *Water Resources Research*, 2025. Disponível em:

https://d197for5662m48.cloudfront.net/documents/publicationstatus/277957/preprint_pdf/e7fd09de4e6bf6a6a804cf17e8cd005a.pdf. Acesso em: 12 de nov. de 2025.

LI, Zaihua; WANG, Jinbo; CHEN, Shuyi; ZHANG, Ying; WANG, Xinyu. *An observing system simulation experiment for ocean state estimation to assess the performance of the SWOT mission: Part 1—A twin experiment*. Journal of Geophysical Research: Oceans, v. 124, n. 1, p. 5–23, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JC014869>. Acesso em: 13 mai. 2025.

MIT – Massachusetts Institute of Technology, 2012, Michelson Interferometer, YouTube.

MOGHADDAM, M.; RODRIGUEZ, E.; ALSIP, C. M.; et al. *KaRIn: the Ka-Band Radar Interferometer of the SWOT Mission—Design and In-Flight Performance*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024.

MONTGOMERY, D. R.; BUFFINGTON, J. M. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. Geological Society of America Bulletin, 1997.

NASA. Flight Systems | Mission – NASA SWOT. [s.d.]. Disponível em: <https://swot.jpl.nasa.gov/mission/flight-systems/>. Acesso em: 13 mai. 2025.

NASA. Ground Systems & Data | Mission – NASA SWOT. [s.d.]. Disponível em: <https://swot.jpl.nasa.gov/mission/ground-systems-and-data/>. Acesso em: 13 mai. 2025.

NASA. Launch | Mission – NASA SWOT. [s.d.]. Disponível em: <https://swot.jpl.nasa.gov/mission/launch/>. Acesso em: 13 mai. 2025.

NASA. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): NASA Earth Science Data Systems, [s.d.]. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm>. Acesso em: 17 jun. 2025.

PAVELSKY, T. M. et al. *Assessing the potential global extent of SWOT river discharge observations*. Journal of Hydrology, v. 519, p. 1516–1525, 2014.

PERAL, Eva et al. *KaRIn, the Ka-Band Radar Interferometer of the SWOT Mission: Design and In-Flight Performance*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. International Series in Operations Research & Management Science 175, 2012. DOI: 10.1007/978-1-4614-3597-6.

TUCCI, Carlos E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002. 943 p.

VAN ZYL, Jakob J.; KIM, Yunjin. *Synthetic Aperture Radar Polarimetry*. Hoboken: Wiley, 2011. (JPL Space Science and Technology Series). Disponível em: <https://swot.jpl.nasa.gov/mission/launch/>. Acesso em: 13 mai. 2025.

WONGCHUIG-CORREA, Sly; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de; BIANCAMARIA, Sylvain; COLLISCHONN, Walter. *Assimilation of future SWOT-based river elevations, surface extent observations and discharge estimations into uncertain global hydrological models*. Journal of Hydrology, v. 590, p. 125473, 2020.

WOODFORD, Chris. *How do interferometers work?*. Explain That Stuff, 09 ago. 2023. Disponível em: <https://www.explainthatstuff.com/howinterferometerswork.html>. Acesso em: 13 mai. 2025.

YAO, Jiaqi; XU, Nan; WANG, Mengran; GONG, Peng; LU, Hui; CAO, Yongqiang; TANG, Xinming. *Promoting global surface water monitoring research with the SWOT satellite*. The Innovation Geoscience, v. 2, n. 4, p. 100099, 2024. DOI: 10.59717/j.xinn-geo.2024.100099.