



*Universidade Federal da Paraíba*  
*Centro de Tecnologia*  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**  
**– MESTRADO –**

Rafael Carneiro de Souza Barros

**EFEITOS DE MUDANÇA DE RESOLUÇÃO ESPACIAL EM  
REPRESENTAÇÕES TOPOGRÁFICAS E REDES DE DRENAGEM  
DERIVADAS DE MODELO DIGITAL DE TERRENO LIDAR DE  
ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL**

Orientador:  
Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz

João Pessoa – Paraíba

Março de 2023



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

**EFEITOS DE MUDANÇA DE RESOLUÇÃO ESPACIAL EM  
REPRESENTAÇÕES TOPOGRÁFICAS E REDES DE DRENAGEM  
DERIVADAS DE MODELO DIGITAL DE TERRENO LIDAR DE  
ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Rafael Carneiro de Souza Barros**

**Orientador: Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz**

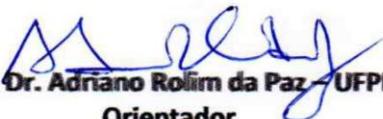
**João Pessoa – Paraíba**

**Março de 2023**

**“EFEITOS DE MUDANÇA DE RESOLUÇÃO ESPACIAL EM REPRESENTAÇÕES  
TOPOGRÁFICAS E REDES DE DRENAGEM DERIVADAS DE MODELO DIGITAL DE  
TERRENO LIDAR DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL”**

**RAFAEL CARNEIRO DE SOUZA BARROS**  
Dissertação aprovada em 28 de março de 2023

**Período Letivo: 2022.2**

  
**Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz – UFPB**  
Orientador

gov.br

Documento assinado digitalmente

**ADRIANO ROLIM DA PAZ**

Data: 29/07/2024 17:26:12-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

  
**Prof. Dr. Richarde Marques da Silva – UFPB**  
Examinador Interno

gov.br

Documento assinado digitalmente

**RICHARDE MARQUES DA SILVA**

Data: 31/07/2024 11:17:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

gov.br

Documento assinado digitalmente

**REJANE ENNES CICERELLI**

Data: 28/03/2023 14:28:09-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. Rejane Ennes Cicerelli – UnB**  
Examinadora Externa

**João Pessoa/PB**  
2023

B277e Barros, Rafael Carneiro de Souza.

Efeitos de mudança de resolução espacial em representações topográficas e redes de drenagem derivadas de modelo digital de terreno LiDAR de alta resolução espacial / Rafael Carneiro de Souza Barros. -João Pessoa, 2023.

90 f. : il.

Orientação: Adriano Rolim da Paz. Dissertação  
(Mestrado) - UFPB/CT.

1. Topografia - Alta resolução espacial. 2. Redes dedrenagem - Alta resolução espacial. 3. Alta resolução espacial - Tecnologia LiDAR. 4. Modelos Digitais de Terreno - MDT. I. Paz, Adriano Rolim da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 528.4(043)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que sempre me apoiaram e tornaram possível a minha trajetória pelo caminho dos estudos.

A minha esposa que esteve sempre presente com incentivos, apoio, dicas e compreensão por todo o período.

Ao meu irmão por incentivar e ajudar de uma forma ou de outra com problemas durante o mestrado.

Ao Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz, pela orientação, pela disposição de sempre querer ajudar e passar conhecimentos. Por confiar no meu potencial e incentivar o processo de aprendizado. Pelas dicas valiosas durante este período.

Aos colegas de grupo de pesquisa. Rafael Mendonça por ajudar com dicas e conhecimentos para processar os dados.

Aos colegas e professores do Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPB, por ajudarem a expandir os meus conhecimentos.

A CAPES pela bolsa de estudos concedida durante o desenvolvimento do mestrado.

Aos membros da banca, pelas contribuições e sugestões: Prof. Dr. Richarde Marque da Silva e Profa. Dra. Rejane Ennes Cicerelli.

Aos meus amigos que de forma direta e indireta me ajudaram nessa jornada.

Muito obrigado a todos.

## RESUMO

A utilização de modelos digitais de terreno (MDT) é de grande importância para estudos ambientais, por exemplo, estudos hidrológicos. Nas últimas décadas, devido a avanços tecnológicos, diversos produtos MDT possuem acesso gratuitos, dentre eles, alguns produtos com alta resolução espacial, especialmente derivados de tecnologia LiDAR. A alta resolução espacial apresenta maior detalhamento das características topográficas, o que justifica a aquisição de tais modelos. Entretanto, trabalhar com modelos de alta resolução espacial provoca maior custo computacional e requer equipamentos de alto desempenho, o que por vez pode inviabilizar o uso destes modelos. Uma das alternativas para viabilizar o uso deste tipo de modelo é realizar a degradação da resolução espacial. Porém, esse procedimento provoca perda de informação. O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos causados pela mudança de resolução espacial em representações topográficas e redes de drenagem extraídas de modelos digitais de terreno de alta resolução espacial derivado de tecnologia LiDAR. Para isso, foram aplicadas três técnicas de reamostragem: agregação pela média, interpolação bilinear e pelo vizinho mais próximo, para degradar MDT na resolução espacial de 1 metro em múltiplas resoluções (2, 5, 10, 30 e 100 m). Os dados MDT foram provenientes do programa Pernambuco Tridimensional – PE3D. Tomou-se como área de estudo de caso a sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém com aproximadamente 550 km<sup>2</sup>. A avaliação dos resultados foi realizada por meio de oito métricas: quantificação de custo operacional, comparação entre perfis topográficos transversais (PTT), variação relativa de curvas hipsométricas, inspeção visual de redes de drenagem, distância média entre traçados de redes de drenagem, variação relativa de comprimento de rio, percentual dentro do *buffer*, área de delimitação de bacias hidrográficas e quantificação de custo computacional (tempo de processamento e espaço de armazenamento em disco). Os resultados apontam que não houve diferença significativa entre as técnicas de reamostragem para uma mesma resolução espacial. Já entre as resoluções espaciais houve diferenças consideráveis, variando conforme a métrica aplicada. Nas métricas que avaliam representações topográficas identificou-se pequena diferença nos Perfis Topográficos Transversais (PTT) para resolução de 100 metros. Em se tratando da avaliação das redes de drenagem, ocorre deslocamentos de confluências e diminuição de comprimento de rios. A diferença entre delimitação de bacia hidrográfica é ínfima, inferior a 2%. E, o custo computacional reduz de forma expressiva com a degradação da resolução. No geral, a resolução espacial de 2 metros apresentou os melhores resultados, sendo a mais indicada para usar em caso de necessidade de degradação de resolução espacial. Em relação as redes de drenagem, para as demais resoluções espaciais em ordem de melhor desempenho foram 10, 5, 30 e 100 metros.

**PALAVRAS-CHAVE:** MDT de alta resolução espacial; LiDAR; efeitos de mudança de resolução espacial.

## ABSTRACT

The use of digital terrain models (DTM) has great importance for environmental studies, for example, hydrological studies. In recent decades, due to technological advances, several DTM products have become free, among them, products with high spatial resolution, especially derived from LiDAR technology. The high spatial resolution presents greater detailing of the topographic characteristics, which justifies the acquisition of such models. However, working with high spatial resolution models imply on higher computational cost and require high-performance equipment, which may make the use of these models unfeasible. One of the alternatives to enable the use of this type of model is to coarsen the spatial resolution. However, this procedure causes loss of information. The objective of this work is to evaluate the effects caused by the change of spatial resolution in topographic representations and drainage networks extracted from high spatial resolution digital terrain models derived from LiDAR technology. For this, three resampling techniques were applied: mean aggregation, bilinear interpolation and nearest neighbour, to coarsen a DTM at 1-meter spatial resolution in multiple resolutions (2, 5, 10, 30 and 100 m). The origin of DTM data is the Pernambuco Tridimensional – PE3D program. The sub-basin of the Sirinhaém river basin with approximately 550 km<sup>2</sup> was taken as case study area. The evaluation of the results was carried out using eight metrics: quantification of operational cost, comparison between cross-sectional topographic profiles (PTT), relative variation of hypsometric curves, visual inspection of drainage networks, average distance between drainage networks tracings, relative variation of river length, percentage within the buffer, watershed delimitation area and computational cost quantification (processing time and space size in disk). The results indicate that there was no significant difference between the resampling techniques. On the other hand, among spatial resolution there were considerable differences, varying according to the applied metric. In the metrics that evaluated topographic representations, a minor difference was identified in the PTT for a resolution of 100 meters. The assessment of drainage networks, showed that there were displacements of confluences and a decrease in the length of rivers. There was no significance difference between the delimitation of the catchment area. Furthermore, the computational cost reduced significantly with resolution coarsening. In general, the spatial resolution of 2 meters presented the best results, being the most indicated to use in case of resample need. The others spatial resolution in order of the best performance were 10, 5, 30 and 100 meters.

**KEYWORDS:** high spatial resolution DTM; LiDAR; change of spatial resolutions effects.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo digital de superfície e do terreno. ....	17
Figura 2 – Componentes sistema LiDAR. ....	20
Figura 3 – Tipos de direções de fluxo. Cores mais escuras possuem valor de declividade maiores. Em (a) direção de fluxo unidirecional, e em (b) direção fluxo multidirecional. ....	21
Figura 4 – (a) Possíveis direções de fluxo em 8 direções e (b) direção de fluxo atribuída para maior declividade. ....	22
Figura 5 – Processamento do raster direções de fluxo gerando o raster de áreas acumuladas... 23	23
Figura 6 – Reamostragem de MDT pelo método de agregação pelo valor máximo. ....	26
Figura 7 – Encostas e rios derivados dos seis MDEs. ....	28
Figura 8 – Comprimento de rio em função da resolução espacial para três bacias estudadas. ..	30
Figura 9 – Delimitação de bacia utilizando o MDE de 1 e 50 metros de resolução espacial.....	31
Figura 10 – Mudança na área da bacia provocada por técnica de reamostragem por resolução espacial.....	31
Figura 11 – Mapas de inundação da mesma área produzidos por resoluções espaciais diferentes.	33
Figura 12 – Localização da área de estudo.....	35
Figura 13 – Fluxograma com etapas da metodológicas. ....	37
Figura 14 – Processamento dos dados de elevação pelo algoritmo D8 gerando o raster direções de fluxo com os códigos de direção. ....	43
Figura 15 – Rede de drenagem de referência com codificação de trechos de rios.....	45
Figura 16 – Distância média entre redes de drenagem: calculada por $\Delta A_i / L$ . ....	47
Figura 17 – Localização dos perfis topográficos transversais.....	50
Figura 18 – Perfil topográfico transversal 1: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.	52
Figura 19 – Perfil topográfico transversal 2: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.	53
Figura 20 – Perfil topográfico transversal 3: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.	54
Figura 21 – Curvas hipsométricas: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros. .	56
Figura 22 – Erro relativo de curvas hipsométricas: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.....	57

Figura 23 – Redes de drenagem: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros. .	59
Figura 24 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 21 e 22: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 2 metros.....	60
Figura 25 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 13 e 26, 9 e 11, 10 e 4, 27 e 16: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 5 metros. ....	60
Figura 26 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 21 e 22: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 10 metros.....	61
Figura 27 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 13 e 26, 9 e 11, 10 e 4, 27 e 16: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 30 metros. ....	62
Figura 28 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 13 e 26, 9 e 11, 10 e 4, 27 e 16: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 100 metros. ....	62
Figura 29 – Distância média entre trechos para métodos de reamostragem: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros. ....	64
Figura 30 – Diferença relativa de comprimento entre trechos para métodos de reamostragem: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.....	69
Figura 31 – Percentual dentro do buffer de trechos para métodos de reamostragem: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros. ....	73
Figura 32 – Computação de áreas de concordância, omissão e comissão na delimitação de bacias hidrográficas: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.....	77
Figura 33 – Tempo de processamento de algoritmos por resolução espacial. ....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Codificação adotada para os produtos derivados de MDTs reamostrados .....	38
Tabela 2 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de distância média para redes de drenagem reamostradas por agregação pela média. ....	65
Tabela 3 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de distância média para redes de drenagem reamostradas por interpolação bilinear.....	66
Tabela 4 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de distância média para redes de drenagem reamostradas por interpolação pelo vizinho mais próximo. ....	66
Tabela 5 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de diferença relativa para a rede de drenagem reamostrada por agregação pela média.....	70
Tabela 6 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de diferença relativa para a rede de drenagem reamostrada por interpolação bilinear. ....	70
Tabela 7 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de diferença relativa para a rede de drenagem reamostrada por interpolação pelo vizinho mais próximo.....	71
Tabela 8 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de percentual dentro do buffer para a rede de drenagem reamostrada por agregação pela média. ....	74
Tabela 9 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de percentual dentro do buffer para a rede de drenagem reamostrada por interpolação bilinear.....	75
Tabela 10 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de percentual dentro do buffer para a rede de drenagem reamostrada por interpolação pelo vizinho mais próximo. ....	75
Tabela 11 – Quantidade de linhas, colunas e <i>pixels</i> por resolução espacial.....	79
Tabela 12 – Espaço de armazenamento em disco de arquivos processados e redução. ....	79
Tabela 13 – Tempo de processamento para algoritmo Fill Sinks XXL. ....	80
Tabela 14 – Tempo de processamento para algoritmo Flow Accumulation. ....	80
Tabela 15 – Tempo de processamento para algoritmo Channel Network.....	80

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	16
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
<b>3.1 Modelo Digital de Elevação</b> .....	17
3.1.1 Conceito .....	17
3.1.2 Geração de MDT .....	18
3.1.3 Pré-processamento de MDT .....	19
3.1.4 Dados LiDAR .....	19
<b>3.2 Produtos derivados de MDT</b> .....	20
3.2.1 Direções de Fluxo .....	21
3.2.2 Áreas acumuladas de drenagem .....	22
3.2.3 Redes de drenagem .....	23
3.2.4 Delimitação de bacia hidrográfica .....	24
<b>3.3 Técnicas de reamostragem de MDT</b> .....	25
3.3.1 Técnica de Agregação .....	25
3.3.2 Técnica de filtragem .....	26
<b>3.4 Efeitos de mudança de resolução espacial de MDE/MDT</b> .....	27
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	35
<b>4.1 Características da área de estudo</b> .....	35
<b>4.2 Visão geral da metodologia</b> .....	36
<b>4.3 Coleta e preparação de dados MDT</b> .....	38
4.3.1 Aquisição de cenas de MDT-LiDAR .....	38
4.3.2 Filtragem de valor nulo .....	39
4.3.3 Concatenação de cenas MDT-LiDAR .....	39
<b>4.4 Reamostragem para degradação da resolução espacial do MDT de referência</b> .....	39
4.4.1 Agregação pela média .....	40
4.4.2 Interpolação bilinear .....	40
4.4.3 Interpolação pelo vizinho mais próximo .....	41
<b>4.5 Extração de representações topográficas</b> .....	41
<b>4.6 Processamento de MDT para caracterização de redes de drenagem e bacias hidrográficas</b> .....	42
4.6.1 Remoção de depressões espúrias de MDTs .....	42
4.6.2 Cálculo das direções de fluxo .....	42
4.6.3 Cálculo de áreas acumuladas de drenagem .....	43

4.6.4	Determinação das redes de drenagem .....	44
4.6.5	Delimitação de bacia hidrográfica.....	45
<b>4.7</b>	<b>Aplicação de métricas de avaliação .....</b>	<b>46</b>
4.7.1	Comparação entre Perfis Topográficos Transversais (PTT) .....	46
4.7.2	Variação relativa de curvas hipsométricas .....	46
4.7.3	Inspeção visual de redes de drenagem .....	46
4.7.4	Distância média entre traçados de redes de drenagem .....	47
4.7.5	Quantificação de comprimento do rio principal e trechos.....	47
4.7.6	Percentual dentro de <i>buffer</i> (PDB) .....	48
4.7.7	Área de delimitação de bacias hidrográficas .....	48
4.7.8	Quantificação de custo computacional.....	49
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>5.1</b>	<b>Comparação entre Perfis Topográficos Transversais (PTT) .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise de curvas hipsométricas .....</b>	<b>55</b>
<b>5.3</b>	<b>Inspeção visual de redes de drenagem.....</b>	<b>58</b>
<b>5.4</b>	<b>Distância média entre redes de drenagem .....</b>	<b>63</b>
5.4.1	Avaliação por trechos.....	63
5.4.2	Avaliação por resolução .....	65
<b>5.5</b>	<b>Quantificação de comprimento do rio principal e trechos .....</b>	<b>67</b>
5.5.1	Avaliação por trechos.....	67
5.5.2	Avaliação por resolução .....	68
<b>5.6</b>	<b>Percentual dentro de <i>buffer</i> (PDB).....</b>	<b>71</b>
5.6.1	Avaliação por trechos.....	72
5.6.2	Avaliação por resolução das redes de drenagem reamostradas.....	74
<b>5.7</b>	<b>Delimitação de bacia hidrográfica .....</b>	<b>75</b>
<b>5.8</b>	<b>Quantificação de custo computacional.....</b>	<b>78</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>83</b>
<b>6.2</b>	<b>Recomendações.....</b>	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>86</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) é de grande valia para uma gama de estudos ambientais. Durante a última década vários produtos MDE tornaram-se públicos, aumentando sua aplicação em pesquisas e contribuindo de forma relevante na temática dos recursos hídricos (WOODROW *et al.*, 2016). O MDE pode ser chamado de Modelos Digitais de Terreno (MDT) quando representam a elevação do terreno e Modelo Digital de Superfície quando tem a influência de objetos acima do terreno como vegetação e construções (UEMOTO, 2021).

Os MDEs são frequentemente utilizados para fins de gestão ambiental, fornecendo informações importantes para o mapeamento de recursos naturais e desastres naturais que sofrem influência da topografia e em diversos modelos preditivos de utilidade pública, por exemplo, modelos climáticos, modelos chuva-vazão e modelos de estimativa e propagação de cheias (ROOSTAEE e DENG, 2022).

Atualmente existem diversas fontes de MDE. Desde os de alta resolução espacial e precisão, porém de custos elevados, por exemplo, derivados de tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR), aos de menor resolução espacial, como *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), *Shuttle Radar Topography Mission*), ALOS (*Advanced Land Observing Satellite* (SRTM) (AZIZIAN e BROCCA, 2019).

A disponibilização de MDTs-LiDAR vem gerando o crescimento de estudos que tem como objetivo explorar a comparação desse tipo de MDE com levantamentos globais amplamente utilizados, por exemplo, os MDEs de menor resolução espacial citados. Estas comparações tendem a avaliar qual modelo consegue entregar produtos com maior acurácia em relação a parâmetros topográficos e hidrológicos (PERSENDT e GOMEZ, 2015).

A aquisição de MDT-LiDAR, de forma geral, é justificada pelo alto grau de detalhamento do produto (LINDSAY *et al.*, 2019). Geralmente este tipo de produto apresenta resoluções espaciais indo de poucos centímetros até 3 metros (MUHADI *et al.*, 2020). Por isso, eles conseguem representar pequenas variações da topografia, adicionando maior complexidade ao modelo. O que pode ser indesejável, pois impacta na caracterização topográfica e dificulta a estimativa de índices geomorfológicos como declividade e direções de fluxo (LINDSAY *et al.*, 2019; LINDSAY e CREED, 2005).

Embora se tenha aumentado o uso desse tipo de modelo, sua disponibilidade ainda é escassa devido ao alto custo de aquisição e dificuldades técnicas na obtenção e processamento dos dados (ZHANG *et al.*, 2019). Para países em desenvolvimento, por exemplo, existem desafios tanto financeiros como práticos envolvendo a manipulação de MDT-LiDAR de grandes áreas. Isso faz com que a maior resolução espacial não seja necessariamente a mais interessante devido ao alto custo de processamento computacional, tornando-se preferível trabalhar com MDT de resolução espacial ideal conforme tamanho de área de estudo e capacidade de processamento (MUTHUSAMY *et al.*, 2021).

Sendo assim, uma das alternativas para se trabalhar com MDT com resolução espacial ideal é realizar a reamostragem de MDT-LiDAR para uma resolução espacial mais degradada. A reamostragem possibilita definir uma resolução de meio termo entre resoluções grosseiras e finas, proporcionando nível de detalhe que forneça densidade de informação adequada e minimizando o tempo de processamento de acordo com o objetivo escolhido (WINZELER *et al.*, 2022).

Pesquisas mostram que devido às limitações como capacidade computacional, tempo de processamento de algoritmos e o grande tamanho em disco dos dados originais LiDAR, o MDT-LiDAR pode ser reamostrado para resoluções mais grosseiras para que possibilite a extração de características hidrológicas e geomorfológicas em escalas desejadas (PERSENDT e GOMEZ, 2015).

A reamostragem de MDT-LiDAR para resoluções mais grosseiras se torna primordial para viabilizar o uso desses modelos em computadores de médio a baixo desempenho, áreas de estudo de grandes dimensões e realização de cruzamento de dados com produtos de resolução espacial mais grosseira (LE COZ *et al.*, 2009).

Ainda mais, a simplificação provocada pela reamostragem pode beneficiar esforços de gerenciamento, permitindo operações mais rápidas e menos onerosa de modelos matemáticos em escala de bacias hidrográficas. Os resultados destas operações facilitam o trabalho de gestores, pois proporcionam tomadas de decisões priorizadas e mais velozes (LISENBY e FRYIRS, 2017).

Diversos estudos em diferentes áreas têm avaliado os efeitos causados pela aplicação de diferentes técnicas de reamostragem em MDT-LiDAR e mostram que o desempenho de cada técnica pode variar de acordo com a resolução espacial degradada e o plano de informação analisado (ERDBRÜGGER *et al.*, 2021; GOULDEN *et al.*, 2014; MELES *et al.*, 2020; MUTHUSAMY *et al.*, 2021; SLIWINSKI *et al.*, 2022).

Para ilustrar isso, trabalhos anteriores mostram que a reamostragem de MDT-LiDAR para resoluções mais grosseiras impacta diferentes índices topográficos. Por exemplo, afeta a estimação de valores de declividade e resulta na subestimação de áreas de contribuição, comprimento dos caminhos de fluxo e da rede de drenagem de bacias hidrográficas (ERDBRÜGGER *et al.*, 2021; GOULDEN *et al.*, 2014; SORENSEN e SEINERT, 2007; WOODROW *et al.*, 2016).

Também é relatado que, com o aumento do grau de degradação da resolução espacial ocorre a eliminação de feições topográficas, diminuição dos valores de declividade, simplificação da hidrografia de superfícies complexas e superestimação da conectividade hidrológica e do escoamento superficial, além de redução significativa do custo computacional (GROHMANN, 2015; HABTEZION *et al.*, 2016; LE COZ *et al.*, 2009; MUTHUSAMY *et al.*, 2021; YANG e CHU, 2013).

A perda de informação ocasionada pela degradação da resolução espacial pode provocar erros em produtos derivados de MDT e, conseqüentemente afetar outros planos de informação. Por exemplo, erros em produtos derivados de MDT como delimitação de bacia, comprimento do rio, caminhos de fluxo e rede de drenagem podem impactar de forma negativa o cálculo do balanço hídrico de bacias hidrográficas, representação de ondas de cheias, transporte de sedimentos e poluentes, e recarga de águas subterrâneas (SOUSA e PAZ, 2017).

Portanto, o MDT-LiDAR é um produto inovador de grande potencial para diversas aplicações, podendo ir de utilização em pesquisas científicas, gestão e política pública a implementação de empreendimentos. Entretanto, o alto custo de processamento requerido pelo MDT-LiDAR tem levado à necessidade de se degradar a resolução espacial. Por isso, é importante entender de que forma a degradação de resolução espacial afeta a perda de informação no MDT-LiDAR. Além disso, identificar os padrões de perda de informação é de grande importância para nortear futuros trabalhos com este tipo de dados.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos causados pela degradação da resolução espacial em representações topográficas e redes de drenagem derivadas de MDT-LiDAR com resolução espacial de 1 metro, tomando como área de estudo de caso uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, localizada no estado de Pernambuco. Para isso são utilizadas três técnicas de reamostragem e cinco resoluções espaciais.

## 2. OBJETIVOS

### **Objetivo geral:**

Avaliar os efeitos causados pela degradação de resolução espacial de MDT-LiDAR em representações topográficas e redes de drenagem.

### **Objetivos específicos:**

- Identificar os padrões de perda de informação em função do nível de degradação da resolução espacial do MDT-LiDAR;
- Avaliar a influência de diferentes técnicas de reamostragem na perda de informação do MDT-LiDAR;
- Quantificar custo computacional para tempo de processamento de algoritmos e espaço de armazenamento em disco de produtos derivados de MDT-LiDAR.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Modelo Digital de Elevação

##### 3.1.1 Conceito

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação numérica da elevação da superfície da Terra, sendo mais comumente estruturado em forma de grade retangular, preferencialmente quadrada, e podendo também ser estruturado em discretização triangular (FISHER e TATE, 2006). Os valores associados ao MDE podem representar dados da elevação do terreno, como também do que se encontra acima do terreno, por exemplo vegetação e construções.

Desta forma, MDE é um termo genérico, podendo ser também chamado de Modelo Digital de Superfície (MDS) quando os dados de elevação são referentes à altura da superfície, incluindo os artefatos sobre o terreno, e Modelo Digital do Terreno (MDT), em que os valores de elevação se referem apenas ao terreno, excluindo, assim, representação de objetos como prédios e cobertura vegetal (UEMOTO, 2021). A Figura 1 ilustra a diferença de MDS e MDT.

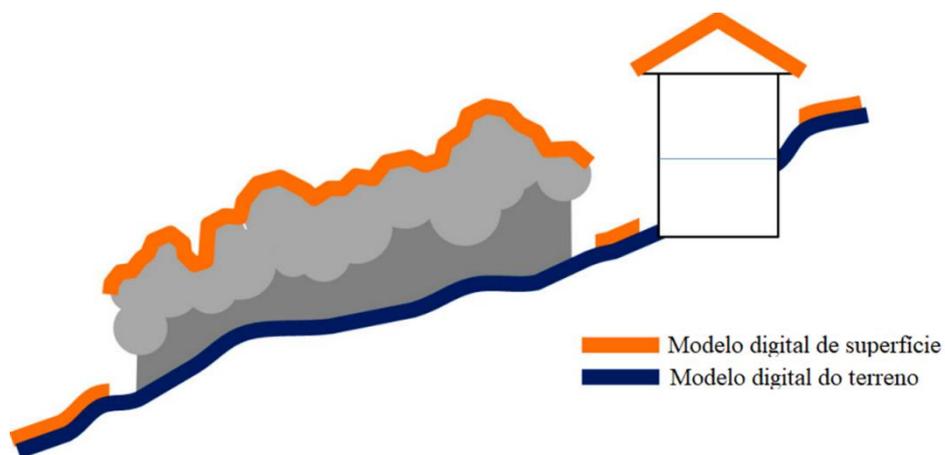


Figura 1 – Modelo digital de superfície e do terreno.

Fonte: adaptado de Polidori e El Hage (2020).

A escolha para a utilização de MDT ou MDS deve ser analisada de acordo com o objetivo do estudo. Por exemplo, para estudos voltados para aplicações hidrológicas o uso

de MDT é mais apropriado, enquanto para procedimento de ortorretificação de imagens o MDS é mais adequado (POLIDORI e EL HAGE, 2020).

O aumento da disponibilidade de MDEs, tanto de forma gratuita como comercial, tem contribuído para maior utilização deste tipo de modelo em diversas aplicações. O MDE pode ser usado para uma gama de aplicações, dentre elas, estudos geocientíficos e análises espaciais. Por exemplo, a partir do MDE é possível extrair características de bacia hidrográficas como rede de drenagem e delimitação de bacia, além de ser usado como dado de entrada em modelos hidrológicos (HOPKINSON *et al.*, 2009)

### 3.1.2 Geração de MDT

A geração de Modelos Digitais de Elevação evoluiu de forma rápida nas últimas décadas, com fontes e métodos de processamento de dados cada vez mais sofisticados (WILSON, 2012). Entretanto, a forma como é construído o MDT ainda segue duas etapas principais. A primeira sendo a captura dos dados de elevação. E a segunda etapa é a criação do modelo digital da superfície desejada com os dados adquiridos (HENGL e REUTER, 2009).

Quanto à aquisição dos dados, existem três maneiras dominantes de adquiri-los para construção de MDT: dados coletados em campo a partir de equipamentos topográficos; dados derivados de cartas topográficas já existentes (através da digitalização dos dados da carta); e dados obtidos a partir de sensoriamento remoto (imagens geradas por equipamentos acoplados a satélites ou aeronaves) (NELSON *et al.*, 2009).

Em relação à criação do modelo, este pode ser representado em duas principais estruturas de grades. A forma de grade regular e a forma irregular, por exemplo, malha quadrada e rede triangular irregular (TIN), respectivamente. A grade regular possui vantagens na manipulação de dados quando comparada com a irregular, entretanto, é preciso uma etapa de interpolação para que os dados de elevação sejam reamostrados com intuito de ajusta-los às dimensões da grade, o que não é necessário para grades irregulares (POLIDORI e EL HAGE, 2020).

Vale ressaltar que o tipo de interpolador utilizado na geração do MDT é baseado na densidade de dados disponíveis. Quanto maior a densidade dos dados, menor é a influência do interpolador na qualidade do MDT gerado. E quanto menor a densidade de dados e presença de dados inválidos, maior é a influência do interpolador na qualidade do MDE (POLIDORI e EL HAGE, 2020).

### 3.1.3 Pré-processamento de MDT

O pré-processamento de MDT é utilizado com o objetivo de aumentar a qualidade do modelo, para isso são utilizados algoritmos capazes de reduzir erros aleatórios e sistemáticos presentes em MDTs (REUTER *et al.*, 2009). A frequência e a magnitude destes erros dependem da tecnologia e método usados para a aquisição de dados de elevação (WILSON, 2012). Assim, a etapa de pré-processamento é necessária para que se possa realizar análises geomorfométricas com maiores precisões.

O grande crescimento do número de MDTs gerados a partir de dados de sensoriamento remoto demandou a criação de novos métodos de pré-processamento (WILSON, 2012). Atualmente existem diversos métodos de pré-processamento, cada um deles mais adequado para determinado tipo de erro. Pode-se dizer que o pré-processamento de MDTs presente em vários programas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) atuais possui três objetivos principais: remover erros; promover uma melhor aproximação da superfície do terreno e de processos hidrológicos/ecológicos (REUTER *et al.*, 2009).

De acordo com a técnica utilizada para a aquisição dos dados de elevação, a quantidade de etapas de pré-processamento pode ser maior ou menor. Por exemplo, para MDTs produzidos a partir de dados de equipamentos de *scanning* são necessárias várias etapas de pré-processamento antes de que se possam ser realizadas análises geomorfométricas (REUTER *et al.*, 2009).

### 3.1.4 Dados LiDAR

O LiDAR é um sistema de sensoriamento remoto ativo capaz de produzir dados de elevação com alta precisão, tornando este tipo de informação importante para diversas áreas do conhecimento (HUI *et al.*, 2019). O sistema LiDAR utiliza scanner a laser acoplado a plataformas (aeronaves, satélites, veículos terrestres ou fixa em solo). Esse sistema emite pulsos de laser em direção ao solo, o tempo da chegada ao solo e retorno do pulso ao sensor é captado, e com esse dado é então calculada a distância entre solo e o sensor formando uma nuvem de pontos com coordenadas planialtimétricas (WEDAJO, 2017).

Geralmente o sistema LiDAR é composto por scanner a laser que emite e recebe o sinal de pulsos, sistema de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*), sistema de orientação inercial (*Inercial Measurement Units – IMU*), câmera fotográfica ou

de vídeo, computador e sistema para armazenamento de dados (MENDONÇA e PAZ, 2022; MUHADI *et al.*, 2020).

Além da capacidade de produzir dados com elevada precisão, o LiDAR é capaz de operar a qualquer hora do dia, durante o dia ou à noite, como também em condições de tempo nublado (MUHADI *et al.*, 2020). Ainda mais, o laser utilizado no sistema LiDAR é capaz de penetrar em áreas florestadas, fornecendo dados mais realísticos da superfície (VILLANUEVA *et al.* 2019). Essas características dão vantagem ao dados LiDAR em relação a outras fontes de dados altimétricos. A Figura 2 ilustra componentes do sistema LiDAR.

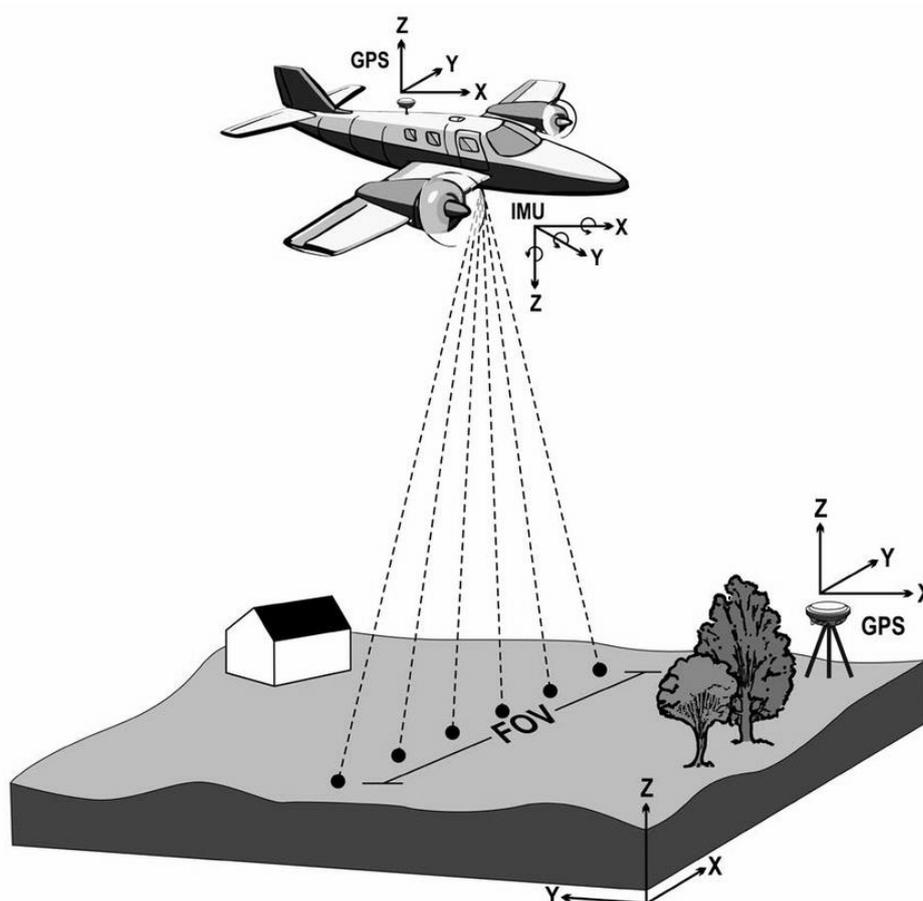


Figura 2 – Componentes sistema LiDAR.

Fonte: Moralejo *et al.* (2018).

### 3.2 Produtos derivados de MDT

Diversas áreas de estudo como hidrologia, ecologia e geologia utilizam MDTs para diferentes tipos de análises. Isto se deve ao fato de ser possível efetuar a derivação de

parâmetros geomorfométricos de forma direta e rápida a partir de MDTs, por exemplo, declividade e insolação (OLAYA, 2009).

### 3.2.1 Direções de Fluxo

O fluxo natural das águas é movido principalmente pela força da gravidade e a partir de modelos digitais de elevação é possível reproduzir o comportamento do fluxo de forma aproximada (GRUBER e PECKHAM, 2009). Isso é possível devido ao desenvolvimento de algoritmos específicos para identificação de direções de fluxo.

As direções de fluxo representam o plano de informação hidrológico que serve de base para a derivação de outros parâmetros hidrológicos importantes, como delimitação de bacias, determinação de área e rede de drenagem, determinação de comprimento de trechos de rio e outros (BUARQUE *et al.*, 2009).

O algoritmo *Deterministic Eight Neighbours* – D8 (O'CALLAGHAN e MARK, 1984), usado para identificar direções de fluxo unidirecional, é um dos mais importantes já desenvolvidos e ainda continua a ser frequentemente utilizado (ARIZA-VILLAVARDE *et al.*, 2015). Ao longo dos anos, outros algoritmos foram desenvolvidos aplicando diferentes abordagens, como a de direção de fluxo multidirecional (FREEMAN, 1991; QUINN *et al.*, 1991; TARBOTON, 1997). A Figura 3 mostra os tipos de direções de fluxo.

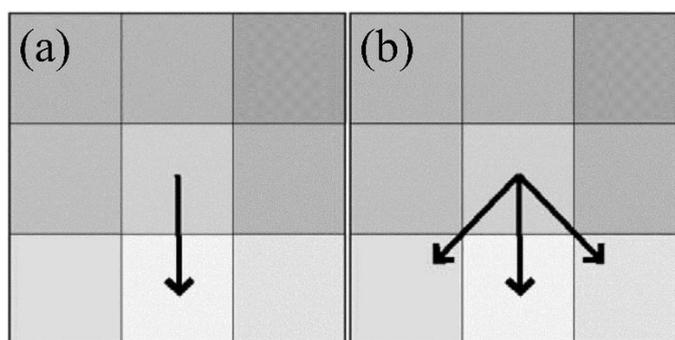


Figura 3 – Tipos de direções de fluxo. Cores mais escuras possuem valor de elevação maiores. Em (a) direção de fluxo unidirecional, e em (b) direção fluxo multidirecional.

Fonte: adaptado de Gruber e Peckham (2009).

A maioria dos algoritmos que determinam direções de fluxo unidirecional se baseia no método D8. Nesse método a direção de fluxo de um *pixel* é atribuída a um vizinho dentre oito, o qual possuir maior valor de declividade, calculada como sendo a diferença de elevação entre o *pixel* central e vizinho dividida pela distância entre os centros dos *pixels*

(PAZ e COLLISCHONN, 2008). A Figura 4 ilustra as direções possíveis e a direção de fluxo atribuída após o cálculo de direções de fluxo.

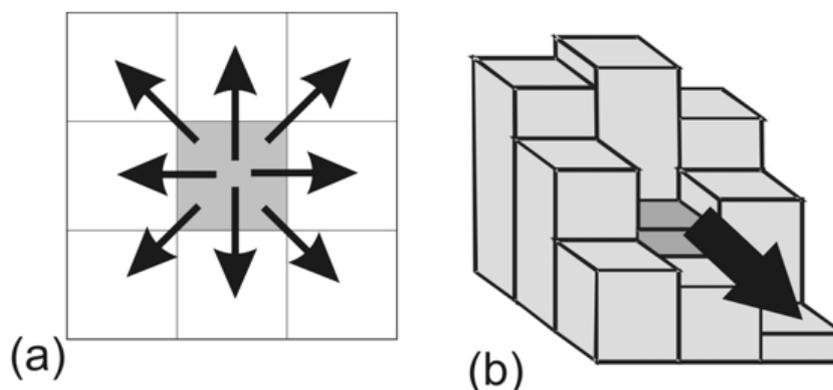


Figura 4 – (a) Possíveis direções de fluxo em 8 direções e (b) direção de fluxo atribuída para maior declividade.

Fonte: Paz e Collischonn (2008).

Ao decorrer do tempo diversos trabalhos desenvolveram melhorias para o método D8, com o objetivo de solucionar problemas de definição de direção de fluxos em área plana e de depressões espúrias, e elevado custo computacional requerido para processar MDEs com grande quantidade de dados (BUARQUE *et al.*, 2009).

A seleção do método e algoritmo de direções de fluxo é de grande importância, pois uma representação errônea pode provocar erros significativos nos subseqüentes parâmetros hidrológicos derivados. Por exemplo, erros apresentados em direções de fluxo podem influenciar de maneira indesejada em resultados de modelos hidrológicos como balanço hídrico, localização e extensão de áreas alagadas, transporte de sedimentos e poluentes (SOUSA e PAZ, 2017).

### 3.2.2 Áreas acumuladas de drenagem

Uma das análises hidrológicas de terreno mais importantes é a determinação das áreas acumuladas de drenagem, pois através delas é possível determinar escoamento superficial resultante de precipitações, o fluxo subterrâneo, transporte de sedimentos e poluentes, locais susceptíveis a erosão (FREEMAN, 1991).

O cálculo das áreas acumuladas de drenagem (também chamada de área de contribuição) é feito a partir das direções de fluxo (QIN e ZHAN, 2012). Para tal, a cada *pixel* é atribuído o valor referente ao somatório das áreas superficiais dos *pixels* ou

quantidade de *pixels* em que o escoamento flui para o *pixel* em análise (JENSON e DOMINGUE, 1988). A Figura 5 ilustra o para o *raster* de direções de fluxo e o de áreas acumuladas.

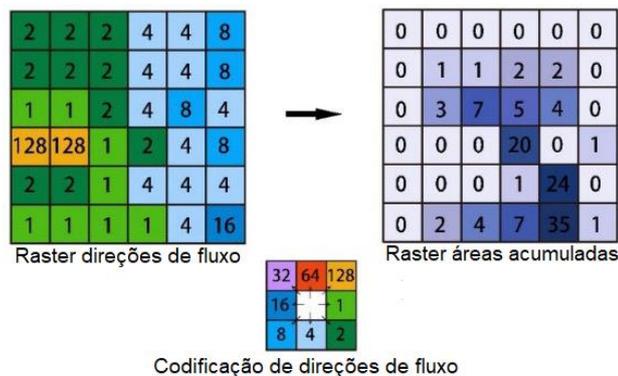


Figura 5 – *Raster* de direções de fluxo gerando o *raster* de áreas acumuladas.

Fonte: adaptado de ESRI (2022).

### 3.2.3 Redes de drenagem

Através do avanço dos computadores, desenvolvimento de algoritmos específicos e uso de modelos digitais de elevação, se tornou factível a extração direta de características hidrológicas da superfície da terra como bacias hidrográficas, redes de drenagem, cabeceiras de rio e índices de saturação de solo (ARIZA-VILLAVARDE *et al.*, 2015).

Um das tarefas básicas quando se deseja realizar análises hidrológicas é a determinação da rede de drenagem, pois esse produto capacita a realização de diversas aplicações, como previsão de áreas alagadas, hidráulica dos fluxos e modelagem de transporte e deposição de poluentes (WANG e YIN, 1998). Rede de drenagem pode ser definida como sendo as linhas de fluxo onde os processos fluviais atuam para transportar água e sedimentos de determinada região sob a força da gravidade (O'CALLAGHAN e MARK, 1984).

A extração das redes de drenagem é uma das análises hidrológicas de terreno mais importantes, sendo que os métodos mais utilizados para esta ação são baseados em rotinas de direções de fluxos (GONG e XIE, 2009). O método mais comum é remover depressões espúrias presentes no MDE, seguido da computação do *raster* de áreas acumuladas e em sequência adota-se um valor de área mínima, em que a rede de drenagem é composta apenas por *pixels* com valores igual ou maior à área mínima estipulada (GRUBER e PECKHAM, 2009).

Este método quando associado a algoritmos de direções de fluxo unidirecional pode apresentar erros como presença de fluxos paralelos em áreas planas, sensibilidade alta a erros inerentes a MDTs e direções de fluxo imprecisas em encostas convexas (PERSENDT e GOMEZ, 2015). E, quando associado a algoritmos de direções de fluxo multidirecional, demanda grande esforço computacional, apresenta fator de amortecimento e dificuldade em delinear área de contribuição (ARIZA-VILLAVÉRDE *et al.*, 2015).

Em MDTs a presença de depressões topográficas é comum, seja elas naturais ou não. Depressão em MDT significa que um ou mais *pixels* possuem vizinhos com maiores valores de elevação (WOODROW *et al.*, 2016). Estas depressões são problemáticas para a determinação das direções de fluxo porque criam descontinuidade no fluxo e conseqüentemente interferem na qualidade de rede de drenagem extraída (LINDSAY e CREED, 2005).

Entretanto, técnicas de tratamento de MDT foram desenvolvidas para solucionar os efeitos negativos causados pelas depressões. São diversas metodologias existentes, cada uma com abordagem diferente, mas todas desenvolvidas para forçar o fluxo em direção a jusante provocando conexão entre as direções de fluxo (WOODROW *et al.*, 2016).

Geralmente o procedimento para a remoção de depressões presentes em MDTs remove qualquer tipo de depressão, tanto natural (ex. lagos) como do tipo espúrias, resultando em uma superfície alterada e conseqüentemente pode originar redes de drenagem não realísticas (YAN *et al.*, 2018). Além disso, a qualidade da rede de drenagem extraída possui dependência com a resolução espacial do MDT, porque a resolução afeta os valores de declividade e por conseqüência a área de contribuição (ARIZA-VILLAVÉRDE *et al.*, 2015).

### 3.2.4 Delimitação de bacia hidrográfica

A delimitação de bacia hidrográfica é um procedimento de alto grau de relevância por servir de base para múltiplos estudos, como modelagem hidrológica, avaliação de erosão de solos, gestão de recursos hídricos e mapeamento geomorfológico (LIU *et al.*, 2020). Além disso, há diversos modelos hidrológicos que se baseiam nesse produto para estimar fluxos de nutrientes e sedimentos, prever características físicas dos rios como temperatura, fluxo de água e volume de escoamento (HAGG *et al.*, 2020).

Antigamente as bacias hidrográficas eram delimitadas manualmente com uso de mapas de curvas de nível e, a partir de 1980, as técnicas para delimitação automática se

tornaram populares (LINDSAY *et al.*, 2008). Atualmente há diversos softwares de SIG com rotinas computacionais que extraem a delimitação de bacia hidrográfica a partir de dados derivados de MDT (HAGG *et al.*, 2020). Contudo, a qualidade desta delimitação está atrelada a fatores como a eficiência da metodologia utilizada e a resolução espacial do MDT (WILSON, 2012).

O método mais utilizado hoje em dia para delimitar uma bacia hidrográfica é baseado no algoritmo de direções de fluxo D8, sendo o procedimento composto por remoção de depressões do MDE, seguido da extração dos *rasters* de direções de fluxos, áreas acumuladas, e então a delimitação da bacia e sub-bacias (LIU *et al.*, 2020).

A partir da delimitação da bacia é possível determinar diversas informações pertinentes como área, perímetro, elevação média, declividade média, distância de determinado ponto até o exutório da bacia e comprimento total dos caminhos de fluxo dentro da bacia (GRUBER e PECKHAM, 2009).

### 3.3 Técnicas de reamostragem de MDT

A mudança da resolução espacial ou a mudança dos dados originais de MDT, também chamada de reamostragem de MDT, pode ser realizada tanto para aumentar quanto para diminuir a resolução de acordo com a necessidade da aplicação.

Diversos estudos têm como foco técnicas de mudança de reamostragem para diferentes tipos de aplicações (ERDBRÜGGER *et al.*, 2021; LE COZ *et al.*, 2009; SAKSENA e MERWADE, 2015; TAN *et al.*, 2015; WOLOCK e PRICE, 1994). As técnicas de reamostragem mais comuns na literatura são agregação e filtragem (ERDBRÜGGER *et al.* 2021).

Existem várias razões para mudar a resolução espacial de MDTs, entre as mais comuns estão: (i) degradação da resolução para diminuir o tempo de processamento e esforço computacional; (ii) área de estudo de grandes extensões; (iii) padronizar resoluções de planos de informação diferentes para análises conjuntas; (iv) utilização em modelos hidrológicos.

#### 3.3.1 Técnica de Agregação

A agregação de MDT pode utilizar diferentes tipos de algoritmos, seja por métodos de *pixel thinnig*, interpolação, como do tipo bilinear, vizinho mais próximo, *kriging*, *spline*

e convolução cúbica, ou por operadores estatísticos como média, mediana, moda, valor máximo ou mínimo (LE COZ *et al.*, 2009). O procedimento de agregação tem como resultado um MDE de resolução espacial diferente do original.

Na agregação, cada *pixel* resultante é fruto do processamento do algoritmo selecionado sobre todos os *pixels* contribuintes abrangidos pela extensão do *pixel* resultante. Portanto, o MDT agregado sofre uma degradação da resolução espacial e conseqüentemente perde detalhes da informação topográfica original (ZHANG e CHU, 2015).

Esta técnica funciona da seguinte maneira. Primeiro é selecionado o nível de degradação da resolução espacial que se deseja, ou seja, determina qual será o tamanho do *pixel* resultante. Em seguida o algoritmo utiliza uma janela matricial móvel para percorre o *raster* aplicando a regra de agregação desejada. O tamanho da janela mais comum é de 3x3, mas pode variar de acordo com o algoritmo ou ser determinado via comando.

Por exemplo, considere a agregação pelo valor máximo em um *raster* com 9 linhas e 9 colunas. Escolhendo como nível de degradação 3, *pixels* resultantes terão três vezes o tamanho do original. O resultado será um novo *raster* em que cada *pixel* terá o valor máximo dentre os *pixels* originais abrangidos pelo tamanho do *pixel* resultante. A Figura 6 ilustra a situação citada acima.

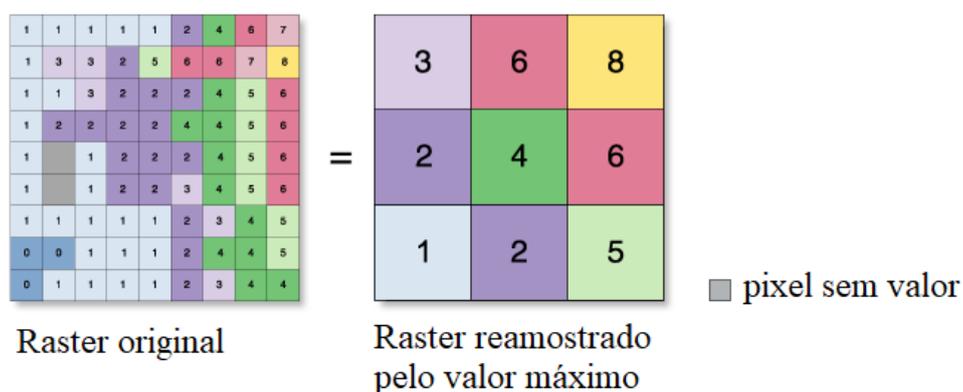


Figura 6 – Reamostragem de MDT pelo método de agregação pelo valor máximo.

Fonte: adaptado de ESRI (2022).

### 3.3.2 Técnica de filtragem

A aplicação da técnica de filtragem é utilizada para remover erros típicos de MDT, entretanto também ocorre a perda de informação, apesar de não acarretar em mudança de resolução espacial (LINDSAY *et al.*, 2019; PERSENDT e GOMEZ, 2015). Diversas

técnicas de filtragem têm sido propostas por estudiosos, entre elas as mais comumente utilizadas são o filtro gaussiano, média, mediana, Perona-Malik (O'NEIL *et al.*, 2019).

Por exemplo, tanto o filtro gaussiano quanto o por média empregam uma janela com quantidade definida de *pixels* a qual percorre o *raster*, tendo o *pixel* central da janela atribuído um novo valor pela média de todos os *pixels* dentro da janela (filtro por média) ou a partir da ponderação dos valores de *pixel* baseado em sua distância calculada pela curva gaussiana (ERDBRUGGER *et al.* 2021)

### 3.4 Efeitos de mudança de resolução espacial de MDE/MDT

Estudos anteriores avaliaram o efeito da mudança de resolução espacial, em especial por meio da degradação, nas características topográficas e produtos derivados de MDTs (GRIEVE *et al.*, 2016). A mudança de resolução espacial afeta de forma expressiva primeiramente representações topográficas e em seguida produtos hidrológicos derivados (WECHSLER, 2007).

Por exemplo, Garbrecht e Martz (1994) estudaram o efeito da mudança de resolução espacial de MDE. Para isso utilizaram o método de agregação pela média para reamostragem de MDE partindo da resolução de 30 e indo até 600 metros. Eles analisaram alguns produtos derivados de MDE, como delimitação de bacia hidrográfica e rede de drenagem. Nos resultados foi percebido que a degradação da resolução espacial provocou redução do comprimento dos canais e da densidade e área de drenagem.

Enquanto no estudo de Armstrong e Martz (2003), foi analisado o efeito da mudança de resolução espacial de MDEs de 1 km para até 64 km. O MDE foi também reamostrado por meio do método de agregação pela média. Eles constataram que a reamostragem de MDEs causou suavização na superfície do terreno, produzindo menor variação nos valores de elevação e declividade.

Já utilizando dados mais refinados, Sorensen e Seinert (2007) reamostraram MDE-LiDAR com resolução espacial de 5 metros para 10, 20 e 50 metros utilizando a técnica *thinning*. Os resultados mostram que houve perda de informação original e que os valores de declividade se tornaram menores à medida que a resolução espacial foi sendo degradada, isto pode afetar informações hidrológicas baseadas em índices topográficos.

Em uma outra pesquisa, Zhang *et al.* (2008) investigaram o efeito da resolução de MDE em parâmetros de entrada de modelo de erosão de solo. Foram utilizados seis MDEs de três fontes e três resoluções espaciais diferentes, LiDAR 4, 10 e 30 metros, SRTM 30

metros e USGS NED 10 e 30 metros. Como conclusão, os autores afirmam que tanto resolução espacial quanto fontes de MDE resultaram em valores diferentes de comprimentos de fluxo, número de encostas e delimitação de bacia. Também foi relatado que as resoluções mais refinadas apresentaram valores mais próximos aos dados coletados em campo. A Figura 7 ilustra os resultados de parâmetros calculados para os diferentes MDEs utilizados por Zhang *et al.* (2008).

Para o estudo de Wu *et al.* (2008), foi examinado o efeito da reamostragem em produtos derivados de MDE. Eles utilizaram três métodos de reamostragem distintos, interpolação pelo vizinho mais próximo, interpolação bilinear e interpolação de convolução cúbica. Constataram que a degradação da resolução tende a diminuir os valores de declividade, por outro lado a área de contribuição tende a aumentar.

Já o trabalho de Le Coz *et al.* (2009) analisou o efeito de reamostragem na modelagem hidrológica. Para isso, o MDE-SRTM de 90 metros foi reamostrado para 5 km utilizando seis técnicas de agregação diferentes: média, mediana, moda, vizinho mais próximo, valor máximo e mínimo. Os resultados mostraram que o método de agregação tem importância nos parâmetros analisados. Por exemplo, média e mediana apresentaram representações topográficas mais suavizadas em relação aos demais. Enquanto para conectividade de redes de drenagem apenas média e mediana foram consistentes.

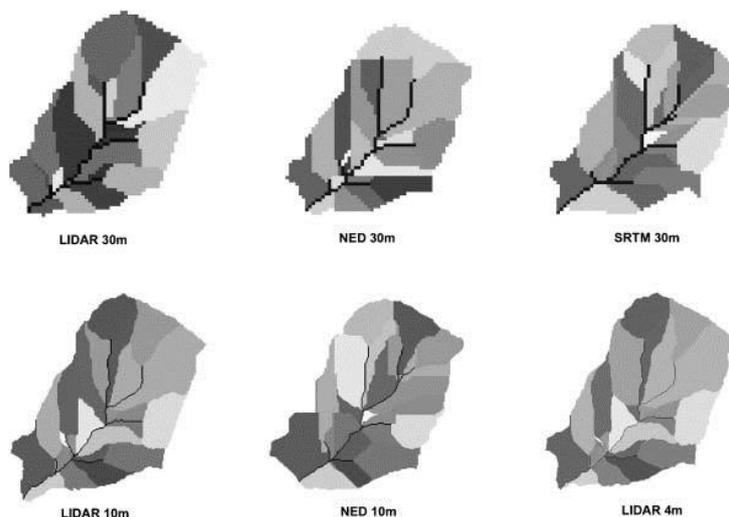


Figura 7 – Encostas e rios derivados dos seis MDEs.

Fonte: Zhang *et al.* (2008).

Em abordagem diferente, a pesquisa de Li e Wong (2010) avaliou o uso de diferentes fontes de MDE com resoluções diferentes para a extração de redes de drenagem e simulação

de cheias. Eles utilizaram MDE-SRTM de 30 metros de resolução espacial, NED 10 e 30 metros de resolução. Também foi utilizado MDE-LiDAR, sendo os dados do MDE-LiDAR de 2 metros reamostrados por meio da interpolação pelo vizinho mais próximo para resolução de 10 e 30 metros. Os resultados do estudo mostram que MDE-LiDAR de resolução mais fina mostrou melhores resultados para extração de redes de drenagem enquanto SRTM os piores. No quesito simulação de cheias, a variação dos resultados da simulação está mais ligada a fonte do MDE do que a resolução espacial.

Enquanto isso, Vaze *et al.* (2010) estudaram o efeito da reamostragem usando método de agregação pela média. Eles reamostraram MDE-LiDAR de 1 metro de resolução espacial para resoluções de até 25 metros. Os autores avaliaram a acurácia dos dados de elevação comparando dados de campo com os dos MDEs reamostrados. No estudo foi constatado que houve pequena variação na distribuição dos dados de elevação dos MDEs reamostrados e que quanto maior a degradação da resolução o valor de declividade tende a diminuir.

O trabalho de Hasan *et al.* (2012) analisou o efeito da resolução espacial de MDE em declividade, área de drenagem e índice topográfico de umidade. Eles utilizaram MDE-LiDAR com resolução espacial de 0,5, 1, 5, 10, 30 e 90 metros. O estudo concluiu que a resolução espacial exerce forte influência nas estimativas dos três parâmetros analisados. Relatam também que a declividade se torna menor, enquanto a área de drenagem fica maior à medida que a resolução espacial é degradada, e esses dois fatores alteram o cálculo do índice topográfico de umidade.

O efeito da resolução de MDT-LiDAR em características da rede de drenagem e na modelagem hidrológica foi estudada por Yang *et al.* (2014). Para isso eles utilizaram MDTs com cinco resoluções espaciais 1, 5, 10, 30 e 60 metros para três bacias hidrográficas com características topográficas diferentes. Os resultados obtidos pelos autores mostram que resoluções com maior refinamento produzem comprimentos de rios e delimitação de bacias mais próximos ao de referência. A Figura 8 mostra a relação entre resolução espacial e comprimento de rio no estudo citado acima.

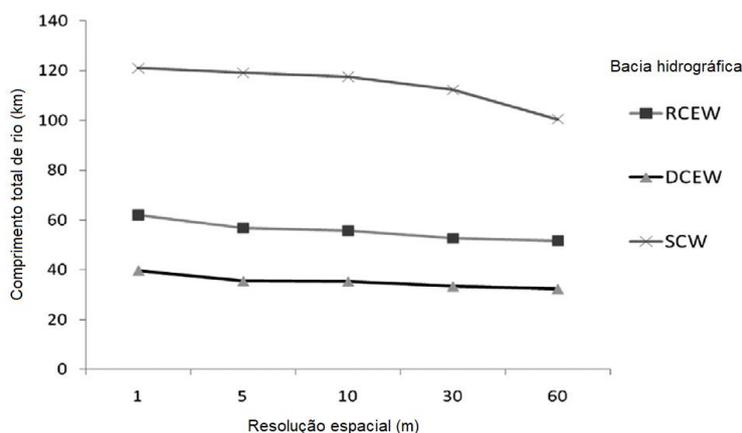


Figura 8 – Comprimento de rio em função da resolução espacial para três bacias estudadas.

Fonte: adaptado de Yang *et al.* (2014).

Em análise da relação entre mudança de resolução espacial de MDE-LiDAR e extração da área da bacia e rede de drenagem, Goulden *et al.* (2014) utilizaram cinco métodos de interpolação: ponderação pelo inverso da distância (IDW), *kriging* universal (UK), média móvel (MA), vizinho mais próximo (NN) e rede triangular irregular (TIN). As resoluções espaciais estudadas foram 1, 5, 10, 25 e 50 metros. Eles concluíram que a resolução espacial exerce maior influência na área da bacia, localização e comprimento de fluxo, enquanto o método de reamostragem afeta localização e comprimento de fluxo.

Além disso, Goulden *et al.* (2014) também concluíram que existe tendência de diminuição da área da bacia hidrográfica com o aumento da resolução espacial, assim como há relação entre as características do relevo da bacia, resolução analisada e método de interpolação. A Figura 9 mostra a delimitação de bacia utilizando MDE de 1 e 50 metros de resolução espacial. E a Figura 10 ilustra a variação de área das bacias analisadas pelos autores de acordo com método de interpolação e resolução espacial.

A avaliação do efeito da resolução espacial na delimitação de bacia e cálculo de métricas topográficas foi realizada por Gillin *et al.* (2015). Eles utilizaram MDE-LiDAR de 1 metro de resolução espacial e reamostraram por meio de agregação pela média para as resoluções de 3, 5 e 10 metros. Os resultados obtidos foram comparados com dados de campo. O estudo concluiu que a mudança de resolução espacial teve impacto significativo na área de drenagem e delimitação da bacia.

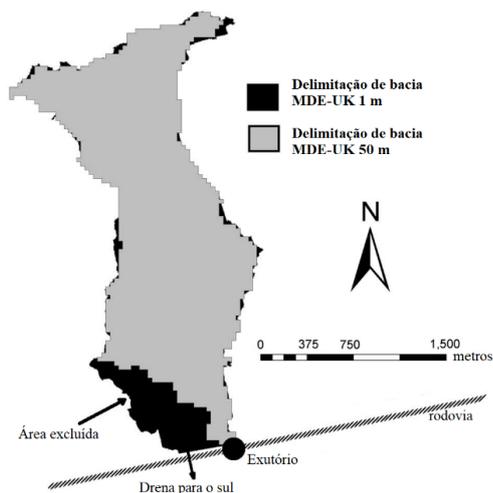


Figura 9 – Delimitação de bacia utilizando o MDE de 1 e 50 metros de resolução espacial.

Fonte: adaptado de Goulden *et al.* (2014).

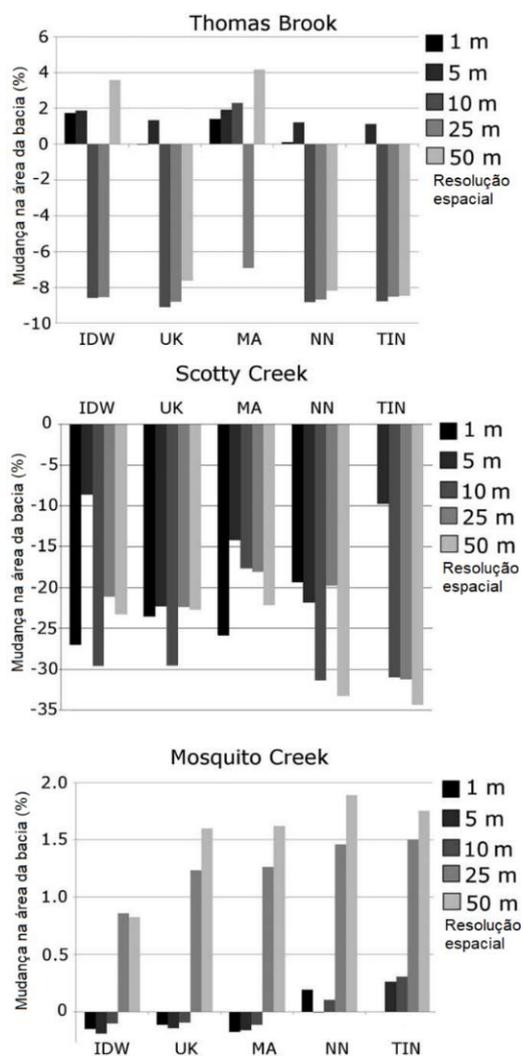


Figura 10 – Mudança na área da bacia provocada por técnica de reamostragem por resolução espacial.

Fonte: adaptado de Goulden *et al.* (2014).

Já Tan *et al.* (2015) estudaram o efeito de reamostragem de MDEs na modelagem hidrológica utilizando o modelo SWAT. Para esse estudo foram analisadas três técnicas de reamostragem: interpolação pelo vizinho mais próximo, interpolação bilinear, interpolação convolução cúbica e interpolação pela maioria. As resoluções utilizadas foram de 20 a 1500 metros, reamostrando os MDEs: SRTM v.41, ASTER GDEM2, EarthEnv-DEM90 e GMTED2010. Os autores concluíram que as técnicas de interpolação pelo vizinho mais próximo e pela maioria apresentaram as melhores performances. E para a simulação de vazão, o modelo SWAT apresentou maior sensibilidade a resolução espacial do MDE, e menos sensibilidade a fonte de MDE e técnica de reamostragem para MDEs de mesma resolução espacial.

Na pesquisa de Ariza-Villaverde *et al.* (2015) foi analisado o efeito da resolução espacial no valor mínimo de áreas acumuladas para geração de redes de drenagem. Para isso eles utilizaram MDTs de resoluções espaciais de 5, 10 e 25 metros para quatro bacias hidrográficas. A conclusão da pesquisa foi que a resolução espacial mais refinada gera redes de drenagem mais precisas, especialmente em redes densas. Já para redes mais esparsas a resolução espacial não exerce influência significativa.

Em análise de características topográficas, Grohmann (2015) teve o objetivo de avaliar as diferenças de parâmetros de declividade e aspecto derivados de MDE original e reamostrado. O autor utilizou o método da agregação pela média para reamostrar o MDE-SRTM de 90 metros em múltiplas resoluções espaciais. Ele concluiu que com maiores graus de degradação da resolução espacial tende-se a mudar os valores de declividade, resultando em drástica redução dos valores máximos e declínio dos valores da média e desvio padrão.

Também estudando característica topográfica, Drover *et al.* (2015) investigaram o efeito da resolução espacial no índice topográfico de umidade (ITW). Para isso eles reamostraram MDE-LiDAR de 1 metro de resolução espacial para resoluções de 2, 5, 10, 20, 30 e 50 metros. Eles concluíram que, a distribuição dos valores de ITW na paisagem é altamente sensível a resolução espacial do MDE.

Woodrow *et al.* (2016) estudaram o impacto de mudança de resolução espacial de MDE para analisar atributos hidrológicos. Para isso eles utilizaram a técnica de interpolação da ponderação pelo inverso da distância (IDW) para reamostrar um MDE-LiDAR de 1 metro em resoluções espaciais de 5 e 10 metros. O estudo concluiu que a degradação da resolução espacial resulta em redução significativa de área de contribuição e comprimento de caminhos de fluxo.

No estudo de Goyal *et al.* (2018) foi avaliado o efeito da mudança de resolução espacial na performance do modelo hidrológico SWAT. Eles utilizaram três fontes de MDE (SRTM, ASTER e CartoDEM), e os reamostraram por meio das técnicas de interpolação pelo vizinho mais próximo, bilinear, convolução cúbica e maioria de valores, partindo da resolução de 30 para 300 metros. Como conclusão os pesquisadores relataram que para as áreas de estudo, tanto a mudança de resolução espacial quanto os métodos de reamostragem não afetaram o cálculo do escoamento superficial mensal.

O trabalho de Muthusamy *et al.* (2021) investigou o efeito da resolução espacial na modelagem de inundações em áreas urbanas. Eles utilizaram MDT-Lidar de 1 metro de resolução espacial como de referência e reamostraram-no para resoluções de 2, 5, 10, 30 e 50 metros. Os resultados mostraram que ocorre aumento da área e profundidade de inundação a partir da degradação da resolução espacial. Os autores relatam que para melhores resultados da modelagem, a resolução espacial do MDT deve ser menor que a largura do rio analisado. A Figura 11 mostra mapas de inundação para a mesma área produzidos com resoluções diferentes.

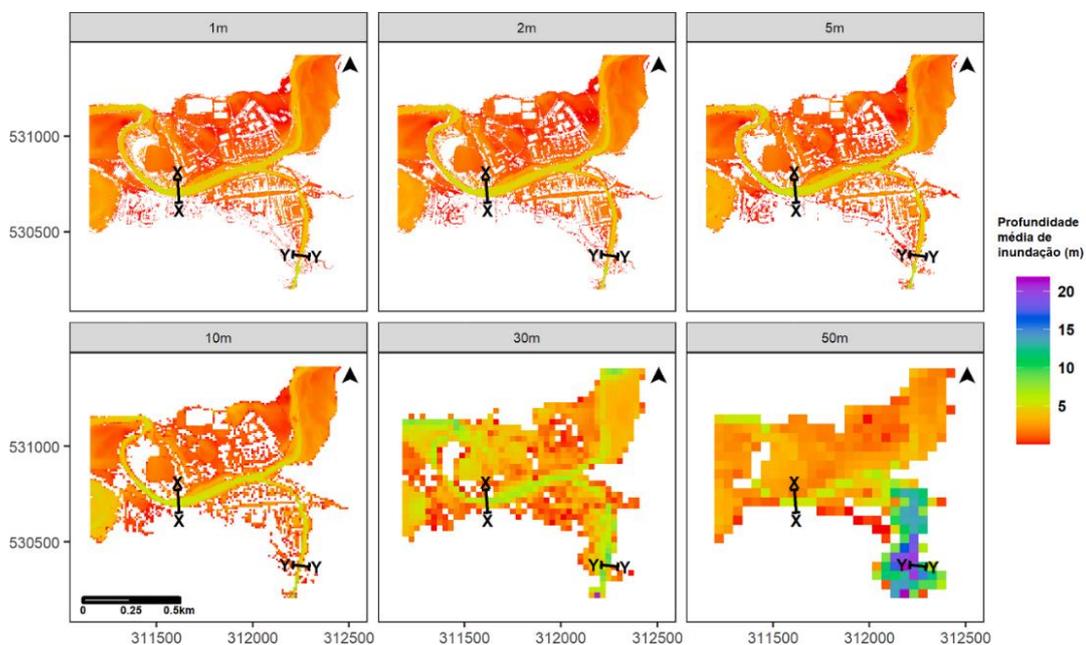


Figura 11 – Mapas de inundação da mesma área produzidos por resoluções espaciais diferentes.

Fonte: adaptado de Muthusamy *et al.* (2021).

Já Erdbrugger *et al.* (2021) reamostraram MDT-LiDAR com 2 metros de resolução espacial por agregação pela média para resoluções de 3, 5, 10 e 20 metros. No estudo eles analisaram o efeito da reamostragem em direções de fluxo e delimitação de bacias hidrográficas. Os resultados obtidos apontam que as direções de fluxo foram mais afetadas pela reamostragem onde a declividade é  $< 40\%$ . Para a delimitação das bacias, a pesquisa mostra que quanto mais grosseira a resolução maior a tendência de superestimação da área da bacia.

Sliwinski *et al.* (2022) estudaram o efeito da reamostragem de MDT-LiDAR na modelagem de bacia hidrográfica. Eles utilizaram as técnicas de reamostragem agregação pela média, moda, mediana, valor mínimo, valor máximo e valor de pixel mais próximo. A degradação das resoluções espaciais foi feita a partir de 50% da resolução mais refinada, partindo de 1 e indo até 86 metros.

Os mesmos autores concluíram que o efeito da reamostragem na delimitação de bacias hidrográficas e caminhos de fluxo foi irregular, variando entre mudanças bem pequenas, moderadas e significativas. Dentre os métodos analisados, a agregação por valor mínimo apresentou os melhores resultados tanto para resoluções mais refinadas quanto para mais degradadas.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Características da área de estudo

A área de estudo se trata de uma sub-bacia da bacia do rio Sirinhaém (O 35° 47' 19.161'', S 8° 33' 0.386''; O 35° 28' 1.500'', S 8° 15' 36.003'') e possui área aproximada de 550 km<sup>2</sup>. Esta sub-bacia foi escolhida por ter disponibilidade de dados MDT-LiDAR de 1 m e ser compatível com a capacidade computacional do equipamento utilizado neste trabalho.

A sub-bacia de estudo contém exutório próximo ao posto fluvial denominado PCH Pedra Furada Barramento (Latitude S 8° 31' 12.000'' e Longitude O 35° 29' 24.000'', código 39450200 no HIDROWEB da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA). A Figura 12 ilustra a área de estudo.

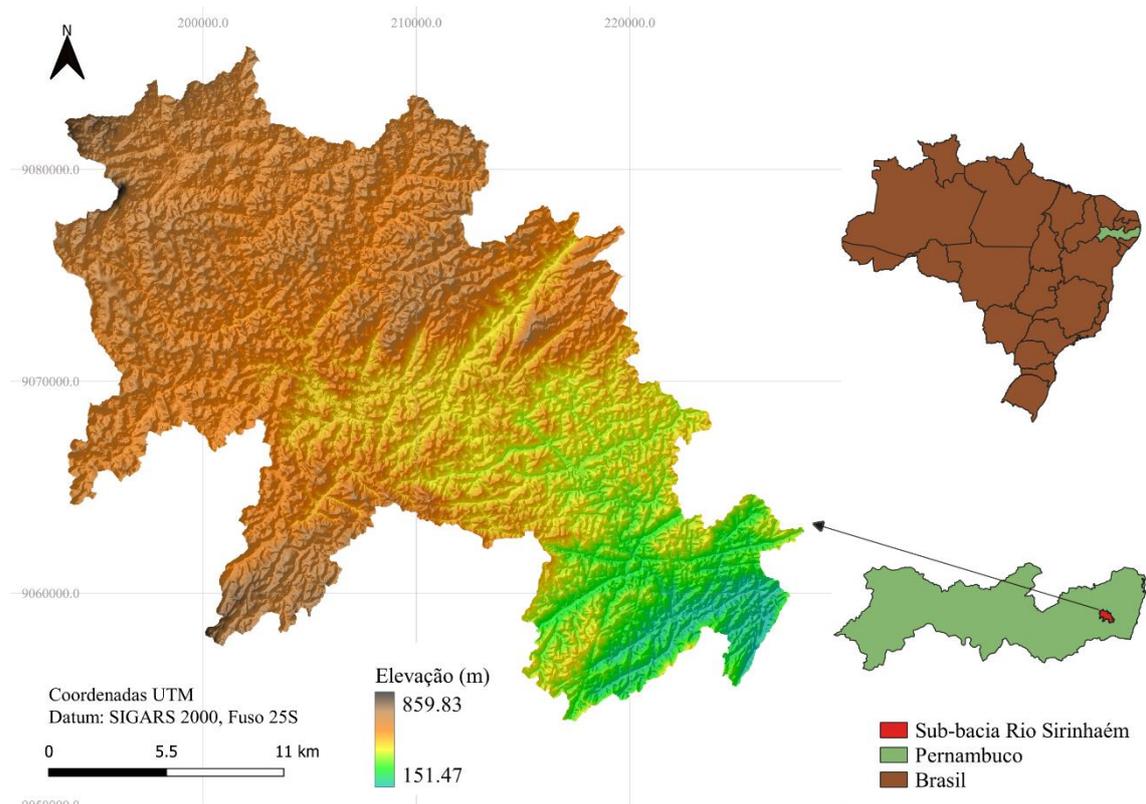


Figura 12 – Localização da área de estudo.

A bacia do rio Sirinhaém tem como principais atividades econômicas o turismo na zona litorânea, cultivo de cana-de-açúcar e a geração de energia hidrelétrica. Atualmente conta com três pequenas centrais hidrelétricas em operação. Ademais, possui disponibilidade

hídrica aproximada de 12 m<sup>3</sup>/s e apresenta problemas de segurança hídrica na porção alta (APAC, 2020), porção em que se situa a área deste estudo.

Além disso, essa bacia apresenta irregularidade na precipitação anual com valores médios de 550 mm (setor oeste) e 2.300 mm (setor leste), tendência de diminuição de 50% da precipitação total anual, e ocorrência de eventos de inundação (FERRAZ, 2019; SILVA *et al.* 2017).

Portanto, devido a características citadas a bacia possui demanda por estudos hidrológicos, voltados para a gestão de recursos hídricos, os quais são essenciais para atividade econômica da região e estado. Estes estudos em grande parte utilizam dados MDT, e neste caso podem fazer proveito do MDT-LiDAR por haver disponibilidade desses dados.

## **4.2 Visão geral da metodologia**

A metodologia empregada neste trabalho seguiu cinco etapas principais. A Figura 13 ilustra o fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados. A primeira etapa foi a coleta e preparação de dados MDT, na qual ocorreu a aquisição de cenas MDT-LiDAR, filtragem das cenas e concatenação das cenas em um único arquivo. Este arquivo único de MDT-LiDAR possui resolução espacial de 1 metro e é adotado como sendo o MDT referencial neste trabalho.

Na segunda etapa foi efetuado o procedimento de reamostragem, degradando a resolução espacial do MDT de referência para as resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros. A terceira etapa consistiu na extração de representações topográficas presentes nos MDT de referência e reamostrados. Na quarta etapa, foi feito o processamento de cada MDT para a caracterização de redes de drenagem e bacias hidrográficas. E, por último, foram aplicadas oito métricas de avaliação sobre os planos de informações extraídos nas terceira e quarta etapas.

Para facilitar o entendimento da sequência da metodologia e dos resultados foi elaborada a Tabela 1. Nela consta a codificação adotada para os produtos extraídos dos MDTs utilizados nesta pesquisa. Os códigos se baseiam na técnica de reamostragem e resolução espacial do MDT, exceto para o MDT de referência, o qual tem como código “Referência”, e não se encontra na tabela.

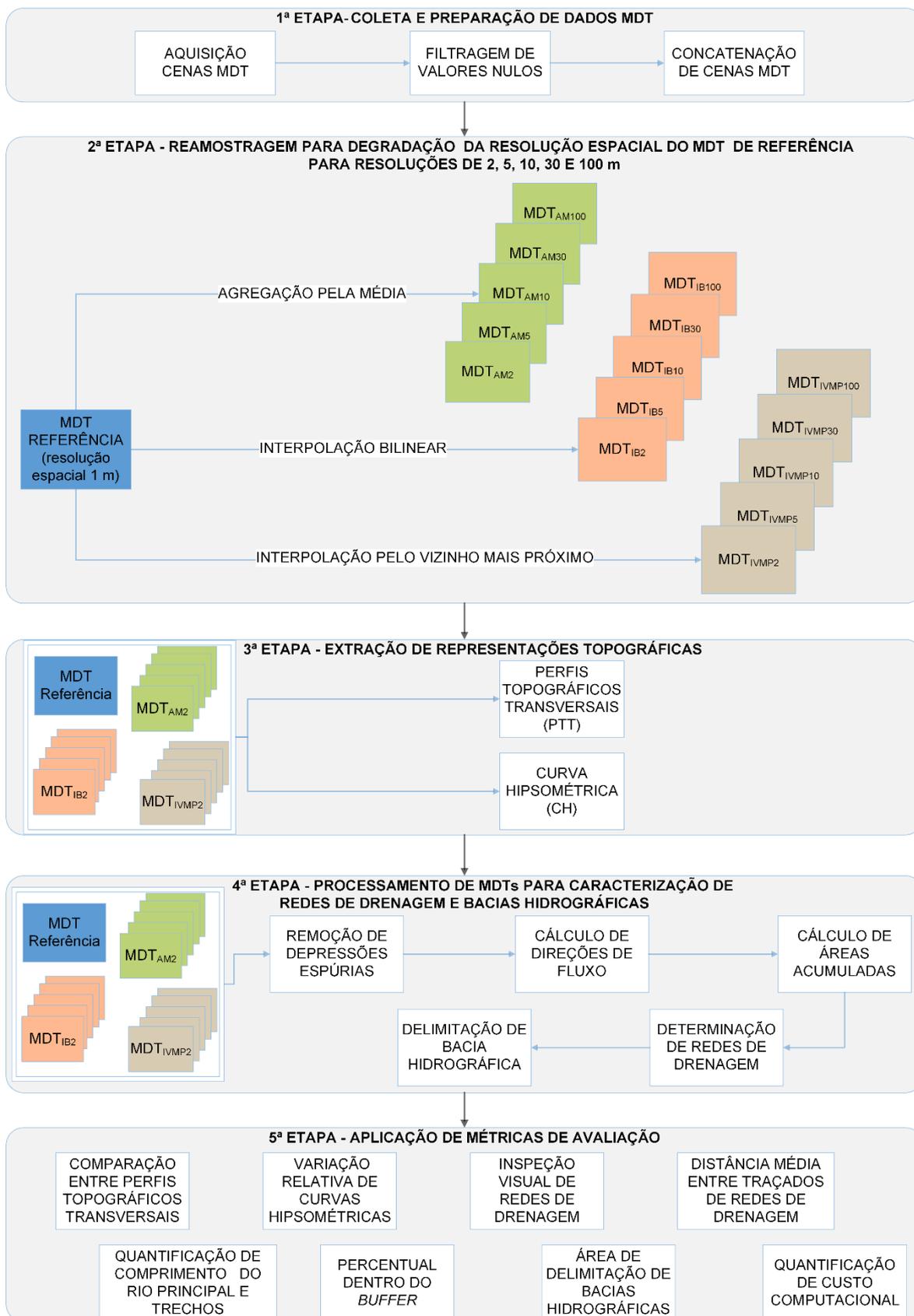


Figura 13 – Fluxograma com etapas da metodológicas.

Tabela 1 – Codificação adotada para os produtos derivados de MDTs reamostrados

Resolução espacial	Técnica de reamostragem		
	Agregação pela média	Interpolação bilinear	Interpolação pelo vizinho mais próximo
2 metros	AM2	IB2	IVMP2
5 metros	AM5	IB5	IVMP5
10 metros	AM10	IB10	IVMP10
30 metros	AM30	IB30	IVMP30
100 metros	AM100	IB100	IVMP100

### 4.3 Coleta e preparação de dados MDT

#### 4.3.1 Aquisição de cenas de MDT-LiDAR

Para a construção do MDT de referência utilizado neste estudo foi necessário obter 170 cenas MDT-LiDAR. Estas cenas foram adquiridas através do portal do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D). As cenas MDT-LiDAR disponibilizadas pelo PE3D possuem resolução espacial de 1 metro na escala 1:5000, resolução radiométrica de 32 bits e precisão altimétrica melhor que 25 cm, referenciadas no Sistema de Coordenadas UTM datum SIRGAS 2000, no fuso 25S para o caso da área do estudo. Cada cena tem aproximadamente 33 megabytes, 3555 colunas e 2425 linhas.

O PE3D teve como objetivo realizar o levantamento aerofotogramétrico e perfilamento a laser (LiDAR) de todo o território do estado de Pernambuco, abrangendo uma área de 98.148 km<sup>2</sup> (CIRILO *et al.*, 2014). O recobrimento aerofotogramétrico gerou ortofotos na escala 1:5000 com resolução espacial de 50 cm, além de fotoíndices e respectivos metadados. O perfilamento a laser teve densidade de pontos cotados aproximada de 1 ponto a cada m<sup>2</sup>, totalizando cerca de 50 bilhões de pontos cotados em todo estado (CIRILO *et al.*, 2015).

Segundo os relatórios de entrega de produto (CONSORCIO ÁGUAS DE PERNAMBUCO, 2017), os dados LiDAR do PE3D atendem ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC classe “A”. O Instituto de Tecnologia de Pernambuco (2018) realizou estudos avaliando os dados do PE3D e a validação dos dados PE3D foi realizada através de levantamentos de dados em campo. O estudo confirma que os dados PE3D possuem Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC classe “A”.

#### 4.3.2. Filtragem de valor nulo

Nas cenas de MDT-LiDAR utilizadas neste trabalho foi detectada a presença de valores de elevação nulos. Com intuito de evitar possível propagação de erros nas etapas seguintes, as cenas foram submetidas a um processamento com o objetivo de eliminar valores nulos.

O procedimento consistiu em aplicar um filtro em cada cena MDT. Este filtro foi elaborado pelo grupo de pesquisa na forma de uma rotina computacional em linguagem de programação *Python*. O filtro é baseado na média dos valores dos *pixels* de uma janela matricial de tamanho variável ( $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ,  $9 \times 9$ ,  $11 \times 11$ ,  $13 \times 13$ , ...) sendo o pixel central da janela aquele de valor nulo.

O tamanho da janela depende do valor da média dos *pixels* vizinhos ao pixel a ser ajustado. Para o cálculo da média, os *pixels* vizinhos que possuem valores inválidos não são computados. Dessa forma, o aumento do tamanho da janela ocorre de maneira caso o valor da média seja menor que zero e continua a aumentar até que o valor da média seja igual ou maior que zero. Ou seja, a janela aumenta até abranger *pixels* com valores válidos.

#### 4.3.3 Mosaico de cenas MDT-LiDAR

Com intuito de formar um arquivo de MDT-LiDAR único para a área de estudo, foi realizada a montagem do mosaico com as cenas MDT-LiDAR tratadas na etapa anterior. Este procedimento foi implementado através de uma rotina computacional em linguagem *Python* utilizando a *Application Programming Interface* (API) do software TerrSet, desenvolvida pelo grupo de pesquisa ao qual este trabalho está associado.

Como resultado final foi obtido um arquivo composto de 170 cenas gerando um MDT de 5,45 gigabytes, 41.860 colunas, 34.979 linhas, totalizando 1.464.220.940 *pixels*.

### 4.4 Reamostragem para degradação da resolução espacial do MDT de referência

O MDT-LiDAR de referência com 1 metro de resolução espacial foi reamostrado para as resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros. A escolha das resoluções de 2, 5 e 10 metros deve-se ao fato de ainda preservarem certo grau de detalhes e, por isso, podem ser utilizadas em trabalhos que requerem maiores níveis de detalhe. Já as resoluções de 30 e 100 metros foram escolhidas por serem aptas para trabalhos que envolvem áreas de grande extensão

(ERDBRUGGER *et al.*, 2021) e também por ser as resoluções espaciais habitualmente trabalhadas no Brasil, pois são as resoluções da maioria dos MDTs disponíveis com acesso gratuito.

Para isso, foram utilizadas três técnicas de reamostragem amplamente usadas na literatura: agregação pela média, interpolação bilinear e pelo vizinho mais próximo. O motivo de escolha por essas técnicas de reamostragem é devido a já consolidada e ampla utilização em estudos que investigaram efeitos de mudança de resolução espacial de MDTs (SLIWINSKI *et al.*, 2022). Além disso, estes métodos são os mais utilizados na literatura para reamostrar MDTs (GILLIN *et al.*, 2015; LE COZ *et al.*, 2009; MUTHUSAMY *et al.*, 2021), tendo demonstrado resultados satisfatórios.

#### 4.4.1 Agregação pela média

A agregação pela média resulta em um *raster* com resolução espacial degradada em que o *pixel* resultante é composto pela média dos valores de todos os *pixels* do *raster* original englobados pelo *pixel* resultante. Por exemplo, para reamostrar o MDT com 1 metro de resolução espacial para 10 metros, são selecionados 100 *pixels* do *raster* original. Destes 100 *pixels* é calculada a média e o resultado é o valor do *pixel* de 10 metros.

Este procedimento foi realizado utilizando o *software* SAGA GIS, tendo como parâmetro o tamanho do *pixel*. Os valores dos parâmetros aplicados foram 2, 5, 10, 30 e 100 para as respectivas resoluções reamostradas de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

#### 4.4.2 Interpolação bilinear

A interpolação bilinear é um método amplamente utilizado em aplicações que envolvem modelos digitais de elevação, sendo bastante empregada em sistemas de informação geográfica (SIG) e modelagem de processos hidrológicos.

A interpolação bilinear utiliza os valores dos quatro *pixels* mais próximos ao *pixel* resultante. O valor do *pixel* resultante é a média ponderada, em que o peso utilizado é o valor da distância entre o centro dos *pixels* envolvidos em relação ao *pixel* central. Neste tipo de interpolação os *pixels* mais próximos do resultante têm maior influência no resultado. Este método é indicado para reamostrar dados contínuos, por exemplo, elevação.

Este procedimento foi realizado utilizando o *software* SAGA GIS, tendo como parâmetro o tamanho do *pixel*. Os valores dos parâmetros aplicados foram 2, 5, 10, 30 e 100 para as respectivas resoluções reamostradas de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

#### 4.4.3 Interpolação pelo vizinho mais próximo

Na interpolação pelo vizinho mais próximo, o *pixel* resultante tem valor igual ao *pixel* de resolução original com centroide mais próximo do centroide do *pixel* resultante. Uma consideração sobre este método é que ele não origina novas informações, ou seja, todos os valores atribuídos ao MDT resultante pertencem ao MDT original.

Este procedimento foi realizado utilizando o *software* SAGA GIS, tendo como parâmetro o tamanho do *pixel*. Os valores dos parâmetros aplicados foram 2, 5, 10, 30 e 100 para as respectivas resoluções reamostradas de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

### 4.5 Extração de representações topográficas

A partir da delimitação da bacia hidrográfica foi possível traçar a curva hipsométrica (CH) e perfis topográficos transversais (PTT) para a bacia de estudo em cada resolução espacial trabalhada. A construção de curvas hipsométrica e aplicação dos PTTs para todos MDTs teve como objetivo identificar o padrão de perda de informação associada ao processo de mudança de resolução espacial.

A curva hipsométrica permite a visualização do relevo médio da bacia hidrográfica. Ela fornece a variação de elevação por fração de área da bacia. Cada MDT reamostrado teve sua curva hipsométrica traçada, assim como o MDT de referência. Os dados para a construção das curvas hipsométricas foram adquiridos utilizando o *software* QGIS.

Já o perfil topográfico transversal permite observar a variação de elevação ao longo de determinado trecho da bacia. Essa métrica é utilizada frequentemente na literatura para avaliar a diferença entre dados de elevação de MDTs com diferentes fontes e resoluções espaciais (VAZE *et al.* 2010; ZHANG *et al.*, 2019).

Para o presente trabalho foram utilizados três PTTs, um na porção alta, outro na média e o último na porção baixa da bacia hidrográfica. Estas localizações foram escolhidas por se tratarem de zonas que possuem amplitudes de elevações distintas. O *software* QGIS foi usado para a construção dos PTTs.

## 4.6 Processamento de MDT para caracterização de redes de drenagem e bacias hidrográficas

### 4.6.1 Remoção de depressões espúrias de MDTs

Os MDTs de referência e reamostrados foram processados com objetivo de remover as depressões espúrias presentes. Esse procedimento se faz necessário para que se formem linhas de fluxo de água contínuas, permitindo estimativas mais reais dos locais de canais de fluxo (LINDBERG *et al.*, 2017).

Para este procedimento utilizou-se o algoritmo *Fill Sinks XXL* (WANG e LIU, 2006) através do software SAGA GIS. Esse algoritmo foi escolhido por ter sido concebido para processar MDTs de alta resolução espacial e, por isso, apresenta boa eficiência computacional no processamento de MDTs derivados de tecnologia LiDAR.

Esse algoritmo funciona da seguinte maneira, quando é identificado uma depressão ele modifica os valores de elevação dos *pixels* da depressão para o valor do *pixel* mais próximo que possui exutório. Para isso o algoritmo analisa cada *pixel* do MDT começando pelas bordas e segue visitando *pixels* de menores ordens, utilizando uma fila de prioridade criada pelo próprio algoritmo (WANG e LIU, 2006).

### 4.6.2 Cálculo das direções de fluxo

Para cada MDT já processado pelo algoritmo *Fill Sinks XXL* (WANG e LIU, 2006), foram calculadas as direções de fluxo. Sendo o cálculo feito para cada *pixel* do MDT. Este novo *raster* com informações de direções de fluxo foi gerado utilizando o programa SAGA GIS através do algoritmo *Flow Accumulation (Top-Down)*, onde é escolhido o método *Deterministic 8 - D8* (O'CALLAGHAN e MARK, 1984). Este algoritmo executa o cálculo em conjunto das direções de fluxo e áreas acumuladas de drenagem.

O algoritmo D8 foi selecionado neste trabalho, pois é um dos mais utilizados para estudos hidrológicos por apresentar simplicidade e representação aceitável para condições de fluxo unidirecional, além de garantir consistência entre os padrões de fluxo, cálculo de áreas acumuladas e delimitação de bacias hidrográficas (ARIZA-VILLAVARDE *et al.*, 2015).

No algoritmo D8 cada *pixel* analisado tem o valor de declividade dos *pixels* vizinhos examinado, o *pixel* vizinho que possuir menor valor de declividade é o exutório do *pixel* em análise. Feito este processamento para cada *pixel* do MDT, como resultado é formado um

novo *raster* contendo *pixels* com valores numéricos representando a direção de fluxo de acordo com a posição do *pixel* exutório.

Ademais, é atribuído valor zero para *pixels* sem direção definida e quando dois ou mais *pixels* vizinhos possuem valor de declividade iguais, o *pixel* exutório escolhido é o primeiro considerado pelo algoritmo. A Figura 14 ilustra um *raster* de direções de fluxo calculado pelo método D8.

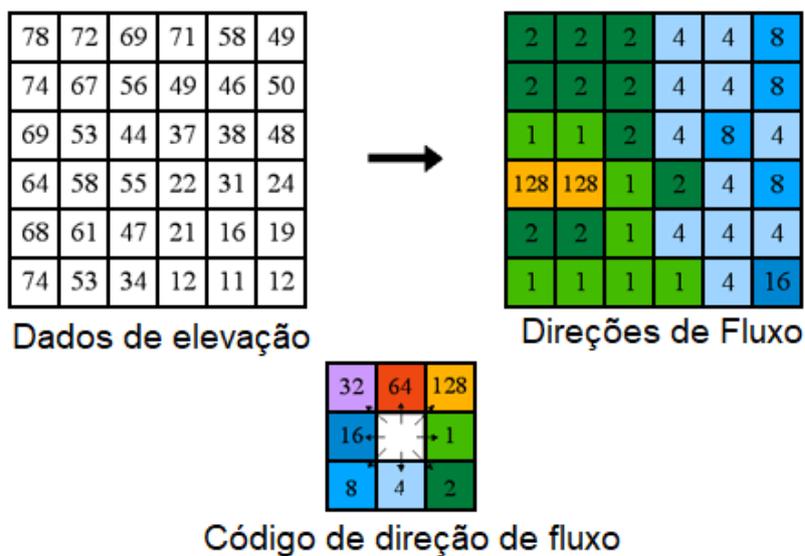


Figura 14 – Processamento dos dados de elevação pelo algoritmo D8 gerando o raster direções de fluxo com os códigos de direção.

Fonte: adaptado de ESRI (2022).

#### 4.6.3 Cálculo de áreas acumuladas de drenagem

As áreas acumuladas de drenagem são calculadas com base no *raster* de direções de fluxo. Neste plano de informação um novo *raster* é formado, nele cada *pixel* pode conter o valor do somatório do número de *pixels* ou das áreas superficiais de todos os *pixels* em que o fluxo drena para o *pixel* em análise, de acordo com a escolha do usuário.

Para o presente estudo o *raster* de áreas acumuladas de drenagem foi gerado utilizando o software SAGA GIS através do algoritmo *Flow Accumulation (Top-Down)* selecionando a opção de unidade de acumulação a área superficial dos *pixels*, ou seja, em metros quadrados (m<sup>2</sup>). A escolha por esse algoritmo é devido ao fato dele utilizar o método D8 para o cálculo das áreas acumuladas, além de estar presente em *software* gratuito e interface gráfica amigável.

#### 4.6.4 Determinação das redes de drenagem

A rede de drenagem é gerada com base no *raster* de áreas acumuladas de drenagem. Para a determinação da rede é escolhido um valor de área mínima, estabelecendo que *pixels* que possuem valor igual ou maior a esta área pertencem a rede de drenagem. Para este processamento foi utilizado o *software* SAGA GIS através do algoritmo *Channel Networks*.

A escolha do valor de área mínima foi baseada a partir da sobreposição do *raster* de áreas acumuladas sobre o vetor de drenagem da bacia hidrográfica observando a localização da nascente do rio principal. O vetor de drenagem utilizado para esse procedimento foi disponibilizado pela Agência Pernambucana de Águas e Climas - APAC.

Por conseguinte, foram realizados testes de valores de áreas mínimas com dois objetivos. O primeiro foi identificar a melhor concordância com a rede da APAC. Ao adotar estes passos evita-se efeitos de incerteza de onde se inicia o rio, por adotar o mesmo valor para todas as resoluções espaciais, evitando prejuízos para as análises. O segundo motivo foi não gerar uma rede densa, ou seja, com muitos caminhos de fluxos. Pois uma rede densa aumenta a complexidade de avaliação, sem necessariamente aumentar a contribuição para o propósito desta pesquisa.

Com os testes concluídos, o valor de 10 km<sup>2</sup> de área mínima foi o que proporcionou melhor concordância do início da rede de drenagem derivada do MDT referência (1 metro de resolução espacial), com o início da rede da APAC. E, portanto, este valor foi utilizado para a determinação da rede de drenagem de todos os MDTs.

A rede de referência adotada neste trabalho é derivada do MDT-LiDAR de referência e possui 27 trechos, sendo trechos do rio principal e afluentes. As análises realizadas nesta pesquisa foram feitas levando em consideração o rio principal e os 27 trechos, totalizando 28 trechos objetos de análise. A Figura 15 mostra a rede de drenagem de referência e a codificação dos trechos.

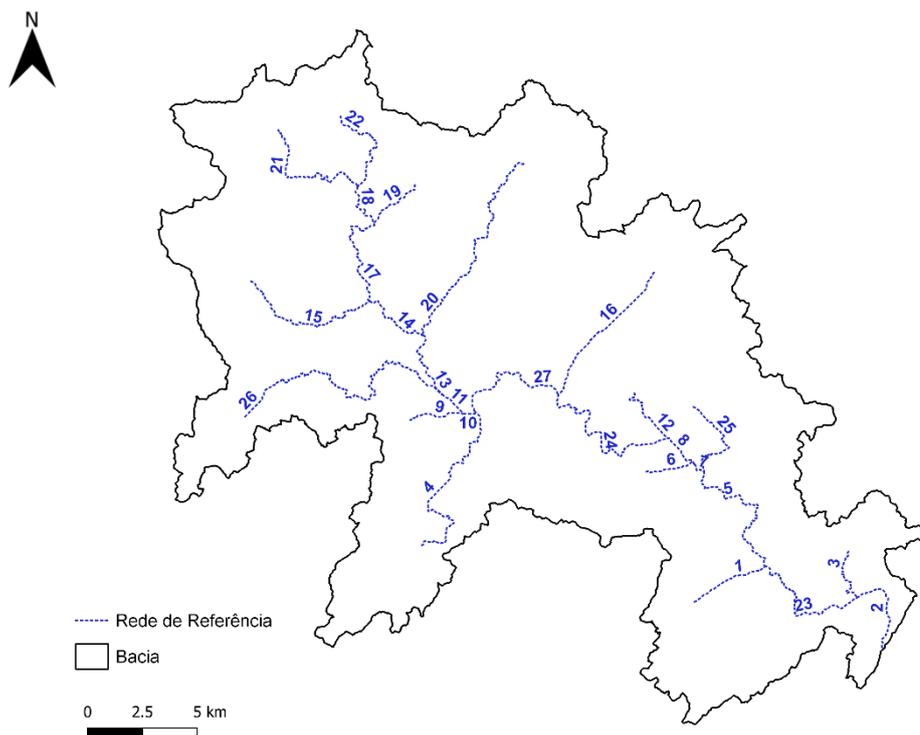


Figura 15 – Rede de drenagem de referência do presente trabalho derivada do MDT-LiDAR com 1 metro de resolução espacial com codificação de trechos de rios.

#### 4.6.5 Delimitação de bacia hidrográfica

Para a delimitação da bacia hidrográfica foi necessário a escolha de um ponto exutório. A escolha da localização do exutório se baseou na existência de um ponto de monitoramento do rio Sirinhaém, o que pode contribuir com dados para estudos futuros. Além disso, levou-se em consideração um valor limite de área de drenagem, para que o computador utilizado neste estudo fosse capaz de realizar os processamentos necessários.

Tendo em vista que o custo computacional está associado a área da bacia, o tempo necessário para processamento de várias resoluções poder ser excessivo. E ainda que o tempo de processamento não seja fator limitante, a capacidade de processamento é limitada a memória RAM, e a falta de memória RAM necessária impossibilita o processamento de algoritmos.

Por isso, o exutório selecionado tem localização próxima ao posto fluviométrico no rio Sirinhaém, denominado PCH Pedra Furada Barramento (Latitude  $-8,52^\circ$  e longitude  $-35,49^\circ$ , código 39450200 no HIDROWEB da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA), situado próximo ao município de Ribeirão-PE.

A delimitação da bacia foi gerada com base no *raster* de direções de fluxo. A área da bacia é delimitada incluindo todos os *pixels* que fluem para o exutório. O exutório utilizado para cada MDT reamostrado foi posicionado em localização igual ou o mais próximo possível do exutório de referência.

## 4.7 Aplicação de métricas de avaliação

### 4.7.1 Comparação entre Perfis Topográficos Transversais (PTT)

A comparação entre PTTs teve como objetivo identificar a diferença dos valores de elevação em determinados trechos da bacia entre o MDT de referência e MDTs reamostrados. Assim como na métrica anterior, a comparação entre os PTTs permitiu identificar e mensurar a perda de representação topográfica ocasionada pela mudança de resolução espacial.

### 4.7.2 Variação relativa de curvas hipsométricas

Esta métrica visou avaliar o erro relativo entre as elevações da bacia por porcentagem de área. Nela é possível verificar a variação entre os valores de elevação encontrados nos MDTs reamostrados em relação aos valores de referência (resolução espacial de 1 m). Identificar a variação relativa é importante, pois através dele é possível mensurar a perda de informação de dados topográficos ao realizar reamostragem de MDT.

$$\text{Variação relativa} = \frac{(\text{Elevação reamostrada} - \text{Elevação de referência})}{\text{Elevação de referência}} * 100 \quad \text{Equação (1)}$$

### 4.7.3 Inspeção visual de redes de drenagem

A inspeção visual pode ser aplicada a redes de drenagem em arquivos *rasters* e vetoriais, sendo geralmente utilizada para avaliar conectividade das redes e identificar erros topológicos e geométricos (POLIDORI e EL HAGE, 2020). Neste trabalho foram analisados os vetores das redes de drenagem geradas, comparando a rede de referência (derivada do MDT de 1 m) com as derivadas de MDTs reamostrados.

O procedimento foi realizado através da sobreposição dos traçados da rede de referência e os traçados das redes reamostradas com resolução espacial degradada. Com isso, foi possível avaliar o nível de semelhança entre os traçados das redes e identificar os erros presentes.

#### 4.7.4 Distância média entre traçados de redes de drenagem

Essa métrica tem como objetivo quantificar o grau de distanciamento entre os traçados de rede de drenagem, para isso é calculada a média da distância entre os traçados da rede de referência e o traçado das redes reamostradas (DAVIES e BELL, 2009).

Devido ao alto número de tributários, o que aumenta significativamente a complexidade de aplicação da métrica, para este trabalho foi analisada a distância média apenas entre o rio principal de cada rede de drenagem e trechos do rio isoladamente.

A distância média foi calculada da seguinte maneira: calculou-se a área de todos os polígonos formados entre os traçados das redes e em seguida este resultado foi dividido pelo comprimento do rio principal da rede de referência (CHEN *et al.*, 2012). A Figura 16 mostra um esquema com elementos do cálculo da distância média.

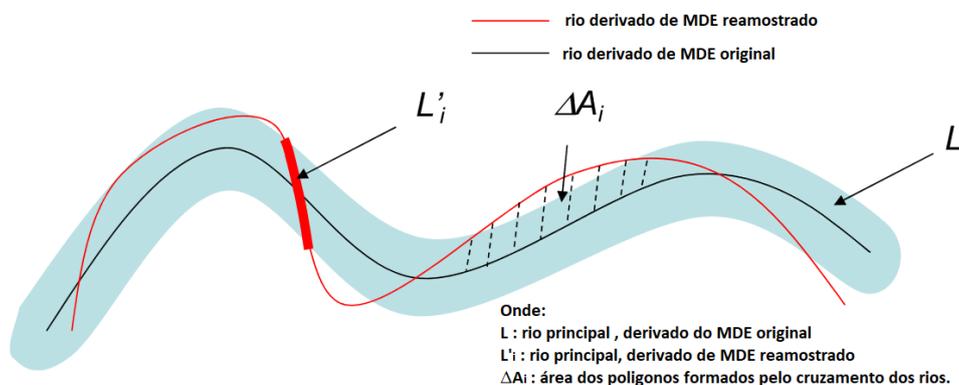


Figura 16 – Distância média entre redes de drenagem: calculada por  $\sum \Delta A_i / L$ .

Fonte: adaptado de Chen *et al.* (2012).

#### 4.7.5 Quantificação de comprimento do rio principal e trechos

O comprimento foi calculado para o rio principal, como também para trechos do rio principal e afluentes. Este procedimento foi realizado através das propriedades dos vetores de todas as redes de drenagem. De posse dos comprimentos calculados, em seguida foi feita a

comparação entre valores de referência e reamostrados com objetivo de avaliar se houve acréscimo ou decréscimo no comprimento. Para a comparação foi feito o cálculo da diferença relativa.

$$\text{Diferença relativa} = \frac{(\text{Comprimento reamostrado} - \text{Comprimento referência})}{\text{Comprimento referência}} * 100 \quad \text{Equação (2)}$$

#### 4.7.6 Percentual dentro de *buffer* (PDB)

Essa métrica de avaliação estima a porcentagem que uma rede de drenagem reamostrada se encontra dentro de um *buffer* (zona ao redor de um objeto) gerado ao redor da rede de referência (DAVIES e BELL, 2009). A estimativa é feita com base no cálculo da razão entre o somatório dos trechos de rio dentro do *buffer* e o comprimento total desse rio, o resultado da razão é multiplicado por 100.

O tamanho de *buffer* selecionado deve garantir que aproximadamente 50% da rede degradada esteja dentro da região do *buffer*. Pois, um valor de *buffer* muito baixo excluiria uma grande parte da rede degradada, enquanto um valor alto permitiria quase toda rede degradada dentro dele, sendo que ambos os casos não permitem comparação e análises (DAVIES e BELL, 2009).

Neste estudo foi avaliado o rio principal e trechos dele de cada resolução degradada. O *buffer* com tamanho de 1/2 da resolução espacial do MDT reamostrado foi aplicado sobre o rio principal e trechos do rio da rede de referência. De acordo com Sousa e Paz (2017), este valor de *buffer* garante resultados mais equilibrados, ou seja, não é muito rigoroso para excluir grande parte da rede dentro do *buffer* e nem tão generoso permitindo um grande percentual dentro do *buffer*.

#### 4.7.7 Área de delimitação de bacias hidrográficas

A identificação de áreas em concordância, erroneamente omitidas (erro de omissão) e incluídas (erro de comissão) entre as bacias analisadas é o principal papel dessa métrica (SOUSA e PAZ, 2017). Com isso, é possível quantificar o percentual dessas áreas para as bacias delimitadas de MDTs reamostrados em comparação com a delimitação de bacia de referência (derivada do MDT de 1 m).

Para isso, foram utilizados os vetores de delimitação das bacias e realizada uma operação de intersecção entre eles. A área de intersecção é considerada área de concordância entre as duas delimitações analisadas. A subtração da delimitação de referência pela delimitação de intersecção é dita área erroneamente omitida. A diferença entre a delimitação na resolução reamostrada e a área de intersecção é chamada de área erroneamente incluída.

#### 4.7.8 Quantificação de custo computacional

Essa métrica avaliou o quanto a degradação da resolução espacial provocou em redução de custo computacional, medido de duas formas, em termos de espaço de armazenamento em disco e quanto ao tempo de processamento de algoritmos. Para isso, foi quantificado o tempo de processamento dos algoritmos *Fill Sinks XXL*, *Flow Accumulation* e *Channel Network* usados para remoção de depressões espúrias, cálculo de áreas acumuladas de drenagem e determinação de rede de drenagem, respectivamente. Foi também quantificado o espaço de armazenamento requerido pelos arquivos gerados por esses algoritmos, tanto para resolução de referência, quanto degradadas.

A computação dos dados ocorreu seguindo alguns cuidados. O primeiro foi manter o *software* SAGA GIS aberto, em execução, sem processamentos em paralelo. O segundo cuidado foi a realização de três rodadas de processamentos para cada algoritmo, sendo o *software* fechado e reiniciado para o início de cada nova rodada. O terceiro cuidado foi a avaliação individual de cada tempo, em que valores destoantes foram descartados e, se percebido, foi realizada nova rodada. Ao final das rodadas foi feita a média dos tempos de processamento de cada algoritmo, assim como a computação do espaço de armazenamento em disco.

A configuração do computador utilizado para o processamento dos dados é: processador Intel Core i5-8250U 1,60 GHz de 4 núcleos, memória RAM de 20 GB, placa gráfica dedicada NVIDIA GeForce MX110 de 2 GB.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Comparação entre Perfis Topográficos Transversais (PTT)

Foram analisados os efeitos das mudanças de resoluções espaciais em três perfis topográficos transversais. A Figura 17 apresenta a localização dos PTT, os quais estão situados em zonas distintas dentro da bacia e possuem faixas de elevação diferentes.

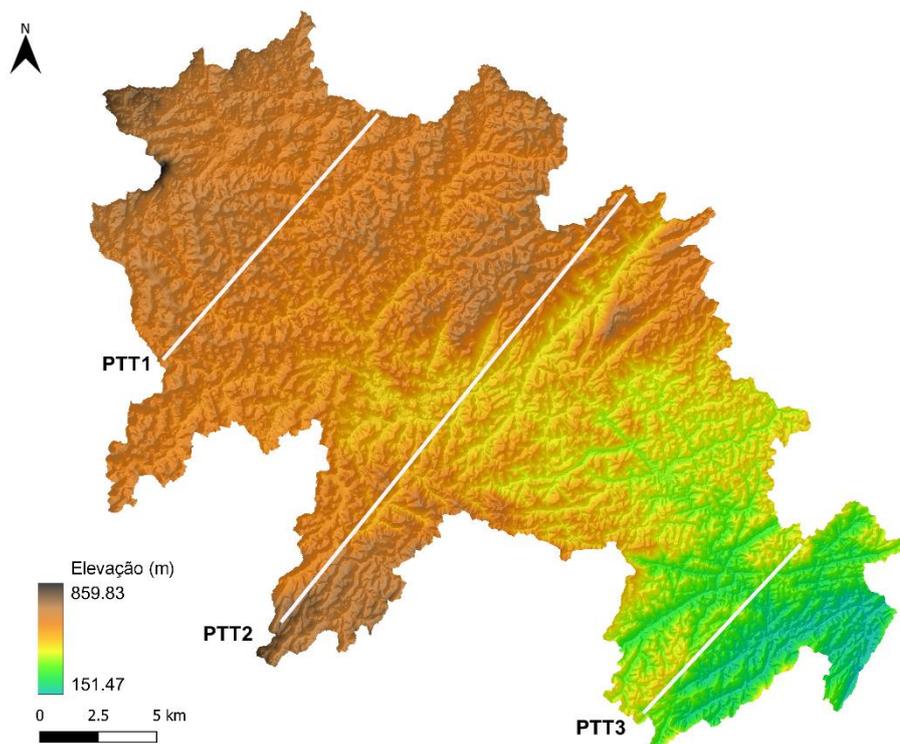


Figura 17 – Localização dos perfis topográficos transversais.

O PTT 1 está localizado na porção alta da bacia e possui elevação variando entre cerca de 590 a 690 metros em uma distância aproximada de 14 quilômetros. O PPT 2 encontra-se na porção média da bacia, contando com uma variação de elevação de 460 a 765 metros e comprimento aproximado de 24 quilômetros. Por fim, o PPT 3 situa-se na porção baixa da bacia com elevação variando entre cerca de 250 a 450 metros em uma distância aproximada de 10 quilômetros.

As Figuras 18, 19 e 20 mostram os PTTs para cada resolução espacial juntamente com o PTT da resolução de referência (1 m). Ao analisar as Figuras 18, 19 e 20 observa-se, em todos PTTs e para todas as resoluções espaciais degradadas, padrão semelhante nas elevações em relação à resolução de referência. As resoluções de 2, 5 e 10 metros apresentam diferenças relativamente reduzidas, não superando 4 metros. Já a resolução de 30 metros

apresenta leves diferenças principalmente em picos, podendo chegar a 8 m em determinados trechos.

Em relação à resolução espacial de 100 metros, nota-se que as elevações tendem a seguir o padrão de referência. Porém, foi a resolução que apresentou maiores diferenças em relação às demais. Além de demonstrar dificuldades em representar variações de elevação em pequenas distâncias, como também exibe picos e vales deslocados e em geral menores. Esses resultados estão em conformidade com outros trabalhos (SLIWINSKI *et al.*, 2022; VAZE *et al.*, 2010), nos quais resoluções mais grosseiras apresentam dificuldades para representar mudanças de elevação em pequenas distâncias, e deslocamentos de picos e vales.

Dessa forma, os perfis topográficos transversais analisados não apresentaram diferenças significativas para os valores de referência e entre os métodos de reamostragem. Em relação às resoluções espaciais, percebe-se que as de 2, 5 e 10 metros também não demonstraram diferença relevantes. Para a resolução de 30 metros identificou-se leves diferenças pontuais e para a de 100 metros foram percebidos deslocamentos de picos e vales.

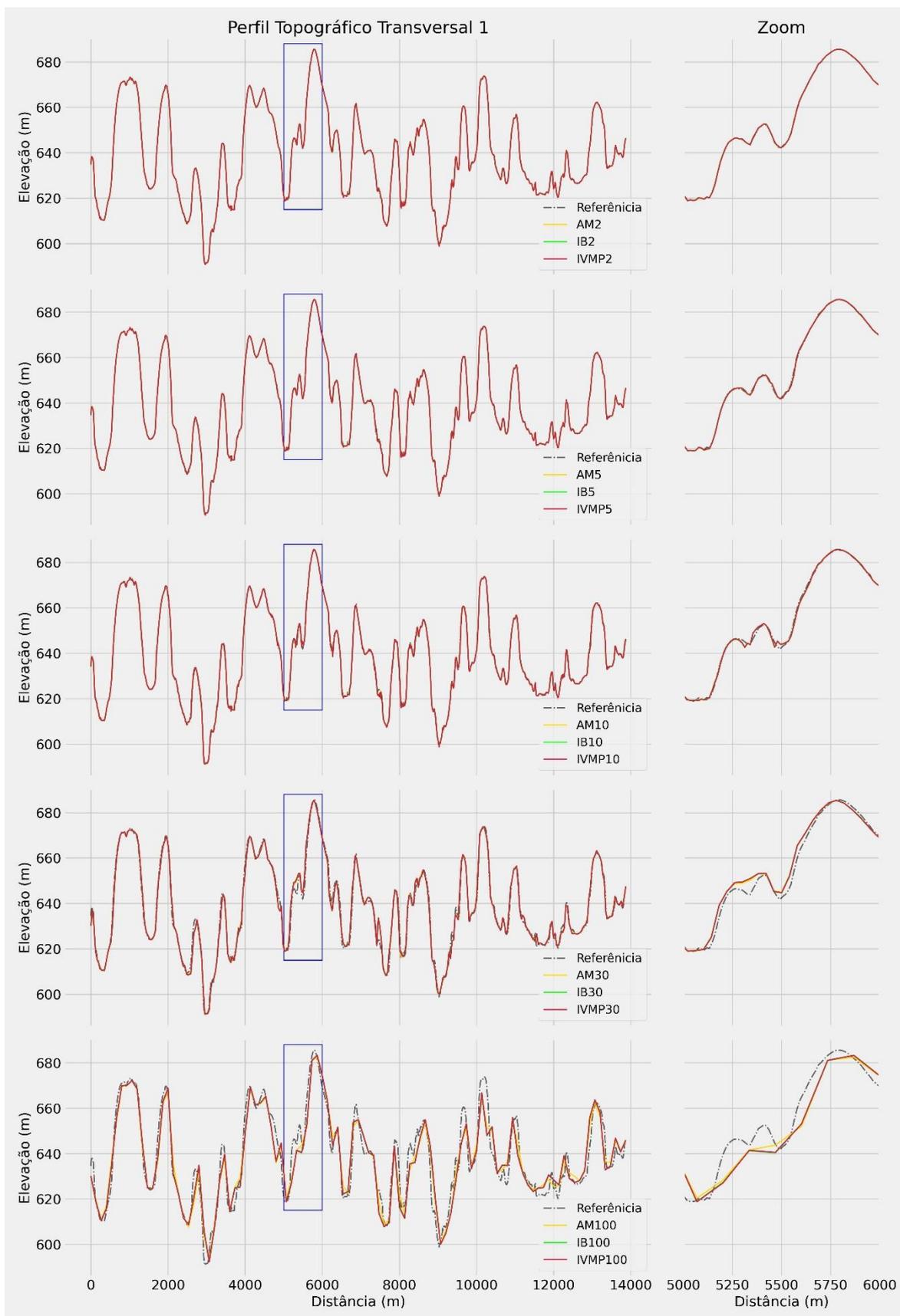


Figura 18 – Perfil topográfico transversal 1: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

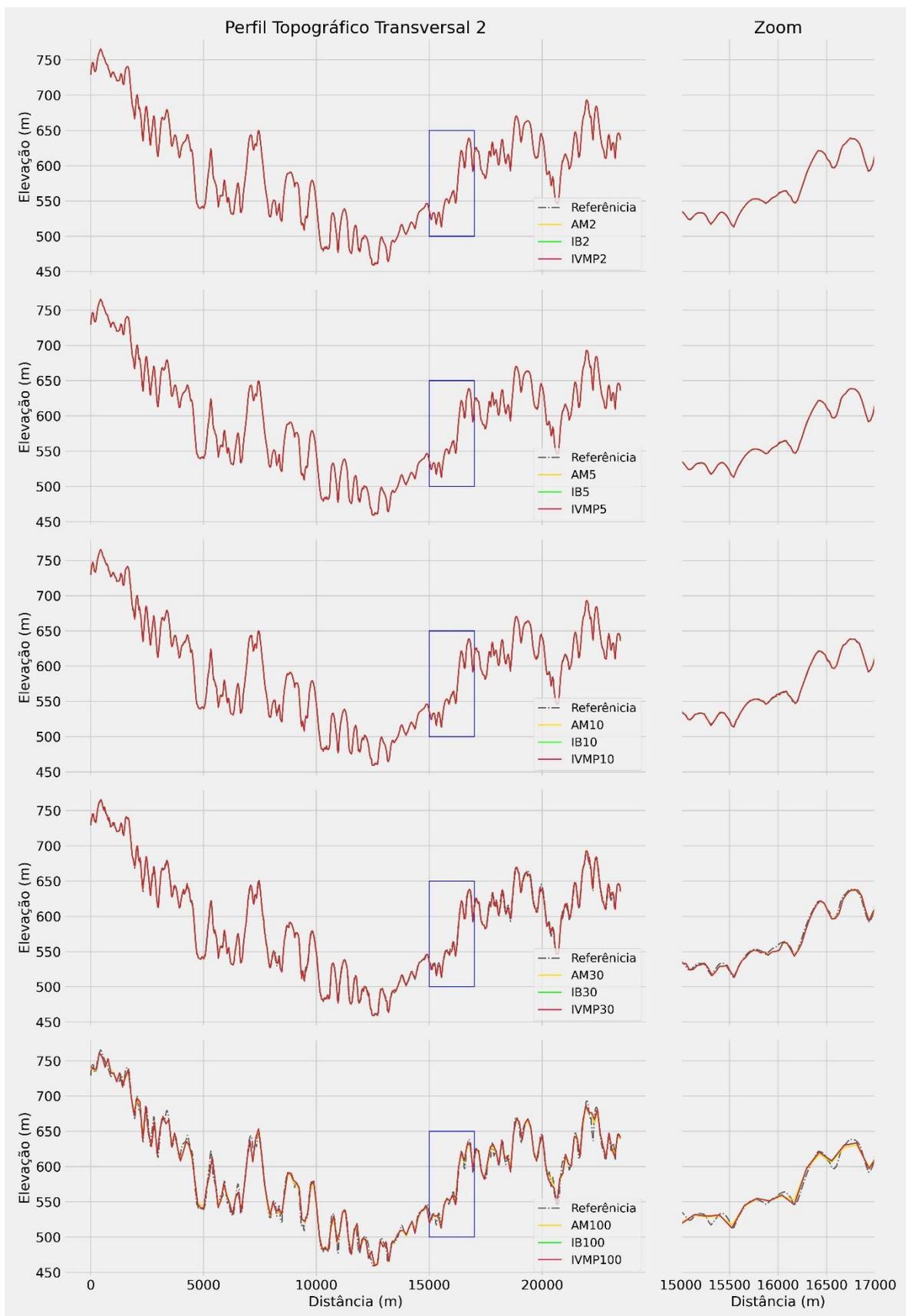


Figura 19 – Perfil topográfico transversal 2: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

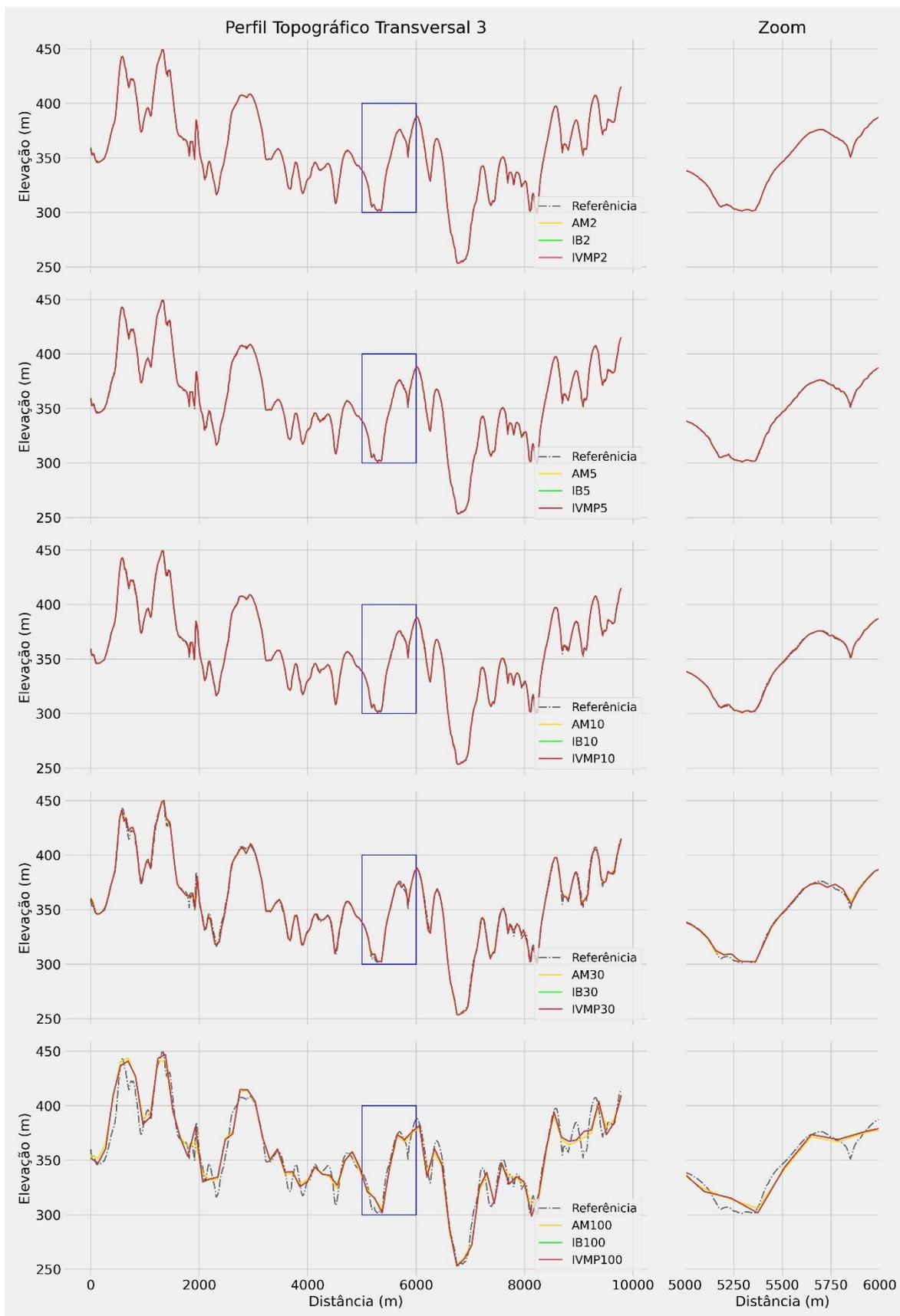


Figura 20 – Perfil topográfico transversal 3: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

## 5.2 Análise de curvas hipsométricas

Para as curvas hipsométricas de todas as resoluções espaciais nos três métodos de reamostragem, não foram identificadas diferenças relevantes em relação à curva de referência. Todavia, é possível notar uma suave subestimação de valores de elevação pela curva AM100. A Figura 21 ilustra as curvas hipsométricas de referência e das resoluções degradadas.

A variação relativa entre a curva hipsométrica de referência e as curvas das reamostradas é mostrado na Figura 22. Analisando as variações relativas das curvas hipsométricas percebe-se o padrão de crescimento da variação com a redução da elevação. Isto ocorre para os três métodos de reamostragem e em todas as resoluções degradadas. Em todos os métodos as resoluções de 2, 5 e 10 metros apresentaram comportamento praticamente iguais, com valor máximo de variação relativa inferior a 0,08%. Enquanto para as resoluções de 30 e 100 metros as maiores variações foram -0,82% e -3,15%, respectivamente. a

As resoluções de 30 e 100 metros apresentaram dois padrões diferentes, variando de acordo com o método de reamostragem. Para a interpolação pelo vizinho mais próximo, o padrão foi igual ao das resoluções de 2, 5, e 10 metros. Enquanto a agregação pela média e interpolação bilinear demonstraram ínfima subestimação dos valores de elevação. A resolução de 100 metros foi a que apresentou os maiores erros. O padrão observado foi de subestimação de até -3,15% para a agregação pela média e superestimação de até 1,3% para a interpolação bilinear e interpolação pelo vizinho mais próximo.

Portanto, como foi percebido na Figura 21 e confirmado pelos resultados apresentados na Figura 22, para todas as resoluções degradadas não foram identificadas diferenças relativas relevantes entre as curvas hipsométricas. Isto demonstra que, apesar da informação ter sido degradada em até 100 vezes, a caracterização hipsométrica praticamente não se altera. Esse fato também foi reportado no trabalho de Mendonça e Paz (2022), eles mostram que não há diferenças significantes entre as curvas hipsométricas de MDT-LiDAR reamostrados nas resoluções de 2, 5, 10 e 30 metros.

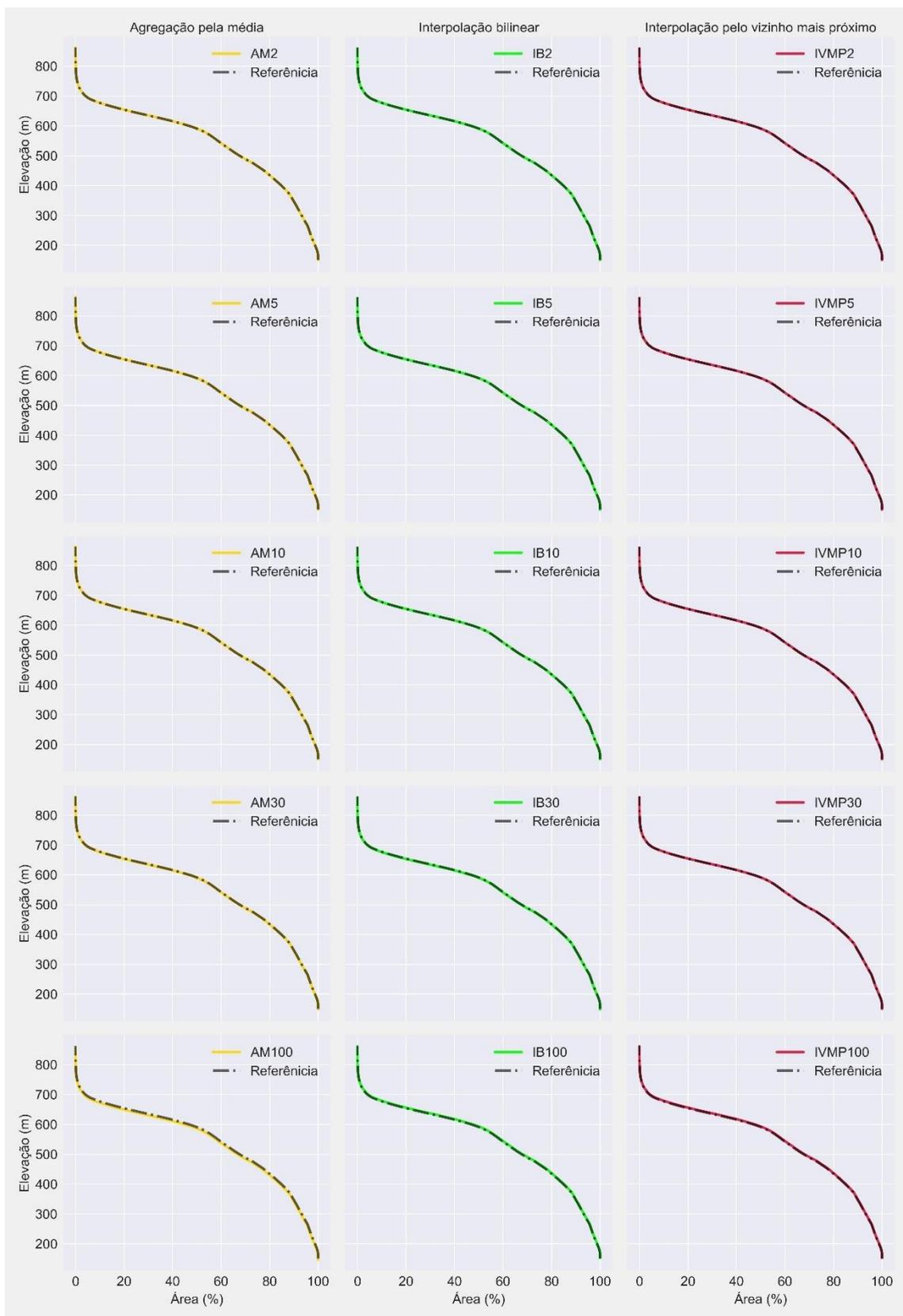


Figura 21 – Curvas hipsométricas: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

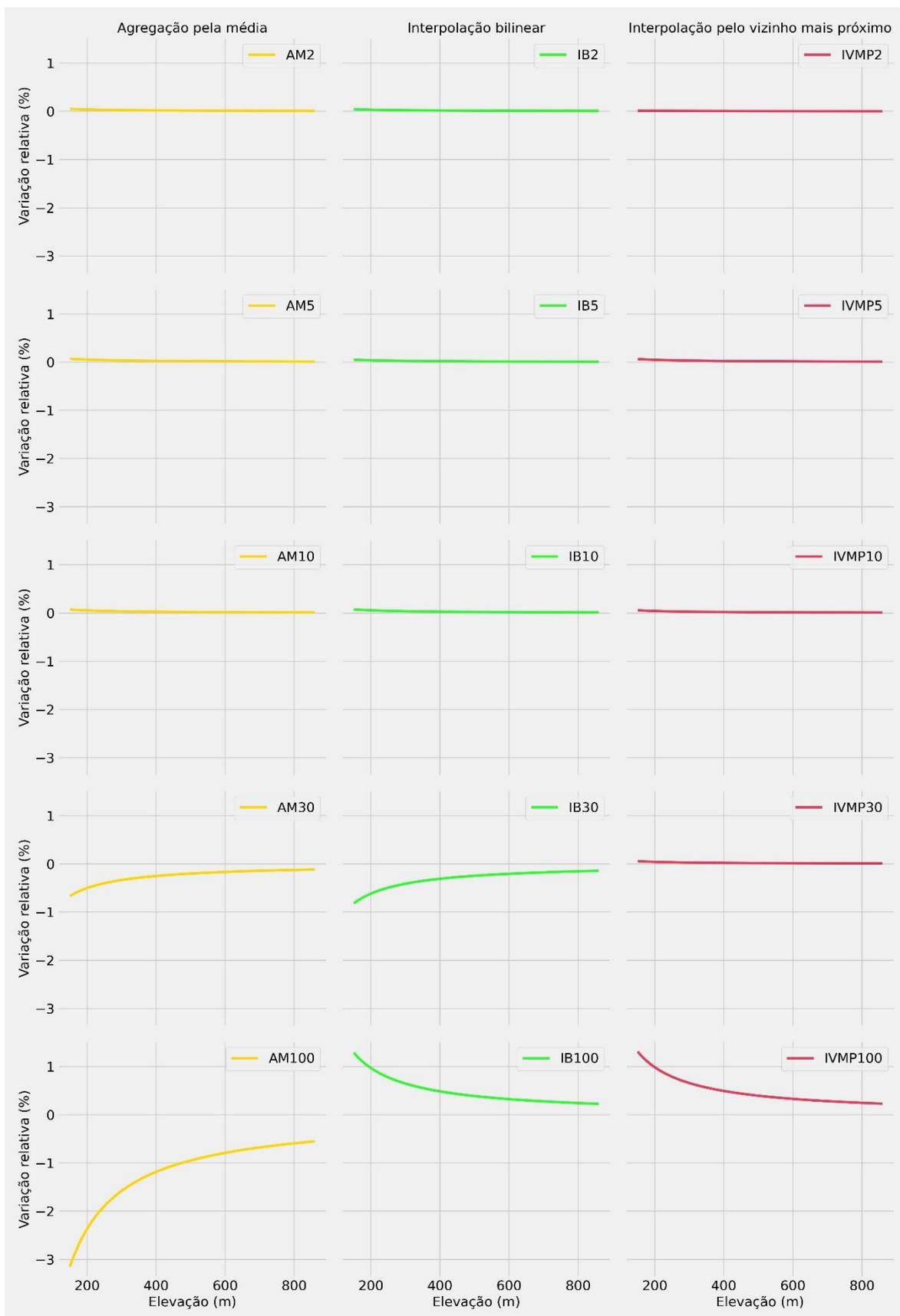


Figura 22 – Variação relativa de curvas hipsométricas: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

### 5.3 Inspeção visual de redes de drenagem

De maneira geral, a partir da inspeção visual percebe-se que, quando analisadas as redes de drenagem de MDTs reamostrados de mesma resolução espacial não há diferenças relativas entre elas. Porém, nota-se uma maior similaridade de traçados entre as redes geradas por MDTs reamostrados pelos métodos de interpolação bilinear e vizinho mais próximo. A Figura 23 mostra a rede de drenagem de referência e todas as redes de drenagem nas resoluções reamostradas.

Já quando é analisado as redes derivadas de MDTs reamostrados em diferentes resoluções espaciais, observa-se de forma geral que a resolução espacial que apresentou maior similaridade com o traçado da rede de referência (1 metro) foi a de 2 metros, seguida pela de 10, 5, 30 e 100 metros. Embora na avaliação trecho a trecho tenha ocorrido variação entre as resoluções com melhor traçado.

Na inspeção visual das redes de drenagem de resolução espacial de 2 metros foi notado que os traçados das três redes reamostradas são semelhantes, salvo em alguns pontos como na confluência entre os trechos 21 e 22 em que apresentam leve diferença. Deve-se destacar que para a parte alta da bacia, as redes obtidas dos MDTs de 2 metros de resolução espacial apresentaram traçados menos precisos quando comparado a outras regiões da bacia. A Figura 24 ilustra a diferença de traçados na confluência dos trechos 21 e 22.

Para a resolução de 5 metros, o padrão dos traçados das redes é semelhante entre si. Entretanto, quando comparado com a rede de referência as redes com resolução de 5 m apresentaram deslocamentos nas confluências, e assim, interferindo no comprimento de trechos fazendo com que alguns fiquem maiores e outros menores. Isto ocorre principalmente nas confluências dos trechos 13 e 26, 9 e 11, 10 e 4, 27 e 16. A Figura 25 ilustra a situação citada.

Na análise da resolução de 10 metros foi observado traçado semelhante entre as redes degradadas. Em relação ao traçado de referência, as redes apresentaram maior afastamento e deslocamento de confluências na parte alta da bacia, principalmente nos trechos 21 e 22, padrão semelhante ao que foi observado para resolução de 2 metros. A Figura 26 mostra o fato supracitado.

A resolução de 30 metros assim como as outras, apresentou traçados similar entre as redes, no entanto com maior número de divergências. Quando comparada com a rede de referência, nota-se maior afastamento e deslocamentos de confluências. Destacando os trechos 11, 13 e 26; 14, 15 e 17; 4, 10 e 27. A Figura 27 mostra o padrão dito anteriormente.

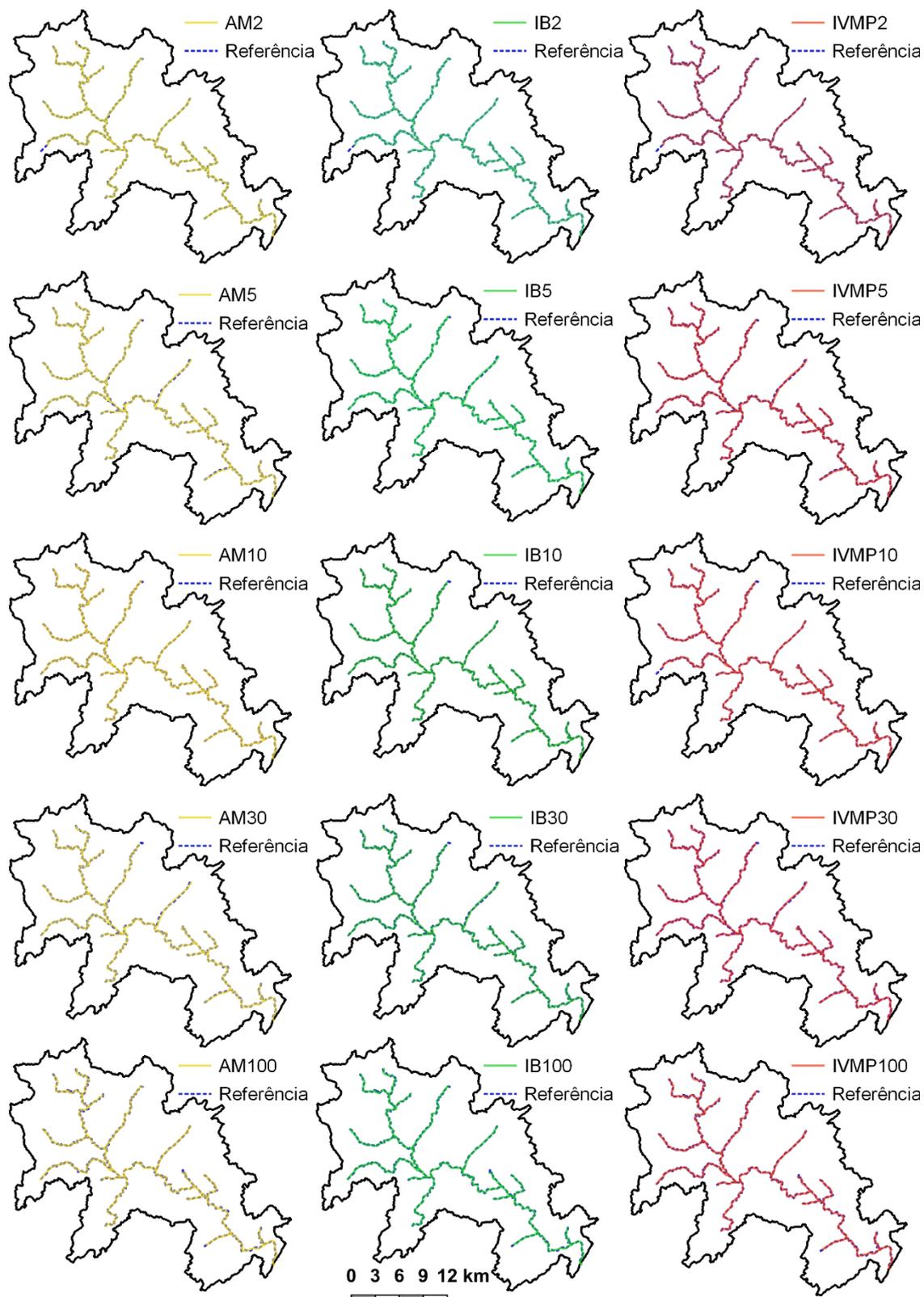


Figura 23 – Redes de drenagem: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e interpolação pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

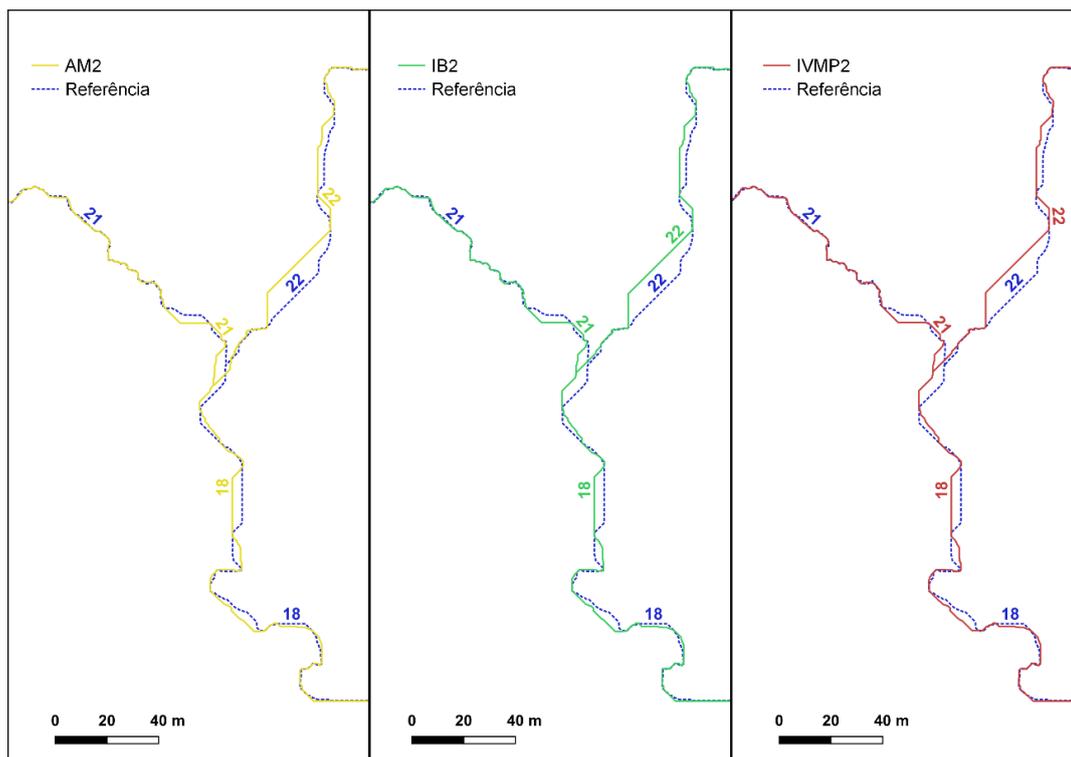


Figura 24 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 21 e 22: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 2 metros.

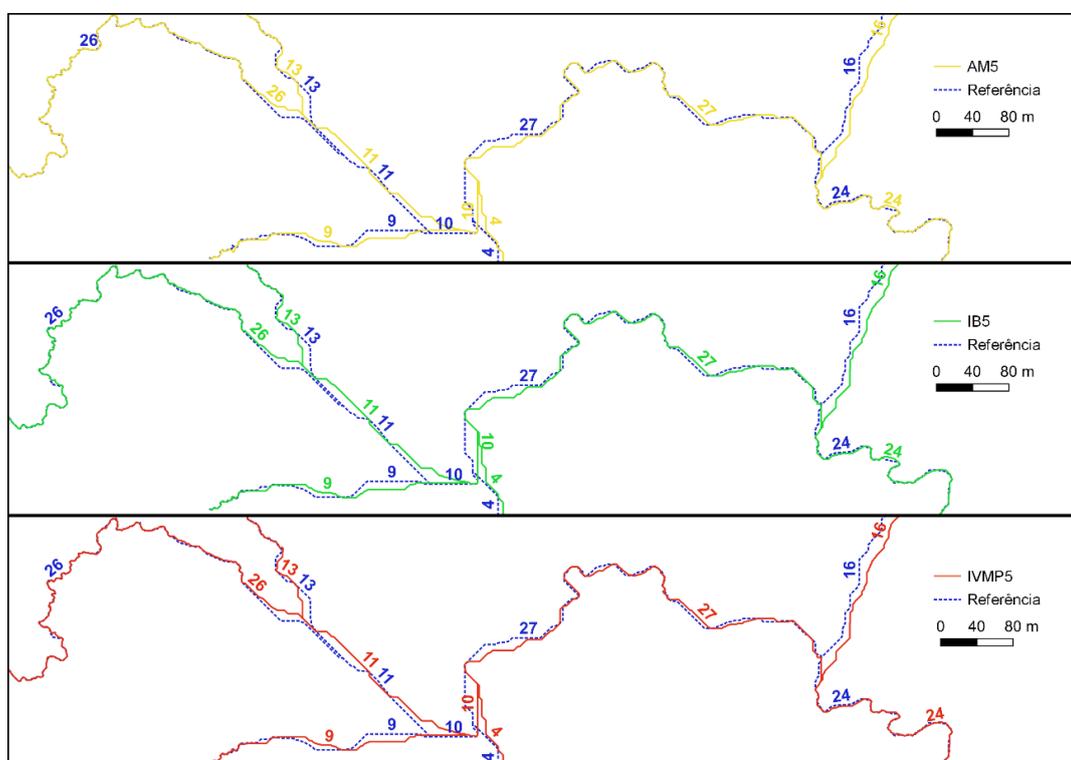


Figura 25 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 13 e 26, 9 e 11, 10 e 4, 27 e 16: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 5 metros.

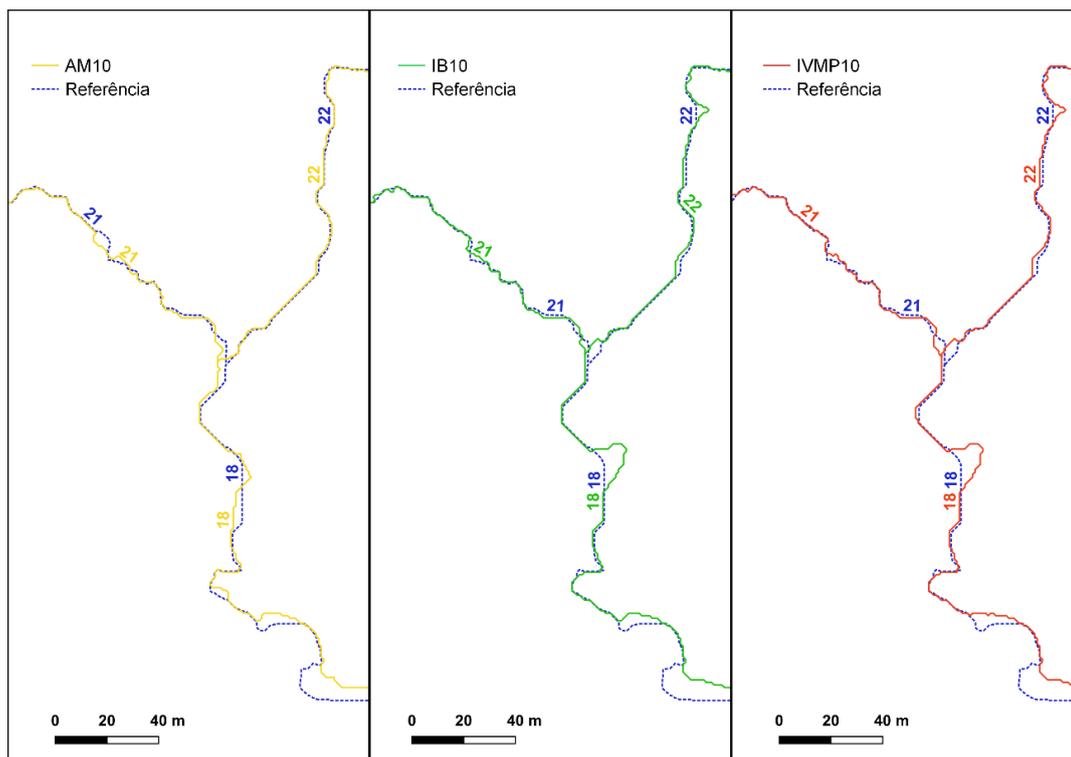


Figura 26 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 21 e 22: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 10 metros.

Na inspeção visual da resolução de 100 metros, observou-se traçados semelhantes entre as redes. Assim como nas outras resoluções avaliadas, a resolução de 100 m apresentou afastamento em relação à rede de referência e deslocamento de confluências. Também foi percebida uma menor capacidade de representar os meandros. A Figura 28 mostra as redes de drenagem na resolução de 100 metros e a rede de referência.

Por meio da inspeção visual das redes de drenagem foi observado que à medida que se aumenta o grau de degradação da resolução espacial, as redes de drenagem apresentaram maior distanciamento e deslocamento de confluências em relação à rede de referência. Isso tende a acarretar em aumento e diminuição do comprimento de trechos. Além disso, as redes também perderam a capacidade de representar os meandros, isto pode implicar na subestimação do comprimento para a maioria dos trechos.

Estes achados vão em acordo com os resultados de outras pesquisas (MENDONÇA e PAZ, 2022; SOUZA e PAZ, 2017; YANG *et al.*, 2014; VAZE *et al.*, 2010), as quais enfatizam que quanto maior o grau de degradação da resolução espacial, maiores são os efeitos de mudança de resolução sobre as redes de drenagem.

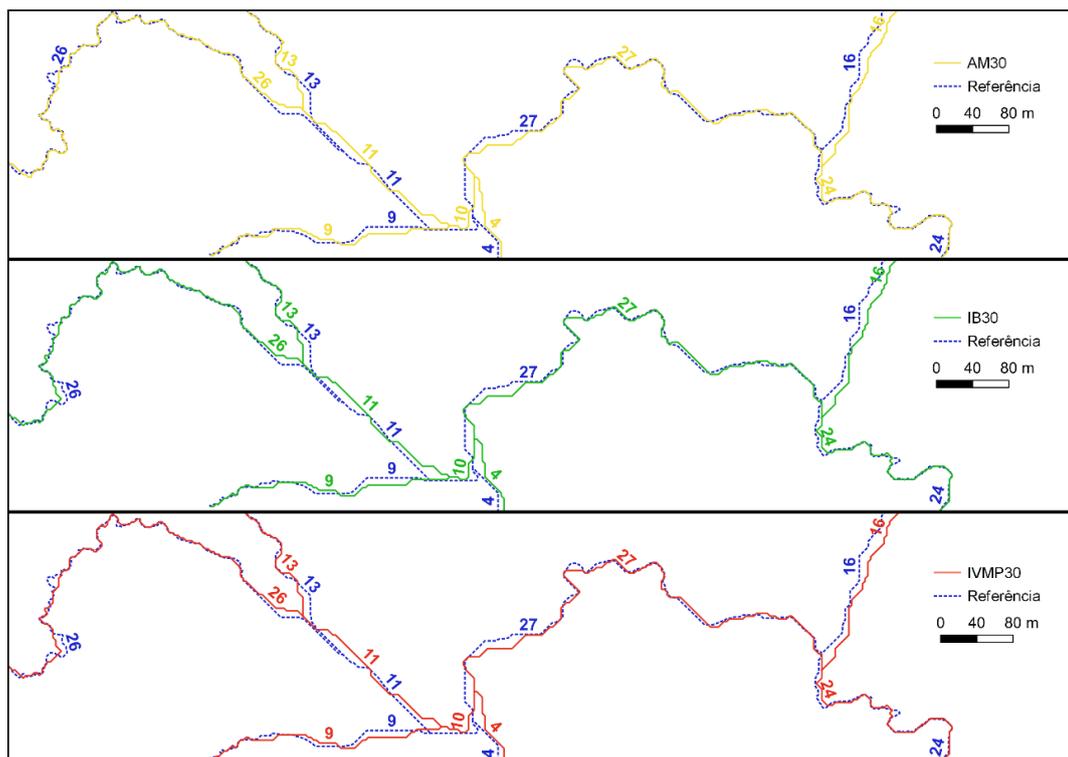


Figura 27 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 13 e 26, 9 e 11, 10 e 4, 27 e 16: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 30 metros.

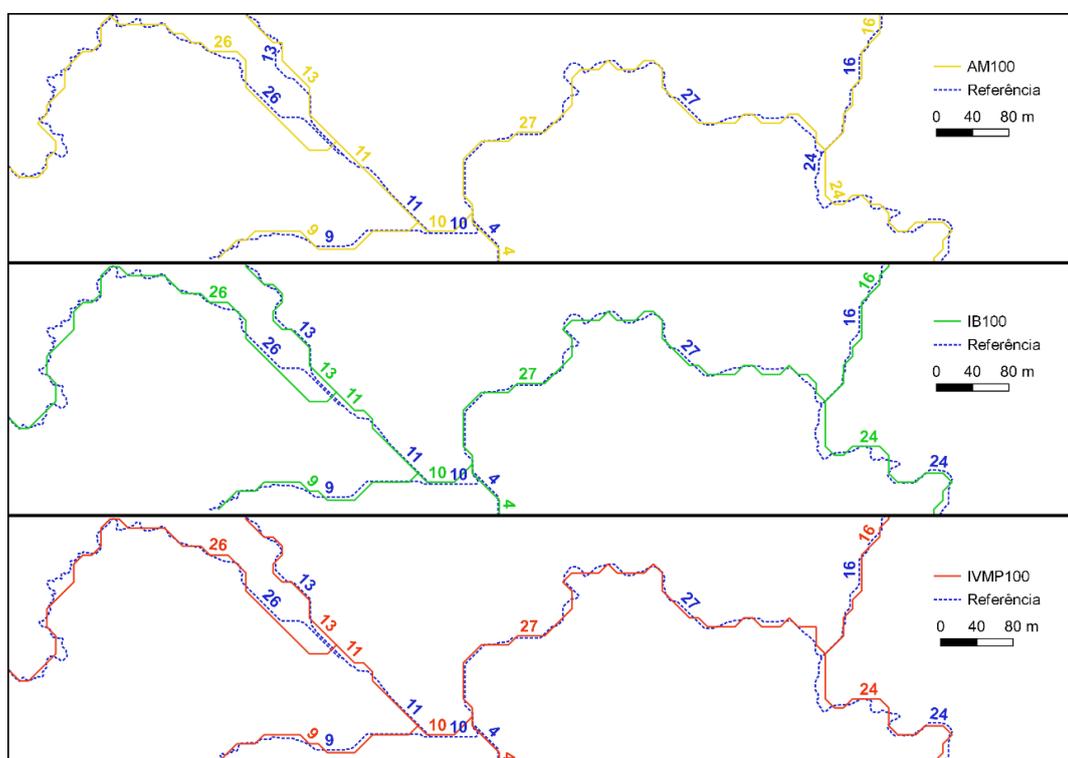


Figura 28 – Traçados das redes de drenagem na confluência dos trechos 13 e 26, 9 e 11, 10 e 4, 27 e 16: para as redes de referência e reamostradas na resolução espacial de 100 metros.

## 5.4 Distância média entre redes de drenagem

A avaliação da distância média entre a rede de referência e as redes degradadas mostrou que para a mesma resolução espacial o valor da distância foi bem próximo entre redes degradadas, com exceção de segmentos de alguns trechos, o que pode ser notado em parte nas Figuras 24, 25, 26, 27 e 28.

Além disso, foi notado que com o aumento da degradação da resolução espacial a distância média entre as redes de drenagem tende a aumentar. Adicionalmente, o deslocamento de confluências foi fator determinante no resultado do cálculo das distâncias médias, favorecendo para a geração de valores maiores.

Esses fatos vão em acordo com os resultados de outros trabalhos (SOUSA e PAZ, 2017; CHEN *et al.*, 2012). Em método que avalia o erro da distância entre redes de drenagem, Yang *et al.* (2014) mostram que para resoluções mais grosseiras o erro aumenta, isso significa que a distância entre as redes é maior à medida que a resolução é degradada.

### 5.4.1 Avaliação por trechos

A Figura 29 mostra para cada trecho analisado a distância média em metros entre a rede de drenagem de referência e as redes degradadas. A resolução de 2 metros apresentou menores valores dentre as resoluções para 68% dos trechos e a resolução de 5 e 10 metros para 28% e 2% respectivamente. Embora a resolução de 5 metros tenha maior percentual de trechos com a menor distância média em relação à resolução de 10 metros, quando comparadas entre si, a de 10 metros demonstrou menores distâncias em 57% dos trechos.

Através da Figura 29, é possível observar nos trechos o padrão predominante de menor valor de distância média para a resolução de 2 metros. Também é possível notar que a resolução de 100 metros tem pior desempenho em quase todos os trechos, exceto nos trechos 1, 9, 11, 16 e 27. Nestes trechos a resolução de 100 metros apresenta menores distâncias médias que as resoluções de 5 e 30 metros, por apresentar confluências mais próximas do traçado de referência.

Nos trechos 9, 11 e 16, as resoluções espaciais de 5 e 30 metros apresentaram comportamento semelhante, onde o valor da distância média é bastante superior as demais resoluções, chegando a uma diferença de até 100%. Isto acontece devido ao maior deslocamento de confluência nesses trechos em relação às demais resoluções. Isto pode ser observado comparando as Figuras 25, 27 e 28.



Figura 29 – Distância média entre trechos para métodos de reamostragem: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

Deve se destacar que a resolução de 5 metros apresentou oscilações de desempenho, tendo os melhores resultados para os trechos localizados na porção alta da bacia, equivalente a 28% dos trechos (trechos 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22). Mas, também teve o pior desempenho em 18% dos trechos, e maior valor de distância média na maioria dos trechos em relação a resolução de 10 metros.

#### 5.4.2 Avaliação por resolução

As Tabelas 2, 3 e 4 mostram o percentual do número de trechos por faixa de valor de distância média para as redes de drenagem reamostrada pela técnica de agregação pela média, interpolação bilinear e interpolação pelo vizinho mais próximo, respectivamente.

Tabela 2 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de distância média para redes de drenagem reamostradas por agregação pela média.

#### Percentual de trechos por rede de drenagem

<b>Distância média (m)</b>	<b>AM2</b>	<b>AM5</b>	<b>AM10</b>	<b>AM30</b>	<b>AM100</b>
<b>0 - 10</b>	82.1%	46.4%	78.6%	3.6%	0.0%
<b>10 - 20</b>	14.3%	28.6%	14.3%	71.4%	3.6%
<b>20 - 30</b>	0.0%	3.6%	7.1%	3.6%	67.9%
<b>30 - 40</b>	3.6%	10.7%	0.0%	7.1%	17.9%
<b>40 - 50</b>	0.0%	0.0%	0.0%	7.1%	3.6%
<b>50 - 60</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	3.6%
<b>60 - 70</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	0.0%
<b>70 - 80</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	3.6%
<b>80 - 90</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	0.0%
<b>90 - 100</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabela 3 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de distância média para redes de drenagem reamostradas por interpolação bilinear.

**Percentual de trechos por rede de drenagem**

<b>Distância média (m)</b>	<b>IB2</b>	<b>IB5</b>	<b>IB10</b>	<b>IB30</b>	<b>IB100</b>
<b>0 - 10</b>	82.1%	46.4%	85.7%	3.6%	0.0%
<b>10 - 20</b>	14.3%	28.6%	10.7%	64.3%	3.6%
<b>20 - 30</b>	0.0%	3.6%	3.6%	10.7%	60.7%
<b>30 - 40</b>	3.6%	10.7%	0.0%	10.7%	25.0%
<b>40 - 50</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	3.6%
<b>50 - 60</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	3.6%
<b>60 - 70</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	3.6%
<b>70 - 80</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>80 - 90</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	0.0%
<b>90 - 100</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabela 4 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de distância média para redes de drenagem reamostradas por interpolação pelo vizinho mais próximo.

**Percentual de trechos por rede de drenagem**

<b>Distância média (m)</b>	<b>IVMP2</b>	<b>IVMP 5</b>	<b>IVMP10</b>	<b>IVMP30</b>	<b>IVMP100</b>
<b>0 - 10</b>	82.1%	46.4%	82.1%	3.6%	0.0%
<b>10 - 20</b>	14.3%	28.6%	14.3%	67.9%	3.6%
<b>20 - 30</b>	0.0%	7.1%	3.6%	7.1%	57.1%
<b>30 - 40</b>	3.6%	7.1%	0.0%	7.1%	28.6%
<b>40 - 50</b>	0.0%	0.0%	0.0%	7.1%	3.6%
<b>50 - 60</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	3.6%
<b>60 - 70</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	3.6%
<b>70 - 80</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>80 - 90</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	0.0%
<b>90 - 100</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	0.0%

Os dados das Tabelas 2, 3 e 4 mostram que em todas as técnicas de reamostragem os melhores resultados, ou seja, menores distâncias médias entre as redes de drenagem de referência e reamostradas, foram apresentados pela resolução de 2 metros, seguida das resoluções de 10, 5, 30 e 100 metros.

Na avaliação das técnicas de reamostragem por resolução espacial, é observado que resultados semelhantes entre elas em todas para as resoluções espaciais de 2 e 5 metros. Já para a resolução de 10 metros a rede IB10 tem leve vantagem e, para as resoluções de 30 e 100 metros as redes AM30 e AM100 possuem menores distâncias médias.

No entanto, os valores de distância média das redes são predominantemente próximos dentro de uma mesma resolução espacial. Sendo assim, como a diferença absoluta entre os valores de distância média é pequena, pode-se afirmar que no geral as redes possuem resultados similares dentro da mesma resolução espacial.

## 5.5 Quantificação de comprimento do rio principal e trechos

De posse dos comprimentos do rio principal e trechos, foram analisadas as diferenças relativas entre os comprimentos dos trechos da rede de referência com os das redes derivadas de MDTs reamostrados, foi observado que no geral a maioria dos trechos em todas redes degradadas apresentaram padrão de subestimação do comprimento. Diferentes estudos (SLIWINSKI *et al.*, 2022; MENDONÇA e PAZ, 2022; SOUZA e PAZ, 2017; GOULDEN *et al.*, 2014; YANG *et al.*, 2014) também concluíram que com a degradação da resolução espacial o comprimento de caminhos de fluxo diminui. Sliwinski *et al.* (2022) testaram seis técnicas de reamostragem e para todas elas houve redução do comprimento de caminho de fluxo.

O deslocamento de confluências foi fator determinante para a diferença dos comprimentos dos trechos, ocasionando aumento para alguns trechos e diminuição para outros. Outro fator importante foi a redução da capacidade de representar corretamente os meandros, provocando diminuição no comprimento dos trechos. Isto ocorre devido ao aumento do tamanho dos *pixels* o que dificulta realizar o delineamento preciso dos meandros.

### 5.5.1 Avaliação por trechos

Os comprimentos dos trechos apresentaram variações de superestimação e subestimação. Para subestimação a variação foi de -0,01% (trecho 27, AM2) até -29,56% (trecho 12, IB100), a maior variação do comprimento foi apresentada na superestimação com valores de 0,02% (trecho 7, AM2) até 75% (trecho 11, IB5 e IVMP5). A Figura 30

mostra para todos os trechos analisados a diferença relativa entre os comprimentos de referência e os das redes de drenagem degradadas.

Entre as resoluções, a de 2 metros mostrou menores diferenças em 79% dos trechos, a de 10 metros em 14% e a de 5 metros em 7%. Algo a se destacar é que a resolução de 10 metros demonstrou menores diferenças relativas quando comparada com a resolução de 5 metros em 57% dos trechos.

De acordo com a Figura 30, 75% dos trechos (3, 4, 5, 6, 8, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, Rio Principal) apresentaram padrão de predominância de subestimação dos comprimentos para maioria das redes degradadas, e 25% dos trechos (1, 2, 7, 9, 10, 11, 16) demonstraram padrão predominante de superestimação.

Dentre todos os trechos analisados, o trecho 11 merece destaque por apresentar maior diferença relativa (75%), a qual ocorre na resolução de 5 m. Isto aconteceu devido ao deslocamento da confluência dos trechos 13 e 26, provocando diminuição do comprimento destes trechos e aumento no trecho 11. Vale destacar também que no trecho 11 a resolução de 30m apresentou valores elevados entre 53% e 62%.

### 5.5.2 Avaliação por resolução

As Tabelas 5, 6 e 7 mostram o percentual do número de trechos por faixa de valor de diferença relativa para as redes de drenagem derivadas dos MDTs reamostrados pela técnica de agregação pela média, interpolação bilinear e interpolação pelo vizinho mais próximo, respectivamente.

A partir dos dados das Tabelas 5, 6 e 7 observa-se que para as três técnicas de reamostragem as redes com 2 metros de resolução espacial apresentaram trechos com menores diferenças relativas, ou seja, o comprimento dos trechos destas redes é mais próximo do valor de referência em relação as demais redes. Seguindo essa lógica, a ordem das resoluções espaciais com comprimentos mais próximos do de referência é 2, 10, 5, 30 e 100 metros.

Quando avaliado qual técnica de reamostragem apresenta trechos com menores diferenças relativas, no geral a interpolação pelo vizinho mais próximo tem uma ligeira vantagem. Entretanto, vale-se dizer que os valores da diferença relativa do comprimento para cada método de reamostragem são, em sua maioria, próximos dentro de cada resolução. Portanto, apesar de no geral haver uma pequena diferença de desempenho entre as técnicas, para uma mesma resolução espacial os métodos tem resultados similares.

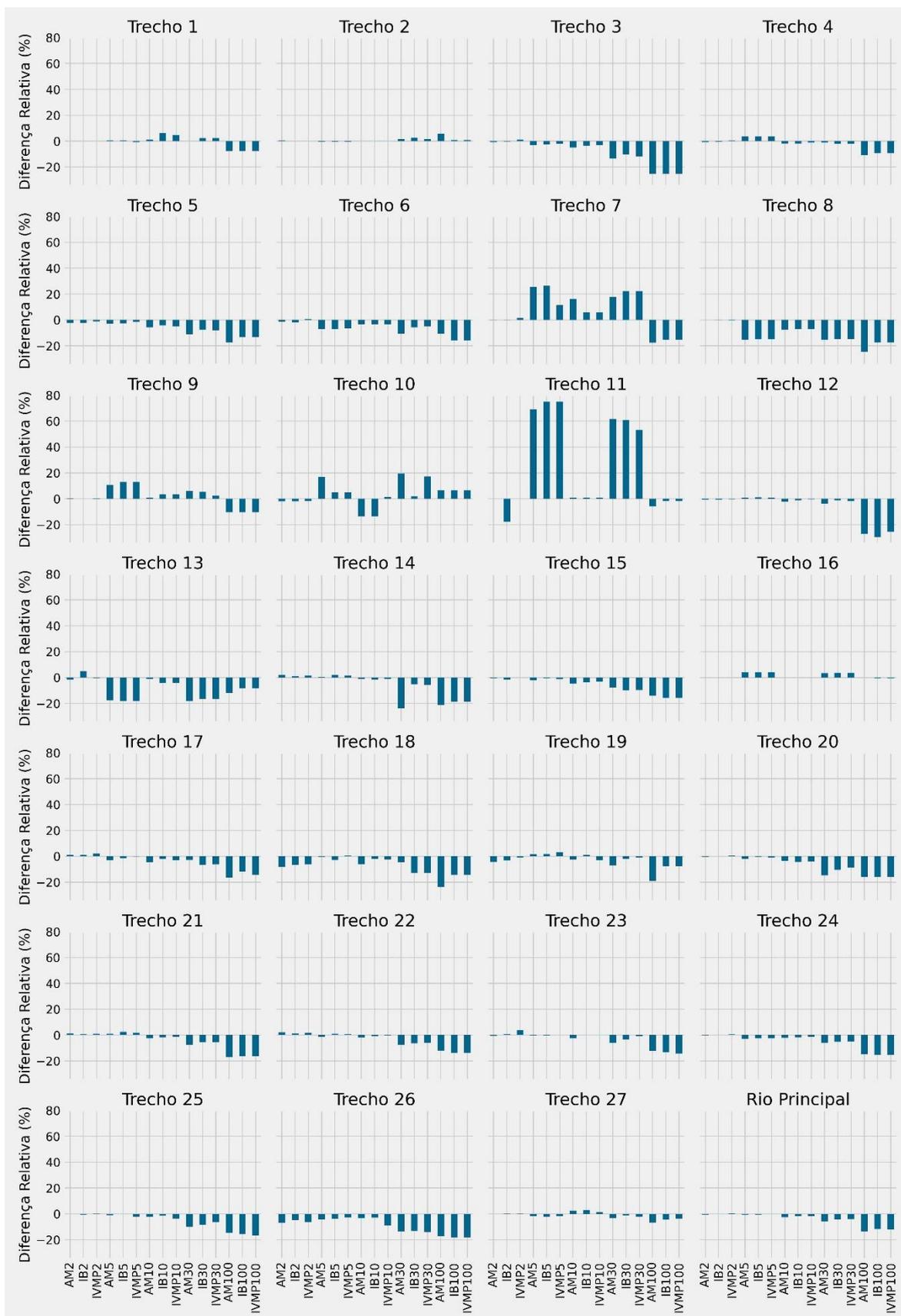


Figura 30 – Diferença relativa de comprimento entre trechos para métodos de reamostragem: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

Tabela 5 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de diferença relativa para a rede de drenagem reamostrada por agregação pela média.

**Percentual de trechos por rede de drenagem**

<b>Diferença Relativa (%)</b>	<b>AM2</b>	<b>AM5</b>	<b>AM10</b>	<b>AM30</b>	<b>AM100</b>
<b>0 - 10</b>	100.0%	78.6%	92.9%	57.1%	21.4%
<b>10 - 20</b>	0.0%	14.3%	7.1%	35.7%	60.7%
<b>20 - 30</b>	0.0%	3.6%	0.0%	3.6%	17.9%
<b>30 - 40</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>40 - 50</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>50 - 60</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>60 - 70</b>	0.0%	3.6%	0.0%	3.6%	0.0%
<b>70 - 80</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>80 - 90</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>90 - 100</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabela 6 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de diferença relativa para a rede de drenagem reamostrada por interpolação bilinear.

**Percentual de trechos por rede de drenagem**

<b>Diferença Relativa (%)</b>	<b>IB2</b>	<b>IB5</b>	<b>IB10</b>	<b>IB30</b>	<b>IB100</b>
<b>0 - 10</b>	96.4%	82.1%	96.4%	71.4%	32.1%
<b>10 - 20</b>	3.6%	10.7%	3.6%	21.4%	60.7%
<b>20 - 30</b>	0.0%	3.6%	0.0%	3.6%	7.1%
<b>30 - 40</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>40 - 50</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>50 - 60</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>60 - 70</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	0.0%
<b>70 - 80</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>80 - 90</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>90 - 100</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabela 7 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de diferença relativa para a rede de drenagem reamostrada por interpolação pelo vizinho mais próximo.

**Percentual de trechos por rede de drenagem**

<b>Diferença Relativa (%)</b>	<b>IVMP2</b>	<b>IVMP 5</b>	<b>IVMP10</b>	<b>IVMP30</b>	<b>IVMP100</b>
<b>0 - 10</b>	100.0%	82.1%	100.0%	71.4%	32.1%
<b>10 - 20</b>	0.0%	14.3%	0.0%	21.4%	60.7%
<b>20 - 30</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	7.1%
<b>30 - 40</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>40 - 50</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>50 - 60</b>	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	0.0%
<b>60 - 70</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>70 - 80</b>	0.0%	3.6%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>80 - 90</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>90 - 100</b>	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Os resultados do trabalho de Yang *et al.* (2014) também mostram redução de comprimento total de rios. Para a resolução espacial de 5 e 10 metros houve uma diferença relativa de aproximadamente 10% e para a resolução de 30 metros a diferença relativa chega até 16%.

Como tendência geral, os resultados de Yang *et al.* (2014) para as resoluções espaciais de 5 e 10 metros se assemelham aos encontrados nesta pesquisa. Entretanto, para a resolução espacial de 30 metros, os resultados não seguem mesma linha, embora alguns trechos deste trabalho apresentem padrão próximo ao resultado dos autores citados.

No trabalho de Sousa e Paz (2017) a proporção do salto de degradação de resolução espacial foi semelhante saindo de 1 km para 5, 10, 20 e 30 km. Os resultados mostram que as diferenças relativas foram superiores a 30% na maioria dos comprimentos de rios analisados. Isto mostra que para a mesma proporção de degradação da resolução espacial 5, 10 e 30 vezes foram encontradas diferenças relativas superiores ao presente estudo.

## **5.6 Percentual dentro de buffer (PDB)**

Na avaliação do percentual dentro do buffer, quanto maior for o percentual melhor a qualidade do traçado da rede de drenagem sob avaliação. De maneira geral, os resultados por resolução espacial mostram que os percentuais das redes de mesma resolução são

próximos, com algumas poucas exceções. Nota-se que o tamanho do buffer ( $\frac{1}{2}$  do tamanho do *pixel* da resolução espacial degradada) e a distância entre os traçados das redes de referência e degradada são os fatores que exerceram maior influência no cálculo do percentual. Com isso, foi observado que a resolução de 100 metros apresentou maiores PDB, seguida pela de 2, 10, 30 e 5 metros.

Diferentemente do que foi realizado e encontrado no presente estudo. Goulden *et al.* (2014) utilizaram outra abordagem, adotando tamanho de buffer fixo de 3 metros para avaliação de diferentes resoluções espaciais. Eles perceberam que com a degradação da resolução espacial o PDB diminuiu.

Já no estudo de Sousa e Paz (2017), quando foi adotado o buffer de  $\frac{1}{2}$  do tamanho do *pixel* da resolução espacial degradada, observou-se que para maioria dos rios analisados, houve a tendência de aumento do PDB para resoluções mais grosseiras. Isto vai em acordo com os resultados apresentados neste trabalho.

#### 5.6.1 Avaliação por trechos

A Figura 31 mostra o percentual dentro do buffer para cada trecho analisado por resolução espacial. A partir da Figura 30 observa-se que há trechos com padrões similares. Os trechos 2, 3, 23 e Rio Principal mostram percentuais próximos entre as resoluções espaciais. Já os trechos 9, 10, 11, 16 e 27 mostram que houve uma enorme variação entre as resoluções, com percentuais baixos para as resoluções de 5 e 30 metros.

Nos trechos 1, 5, 6, 7, 8, 12, 24 e 25 é possível notar que em sua maioria a resolução de 2 metros tem melhor resultado, com as resoluções de 10, 30 e 100 metros com percentuais próximos, enquanto a de 5 metros apresenta percentuais consideravelmente mais baixos em todos os trechos. Para os trechos 4, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22 e 26 existe a predominância de menores e maiores percentuais para a resolução de 2 e 100 metros, respectivamente.

Em questão de amplitude do percentual, o trecho 11 tem o maior valor, onde a resolução de 2 metros apresentou o maior valor de 98% (AM2) e menor valor de 3,82% resolução de 5 metros (em todas as redes). O trecho 16 apresentou a maior diferença de percentual em uma mesma resolução, a resolução de 2 metros teve como maior valor 90% para interpolação bilinear e 42% para interpolação pelo vizinho mais próximo.



Figura 31 – Percentual dentro do buffer de trechos para métodos de reamostragem: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

### 5.6.2 Avaliação por resolução das redes de drenagem reamostradas

As Tabelas 8, 9 e 10 mostram o percentual do número de trechos por faixa de valor de percentual dentro do *buffer* para as redes de drenagem derivadas dos MDTs reamostrados pela técnica de agregação pela média, interpolação bilinear e interpolação pelo vizinho mais próximo, respectivamente.

Por meio dos dados das Tabelas 8, 9 e 10 é possível inferir que a resolução que apresentou maiores valores de percentuais dentro do buffer foi a de 100 metros, seguida pela de 2, 10, 30 e 5 metros. Isto ocorreu devido ao tamanho do buffer ser de 50 metros, o que proporcionou uma zona de abrangência maior. Embora a distância média com a rede de referência tenha sido maior que nas outras resoluções.

Levando em consideração as redes por técnica, foi observado para a maioria das resoluções uma pequena prevalência para a interpolação bilinear. Porém, como também foi observado nas métricas anteriores, deve-se salientar que os valores de percentual dentro do buffer das redes reamostradas são majoritariamente próximos para uma mesma resolução espacial.

Tabela 8 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de percentual dentro do buffer para a rede de drenagem reamostrada por agregação pela média.

**Percentual de trechos por rede de drenagem**

<b>Percentual dentro do <i>buffer</i> (%)</b>	<b>AM2</b>	<b>AM5</b>	<b>AM10</b>	<b>AM30</b>	<b>AM100</b>
<b>0 - 10</b>	3.57%	17.86%	0.00%	0.00%	0.00%
<b>10 - 20</b>	0.00%	10.71%	3.57%	14.29%	0.00%
<b>20 - 30</b>	10.71%	0.00%	0.00%	3.57%	0.00%
<b>30 - 40</b>	17.86%	10.71%	3.57%	0.00%	0.00%
<b>40 - 50</b>	3.57%	17.86%	3.57%	10.71%	3.57%
<b>50 - 60</b>	3.57%	14.29%	17.86%	32.14%	7.14%
<b>60 - 70</b>	14.29%	10.71%	32.14%	39.29%	39.29%
<b>70 - 80</b>	14.29%	17.86%	28.57%	0.00%	35.71%
<b>80 - 90</b>	21.43%	0.00%	7.14%	0.00%	10.71%
<b>90 - 100</b>	10.71%	0.00%	3.57%	0.00%	3.57%

Tabela 9 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de percentual dentro do buffer para a rede de drenagem reamostrada por interpolação bilinear.

**Percentual de trechos por rede de drenagem**

<b>Percentual dentro do buffer (%)</b>	<b>IB2</b>	<b>IB5</b>	<b>IB10</b>	<b>IB30</b>	<b>IB100</b>
<b>0 - 10</b>	3.57%	17.86%	0.00%	0.00%	0.00%
<b>10 - 20</b>	0.00%	10.71%	3.57%	10.71%	0.00%
<b>20 - 30</b>	10.71%	0.00%	0.00%	3.57%	0.00%
<b>30 - 40</b>	17.86%	14.29%	0.00%	3.57%	3.57%
<b>40 - 50</b>	7.14%	14.29%	7.14%	3.57%	0.00%
<b>50 - 60</b>	0.00%	10.71%	28.57%	39.29%	7.14%
<b>60 - 70</b>	14.29%	14.29%	32.14%	25.00%	32.14%
<b>70 - 80</b>	17.86%	17.86%	17.86%	14.29%	39.29%
<b>80 - 90</b>	10.71%	0.00%	7.14%	0.00%	10.71%
<b>90 - 100</b>	17.86%	0.00%	3.57%	0.00%	7.14%

Tabela 10 – Percentual de número de trechos por faixa de valor de percentual dentro do buffer para a rede de drenagem reamostrada por interpolação pelo vizinho mais próximo.

**Percentual de trechos por rede de drenagem**

<b>Percentual dentro do buffer (%)</b>	<b>IVMP2</b>	<b>IVMP 5</b>	<b>IVMP10</b>	<b>IVMP30</b>	<b>IVMP100</b>
<b>0 - 10</b>	0.00%	21.43%	0.00%	0.00%	0.00%
<b>10 - 20</b>	3.57%	7.14%	3.57%	14.29%	0.00%
<b>20 - 30</b>	17.86%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
<b>30 - 40</b>	10.71%	17.86%	3.57%	3.57%	3.57%
<b>40 - 50</b>	7.14%	10.71%	7.14%	3.57%	0.00%
<b>50 - 60</b>	17.86%	17.86%	25.00%	39.29%	7.14%
<b>60 - 70</b>	17.86%	10.71%	35.71%	28.57%	35.71%
<b>70 - 80</b>	17.86%	14.29%	14.29%	10.71%	35.71%
<b>80 - 90</b>	3.57%	0.00%	3.57%	0.00%	10.71%
<b>90 - 100</b>	3.57%	0.00%	7.14%	0.00%	7.14%

## 5.7 Delimitação de bacia hidrográfica

Através da delimitação de bacia hidrográfica das redes de drenagem de referência e reamostradas foi possível computar o percentual de área de concordância, erros de comissão

e omissão das redes analisadas. A Figura 32 ilustra por resolução espacial as áreas de concordância, comissão e omissão, e respectivos percentuais para cada rede de drenagem.

Os resultados da Figura 32 mostram que os percentuais de área em concordância, erro de comissão e omissão entre todas as redes são próximos entre si. Apesar da proximidade dos valores, à medida que o grau de degradação da resolução espacial aumenta os valores de concordância diminuem e erros de comissão e omissão aumentam.

A variação dos percentuais para concordância e erro de omissão foi de 1,76%, e de 0,948% para erro de comissão. Isto indica que mesmo degradando a informação de referência em até 100 vezes, ocorre compensações de áreas, permitindo que o valor da área da bacia seja relativamente preciso.

A resolução de 2 metros obteve melhores resultados, seguida pela de 5, 10, 30 e 100 metros. Em relação às redes de mesma resolução espacial, os melhores resultados são observados para as redes derivadas de MDTs reamostrados pela agregação por média nas resoluções espaciais de 5 e 100 metros, nas resoluções espaciais de 2 e 30 metros para as redes derivadas de MDTs reamostrados por interpolação bilinear, e mesmo desempenho entre ambas as técnicas para as redes com resolução espacial de 10 metros.

Portanto, a partir dos resultados apresentados percebe-se que a degradação de resolução espacial provoca a diminuição da área da bacia. Isso está de acordo com os resultados de diferentes trabalhos na literatura (SLIWINSKI *et al.*, 2022; MENDONÇA e PAZ, 2022; SOUZA e PAZ, 2017; GOULDEN *et al.*, 2014). Especificamente o trabalho de Mendonça e Paz (2022) mostra percentuais de decréscimo de ordem de grandeza similar ao do presente estudo. Goulden *et al.* (2014) relatam que os erros na delimitação de bacia hidrográficas encontrados em seu trabalho estão ligados às características topográficas do terreno, eliminação de característica hidrológicas em resoluções mais grosseiras e erros de medições altimétricas do LiDAR devido a vegetação.

Em contrapartida, outros estudos (EDBRUGGER *et al.*, 2021; TAN *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2008) mostram que a mudança de resolução espacial refinada para mais grosseira acarretou em aumento da área da bacia.

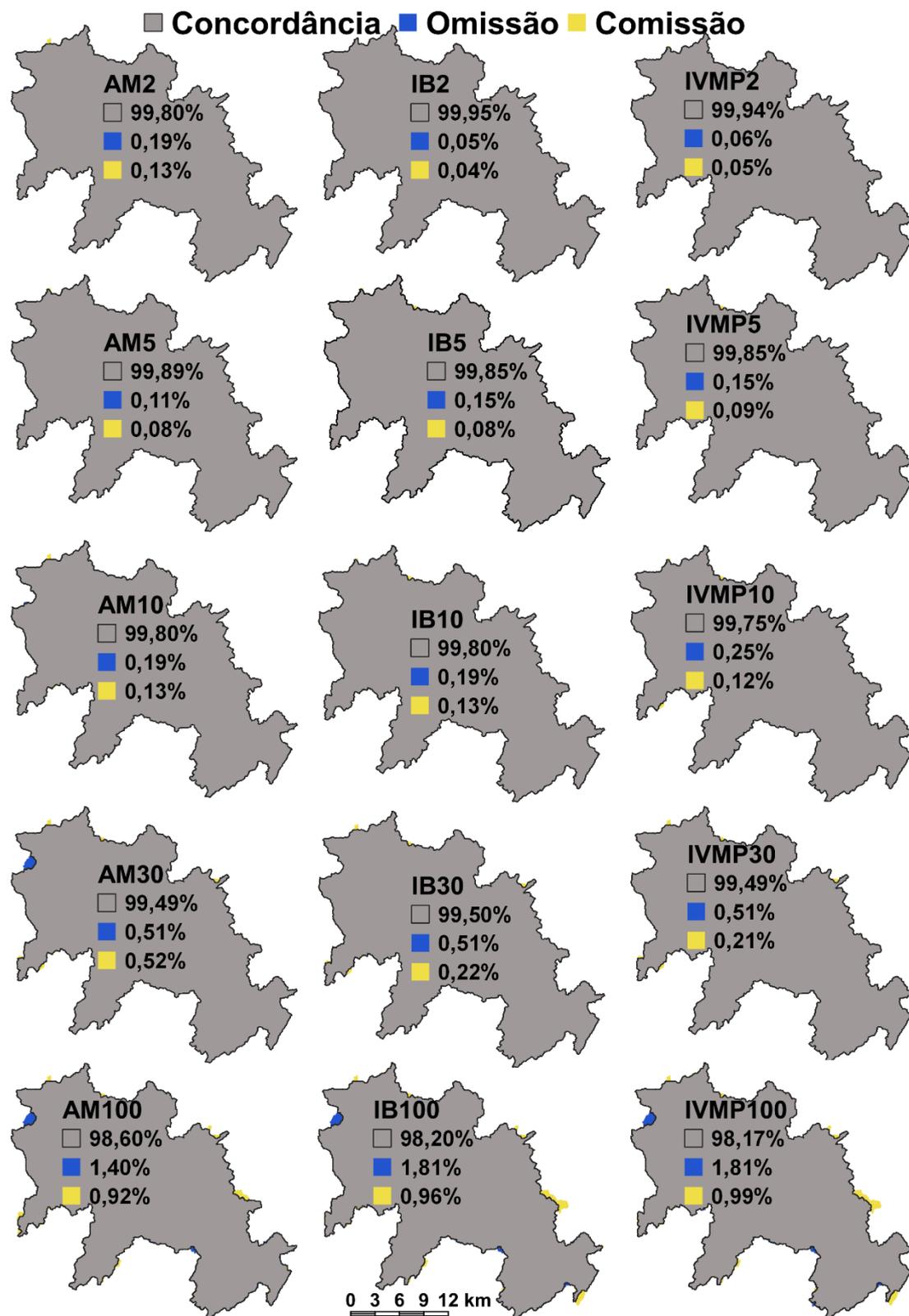


Figura 32 – Computação de áreas de concordância, omissão e comissão na delimitação de bacias hidrográficas: agregação pela média (AM), interpolação bilinear (IB) e pelo vizinho mais próximo (IVMP) nas resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros.

## 5.8 Quantificação de custo computacional

A reamostragem do MDT-Lidar proporcionou uma extrema redução no tempo de processamento de algoritmos e no espaço de armazenamento em disco chegando até 5.031.900% e 986.394%, respectivamente. A variação de tempo de processamento entre as resoluções espaciais ilustra como a degradação da resolução espacial reduz o custo computacional, o que pode ser necessário para trabalhar com áreas de grandes dimensões.

Ainda que o tempo de processamento não tenha sido fator proibitivo neste estudo, para áreas com maiores dimensões e conseqüentemente maior quantidade de *pixels*, o tempo de processamento e limitação de memória RAM podem se tornar fatores proibitivos devido a quantidade de *pixels* a se processar. Por isso, algoritmos têm sido propostos com processamentos mais eficientes, diminuindo o custo computacional de processamento. Por exemplo, algoritmos que utilizam processamentos em paralelo (BARNES *et al.*, 2014; GONG e XIE, 2009; STANISLAWSKI *et al.*, 2018; YILDIRIM *et al.*, 2015).

Tratando-se do custo computacional por resolução espacial, observa-se que para as três técnicas de reamostragem os tempos de processamento foram praticamente iguais, com variações de apenas alguns segundos. Em questão do espaço de armazenamento em disco, não há variação de espaço entre arquivos de uma mesma resolução espacial, pois possuem o mesmo número de linhas e colunas e mesmo tipo de dados. Isto reforça que em questão de custo computacional não ocorre diferenças significativas entre as técnicas de reamostragem, mas sim em relação às resoluções espaciais.

A Tabela 11 mostra quantidade de linhas, colunas e *pixels* por resolução espacial. Nela é observado menor número de linhas, colunas e *pixels* para resoluções mais grosseiras. Já na Tabela 12 é mostrado o espaço de armazenamento em disco de arquivos originais e processados e a redução destes em relação ao arquivo de referência e da resolução anterior.

Os resultados da Tabela 12 mostram que há grandes saltos de redução de espaço de armazenamento em disco de uma resolução espacial para outra, principalmente das resoluções de 2 para 5 metros, 10 para 30 metros e 30 para 100 metros.

Tabela 11 – Quantidade de linhas, colunas e *pixels* por resolução espacial

Resolução espacial	Quantidade de linhas	Quantidade de colunas	Quantidade de <i>pixels</i>
<b>Referência 1 metro</b>	34.979	41.860	1.464.220.940
<b>2 metros</b>	17.487	20.931	366.020.397
<b>5 metros</b>	6.995	8.373	58.569.135
<b>10 metros</b>	3.498	4.187	14.646.126
<b>30 metros</b>	1.166	1.396	1.627.736
<b>100 metros</b>	350	419	146.650

Tabela 12 – Espaço de armazenamento em disco de arquivos processados e redução.

Resolução espacial	Espaço de armazenamento em disco de arquivo MDT e produtos derivados (GB)	Redução de espaço de armazenamento em disco (%)	Redução de armazenamento em disco em relação à resolução anterior (%)
<b>Referência 1 metro</b>	5,45	-	-
<b>2 metros</b>	1,36	300	300
<b>5 metros</b>	0,223	2.400	700
<b>10 metros</b>	0,0558	9.897	312
<b>30 metros</b>	0,00621	89.694	806
<b>100 metros</b>	0,000576	986.394	1.000

As Tabelas 13, 14 e 15 mostram o tempo de processamento por algoritmo e redução de tempo de processamento em relação à referência e à resolução anterior para os algoritmos *Fill Sinks XXL*, *Flow Accumulation* e *Channel Network*, respectivamente. Os dados das tabelas mostram que há grande redução de tempo de processamento à medida que a resolução espacial se torna mais grosseira, o que já era esperado devido a menor quantidade de *pixels* para processar.

Através da Tabela 13 é possível notar que o tempo de processamento sai da escala de minutos para resoluções espaciais de 1 e 2 metros, e vai até poucos segundos para as resoluções de 5, 10, 30 e 100 metros. Quando analisada a redução do tempo em relação a resolução anterior, percebe-se que a redução também é grande, porém em menor grau em relação à resolução de referência. Assim, é observada maior redução no salto da resolução de 10 para 30 metros, e menor redução da resolução de 1 para 2 metros.

Tabela 13 – Tempo de processamento para algoritmo *Fill Sinks XXL*.

<b>Resolução espacial</b>	<b>Tempo processamento (minutos)</b>	<b>Redução de tempo em relação à referência (%)</b>	<b>Redução de tempo em relação à resolução anterior (%)</b>
<b>Referência 1 metro</b>	31,05	-	-
<b>2 metros</b>	6,70	363	363
<b>5 metros</b>	0,88	3.415	658
<b>10 metros</b>	0,18	16.836	382
<b>30 metros</b>	0,02	186.200	1.000
<b>100 metros</b>	<0,01	1.862.900	900

Tabela 14 – Tempo de processamento para algoritmo *Flow Accumulation*.

<b>Resolução espacial</b>	<b>Tempo processamento (minutos)</b>	<b>Redução de tempo em relação à referência (%)</b>	<b>Redução de tempo em relação à resolução anterior (%)</b>
<b>Referência 1 metro</b>	83,87	-	-
<b>2 metros</b>	17,75	372	372
<b>5 metros</b>	2,47	3.300	620
<b>10 metros</b>	0,55	15.148	348
<b>30 metros</b>	0,05	167.633	1.000
<b>100 metros</b>	0,00	5.031.900	2.900

Tabela 15 – Tempo de processamento para algoritmo *Channel Network*.

<b>Resolução espacial</b>	<b>Tempo processamento (minutos)</b>	<b>Redução de tempo em relação à referência (%)</b>	<b>Redução de tempo em relação à resolução anterior (%)</b>
<b>Referência 1 metro</b>	71,93	-	-
<b>2 metros</b>	15,28	371	371
<b>5 metros</b>	2,42	2.877	532
<b>10 metros</b>	0,62	11.565	292
<b>30 metros</b>	0,08	86.220	640
<b>100 metros</b>	0,00	4.315.900	4.900

Para os algoritmos *Flow Accumulation* e *Channel Network*, o tempo de processamento sai da escala de horas na resolução espacial de 1 metro, passa para minutos

nas resoluções espaciais de 2 e 5 metros, e vai até poucos segundos nas resoluções de 10, 30 e 100 metros.

Na questão da redução do tempo em relação à resolução anterior, observa-se larga redução, mas de menor nível em relação à resolução de referência. Nesse sentido, é notada maior redução no salto da resolução de 30 para 100 metros, e menor redução da resolução de 5 para 10 metros.

Pelas Tabelas 13, 14 e 15 é possível inferir que o tempo de processamento do algoritmo *Flow Accumulation* é maior que do *Fill Sinks XXL* e *Channel Network* para as resoluções de 1, 2 e 5 metros. Enquanto para as demais resoluções não há diferença relevante para o tempo de processamento dos algoritmos.

A Figura 33 mostra o tempo de processamento dos algoritmos por resolução espacial. Nela é possível observar uma enorme diminuição do tempo de processamento principalmente da resolução de 1 para 2 metros. Além disso, o tempo para as resoluções de 10, 30 e 100 metros é praticamente imediato. Isso pode ser explicado pela quantidade de *pixels* a serem processados nestas resoluções espaciais, e assim, a maior parte do tempo de processamento é constituído por elementos de inicialização e procedimentos dos algoritmos de tempo fixo, freando uma maior redução do tempo de processamento.

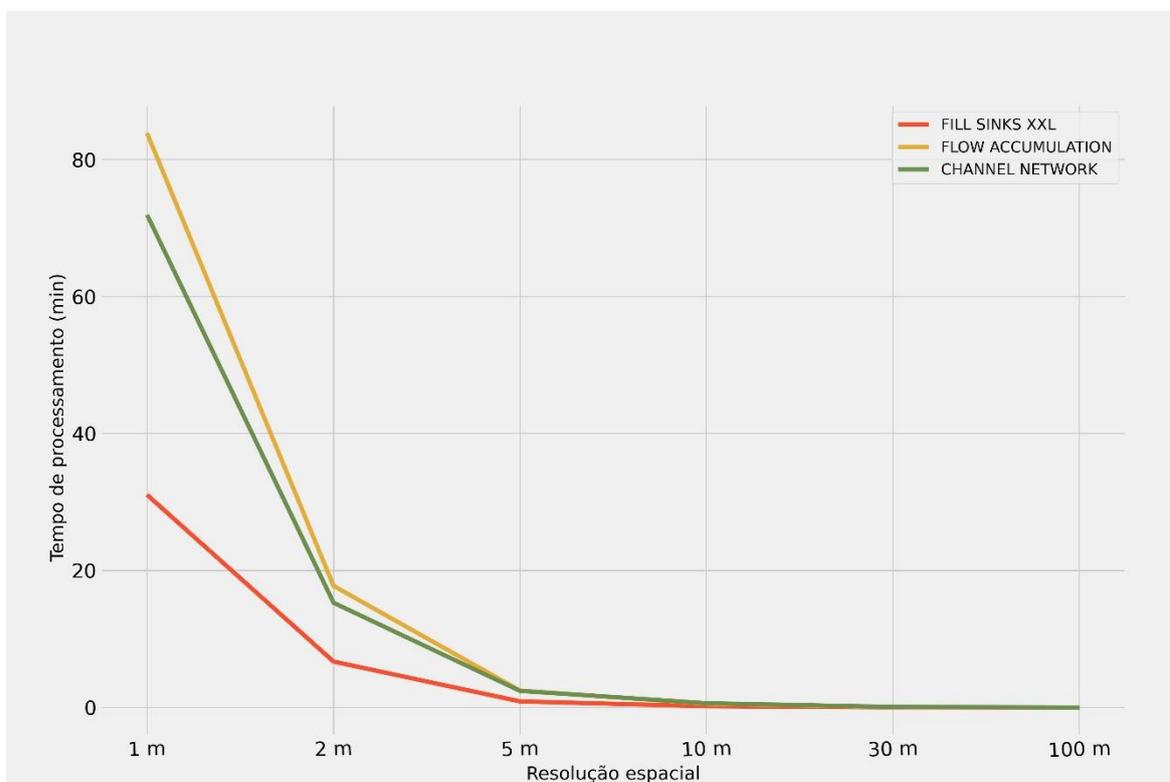


Figura 33 – Tempo de processamento de algoritmos por resolução espacial.

A redução de espaço de armazenamento em disco e tempo de processamento é ilustrada na Figura 34. Ela mostra os valores médios em escala logarítmica. Os resultados da Figura 34 mostram que há uma tendência exponencial de aumento das reduções de espaço de armazenamento em disco e tempo de processamento com o aumento da degradação da resolução espacial. Além disso, para as resoluções de 2 e 100 metros a maior redução foi no tempo de processamento do algoritmo *Flow Accumulation*, enquanto para as resoluções de 5, 10 e 100 metros foi para o processamento do *Fill Sink XXL*.

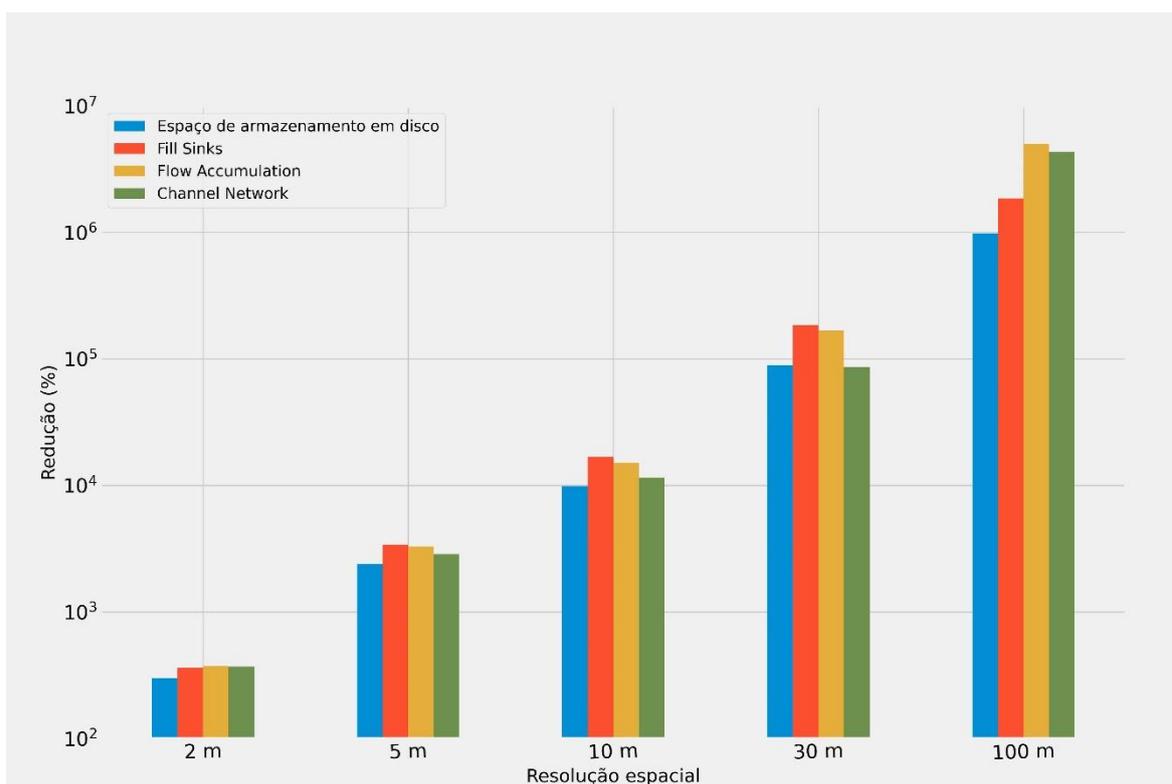


Figura 34 – Redução por resolução espacial de espaço de armazenamento em disco, tempo de processamento para os algoritmos *Fill Sinks XXL*, *Flow Accumulation* e *Channel Network* em relação a resolução espacial de 1 metro.

Os resultados encontrados estão de acordo com trabalhos presentes na literatura. Por exemplo, no estudo de Mendonça e Paz (2022), eles também utilizaram os algoritmos *Fill Sinks XXL* e *Flow Accumulation* no SAGA GIS e constataram extrema redução do tempo de processamento e tamanho em disco. Em outro trabalho, Metz *et al.* (2011) utilizando algoritmos diferentes, do presente trabalho para extração de rede de drenagem, também relatam redução significativa de tempo de processamento para resoluções mais grosseiras.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Conclusões

Este trabalho aplicou oito métricas para avaliar os efeitos da mudança de resolução espacial, a saber: comparação entre perfis topográficos transversais (PTT), variação relativa de curvas hipsométricas, inspeção visual de redes de drenagem, distância média entre traçados de redes de drenagem, variação relativa de comprimento de rio, percentual dentro do buffer, área de delimitação de bacias hidrográficas e quantificação de custo computacional (tempo de processamento e espaço de armazenamento em disco).

O MDT-LiDAR de 1 metro foi reamostrado para as resoluções de 2, 5, 10, 30 e 100 metros utilizando três técnicas de reamostragem: agregação pela média, interpolação bilinear e interpolação pelo vizinho mais próximo. A partir das avaliações efetuadas, não foram identificadas diferenças pertinentes entre as técnicas de reamostragem. Entretanto, a reamostragem provocou variações significativas entre as resoluções espaciais analisadas.

As representações topográficas não apresentaram diferenças relevantes entre as resoluções espaciais, exceto pela resolução espacial de 100 metros. A resolução espacial de 100 metros demonstrou dificuldade em representar mudanças de elevação em pequenas distâncias, subestimou os valores de picos e vales e apresentou variação relativa na curva hipsométrica superior a 1%.

A reamostragem do MDT provocou nas redes de drenagem deslocamento de confluências, distanciamento da rede de drenagem de referência e perda da capacidade de representar meandros. Estes efeitos foram aumentando à medida que a resolução espacial teve maior grau de degradação. Embora na comparação direta entre as redes de drenagem as diferenças sejam pequenas, a utilização destas redes para geração de outros planos de informação, como estimativa de área de inundação, transporte de sedimentos ou cruzamento com outros tipos de dados, podem provocar erros.

Além disso, a distância média entre as redes de drenagem tende a aumentar com o aumento da resolução espacial. A resolução de 2 metros apresentou as menores distâncias e a de 100 as maiores. Enquanto a resolução de 10 metros teve melhor desempenho em relação as resoluções de 5 e 30 metros.

Em relação a diferença relativa do comprimento, o padrão predominante entre as resoluções grosseiras foi de subestimação dos comprimentos, apresentando subestimação

para 75% dos trechos e superestimação para 25% restantes. Nessa métrica os melhores resultados foram obtidos pelas resoluções de 2, 10, 5, 30 e 100 metros, respectivamente.

No percentual dentro do buffer, a resolução espacial de 100 metros teve os maiores percentuais, isto é explicado pelo fato de ter tamanho de buffer maior que as demais resoluções, provocando uma maior zona de tolerância. As demais resoluções com melhores resultados foram 2, 10, 30 e 5 metros, respectivamente.

A delimitação de bacia hidrográfica não apresentou perdas de informação significativas à medida que foi degradando a resolução espacial. Apresentou valores máximos de erro para a resolução de 100 metros, em que demonstrou 98% de concordância com a área de referência, enquanto as demais resoluções teve para mesma área valores superiores a 99%. Os melhores resultados foram da resolução de 2, 5, 10, 30 e 100 metros, respectivamente. Portanto, a delimitação de bacia não é afetada de maneira significativa quando se degrada a resolução espacial.

No quesito computação do custo computacional, foi identificada uma enorme redução de tempo de processamento e espaço de armazenamento em disco ocasionado pela reamostragem. Tanto em relação ao tempo de processamento quanto ao espaço de armazenamento em disco, a degradação da resolução espacial provocou redução em escala exponencial.

Por fim, a resolução espacial de 2 metros apresentou os melhores resultados. Sendo assim, essa resolução é a mais indicada em caso de necessidade de reamostragem dos dados PE3D para esta área de estudo, pois apresentou significativa redução de custo computacional sem perder representatividade de características topográficas, qualidade do traçado da rede de drenagem e da delimitação da bacia hidrográfica.

## **6.2 Recomendações**

No contexto dessa pesquisa, para futuros estudos recomenda-se:

- Utilizar áreas de estudos com características topográficas diferentes, tendo intuito de avaliar relação entre padrões de perda de informação em diferentes características geomorfológicas;
- Realizar a quantificação do custo computacional em máquinas com diferentes capacidades de processamento. Esta avaliação pode fornecer dados importantes sobre custo-benefício para aquisição de máquinas para processamento de dados;

- Realizar estudos comparativos com outros produtos MDE como SRTM, TanDEM-X, TOPODATA para comparar os padrões de perda de informação e identificar fontes de dados com maior nível de acurácia;
- Avaliar o efeito da reamostragem de resolução espacial em outras características topográficas como declividade, aspecto e rugosidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 25 jun. 2022
- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA - APAC. **Atualização do plano estadual de recursos hídricos de Pernambuco – PERH|PE (diagnóstico integrado)**. 2020. Disponível em: <https://www.perhpe.com.br/downloads>. Acesso em: 15 jun. 2022.
- ARIZA-VILLAVERDE, A. B.; JIMÉNEZ-HORNERO, F. J.; GUTIÉRREZ DE RAVÉ, E. Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis. **Geomorphology**, v. 241, p. 243-254, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.040>.
- ARMSTRONG, R.N.; MARTZ, L.W. Topographic parametrization in continental hydrology: a study in scale. **Hydrological Processes**, v. 17, p. 3763-3781, 2003.
- AZIZIAN, A.; BROCCA, L. Determining the best remotely sensed DEM for flood inundation mapping in data sparse regions. **Int. J. Remote Sens.**, v. 41, p. 1884-1906, 2019. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1677968>.
- BARNES, R.; LEHMAN, C.; MULLA, D. Priority-flood: an optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models. **Computers & Geosciences**, v. 62, p. 117-127, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.024>.
- BUARQUE, D. C.; FAN, F. M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 91-103, 2009.
- CHEN, Y., WILSON, J. P., ZHU, Q.; ZHOU, Q. Comparison of drainage constrained methods for DEM generalization. **Computers and Geosciences**, v. 48, p. 41-49, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.002>.
- CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. de M.; CAMPOS, P. H. A. L. PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL: base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. **SILUSBA Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**. 12º, 2015, Brasília, Distrito Federal, Brasil. Anais... Brasília: SILUSBA, 2015.
- CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014.
- CONSORCIO ÁGUAS DE PERNAMBUCO. **Relatório Final de Atividades Executadas Bloco I**. 2017. Acesso em: 12 jan. 2023.
- DAVIES, H. N.; BELL, V. A. Assessment of methods for extracting low-resolution river networks from high-resolution digital data. **Hydrological Sciences Journal**, v. 54, n. 1, p. 17-28, 2009. doi: <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.17>.

ESRI. **Aggregate**. Disponível em:

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/aggregate.htm>. Acesso em: 08 jul. 2022.

ESRI. **How Flow Direction works**. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>. Acesso em: 28 set. 2022.

ESRI. **How Flow Accumulation works**. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm>. Acesso em: 30 set. 2022.

ESRI. **How Flow Accumulation works**. Disponível em:

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm>. Acesso em: 30 set. 2022.

ERDBRÜGGER, J.; VAN MEERVELD, I.; BISHOP, K.; SEIBERT, J. Effect of DEM-smoothing and -aggregation on topographically-based flow directions and catchment boundaries. **Journal of Hydrology**, v. 602, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126717>.

FERRAZ, G. F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/34017>. Acesso em: 10 jun. 2022.

FISHER, P. F.; TATE, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. **Progress in Physical Geography**, v.30, n. 4, p. 467-489, 2006.

FREEMAN, G. T. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413-422, 1991. doi: [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90048-I](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90048-I)

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. Grid size dependency of parameters extracted from digital elevation models. **Comput. Geosci.**, v.20, n.1, p. 85-87, 1994.

GILLIN, C. P.; BAILEY, S. W.; MCGUIRE, K. J.; PRISLEY, S. P. Evaluation of lidar-derived DEMs through terrain analysis and field comparison. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 81, n. 5, p. 387-396, 2015. doi: 10.14358/PERS.81.5.387.

GONG, J.; XIE, J. Extraction of drainage networks from large terrain datasets using high throughput computing. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 2, p. 337-346, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.09.002>.

GOULDEN, T.; HOPKINSON, C.; JAMIESON, R.; STERLING, S. Sensitivity of watershed attributes to spatial resolution and interpolation method of LiDAR DEMs in three distinct landscapes. **Water Resour. Res.**, v. 50, p. 1908-1927, 2014. doi:10.1002/2013WR013846.

GOYAL, M. K.; PANCHARIYA, V. K.; SHARMA, A.; SINGH, V. Comparative assessment of swat model performance in two distinct catchments under various dem scenarios of varying resolution, sources and resampling methods. **Water Resources Management**, v. 32, p.805–825, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1840-1>.

GRIEVE, S. W. D.; MUDD, S. M.; MILODOWSKI, D. T.; CLUBB, F. J.; FURBISH, D. J. How does grid-resolution modulate the topographic expression of geomorphic processes? **Earth Surf. Dynam.**, v. 4, p. 627-653, 2016. doi:10.5194/esurf-4-627-2016

- GROHMANN, C. H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional scale analysis. **Computers & Geosciences**, v. 77, p. 111-117, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.003>.
- GRUBER S.; PECKHAM, S. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. *In*: HENGL, T.; REUTER, H.I. **Developments in Soil Science**. Amsterdam: Elsevier, 2009. v. 33, cap. 7, p. 141-169.
- HAAG, S.; SCHWARTZ, D.; SHAKIBAJAHROMI, B.; CAMPAGNA, M.; SHOKOUFANDEH, A. A fast algorithm to delineate watershed boundaries for simple geometries. **Environmental Modelling & Software**, v. 134, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104842>.
- HABTEZION, N.; NASAB, M. T.; CHU, X. How does DEM resolution affect microtopographic characteristics, hydrologic connectivity, and modelling of hydrologic processes? **Hydrol. Process.**, v. 30, p. 4870-4892, 2016.
- HASAN, A; PILESJO, P.; PERSSON, A. On generating digital elevation models from lidar data – resolution versus accuracy and topographic wetness index indices in northern peatlands. **Geodesy and cartography**, v. 38, n. 2, p. 57-69, 2012. doi: 10.3846/20296991.2012.702983.
- HENGL, T.; REUTER, H.I. **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- HOPKINSON, C.; HAYASHI, M.; PEDDLE, D. Comparing alpine watershed attributes form LiDAR, photogrammetric, and contour based digital elevation models. **Hydrol. Processes**, v. 23, n. 3, p. 451-463, 2009. doi:10.1002/hyp.7155.
- HUI, Z; JIN, S.; CHENG, P.; ZIGGAH, Y. Y.; WANG, L.; WANG, Y.; HU, H.; HU, Y. An active learning method for dem extraction from airborne LiDAR point clouds. **IEEE Access**, v. 7, p. 89366-89378, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2926497.
- ITEP – INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO. **PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL – PE 3D Validação dos Produtos Aerofotogramétricos e Perfilamento a Laser – Relatório Final do Bloco 1 -Análise de Consistência Lógica, Completude e Exatidão Posicional**: PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL – PE 3D. Recife: ITEP, 6 nov. 2018a. Acesso em: 12 jan. 2023.
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.
- LE COZ, M.; DELCLAUX, F.; GENTHON, P.; FAVREAU, G. Assessment of Digital Elevation Model (DEM) aggregation methods for hydrological modeling: Lake Chad basin, Africa. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 8, p. 1661-1670, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.07.009>.
- LI, J.; WONG, D. W. S. Effects of DEM sources on hydrologic applications. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, n. 3, p. 251-261, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.11.002>.
- LI, J.; ZHAO, Y.; BATES, P.; NEAL, J.; TOOTH, S.; HAWKER, L.; MAFFEI, C. Digital Elevation Models for topographic characterisation and flood flow modelling along low-gradient, terminal dryland rivers: A comparison of spaceborne datasets for the Rio Colorado, Bolivia. **Journal of Hydrology**, v. 591, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125617>

- LIDBERG, W.; NILSSON, M.; LUNDMARK, T.; ÅGREN, A. M. Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling. **Hydrol. Process.**, v. 31, p. 4660-4668, 2017. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.11385>.
- LINDSAY, J. B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. **Comput. Geosci.**, v. 95, p. 75-84, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.003>.
- LINDSAY, J. B.; CREED, I. F. Sensitivity of digital landscapes to artifact depressions in remotely-sensed DEMs. **Photogramm. Eng. Remote Sens.**, v. 71, p. 1029-1036, 2005.
- LINDSAY, J. B.; ROTHWELL, J. J.; DAVIES, H. Mapping outlet points used for watershed delineation onto DEM-derived stream networks. **Water Resources Research** v. 44, n. 8, 2008. doi: <https://doi.org/10.1029/2007WR006507>.
- LINDSAY, J. B.; FRANCONI, A.; COCKBURN, J. M. H. LiDAR DEM smoothing and the preservation of drainage features. **Remote Sensing**, v. 11, n. 16, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/rs11161926>.
- LISENBY, P. E.; FRYIRS, K. A. 'Out with the Old?' Why coarse spatial datasets are still useful for catchment-scale investigations of sediment (dis)connectivity. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 42, p. 1588-1596, 2017. doi: <https://doi.org/10.1002/esp.4131>.
- LIU, K.; SONG, C.; KE, L.; JIANG, L.; MA, R. Automatic watershed delineation in the Tibetan endorheic basin: A lake-oriented approach based on digital elevation models. **Geomorphology**, v. 358, 2020.
- MENDONÇA, R. L.; PAZ, A. R. LiDAR data for topographical and river drainage characterization: capabilities and shortcomings. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 27, 2022. doi: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220092>.
- METZ, M.; MITASOVA, M.; HARMON, R. S. Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 15, P. 667–678, 2011. doi: 10.5194/hess-15-667-2011.
- MORALEJO, R. A.; GOBBO, D.; COGLIANO, D.; PINTO, L. Application of LiDAR technology at El Shincal de Quimivil, Londres, Catamarca. **Arqueologia**, v. 24, p. 165-184, 2018.
- MUHADI, N. A.; ABDULLAH, A. F.; BEJO, S. K.; MAHADI, M. R.; MIJIC, A. The use of LiDAR-derived DEM in flood applications: a review. **Remote Sensing**, v. 12, n14, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12142308>.
- MUTHUSAMY, M.; CASADO, M. R.; BUTLER, D.; LEINSTER, P. Understanding the effects of digital elevation model resolution in urban fluvial flood modelling. **Journal of Hydrology**, v. 596, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126088>.
- NELSON, A.; REUTER, H. I.; GESSLER, P. DEM production methods and sources. *In*: HENGL, T.; REUTER, H.I. **Developments in Soil Science**. Amsterdam: Elsevier, 2009. v+. 33, cap. 3, p. 65-85.
- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 28, p. 323-344, 1984.
- O'NEIL, G. L.; SABY, L.; BAND, L. E.; GOODALL, J. L. Effects of LiDAR DEM smoothing and conditioning techniques on a topography-based wetland identification model. **Water Resour. Res.**, v. 55, n. 5, p. 4343-4363, 2019. doi: <https://doi.org/10.1029/2019WR024784>.

- OLAYA, V. Basic Land-Surface Parameters. *In*: HENGL, T.; REUTER, H.I. **Developments in Soil Science**. Amsterdam: Elsevier, 2009. v. 33, cap. 6, p. 141-169.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v.2, n.2 (viii.2008), p. 84-95, 2008.
- PERSENDT, F. C.; GOMEZ, C. Assessment of drainage network extractions in a low-relief area of the Cuvelai Basin (Namibia) from multiple sources: LiDAR, topographic maps, and digital aerial orthophotographs. **Geomorphology**, v. 260, p. 32-50, 2015.
- POLIDORI, L.; EL HAGE, M. Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, 2020. doi:10.3390/rs12213522
- QIN, C.; ZHU, A.X.; PEI, T.; LI, B.; ZHOU, C.; YANG, L. 2007. An adaptive approach to selecting the flow partition exponent for multiple flow direction algorithms. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 21, p. 443-458. doi: <https://doi.org/10.1080/13658810601073240>
- QIN, C. Z.; ZHAN, L. Parallelizing flow-accumulation calculations on graphics processing units-From iterative DEM preprocessing algorithm to recursive multiple-flow-direction algorithm. **Computers & Geosciences**, v. 43, p. 7-16, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.02.022>.
- QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 59-79, 1991.
- REUTER, H.I.; HENGL, T.; GESSLER, P.; SOILLE, P. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. *In*: HENGL, T.; REUTER, H.I. **Developments in Soil Science**. Amsterdam: Elsevier, 2009. v 33, cap. 4, p. 87-120.
- ROOSTAEE, M.; DENG, Z. Effects of digital elevation model data source on HSPF-based watershed-scale flow and water quality simulations. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24449-9>.
- SAKSENA, S.; MERWADE, V. Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. **Journal of Hydrology**, v. 530, p. 180-194, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.069>.
- SILVA, R. O. B. de; MONTENEGRO, S. M.G. L; SOUZA, W. M. de. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 22, n. 03, 2017. doi: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017142481>
- SLIWINSKI, D.; ANITA KONIECZNA, A.; ROMAN, K. Geostatistical Resampling of LiDAR-Derived DEM in Wide Resolution Range for Modelling in SWAT: A Case Study of Zgłowiacka River (Poland). **Remote Sensing**, v.14, n. 05, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14051281>.
- SORENSEN, R.; SEIBERT, J. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. **Journal of Hydrology**, v. 347, n. 1-2, p. 79-89, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.001>.
- SOUSA, T. M. I.; PAZ, A. R. How to evaluate the quality of coarse-resolution DEM-derived drainage networks. **Hydrological Processes**, v. 31, p. 3379-3395, 2017.
- STANISLAWSKI, L. V.; SURVILA, K.; WENDEL, J.; LIU, Y.; BUTTENFIELD, B. P. An open source high-performance solution to extract surface water drainage networks from

- diverse terrain conditions. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 45, n. 4, p. 319-328, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/15230406.2017.1337524>.
- TAN, M. L.; FICKLIN, D. L.; DIXON, B.; IBRAHIM, A. L.; YUSOP, Z.; CHAPLOT, V. Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow. **Applied Geography**, v. 63, p. 357-368, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.014>.
- TARBOTON, D. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resour. Res.**, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.
- UEMOTO, J. Refinement of interferometric SAR parameters using digital terrain model as an external reference. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 175, p. 34-43, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.02.017>.
- VAZE, J.; TENG, J.; SPENCER, G. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. **Environ. Modell. Softw.**, v. 25, p. 1086-1098, 2010. doi: [10.1016/j.envsoft.2010.03.014](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.014).
- VIEUX, B. B. E. DEM aggregation and smoothing effects on surface runoff modeling. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 7, n. 3, p. 310-338, 1993.
- VILLANUEVA, J. R. E.; MARTÍNEZ, L. I.; MONTIAL, J. I. P. DEM generation from fixed-wing UAV imaging and LiDAR-derived ground control points for flood estimations. **Sensors**, v. 19, n. 14, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/s19143205>.
- WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 2, p. 193-213, 2006.
- WANG, X.; YIN, Z. A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales, **J. Hydrol.**, v. 210, n. 1-4, p. 221-241, 1998. doi: [10.1016/S0022-1694\(98\)00189-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00189-9).
- WECHSLER, S. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1481-1500, 2007.
- WEDAJO, G. K. LiDAR DEM data for flood mapping and assessment; opportunities and challenges: a review. **Journal of Remote Sensing & GIS**, v. 6, n. 4, 2017. doi: [10.4172/2469-4134.100021](https://doi.org/10.4172/2469-4134.100021).
- WILSON, J. P. Digital terrain modelling. **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 107-121, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.012>.
- WINZELER, H.E.; OWENS, P.R.; READ, Q.D.; LIBOHOVA, Z.; ASHWORTH, A.; SAUER, T. Topographic Wetness Index as a Proxy for Soil Moisture in a Hillslope Catena: Flow Algorithms and Map Generalization. **Land**, v. 11, n.11: 2018, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/land11112018>.
- WOLOCK, D. M.; PRICE, C. V. Effects of digital elevation model and map scale and data resolution on a topography-based watershed model. **Water Resources Research**, v. 30, n. 11, p. 3041-3052, 1994.
- WOODROW, K.; LINDSAY, J. B.; BERG, A. A. Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 1022-1029, 2016.

- WU, S.; LI, J.; HUANG, G. H. A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. **Applied Geography**, v. 28, n. 3, p. 210-223, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.006>.
- YAN, Y; TANG, J.; PILESJÖ, P. A combined algorithm for automated drainage network extraction from digital elevation models. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 10, p. 1322-1333, 2018. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.11479>.
- YANG, J.; CHU, X. Effects of DEM Resolution on Surface Depression Properties and Hydrologic Connectivity. **J. Hydrol. Eng.**, v. 18, n. 9, p. 1157-1169, 2013.
- YANG, P.; AMES, D. P.; FONSECA, A.; ANDERSON, D.; SHRESTHA, R.; GLENN, N. F.; CAO, Y. What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results? **Environmental Modelling & Software**, v. 58, p. 48-57, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.005>.
- YILDIRIM, A. A.; WATSON, D.; TARBOTON, D.; WALLACE, R. M. A virtual tile approach to raster-based calculations of large digital elevation models in a shared-memory system. **Computers & Geosciences**, v. 82, p. 78-88, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2015.05.014>.
- ZHANG, J. X.; CHANG, K.; WU, J. Q. Effects of DEM resolution and source on soil erosion modelling: a case study using the WEPP model. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, n. 8, p. 925-942, 2008. doi:10.1080/13658810701776817.
- ZHANG, J; CHU, X. Impact of DEM resolution on puddle characterization: comparison of different surfaces and methods. **Water**, v. 7, p. 2293-2313, 2015. doi:10.3390/w7052293.
- ZHANG, K.; GANN, D.; ROSS, M.; ROBERTSON, Q.; SARMIENTO, J.; SANTANA, S.; RHOME, J.; FRITZ, C. Accuracy assessment of ASTER, SRTM, ALOS, and TDX DEMs for Hispaniola and implications for mapping vulnerability to coastal flooding. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 290-306, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.028>.