



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

**DEGRADAÇÃO DE REDES DE DRENAGEM VIA UPSCALING DAS
DIREÇÕES DE FLUXO A PARTIR DE MDT LIDAR DE ALTA
RESOLUÇÃO ESPACIAL**

Por

Ana Alice Rodrigues Dantas Almeida

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2023



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

**DEGRADAÇÃO DE REDES DE DRENAGEM VIA UPSCALING DAS
DIREÇÕES DE FLUXO A PARTIR DE MDT 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.

Ana Alice Rodrigues Dantas Almeida

Orientador: Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A447d Almeida, Ana Alice Rodrigues Dantas.

Degradação de redes de drenagem via upscaling das
direções de fluxo a partir de MDT lidar de alta
resolução espacial / Ana Alice Rodrigues Dantas
Almeida. - João Pessoa, 2023.

115 f. : il.

Orientação: Adriano Rolim da Paz.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/Tecnologia.

1. Bacias de drenagem. 2. Modelo digital - Terreno.
3. Delimitação - Bacias hidrográficas. I. Paz, Adriano
Rolim da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 556.51(043)



“DEGRADAÇÃO DE REDES DE DRENAGEM VIA UPSCALING DAS DIREÇÕES DE FLUXO A PARTIR DE MDT LIDAR DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL”

ANA ALICE RODRIGUES DANTAS ALMEIDA
Dissertação aprovada em 16 de fevereiro de 2023.

Período Letivo: 2022.2


Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz – UFPB
Orientador


Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho – UFPB
Examinador Interno


Prof. Dr. Camilo Daleles Rennó – INPE
Examinador Externo

João Pessoa/PB
2023

***“What is a person, if not the marks they leave
behind?”***

V.E. Schwab, *The Invisible Life of Addie LaRue*

*Aos meus pais, Aline e Flávio, ao meu irmão,
Jorge, e ao meu esposo, Orlando Gabriel,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que em sua infinita bondade e misericórdia, permitiu que eu concluísse esta pesquisa mesmo diante de todas as adversidades.

Ao meu esposo, Orlando Gabriel, por embarcar em todas as minhas aventuras desde a graduação. Obrigada por todo o incentivo, essa conquista também é sua, te amo!

Aos meus pais, Aline e Flávio, e ao meu irmão, Jorge Filho, que mesmo distantes fisicamente sempre se fizeram presentes em minha vida diariamente! Amo vocês!

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Adriano Paz, pela oportunidade, compreensão e pelos ensinamentos e discussões tão enriquecedoras. Aquela oportunidade de iniciação científica durante a graduação foi como uma semente plantada!

Aos membros da banca, o Prof. Dr. Victor Coelho (UFPB) e o Prof. Dr. Camilo Rennó (INPE), por aceitarem o convite e pelas sugestões que auxiliaram no enriquecimento e desenvolvimento deste trabalho desde a qualificação até sua defesa final.

Às amigas que construí ao longo do mestrado, em especial Cinthia Maria, Brenda Sousa e Francisco Judivan. Aos amigos da vida, que tornaram os dias e a caminhada mais leve.

Aos companheiros do grupo de pesquisa, em especial Rafael Carneiro e Rafael Mendonça, pela troca de ideias e auxílio no manejo e processamento dos dados.

Ao Laboratório de Análises Computacionais em Meio Ambiente (LACMA/UFPB), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e à Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são uma ferramenta útil para estudos hidrológicos, fornecendo informações sobre a topografia do terreno e permitindo a extração de aspectos hidrológicos de bacias hidrográficas. A disponibilidade de dados espaciais gratuitos a nível global, com resolução espacial superior a 1 km, a exemplo do MDE SRTM com resoluções de 30 e 90 metros, permite diversas possibilidades de aplicação. No entanto, no caso da hidrologia de grande escala, onde se trabalha com bacias com dimensões superiores a 10.000 km², há a necessidade de degradar a resolução espacial com o intuito de reduzir custos de processamento e armazenamento. Nesse sentido, tem-se os procedimentos de mudança de escala para degradação da resolução espacial, como a reamostragem do MDE e o *upsampling* das direções de fluxo. O COTAT+ é um método de *upsampling* que permite a degradação da resolução espacial a partir da adoção de dois parâmetros: o caminho mínimo de montante (MUFP) e a área mínima incremental (AT), e foi aplicado nesta pesquisa para degradar um MDT LiDAR de 1 m para as resoluções espaciais de 30 e 100 m. A área de estudo é uma sub-bacia (21,7 km²) inserida na bacia hidrográfica do Riacho das Garças (4.094 km²), no semiárido de Pernambuco. Foi realizada a comparação entre o desempenho do COTAT+ e da reamostragem pela média para extração de redes de drenagem e bacia hidrográfica. Para a aplicação do COTAT+, foram consideradas duas abordagens quanto ao valor dos parâmetros: (i) a adoção dos valores indicados em estudo anterior, com outro enfoque; e (ii) quatro variações para o MUFP (1/10, 1/7, 1/4 e 1/3) e AT (-50%, -25%, 25% e 50%). As métricas de avaliação utilizadas foram a inspeção visual, distância média (DM), percentual dentro do *buffer* (PWB), comprimentos de rio e análise de área de drenagem. Os resultados demonstraram o desempenho superior do *upsampling* frente à reamostragem ao degradar as redes de drenagem, independente da variação dos parâmetros, para as duas resoluções consideradas. Além disso, o traçado da rede de drenagem pela reamostragem gerou inconsistências, como deslocamentos e distanciamento espacial da referência de 1 m, além de alterações acentuadas no comprimento dos rios.

PALAVRAS-CHAVE: Redes de drenagem, Modelo Digital de Terreno, LiDAR, *Upsampling*, Direções de fluxo.

ABSTRACT

Digital Elevation Models (DEM) are a useful tool for hydrological studies, providing information about the terrain topography and allowing the extraction of hydrologic aspects of watersheds. The availability of free global spatial data with spatial resolution greater than 1 km, such as the SRTM DEM with resolutions of 30 and 90 meters, enables several application possibilities. However, in the case of large-scale hydrology, which works with basins larger than 10,000 km², there is a need to degrade the spatial resolution in order to reduce processing and storage costs. In this sense, there are scale-shifting procedures for degrading the spatial resolution, such as resampling the DEM and upscaling the flow directions. COTAT+ is an upscaling method that allows the degradation of spatial resolution from the adoption of two parameters: the minimum upstream flow path (MUFP) and the area threshold (AT) and was applied in this research to degrade a 1 m LiDAR DTM to 30 and 100 m spatial resolutions. The study area is a sub-basin (21.7 km²) inserted in the Riacho das Garças watershed (4,094 km²), in the semi-arid region of Pernambuco. A comparison was made between the performance of COTAT+ and resampling by the mean for extraction of drainage networks and watershed. For the application of COTAT+, two approaches were considered regarding the value of the parameters: (i) the adoption of the values indicated in a previous study, with another approach; and (ii) four variations for MUFP (1/10, 1/7, 1/4 and 1/3) and AT (-50%, -25%, 25% and 50%). The evaluation metrics used were visual inspection, mean distance (MD), percent within buffer (PWB), river lengths, and drainage area analysis. The results demonstrated the superior performance of upscaling over resampling in degrading the drainage networks, regardless of parameter variation, for the two resolutions considered. Furthermore, the drainage network plotting by resampling generated inconsistencies, such as displacements and spatial distance from the 1 m reference, as well as significant changes in river lengths.

KEYWORDS: Drainage network; Digital Terrain Model, LiDAR, Upscaling, Flow direction.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1	AS GEOTECNOLOGIAS E OS ESTUDOS HIDROLÓGICOS	26
2.2	MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO	27
2.2.1	<i>Conceitos.....</i>	27
2.2.2	<i>Fontes de dados globais.....</i>	28
2.2.3	<i>Dados obtidos por LiDAR (Airborne Light Detection and Ranging).....</i>	30
2.3	PRODUTOS DERIVADOS DO MDE PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS	32
2.3.1	<i>Direções de fluxo</i>	32
2.3.2	<i>Áreas acumuladas de drenagem</i>	34
2.3.3	<i>Redes de drenagem</i>	34
2.3.4	<i>Bacia hidrográfica</i>	36
2.4	DERIVAÇÃO DE REDES DE DRENAGEM EM RESOLUÇÃO MAIS GROSSEIRA DO QUE O MDE	36
2.4.1	<i>Visão geral.....</i>	36
2.4.2	<i>Procedimento de degradação da resolução via reamostragem do MDE....</i>	39
2.4.3	<i>Procedimento de degradação da resolução via upscaling</i>	40
	<i>O algoritmo COTAT+</i>	41
	<i>Outros algoritmos de upscaling.....</i>	45
2.5	MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM	47
2.5.1	<i>Inspeção visual.....</i>	49
2.5.2	<i>Características do rio e da bacia hidrográfica</i>	49
2.5.3	<i>Delimitação de área de drenagem.....</i>	49
2.5.4	<i>Distância média (DM)</i>	49

2.5.5	<i>Porcentagem dentro do buffer (Percentage within buffer – PWB)</i>	50
3	ÁREA DE ESTUDO	52
3.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	52
3.2	CLIMA, SOLOS E RELEVO.....	52
3.3	CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÔMICA	53
3.4	GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA	54
4	MATERIAL E MÉTODOS	56
4.1	COMPATIBILIZAÇÃO DOS DADOS.....	57
4.1.1	<i>Coleta do MDT LiDAR</i>	57
4.1.2	<i>Recorte do MDT LiDAR e remoção de depressões artificiais</i>	58
4.2	EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DO MDT LiDAR	59
4.2.1	<i>Obtenção das direções de fluxo</i>	59
4.2.2	<i>Determinação das áreas acumuladas de drenagem</i>	60
4.2.3	<i>Determinação de rede de drenagem e delimitação de bacia hidrográfica</i> .	60
4.3	DEFINIÇÃO DE RESOLUÇÕES ESPACIAIS.....	60
4.4	DERIVAÇÃO DE REDES DE DRENAGEM NAS RESOLUÇÕES DEGRADADAS.....	62
4.4.1	<i>Reamostragem do MDT</i>	62
4.4.2	<i>Upscaling das direções de fluxo</i>	62
	Aplicação do algoritmo COTAT+	62
	Obtenção de áreas acumuladas de drenagem na resolução degradada.....	64
	Determinação das redes de drenagem na resolução degradada.....	64
	Delimitação das bacias hidrográficas na resolução degradada	65
4.5	MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	ORGANIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	67
5.2	INSPEÇÃO VISUAL DE REDES DE DRENAGEM.....	67
5.2.1	<i>Resolução espacial de 30 metros</i>	67
5.2.2	<i>Resolução espacial de 100 metros</i>	71
5.3	DISTÂNCIA MÉDIA ENTRE REDES DE DRENAGEM	76
5.3.1	<i>Resolução espacial de 30 metros</i>	76
5.3.2	<i>Resolução espacial de 100 metros</i>	80

5.4	PORCENTAGEM DENTRO DO <i>BUFFER</i>	83
5.4.1	<i>Resolução espacial de 30 metros</i>	84
5.4.2	<i>Resolução espacial de 100 metros</i>	87
5.5	ANÁLISE DOS COMPRIMENTOS DE RIOS	91
5.5.1	<i>Resolução espacial de 30 metros</i>	91
5.5.2	<i>Resolução espacial de 100 metros</i>	96
5.6	ANÁLISE DE ÁREAS DE DRENAGEM	101
5.6.1	<i>Resolução espacial de 30 metros</i>	101
5.6.2	<i>Resolução espacial de 100 metros</i>	103
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	106
6.1	CONCLUSÕES	106
6.2	RECOMENDAÇÕES.....	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Em (A) tem-se o relevo da superfície e, em (B), a ilustração do que representam os Modelos Digitais de Superfície (MDS) e os Modelos Digitais de Terreno (MDT).
..... 28
- Figura 2 – Representação do método D8 para escolha das direções de fluxo: *raster* com pixels e as diferentes codificações de cada SIG. 34
- Figura 3 – Abordagens para determinação de direções de fluxo de baixa resolução a partir de MDE de alta resolução: (a) Procedimento tradicional de reamostragem; (b) *Upscaling* das direções de fluxo. 39
- Figura 4 – Comparação da precisão das redes de drenagem grosseiras derivadas de um MDT de 50 m de resolução usando quatro métodos diferentes para o Reino Unido e as bacias do Tâmesa e Severn. Em (a) tem-se a comparação por meio da DM e em (b) porcentagem dentro do *buffer*. 41
- Figura 5 – Percentual de erro na área de delimitação das bacias entre o MDT de 50 m e as células para a resolução de 5 (a) e 10 km (b), provenientes da degradação para cada método. Apenas os erros de -50% e +50% são apresentados. O COTAT+ foi o método que apresentou os menores erros percentuais. 41
- Figura 6 – Situação em que o COTAT resultaria em uma direção de fluxo mal definida. Em (a) a direção de fluxo da célula C3 (amarelo) é atribuída equivocadamente à C2 (azul), quando, na verdade, deveria ser atribuída à B3 (marrom) ou B2 (rosa), como ilustrado na situação (b). O motivo do equívoco é a presença de rios paralelos em (c).
..... 42
- Figura 7 – Determinação do pixel exutório pelo COTAT+. Quanto mais escura for a cor do pixel, maior é a sua área de drenagem. Na célula B2 de baixa resolução, destacada em azul (a), mesmo o pixel I possuindo maior área acumulada, ele é rejeitado por causa do curto caminho de fluxo percorrido à montante no interior da célula (b). Pelo mesmo motivo, o pixel III também é rejeitado, sendo o pixel de saída de B2 o pixel IV. 44
- Figura 8 – Comparação entre duas drenagens determinadas pelo COTAT+ para um trecho da bacia do Rio Grande, considerando a adoção dos parâmetros (a) MUFP = 0 e AT = 100 km² e (b) MUFP = 1,5 km e AT = 100 km². Os pixels exutório das células A3 (c)

e C3 (d), destacados em roxo, são indicados pelos pixels 1 ou 2, dependendo do conjunto de parâmetros escolhidos, alterando a área de contribuição de P (células cinzas).....	44
Figura 9 – Redes e áreas de drenagem do Rio Reno para as resoluções de 1, 10 e 30 km pelos métodos EAM, DMM e IHU. A cor azul indica erros positivos de superestimação e, vermelho, subestimação da direção da drenagem.	46
Figura 10 – (a) Comparação entre as redes de drenagem extraídas pelos métodos NN e HD (CM não representado por ter se comportado de forma semelhante ao NN) e a drenagem de referência LiDAR de 1 m. E (b) Função de densidade acumulada (CDF) das elevações observadas, em dados topográficos de alta resolução (HR) e pelos métodos NN, CM e HD ao longo do SV (a-c), da bacia de drenagem do rio Crostolo (d-f), e da bacia de drenagem do rio Cordevole (g-i).	48
Figura 11 – Métricas para avaliação da rede de drenagem: (a) Distância Média e (b) Porcentagem dentro do <i>buffer</i>	50
Figura 12 - Bacia do Riacho das Garças: Localização e MDE com variação de altitude. ..	53
Figura 13 – Demandas de retirada de água por categoria de uso em cada UP, em especial a UP14 Riacho das Garças, destacada pelo retângulo vermelho.....	54
Figura 14 – Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.	57
Figura 15 – Recorte do MDT com dimensões de 100 km ² (10.000 linhas x 10.000 colunas) para representação da área de estudo: sub-bacia do Riacho das Garças.	59
Figura 16 – Trechos da sub-bacia selecionados para a realização das análises.	66
Figura 17 – Redes de drenagem resultantes da reamostragem (vermelho) e <i>upscaling</i> (preto), na resolução espacial de 30 metros, e a de referência LiDAR de 1 metro (azul). Os trechos destacados em a, b, c e d representam diferentes regiões ao longo da bacia.....	68
Figura 18 – Redes de drenagem extraídas do LiDAR de 1 metro (azul), do <i>upscaling</i> padrão (preto) e das quatro variações do MUFP (laranja). Recortes de (a) a (h) destacando semelhanças e diferenças no traçado. Os números em preto identificam o trecho que está sendo representado.	69
Figura 19 – Recorte da região de nascente do rio principal obtida a partir da aplicação do <i>upscaling</i> , com o padrão (preto) e a variação de parâmetros (laranja), e da referência LiDAR de 1 m (azul).	70

Figura 20 – Redes de drenagem extraídas do LiDAR de 1 metro (azul), do <i>upscaling</i> padrão (preto) e das quatro variações do AT (laranja). Recortes de (i) a (p) destacando semelhanças e diferenças no traçado. Os números em preto identificam o trecho que está sendo representado.	70
Figura 21 – Alterações no traçado dos trechos provocadas pela variação do parâmetro AT (laranja), em sobreposição com <i>upscaling</i> , com o padrão (preto) e a referência LiDAR de 1 m (azul).	71
Figura 22 –Alterações no traçado do rio principal provocadas pela variação do parâmetro AT (laranja), em sobreposição com <i>upscaling</i> , com o padrão (preto) e a referência LiDAR de 1 m (azul). As setas enumeradas de (1) a (4) destacam pontos onde a drenagem do AT divergiu do padrão.	71
Figura 23 – Redes de drenagem resultantes da reamostragem (vermelho) e <i>upscaling</i> (preto), na resolução espacial de 30 metros, e a de referência LiDAR de 1 metro (azul). Os trechos destacados em a, b, c e d representam diferentes regiões ao longo da bacia.	72
Figura 24 – Comparação visual entre as redes de drenagem resultantes do <i>upscaling</i> padrão (preto) e reamostragem (vermelha) com a de referência, o LiDAR de 1 m (azul). Em (1) tem-se as drenagens para a resolução de 30 m, enquanto em (2), para 100 m, com destaque para os trechos 19 e 20, identificados pelas setas.	73
Figura 25 – Redes de drenagem extraídas do LiDAR de 1 metro (azul), do <i>upscaling</i> padrão (preto) e das quatro variações do MUFP (laranja). Recortes de (a) a (h) destacando semelhanças e diferenças no traçado. Os números em preto identificam o trecho que está sendo representado.	74
Figura 26 –Alterações no traçado do rio principal provocadas pela variação do parâmetro MUFP (laranja), em sobreposição com <i>upscaling</i> , com o padrão (preto) e a referência LiDAR de 1 m (azul).	75
Figura 27 – Redes de drenagem extraídas do LiDAR de 1 metro (azul), do <i>upscaling</i> padrão (preto) e das quatro variações do AT (laranja). Recortes de (i) a (p) destacando semelhanças e diferenças no traçado. Os números em preto identificam o trecho que está sendo representado.	75

Figura 28 – Alterações no traçado do rio principal provocadas pela variação do parâmetro AT (laranja), em sobreposição com <i>upscaling</i> , com o padrão (preto) e a referência LiDAR de 1 m (azul).....	76
Figura 29 – Distância média entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.....	77
Figura 30 – Distância média entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro	79
Figura 31 – Distância média entre os rios principais do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.....	80
Figura 32 – Distância média entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.....	81
Figura 33 – Distância média entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro	82
Figura 34 – Distância média entre os rios principais do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.....	83
Figura 35 – PWB entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro	85
Figura 36 – PWB entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.....	86
Figura 37 – PWB entre os rios principais do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.	87
Figura 38 – PWB entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro	88
Figura 39 – PWB entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.....	90
Figura 40 – PWB entre os rios principais do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro	90

Figura 41 – Variação do comprimento entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.....	93
Figura 42 – Variação do comprimento entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro	95
Figura 43 – Variação do comprimento entre os rios principais do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.	95
Figura 44 – Variação do comprimento entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.....	97
Figura 45 – Variação do comprimento entre trechos de rio do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.....	99
Figura 46 – Variação do comprimento entre os rios principais do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.	99
Figura 47 – Análise percentual da variação de área de drenagem após a aplicação das metodologias de mudança de escala para a resolução de 30 m.	102
Figura 48 – Análise percentual do total de área de drenagem omitida ou incluída entre as bacias hidrográficas delimitadas a partir da variação dos parâmetros MUFP e AT para <i>upscaling</i> , o padrão e a reamostragem, na resolução de 30 metros, em comparação com a bacia extraída do MDT LiDAR de 1 m.	102
Figura 49 – Análise visual da delimitação de bacia hidrográfica na resolução espacial de 30 m.	103
Figura 50 – Análise percentual da variação de área de drenagem após a aplicação das metodologias de mudança de escala para a resolução de 100 m.	104
Figura 51 – Análise percentual do total de área de drenagem omitida ou incluída entre as bacias hidrográficas delimitadas a partir da variação dos parâmetros MUFP e AT, <i>upscaling</i> padrão e a reamostragem, na resolução de 100 metros, em comparação com a bacia extraída do MDT LiDAR de 1 m.	104
Figura 52 – Análise visual da delimitação de bacia hidrográfica na resolução espacial de 100 m.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Revisão bibliográfica: Aplicação de métodos de mudança de escala para degradação de MDE.	37
Tabela 2 – Características das resoluções espaciais adotadas nesta pesquisa.	61
Tabela 3 – Área e total de pixels, nas resoluções de 1 km e 100 m, de importantes bacias da América do Sul	61
Tabela 4 – Variação dos valores de caminho mínimo de montante (MUFP) considerando o valor fixo padrão do parâmetro área mínima incremental (AT).....	63
Tabela 5 – Variação dos valores de área mínima incremental (AT) considerando o valor fixo padrão do parâmetro caminho mínimo de montante (MUFP).	64
Tabela 6 – Distância média dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do <i>upsampling</i> padrão na resolução de 30 m.....	77
Tabela 7 – Distância média dos trechos resultantes da aplicação do <i>upsampling</i> padrão e das variações de MUFP e AT na resolução de 30 m.	78
Tabela 8 – Distância média dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do <i>upsampling</i> padrão na resolução de 100 m.....	80
Tabela 9 – Distância média dos trechos resultantes da aplicação do <i>upsampling</i> padrão e das variações de MUFP e AT na resolução de 100 m	81
Tabela 10 – PWB dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do <i>upsampling</i> padrão na resolução de 30 m.	84
Tabela 11 – PWB dos trechos resultantes da aplicação do <i>upsampling</i> padrão e das variações de MUFP e AT na resolução de 30 m	85
Tabela 12 – PWB entre trechos de rio do <i>upsampling</i> padrão e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro	88
Tabela 13 – PWB dos trechos resultantes da aplicação do <i>upsampling</i> padrão e das variações de MUFP e AT na resolução de 100 m	89
Tabela 14 – Comprimentos dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do <i>upsampling</i> padrão para a resolução de 30 m.....	92
Tabela 15 – Comprimentos dos trechos resultantes da aplicação do <i>upsampling</i> padrão e das variações de MUFP e AT para a resolução de 30 m.	94

Tabela 16 – Comprimentos dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do <i>upscaling</i> padrão para a resolução de 100 m.	96
Tabela 17 – Comprimentos dos trechos resultantes da aplicação do <i>upscaling</i> padrão e das variações de MUFP e AT para a resolução de 100 m.	98

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AT – Area Threshold ou Área Incremental Mínima
COTAT+ – Cell Outlet Tracing with an Area Threshold Plus
DM – Distância média
DRT – Dominant River Tracing
G2C – Grid to Grid Model
HD – Hydrography-Driven Coarsening
IHU – Iterative Hydrography Upscaling
JULES – Joint UK Land Environment Simulator
LiDAR – Light Detection and Ranging
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDT – Modelo Digital de Terreno
MDS – Modelo Digital de Superfície
MEM – Método de Elevação Média
MUFP – Minimum Upstream Flow Path ou Caminho Mínimo de Montante
NSA – Network Scaling Algorithm
NTM – Network Tracing Algorithm
PWB – Percentage within buffer
SIG – Sistemas de Informações Geográficas
SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

1 INTRODUÇÃO

A crescente disponibilidade de dados espaciais, como os Modelos Digitais de Elevação (MDE), estimula o desenvolvimento de uma série de estudos, trazendo consigo novas técnicas e metodologias de análise da superfície e dos fenômenos terrestres (TAROLLI, 2014). A incorporação de MDE na hidrologia, a exemplo da modelagem hidrológica, permite a extração das características físicas do terreno de forma rápida e a obtenção de elementos essenciais para as análises hidrológicas, como a rede de drenagem.

Na hidrologia de grande escala, onde são estudadas bacias hidrográficas com dimensões superiores a 10.000 km², por vezes, são adotados modelos hidrológicos do tipo distribuídos, considerando-se a variabilidade espacial das características dos processos hidrológicos, como evaporação, precipitação e infiltração (MARINHO FILHO et al., 2012). A bacia é então subdividida em uma grade de células interconectadas entre si para representar o fluxo de água na rede de drenagem (SARAIVA & PAZ, 2014).

A disponibilidade de dados espaciais gratuitos com resolução espacial superior a 1 km, como o MDE SRTM, com resoluções de 30 e 90 metros, permite diversas possibilidades de aplicação. Ao trabalhar com bacias de grandes dimensões, o processo de discretização através da utilização de MDE com essas características, envolve a necessidade de degradação da resolução da informação para uma resolução mais grosseira, como 5 ou 10 km, por exemplo. Isso ocorre por dois motivos: redução dos custos associados ao armazenamento e ao processamento dos dados, e preservação da qualidade da representação espacial.

Por outro lado, há a necessidade de manter a interconexão entre as células do modelo hidrológico na grade grosseira, com a geração de caminhos de fluxo bem definidos nesta nova resolução (SARAIVA & PAZ, 2014). A interconexão entre as células deve representar da melhor forma possível os caminhos de fluxo existentes na resolução original. Para isto, tem-se duas abordagens: a reamostragem do MDE e o *upscaling* das direções de fluxo (DAVIES & BELL, 2009).

A reamostragem do MDE é a abordagem mais utilizada (WU, LI & HUANG, 2008) e consiste, de modo geral, na degradação do MDE de alta resolução para uma resolução mais grosseira a partir da adoção de técnicas, como a agregação pela média, vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica. A técnica mais comum

dessa metodologia é a agregação pela média (LE COZ et al., 2009), onde o valor atribuído às células de baixa resolução é a média dos pixels inseridos em seu interior.

No entanto, a reamostragem provoca alterações na topografia do MDE, mudando a estrutura da rede de drenagem e da bacia hidrográfica delimitada (LE COZ et al., 2009), e necessitando de correções manuais por parte do usuário (SHAW et al., 2005). Davies e Bell (2009) alertam quanto a essas correções, estando a acurácia das mesmas associadas à dedicação e à paciência do usuário.

Uma alternativa proposta é a realização do *upscaling* das direções de fluxo, cujo enfoque principal não é a degradação do MDE em si, mas a obtenção dos caminhos de fluxo na resolução mais grosseira, baseando-se nas direções de fluxo de alta resolução extraídas pelo processamento do MDE na resolução mais refinada possível, ou seja, a original.

Na literatura, existem diversas abordagens de *upscaling*, como o Método de Agregação Baseado nas Direções de Fluxo (WANG et al., 2000), o *Network Scaling Algorithm* (NSA; FEKETE et al., 2001), o *Cell Outlet Tracing with an Area Threshold* (COTAT; REED, 2003), o *Network Tracing Method* (NTM; OLIVERA & RAINA, 2003), o *Dominant River Tracing* (DRT; WU et al., 2011), o *Hydrography-Driven Coarsening* (HD; MORETTI & ORLANDINI, 2018) e o *Iterative Hydrography Upscaling* (IHU; EILANDER et al., 2021). Dentre esses métodos, tem-se o COTAT+, proposto por Paz et al. (2006), concebido com o intuito de corrigir os problemas associados a rios com fluxo em paralelo produzidos artificialmente pelo COTAT (REED, 2003).

O COTAT+ tem sido aplicado em diversos estudos hidrológicos presentes na literatura. Collischonn et al. (2007b) utilizaram o algoritmo para degradar um MDT, de 90 metros, e incorporá-lo na modelagem hidrológica de um trecho da bacia do rio Paranaíba, entre as usinas hidrelétricas de Itumbiara e São Simão (76.746 km²). Saraiva e Paz (2014) aplicaram o COTAT+ para degradar MDE de 100 e 200 m para as resoluções de 10, 30 e 50 km, tomando como áreas de estudo as bacias dos rios Tapajós (478.000 km²), São Francisco (642.000 km²), Paraíba (20.000 km²) e Uruguai (206.000 km²).

La Torre et al. (2019) empregaram o método de *upscaling* COTAT+ para degradação da resolução espacial e aplicação do modelo hidrológico distribuído JULES para 13 bacias da Grã-Bretanha, com dimensões variando entre 234 e 9.948 km². Bell et al. (2012) utilizaram um MDE para obter estimativas hidráulicas do solo, rotear e

parametrizar o fluxo de água na bacia do rio Tâmbisa (10.000 km²), no Reino Unido, através do modelo distribuído *Grid-to-Grid* (G2C). Os autores extraíram as direções de fluxo, na resolução de 1 km, para entrada no modelo a partir da metodologia proposta por Paz et al. (2006).

É interessante destacar que, o COTAT+ foi incorporado ao sistema computacional TerraHidro (ROSIM et al., 2015), na ferramenta “*upscaling*”. Rosim et al. (2015) testaram o funcionamento da ferramenta ao aplicá-la para a porção continental da Itália e as ilhas de Sicília e Sardenha, incluindo, ainda, a ilha francesa de Córsega. Ao ser comparado com os métodos de *upscaling* NSA e NTM, e o método de reamostragem Elevação Média (MEM), o COTAT+ apresentou resultados superiores, com os menores erros percentuais, frente às degradações de 50 m para 0,5, 1, 2,5, 5, 10, 15 e 20 km (DAVIES & BELL, 2009).

Para a aplicação do algoritmo COTAT+, são considerados dois parâmetros (PAZ et al., 2006): o caminho mínimo de montante (*Minimum Upstream Flow Path* – MUFP) e a área incremental mínima ou limiar de área (*Area Threshold* – AT). O MUFP define um caminho mínimo que deve ser percorrido no interior da célula de baixa resolução para que o pixel de alta resolução, cotado como exutório, seja considerado no processo de escolha das direções de fluxo na resolução grosseira. Por sua vez, o AT, que se baseia no valor de área acumulada, estabelece um limite mínimo que deve ser atendido para definição da direção de fluxo.

Com a continuidade dos avanços de monitoramento e coleta de dados por sensoriamento remoto, tem-se disponíveis dados com resoluções mais refinadas do que 30 m, como os Modelos Digitais de Terreno (MDT) obtidos através da varredura da superfície com sensores LiDAR (*Airborne Light Detection and Ranging*).

A tecnologia LiDAR permite uma representação digital da superfície com qualidade superior a métodos tradicionais de coleta de dados, podendo apresentar resoluções da ordem de centímetros ou até milímetros, dependendo do tipo e da posição do sensor (CAVALLI et al., 2008; JABOYEDOFF et al., 2012). Devido à essas características, a utilização de MDT LiDAR permite simulações mais precisas, em especial na área de modelagem hidrológica e hidrodinâmica (ZHAO et al., 2010; PETROSELLI, 2012).

No entanto, o uso de MDT LiDAR com resoluções tão refinadas traz consigo consequências, como o excesso de dados e o alto custo de processamento, de modo que

muitas aplicações requerem degradar essa informação para uma resolução mais grosseira. Bacias consideradas pequenas, com área de drenagem de 10 km², por exemplo, ao serem discretizadas na resolução de 30 m possuíam cerca de 11 mil pixels, enquanto para a resolução de 1 m, o total de pixels passa a ser 10 milhões. De forma análoga, ocorria para as grandes bacias utilizando MDE SRTM de 30 m, onde 10.000 km² de área implica em cerca de 11 milhões de pixels, mas apenas 10.000 pixels se degradar a resolução para 1 km.

Na literatura, são identificados estudos que buscam solucionar essa problemática, a exemplo do trabalho de Vaze, Teng e Spencer (2010), que reamostraram um MDT LiDAR de 1 m para as resoluções de 2, 5, 10 e 25 metros para duas áreas do estado de *New South Wales* (Austrália). Os autores observaram o quanto a resolução do dado de entrada influencia nos resultados e como o MDT LiDAR contribuiu para a extração das características das duas áreas de estudo, mesmo com a perda de detalhes causada pela reamostragem do MDT.

Petroselli (2012) buscou avaliar o desempenho de MDT LiDAR de 2,5 e 1 m, comparando-o à reamostragem, para 20 e 30 m, e à aplicação de MDE com resoluções originais de 20 e 30 m. A autora considerou como áreas de estudo duas bacias, a *Selva di Val Gardena*, na Itália, e a do rio Napa, nos Estados Unidos, e concluiu que a utilização de dados LiDAR, mesmo reamostrados, fornecem resultados mais satisfatórios quanto ao comportamento hidrológico da bacia. Barber e Shortridge (2005) obtiveram resultados semelhantes ao analisar a representação proveniente de um MDT LiDAR reamostrado por dois métodos para a resolução de 30 m, com resolução original de 6 m, comparativamente a um MDE com resolução original de 30 m, para duas bacias da Carolina do Norte (Estados Unidos).

Entretanto, há uma escassez de trabalhos voltados para a aplicação da metodologia de *upscaling* para a degradação partindo de uma resolução espacial tão refinada. Foi encontrado apenas um estudo que aplicou a abordagem de *upscaling* das direções de fluxo para solucionar esse tipo de problema (MORETTI & ORLANDINI, 2018).

Tem-se o salto de escalas semelhante ao que se tinha no problema de grandes bacias com dados SRTM. Porém, enquanto esse caso das grandes bacias foi e continua sendo estudado quanto ao *upscaling*, avaliando desempenho e formas de melhoria, o problema de pequenas bacias utilizando dados LiDAR tem sido negligenciado. Em sua

pesquisa, Moretti e Orlandini (2018) utilizaram um MDT LiDAR de 1 m de resolução para saltos de escala de 10, 50, 100, 200, 400 e 800 m, a partir do método de *upsampling Hydrography-Driven Coarsening* (HD), considerando três pequenas áreas dos Alpes Italianos.

A degradação via *upsampling* a partir do MDT LiDAR de alta resolução é capaz de diminuir significativamente o espaço de armazenamento, bem como o tempo de processamento dos dados. Além disso, a adoção dessa metodologia pode vir a reduzir diversos erros, a exemplo daqueles relacionados à delimitação de bacia, como a omissão de áreas, à redução do percentual de entrada e saída de água, alterando o tempo de propagação de cheias, ao comprimento e posicionamento de rios e à geração de fluxos irreais (SOUSA & PAZ, 2017).

Nesse sentido, propõe-se avaliar o desempenho do procedimento de obtenção de redes de drenagem degradadas provenientes de MDT LiDAR de alta resolução espacial, via *upsampling* para as resoluções espaciais de 30 e de 100 m, preenchendo a lacuna existente na literatura. O algoritmo de *upsampling* utilizado é o COTAT+, considerando a variação dos valores dos parâmetros MUFP e AT, para uma bacia hidrográfica do estado de Pernambuco.

Para a validação dos resultados, são consideradas as métricas de inspeção visual, distância média, porcentagem dentro do *buffer* e análise de comprimentos de rios e de área de drenagem. Os resultados do *upsampling* são comparados aos obtidos pela reamostragem do MDT e à rede de referência, de modo a investigar e comparar as redes de drenagem e as bacias hidrográficas geradas pelos dois métodos de degradação da resolução espacial. A rede de drenagem e a delimitação de bacia de referência foram as extraídas do MDT LiDAR na resolução espacial de 1 m.

1.1 Objetivos

Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o desempenho do procedimento de degradação de redes de drenagem via algoritmo de *upsampling* das direções de fluxo COTAT+, a partir da utilização de MDT LiDAR de alta resolução espacial.

Objetivos específicos

- Avaliar a sensibilidade da representação das redes de drenagem via *upscaling* frente à variação dos parâmetros MUFP e AT considerando as resoluções espaciais de 30 e 100 metros;
- Investigar diferenças na delimitação de bacia hidrográfica geradas pelo *upscaling* a partir da variação dos parâmetros MUFP e AT;
- Analisar a rede de drenagem degradada obtida a partir do *upscaling*, derivadas do MDT LiDAR de 1 metro, comparativamente às redes de drenagem obtidas pela reamostragem;
- Examinar a relação da mudança de resolução espacial na diferença de desempenho entre os procedimentos de reamostragem e *upscaling*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica considerada para o desenvolvimento desta dissertação, subdividida em cinco partes, de acordo com os elementos empregados na metodologia.

Inicialmente, é apresentado o conceito de geotecnologias e sua importância na hidrologia. Na segunda parte, são abordados os conceitos relativos aos Modelos Digitais de Elevação e às diferentes fontes de obtenção desse dado. Posteriormente, na seção 2.3, é abordada a importância da inserção de MDE em estudos hidrológicos, enfatizando quais produtos podem ser extraídos dessa fonte de dados para as análises hidrológicas. Na quarta seção, são apresentados os diferentes métodos de derivação de redes de drenagem em uma resolução mais grosseira do que a original do MDE, com enfoque na reamostragem e no *upscaling* das direções de fluxo. Por fim, são apresentadas e discutidas as principais métricas de avaliação de redes de drenagem presentes na literatura.

2.1 As geotecnologias e os estudos hidrológicos

Geotecnologia pode ser definida como o “conjunto de ciências e tecnologias relacionadas à aquisição, armazenamento em bancos de dados, processamento e desenvolvimento de aplicações utilizando informações georreferenciadas”, sendo os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a topografia, a fotogrametria e o sensoriamento remoto algumas das tecnologias, ou ferramentas, as quais o conceito de geotecnologia abrange (SOUZA FILHO & CRÓSTA, 2003).

Devido às suas características, as geotecnologias são importantes ferramentas de gestão, a exemplo do SIG, que permite manipular, armazenar e interagir com grandes volumes de dados de forma integrada, e do sensoriamento remoto, fornecendo dados multivariados da superfície terrestre (SARAF et al., 2004). Recentemente, esse conjunto de ferramentas tem passado por uma série de modificações, em especial devido aos crescentes avanços da fotogrametria e do sensoriamento remoto, além da abrangente disponibilidade de dados da superfície terrestre.

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são um dos principais dados utilizados nas geotecnologias, e fornecem informações sobre o relevo e a topografia do terreno,

permitindo a extração de importantes aspectos físicos das bacias hidrográficas e a construção da rede de drenagem. A utilização dos MDE agrega maior eficiência às análises, reduzindo, por exemplo, os custos associados à realização de levantamentos *in loco*, ao contrário de metodologias baseadas na interpretação de mapas topográficos (VAZE, TENG & SPENCER, 2010).

Na hidrologia, o MDE é utilizado como dado de entrada em modelos hidrológicos distribuídos em geral, como o TOPMODEL (*Topography-based Hydrological Model*; BEVEN & KIRBY, 1979) e o MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias; COLLISCHONN et al., 2007a). O MDE permite a extração de diferentes parâmetros que se relacionam diretamente com a topografia, como a velocidade do escoamento e o tempo de concentração, permitindo a geração de dados ou informações para análises hidrológicas, como direções de fluxo e áreas acumuladas de drenagem (EILANDER et al., 2021). Outro aspecto importante é a determinação da rede de drenagem e da delimitação da bacia hidrográfica a partir do MDE, essenciais para estudos hidrológicos.

2.2 Modelos Digitais de Elevação

2.2.1 Conceitos

Os Modelos Digitais de Elevação caracterizam-se como uma representação numérica da superfície, sendo amplamente utilizados para estimar suas características hidrológicas e geomorfológicas, como as redes de drenagem e o potencial erosivo do solo (BARNES, LEHMAN & MULLA, 2014). Comumente, a estrutura do MDE consiste em uma matriz de dados formados por células ou pixels, sendo um termo genérico utilizado para se referir à representação digital da topografia em uma determinada área (GUTH et al., 2021).

Zhou (2017) destaca que, na literatura, o termo MDE é comumente associado ao Modelo Digital de Superfície (MDS) e ao Modelo Digital de Terreno (MDT), não havendo uma distinção clara e universalmente aceita entre eles. Para Guth et al. (2021), o MDS pode ser compreendido como a representação de tudo que há abaixo da atmosfera, ou seja, vegetação, edificações, formas diversas do relevo e o próprio solo, por exemplo (Figura 1). Por outro lado, o MDT pode ser compreendido como a representação do terreno sem a interferência dos elementos existentes sobre ele (HIRT, 2015).

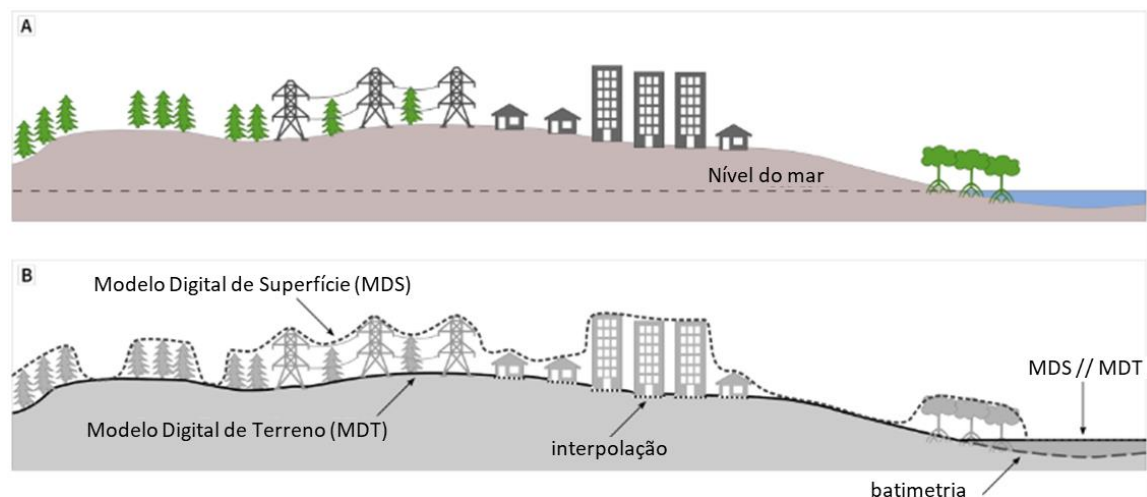


Figura 1 - Em (A) tem-se o relevo da superfície e, em (B), a ilustração do que representam os Modelos Digitais de Superfície (MDS) e os Modelos Digitais de Terreno (MDT).

(Fonte: Adaptado de Guth et al., 2021).

Assim, pode-se inferir que o MDT permite uma análise mais detalhada da superfície e dos diferentes fenômenos associados a ela, destacando a topografia e possibilitando uma caracterização mais detalhada do relevo, além da extração de outros aspectos morfológicos.

Justamente por representar as características do terreno em si, os MDT têm sido amplamente utilizados em diversos estudos com propósitos distintos, como, por exemplo, planejamento urbano (e.g. YANG et al., 2020) e monitoramento de áreas sujeitas a movimentos de massa (e.g. GÖRÜM, 2019). No caso da hidrologia, os MDTs se mostram como uma fonte de dados de extrema valia, permitindo, por exemplo, a determinação das direções de fluxo, a extração de redes de drenagem e a delimitação de bacia hidrográfica de forma rápida e automatizada (ZHAO et al., 2010).

2.2.2 Fontes de dados globais

Atualmente, tem-se disponível fontes de MDE provenientes de distintos métodos de aquisição de dados e sensores orbitais. Uma das primeiras fontes de dados disponíveis de forma gratuita e a nível global, com resolução de 90 metros (3 arco-segundo), usada até os dias atuais, são os MDE da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

Lançada entre os dias 11 e 22 de fevereiro de 2000, a bordo do *Shuttle Endeavor*, a Missão SRTM é fruto de uma parceria entre a Agência Espacial Americana, a NASA, o Centro Aeroespacial Alemão (DLR), e a Agência Espacial Italiana (ASI) (RABUS et al.,

2002). A partir de técnicas de Interferometria de Radar (SAR) e de dois pares de antenas operando simultaneamente nas bandas C e X, foram coletadas informações sobre a topografia entre as latitudes 60°N e 57°S, o correspondente a 80% da superfície terrestre, nas resoluções de 30 (1 arco-segundo) e 90 metros (3 arco-segundos) (RABUS et al., 2002; YANG et al., 2011).

Inicialmente, o MDE do SRTM foi disponibilizado gratuitamente apenas na resolução espacial de 90 metros, sendo resultante do procedimento de reamostragem do dado de 30 metros. Posteriormente, o dado de 30 metros original foi disponibilizado de forma gratuita a nível mundial, permitindo o avanço de diversos estudos utilizando MDE para a extração de informações topográficas.

Outra fonte de dados são os MDE obtidos pelo satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*; ROSENQVIST et al., 2007), o ALOS World 3D (AW3D), desenvolvido pela Agência Japonesa de Exploração Espacial (JAXA) e lançado em 24 de janeiro de 2006, encerrando suas atividades em 12 de maio de 2011, em decorrência de falhas na geração de energia. Dois importantes sensores a bordo do ALOS eram o PALSAR (*Advanced Land Observing Satellite Phase Array L-band Synthetic Aperture Radar*) e o PRISM (*Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping*), gerando dados com 30 e 12,5 metros de resolução espacial, respectivamente (TADONO et al., 2014).

Ainda a nível global, tem-se o ASTER-GDEM, produzido a partir de um consórcio entre o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI) e a NASA, e o TANDEM-X, produzido pelo DLR. Lançado em 29 de junho de 2009, o ASTER-GDEM tinha como objetivo fornecer uma cobertura territorial mais extensa do que o SRTM, com uma resolução espacial de 30 metros (REUTER et al., 2009). O TanDEM-X é um produto com resolução espacial de 12 metros (0,4 arco-segundo), resultado da Missão TanDEM-X, lançada em 21 de junho de 2010 (ZINK et al., 2014).

É interessante destacar que, pela definição defendida por Guth et al. (2021), os MDE apresentados nessa seção são, na verdade, MDS, devido às suas características e à ausência de um procedimento de filtragem da superfície.

Além de novas fontes de dados, foram propostas melhorias para dados já pré-existent, como o *Bare Earth*, desenvolvido por O'Loughlin et al. (2016), com o intuito de reduzir a influência da vegetação a partir de uma correção do SRTM de 90 m, baseada

na altura e densidade da massa vegetal das zonas de alcance do produto. Outro exemplo é o TOPODATA (VALERIANO & ROSSETTI, 2012), um banco de dados desenvolvido a partir de um refinamento dos dados SRTM de 90 metros para todo o território brasileiro, disponibilizando MDE com 30 metros de resolução espacial.

2.2.3 Dados obtidos por LiDAR (*Airborne Light Detection and Ranging*)

Com o avanço das técnicas de coleta de dados da superfície, tem-se o surgimento e o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais sofisticadas, como é o caso do LiDAR. Liu (2008) destaca que a utilização dessa tecnologia para coleta de dados topográficos data da década de 1980, desempenhando um importante papel na geração de MDT com resoluções espaciais cada vez mais refinadas.

A obtenção de dados LiDAR independe de fonte de luz externa, e é realizada a partir do sensor ativo LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). São emitidos pulsos de luz sobre a superfície, permitindo a coleta de uma nuvem de pontos com diferentes atributos, como latitude, longitude e elevação, sendo a densidade típica de 1 a 20 pontos por metro quadrado (PFEIFER & MANDLBURGER, 2018). A variação da elevação da superfície é calculada pela diferença do tempo entre emissão e recepção, além da sua orientação e posição em relação ao sensor (BECKER & CENTENO, 2013; MENDONÇA & PORTUGAL, 2018).

Segundo Chen, Gao e Devereux (2017), existe uma série de procedimentos para a geração do MDT a partir de uma nuvem de pontos, sendo três passos cruciais para este processo: pré-processamento, filtragem e interpolação. A etapa de pré-processamento tem como objetivo principal remover ruídos, ou *outliers*, gerados no momento de coleta dos pontos, e detectados a partir da análise da distribuição dos pontos e da densidade da nuvem gerada (CHEN, GAO & DEVEREUX, 2017; NAZERI & CRAWFORD, 2021). A remoção desses ruídos pode ser feita a partir da aplicação de métodos de distribuição estatística, a exemplo da morfologia matemática e dos métodos baseados na densidade, como densidade quadrática e a densidade de Kernel.

A filtragem busca identificar e classificar quais pontos se referem ao solo e quais se referem às feições acima dele, como edifícios, veículos e vegetação. Na literatura, existe uma série de métodos baseados em modelos matemáticos para a filtragem, a exemplo do

método de interpolação linear, proposto por Kraus e Pfeifer (1998), o método da superfície, proposto por Vosselman (2000), e o filtro morfológico progressivo, desenvolvido por Zhang et al. (2003).

O último passo é a interpolação dos pontos filtrados a partir da aplicação de métodos determinísticos e probabilísticos, como a interpolação linear ou bilinear. Para Chen, Gao e Devereux (2017), a escolha do método de interpolação deve ser baseada no tipo de relevo da região onde foi realizado o levantamento, podendo essa análise ser feita de forma concentrada, com a adoção de um método único para toda a área, ou de forma distribuída, com a divisão da região levantada em trechos e a aplicação de métodos distintos.

A metodologia de coleta dos dados LiDAR difere de outros métodos existentes, como a técnica de imageamento ativo de interferometria por radar, que deu origem aos dados SRTM, e a estereoscopia óptica, a exemplo do ASTER GDEM. A interferometria de radar consiste na emissão de um sinal por um radar e no registro das características do retorno desse sinal a partir de duas antenas, localizadas próximas uma da outra (MELGAÇO, SOUZA FILHO & STEINMAYER, 2005). A construção do MDE se dá pela comparação entre os dois sinais. Já a estereoscopia óptica é uma técnica baseada na comparação entre pares estereoscópicos, que extraem duas imagens de um mesmo local em diferentes ângulos (MELGAÇO, SOUZA FILHO & STEINMAYER, 2005).

Vaze, Teng e Spencer (2010) degradaram um MDT LiDAR de 1 metro para as resoluções espaciais de 2, 5, 10 e 25 metros, a partir da aplicação da técnica de reamostragem pela média. O MDT degradado foi comparado a um MDE com resolução de 25 metros, derivado de curvas de nível e dados de drenagem, para duas áreas do estado de *New South Wales*, na Austrália. A análise dos resultados demonstrou que, mesmo degradado, o MDT LiDAR se sobressaiu em relação ao outro MDE, fornecendo um maior detalhamento das características hidrológicas das bacias inseridas nas áreas de estudo.

Tarolli (2014) elencou algumas características do LiDAR que fazem com que essa tecnologia se sobressaia em relação a métodos mais tradicionais, com destaque para a capacidade de geração de MDT com resoluções inferiores a 1 metro para cobertura de grandes áreas. Assim, esse tipo de dado vem sendo amplamente utilizado na execução de diversos estudos e como ferramenta de tomada decisão.

2.3 Produtos derivados do MDE para estudos hidrológicos

A utilização de MDE no desenvolvimento de estudos onde há a necessidade do levantamento de aspectos físicos da superfície tem ganhado cada vez mais espaço, e na área da hidrologia não tem sido diferente. Devido ao tipo de informação que esse dado apresenta, é possível extrair informações essenciais para a realização de análises hidrológicas, como curvas hipsométricas, diferença de cotas, declividade do terreno e perfis topográficos.

Com o processamento do MDE, é possível extrair as direções de fluxo, determinar as áreas acumuladas de drenagem e a rede de drenagem, bem como delimitar a bacia hidrográfica. Essas informações servem de subsídio para uma série de análises, como na modelagem hidrológica, contribuindo com a sofisticação de modelos e permitindo simulações mais precisas (COURTY et al., 2019), e na suscetibilidade de risco à inundação, com a previsão de cheias, vazão de rios e altura de inundação (MUHADI et al., 2020), por exemplo.

2.3.1 Direções de fluxo

A obtenção da matriz de direções de fluxo a partir de um MDE é uma etapa essencial para a execução de estudos hidrológicos, uma vez que, a partir dela, é possível compreender o caminhamento do fluxo em uma determinada área. Um método comumente adotado para determinação das direções de fluxo é o *Deterministic Eight Neighborhood* (D8), desenvolvido por Jenson e Domingue (1988). De modo geral, esse método consiste na criação de um arquivo matricial do tipo *raster*, onde o atributo de cada uma das suas células é um valor que representa a indicação do fluxo, estando este fluxo restrito a um de seus oito vizinhos.

Outro algoritmo que considera que o fluxo se restringe a oito direções é o D8-LAD e o D8-LTD, onde são adicionados pequenos desvios no momento de escolha da direção do fluxo de uma célula, semelhante ao efeito de dispersão que pode ocorrer na natureza, mas mantendo a restrição de oito direções (ORLANDINI et al., 2003). Na literatura existem outras metodologias de extração das direções de fluxo, como o *Priority*

First Search (PFS) e o *D-infinity* (D^∞), propostos por Fairfield e Leymarie (1991) e Tarboton (1997), respectivamente.

O PFS é um algoritmo robusto e automático, baseado na metodologia D8, que permite resolver uma série de problemas mudando a sua “*priority function*”, sendo utilizado para contornar a presença de áreas planas e depressões espúrias, simulando o caminho de fluxo da água (JONES, 2002). Buarque et al. (2009) resumem o PFS em quatro passos: (i) partindo da depressão, adiciona-se um pixel ao conjunto do caminho de fluxo e suas 8 células vizinhas são adicionadas como um conjunto de candidatas ao caminho de fluxo; (ii) o conjunto de candidatas é analisado e é selecionada a célula com menor valor; (iii) a célula com menor valor é então movida para o conjunto do caminho de fluxo e suas 8 vizinhas são, novamente, adicionadas ao conjunto de candidatas; (iv) esse procedimento é repetido até que seja encontrada uma nova depressão ou os limites do MDE sejam alcançados.

No PFS, o valor das células é ajustado de forma decrescente ao longo do caminho de fluxo, onde a célula inicial é a primeira célula da depressão analisada e a célula final é uma célula que possua atributo menor que a depressão ao longo do fluxo ou que se localize na borda do MDE (BUARQUE et al., 2009). Caso a célula de borda possua um valor superior ao da depressão, a ela é designado um novo atributo, calculado pela elevação da depressão menos um valor escolhido com base na resolução vertical do MDE.

Fairfield e Leymarie (1991) propuseram o PFS ao identificar deficiências no D8 de Jenson e Domingue (1988), como a criação de linhas de fluxo paralelas e a predisposição para transmitir o fluxo apenas ortogonalmente, aos vizinhos localizados nos pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste), reduzindo a ocorrência de direções diagonais. Por sua vez, o *D-infinity* (D^∞) foi desenvolvido de modo a considerar que o fluxo não se restringe apenas a oito direções, mas sim a infinitas possibilidades, considerando uma janela 3x3 de células e oito facetas triangulares (TARBOTON, 1997).

Apesar da variedade de métodos existentes, o D8 ainda continua sendo o método mais utilizado para a determinação das direções de fluxo. O seu funcionamento perpassa pela identificação e preenchimento de eventuais depressões, evitando que o fluxo fique estacionado nesse ponto, e determinação da diferença de declividade entre as oito vizinhas, a partir de uma janela 3x3 (Figura 2).

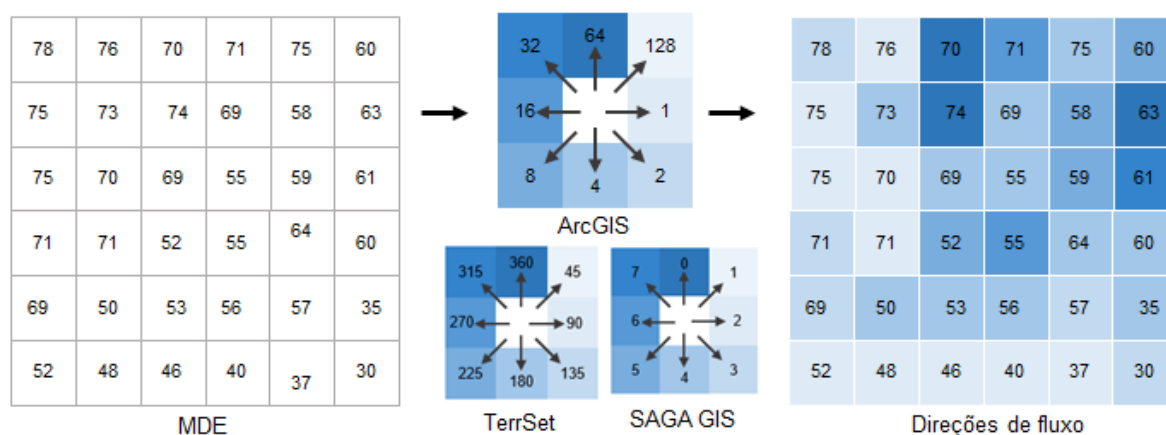


Figura 2 – Representação do método D8 para escolha das direções de fluxo: *raster* com pixels e as diferentes codificações de cada SIG.

Buscando contornar algumas limitações do método, como a discretização de fluxo estar restrita a oito direções, e evitar a formação de linhas paralelas irreais em trechos planos da drenagem, foi proposto o acréscimo da ideia de aleatoriedade para contornar essa tendência, evitando assim a geração de erros na determinação de outros planos de informação subsequentes que dependam da matriz de direções de fluxo (PAZ et al., 2006).

2.3.2 Áreas acumuladas de drenagem

As áreas acumuladas de drenagem representam um arquivo matricial derivado do MDE, composto por pixels. O atributo de cada pixel refere-se ao acúmulo ou somatório das áreas dos pixels de montante ao longo do caminhamento do fluxo. As áreas acumuladas podem ser determinadas em termos de pixel ou em termos de área (m² ou km², por exemplo).

2.3.3 Redes de drenagem

A rede de drenagem é um importante componente das análises hidrológicas, auxiliando na determinação da bacia hidrográfica e sendo fator chave na execução de modelos hidrológicos e de planos voltados para a gestão e o gerenciamento dos recursos hídricos (O'CALLAGHAN & MARK, 1984). Comumente, é obtida a partir das áreas acumuladas de drenagem com a adoção de um valor de área mínimo. A escolha desse limiar mínimo implica em quais pixels fazem parte ou não da rede de drenagem.

Tradicionalmente, Fan et al. (2013) destacam duas abordagens para a definição desse parâmetro: i) escolha de um valor arbitrário que resulte em uma rede de drenagem conveniente para o estudo, ou seja, não necessariamente fiel aos cursos d'água reais; ii) e escolha da área mínima de modo a representar de forma mais precisa a rede de drenagem daquela bacia. Fan et al. (2013) ainda acrescentam que este limiar mínimo está associado diretamente às características da região em que o rio se encontra.

A fim de propor uma representação mais próxima daquela existente, sugere-se a identificação das nascentes e escolha de uma área mínima variável, adequada para diferentes pontos da bacia (FAN et al., 2013). Todavia, essa temática ainda é alvo de pesquisas, a exemplo de Wu et al. (2017) e Reddy et al. (2018).

Outro exemplo de algoritmo baseado na escolha de um limiar mínimo é o *flooding algorithm*, por Rueda, Noguera e Martínez-Cruz (2013). Eficiente na detecção de lagos, reservatórios e pântanos no MDE, o *flooding algorithm* opera sem a necessidade da remoção de depressões espúrias do MDE.

Apesar de ser facilmente implementada, a derivação da rede de drenagem a partir de uma área mínima é questionada, em especial em áreas onde há grande variação geomorfológica, demandando a necessidade de correções manuais ou semiautomáticas (BANON, 2013). Essa constatação levou ao desenvolvimento de novas técnicas para extração da rede de drenagem, a exemplo da metodologia desenvolvida por Banon (2013).

Banon (2013) notou que para regiões com grande variação morfológica, como a região Amazônica, o conceito de área mínima não resulta em redes de drenagem coerentes, propondo uma nova metodologia de extração automática baseada em mineração de dados e árvores de decisão. Em síntese, foi aplicada a técnica de árvores de decisão para indicar quais são os critérios importantes que devem ser considerados para a definição da rede de drenagem. A autora selecionou e classificou amostras das 5 áreas de estudo, todas localizadas na região amazônica, em três classes: nascente, drenagem e não drenagem. A árvore de decisão selecionou os atributos área de contribuição, curvaturas mínima, máxima e horizontal, desnível ao vizinho à jusante e a altura acima da drenagem mais próxima (*Height Above the Nearest Drainage*; RENNO et al., 2008) como essenciais para a construção de uma rede de drenagem satisfatória.

2.3.4 Bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica é o enfoque principal de estudos na hidrologia, caracterizando-se como uma unidade de planejamento e de tomada de decisões. Estimar sua delimitação permite a realização de uma série de análises relacionadas ao ciclo hidrológico, como a estimativa de escoamento e infiltração. Sua delimitação depende das direções de fluxo, áreas acumuladas e rede de drenagem, além da escolha de um exutório que representa o ponto de saída de toda a água que entra na bacia.

2.4 Derivação de redes de drenagem em resolução mais grosseira do que o MDE

2.4.1 Visão geral

Na hidrologia de grandes bacias (áreas $\geq 10.000 \text{ km}^2$), e na aplicação de modelos e representação de fenômenos, é comum a utilização de informações da ordem de quilômetros, tendo em vista que o detalhamento excessivo de dados traz consigo o consumo computacional demasiado (SARAIVA & PAZ, 2014). Esse é o caso do MDT LiDAR, um dado com resolução espacial de 1 metro ou até inferior, que, apesar de promover uma análise detalhada da superfície, é pouco utilizado, justamente por demandar custos de armazenamento e processamento excessivos.

Nesse sentido, tem-se os procedimentos de mudança de escala, que, em linhas gerais, buscam alterar os dados de alta resolução, de modo a transformá-los em uma resolução mais grosseira. Para isso, existem duas grandes abordagens: a reamostragem do MDE, onde há a degradação do MDE para a resolução grosseira desejada e, em seguida, seu processamento básico; e o *upscaling* das direções de fluxo, que utiliza as direções de fluxo derivadas do MDE original para obter a drenagem grosseira (Figura 3).

A bibliografia apresenta diversas metodologias de reamostragem e de *upscaling*. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais técnicas de mudança de escala, as resoluções espaciais e as bacias hidrográficas consideradas.

Tabela 1 – Revisão bibliográfica: Aplicação de métodos de mudança de escala para degradação de MDE.

<i>Referência</i>	<i>Algoritmo de mudança de escala</i>	<i>Área de estudo</i>	<i>Resolução original</i>	<i>Total de pixels na res. original</i>	<i>Resolução grosseira</i>	<i>Total de pixels na res. grosseira</i>
Paz et al. (2006)	<i>Cell Outlet Tracing With an Area Threshold Plus (COTAT+)</i>	(1) Rio Tapajós (530.000 km ²) e; (2) Rio Grande (145.000 km ²)	90 m	(1): 65.432.099; (2): 17.901.235	(1): 216 m; (2): 270 m	(1): 11.359.739; (2): 1.989.026
Davies e Bell (2009)	- COTAT+; - <i>Network Scaling Algorithm</i> (NSA); - <i>Network Tracing Method</i> (NTM) e; - Método de Elevação Média (MEM)	(1) Território continental do Reino Unido (241.600 km ²); (2) Rio Severn – da nascente até a vila de Buildwas (3.717 km ²) e; (3) Rio Tâmsa – de Kingston até próximo a uma barragem para controle de cheias (9.948 km ²)	50 m	(1): 96.640.000; (2): 1.486.800; (3): 3.979.200	(1): 5, 10, 15 e 20 km; (2) e (3): 0,5, 1, 2,5 e 5 km	(1): 9.664, 2.416, 1.074; 604; (2): 14.868, 3.717; 595, 149; (3): 39.792, 9.948, 1.592 e 398
Le Coz et al. (2009)	Reamostragem: - Média - Mediana; - Vizinho mais próximo; - Máximo; - Mínimo	Bacia hidrográfica do Lago Chad (África Central – 2.500.000 km ²)	90 m	308.641.975	10 km	25.000
Saraiva e Paz (2014)	- COTAT+; - <i>Multi-step upscaling</i> com o COTAT+	(1) Rio Tapajós (478.000 km ²); (2) Rio São Francisco (642.000 km ²); (3) Rio Paraíba (20.000 km ²) e; (4) Rio Uruguai (206.000 km ²)	MDE SRTM 90 m reamostrado: (1) e (2): 200 m; (3) e (4): 100 m	(1): 11.950.000; (2): 16.050.000; (3): 2.000.000; (4): 20.600.000	(1) e (2): 50 km; (3): 10 km; (4): 30 km	(1): 191; (2): 257; (3): 200; (4): 229

Tabela 1 – Revisão bibliográfica: Aplicação de métodos de mudança de escala para degradação de MDE.

<i>Referência</i>	<i>Algoritmo de mudança de escala</i>	<i>Área de estudo</i>	<i>Resolução original</i>	<i>Total de pixels na res. original</i>	<i>Resolução grosseira</i>	<i>Total de pixels na res. grosseira</i>
Sousa e Paz (2017)	- Reamostragem pela média; - COTAT+	Bacia hidrográfica do Rio Uruguai (206.000 km ²)	100 m (MDE SRTM de 90 m reamostrado)	20.600.000	1, 5, 10, 20 e 30 km	206.000, 8.240, 2.060, 515 e 229
Moretti e Orlandini (2018)	- <i>Hydrography-Driven Coarsening</i> (HD); Reamostragem: - Vizinho mais próximo; - <i>Compound Method Coarsening</i> (CM)	(1) <i>Synthetic Valley</i> (SV – 260 km ²); (2) Bacias hidrográficas do Rio Crostolo (Itália - 86 km ²) e; (3) Cordevole (Itália – 680 km ²)	(1): 10 m (MDE gerado para a SV); (2) e (3): 1 m (MDT LiDAR)	(1): 2.600.000; (2): 86.000.000; (3): 680.000.000	(1): 20, 50, 100, 200 e 500 m e 1 km; (2) e (3): 10, 50, 100, 200, 400 e 800 m	(1): 650.000, 104.000, 26.000, 6.500, 1.040 e 260; (2): 860.000, 34.400, 8.600, 2.150, 538 e 134; (3): 6.800.000, 272.000, 68.000, 17.000, 4.250 e 1.063
Eilander et al. (2021)	- <i>Iterative Hydrography Upscaling</i> (IHU); - <i>Double Maximum Method</i> (DMM); - <i>Effective Area Method</i> (EAM)	(1) Bacia hidrográfica do Rio Reno (195.000 km ²) com um evento de escoamento simulado	90 m (MDE MERIT Hydro)	(1): 24.074.074	1, 10 e 30 km	195.000, 1.950 e 217

2.4.2 Procedimento de degradação da resolução via reamostragem do MDE

A reamostragem é um procedimento de mudança de escala utilizado com o intuito de degradar um dado de uma determinada resolução espacial (considerada como alta) para uma resolução mais grosseira (considerada como baixa). Existem diversas técnicas de reamostragem, a exemplo da suavização/filtragem, do método do vizinho mais próximo e daquelas baseadas na aplicação de métodos estatísticos e de interpolação, sendo a metodologia mais utilizada a de agregação pela média.

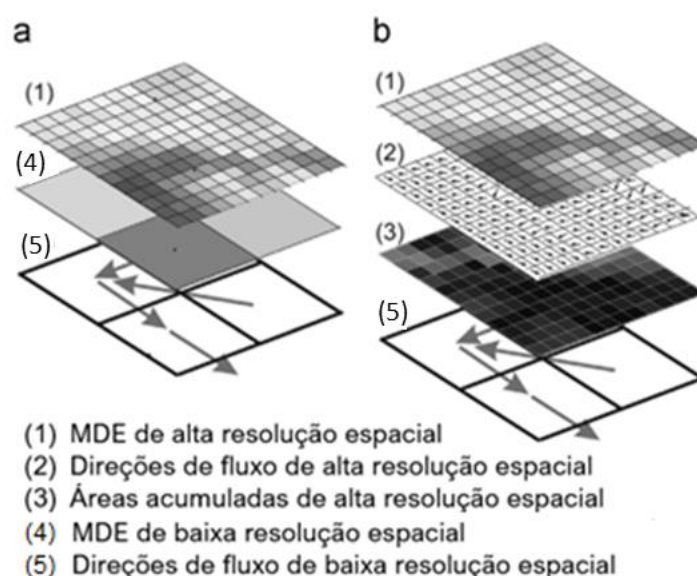


Figura 3 – Abordagens para determinação de direções de fluxo de baixa resolução a partir de MDE de alta resolução: (a) Procedimento tradicional de reamostragem; (b) *Upscaling* das direções de fluxo.

(Fonte: Adaptado de Saraiva & Paz, 2014).

Na agregação pela média, os pixels de alta resolução são agregados de modo que o atributo de cada pixel de baixa resolução corresponde ao valor da média dos pixels de alta resolução incluídos em seu interior. A quantidade de pixels de alta resolução utilizados para representar a célula de baixa depende da degradação escolhida.

Após ser reamostrado, o MDE degradado é processado, permitindo a obtenção das direções de fluxo e das áreas acumuladas nessa nova resolução. Posteriormente, a rede de drenagem é extraída e a bacia é delimitada, ambas na resolução grosseira.

Apesar de sua ampla aplicabilidade e simplicidade, a reamostragem não é a metodologia mais indicada, tendo em vista que a representação da topografia pode sofrer alterações significativas, prejudicando a estrutura da drenagem e a delimitação da bacia

hidrográfica (SHAW et al., 2005; LE COZ et al., 2009). Consequentemente, a degradação do MDE por reamostragem e a extração de seus atributos hidrológicos demanda uma excessiva correção manual (REED 2003; SHAW et al., 2005).

2.4.3 Procedimento de degradação da resolução via *upscaling*

Os procedimentos via *upscaling* das direções de fluxo, ao contrário da reamostragem do MDE, trabalham diretamente com os caminhos de fluxo, minimizando erros e conservando as características essenciais para a construção de uma rede de drenagem coerente (EILANDER et al., 2021). Na literatura, existem diversas metodologias para a realização do *upscaling* e mudança de escala.

Buscando avaliar qual procedimento de mudança de escala apresentava os melhores resultados, Davies e Bell (2009) analisaram três métodos de *upscaling*, o *Cell Outlet Tracing With an Area Threshold Plus* (COTAT+; PAZ et al., 2006), o *Network Scaling Algorithm* (NSA; FEKETE et al., 2001) e o *Network Tracing Method* (NTM; OLIVERA & RAINA, 2003), e o mais comumente utilizado método de reamostragem, o Método de Elevação Média (MEM; JENSON & DOMINGUE, 1988). As áreas de estudo foram o território do Reino Unido (241.600 km²), desconsiderando as ilhas, além de duas bacias hidrográficas, a do rio Severn, de sua nascente até a vila de Buildwas (3.717 km²), e do rio Tamisa, de Kingston até próximo a uma barragem para controle cheias (9.948 km²).

Partindo de um MDT com resolução de 50 m, Davies e Bell (2009) realizaram o procedimento de degradação para todo o Reino Unido (5, 10, 15 e 20 km), e para as bacias mencionadas (0,5, 1, 2,5 e 5 km), utilizando os quatro métodos. As redes de drenagem geradas pela mudança de resolução pelos quatro métodos, para três áreas de estudo, foram avaliadas com base nas métricas de distância média (DM), porcentagem dentro do *buffer* (PWB), área de drenagem e comparação visual. A rede de drenagem de referência para as análises foi a extraída do MDT de 50 m para cada região de estudo.

Ao analisar os resultados, Davies e Bell (2009) verificaram que o COTAT+ apresentou valores de DM inferiores a 5.500 m para o Reino Unido e 900 m para as bacias hidrográficas, além do aumento do PWB, em especial para a bacia do Severn, atingindo valores próximos à 65% (Figura 4). Quanto à área de drenagem, foram observados os menores percentuais de erro de área de drenagem para as resoluções de 5 e 10 km (Figura

5). Logo, as autoras concluíram que o COTAT+ apresentou um desempenho superior aos demais, seguido pelo NTM e NSA, sendo o MEM o método com pior desempenho.

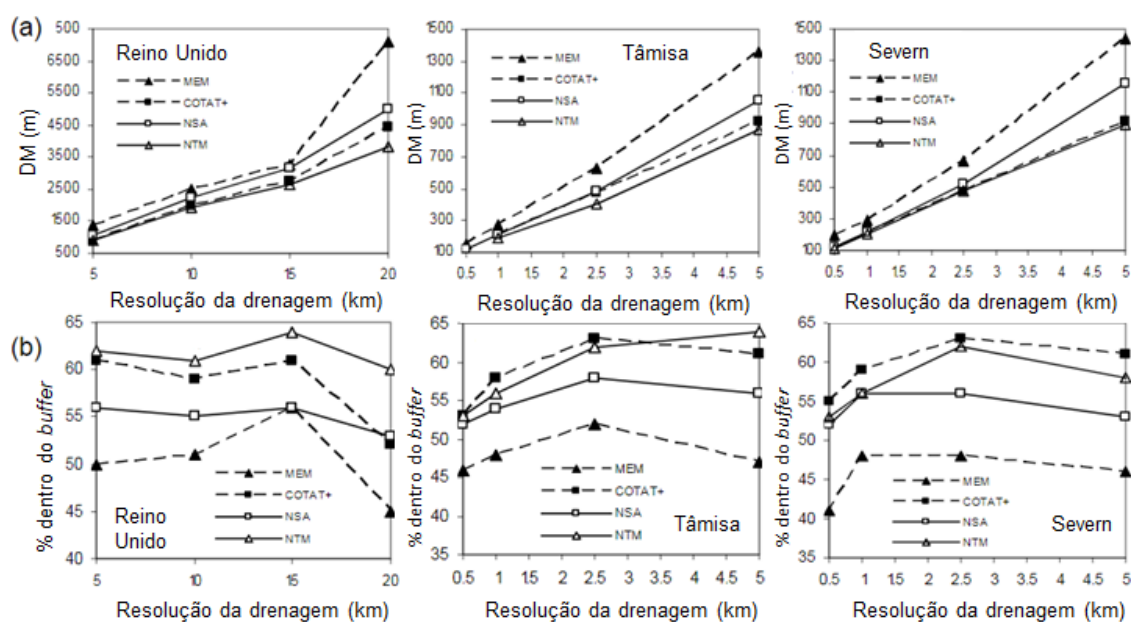


Figura 4 – Comparação da precisão das redes de drenagem grosseiras derivadas de um MDT de 50 m de resolução usando quatro métodos diferentes para o Reino Unido e as bacias do Tâmbisa e Severn. Em (a) tem-se a comparação por meio da DM e em (b) porcentagem dentro do *buffer*.

(Fonte: Adaptado de Davies e Bell, 2009).

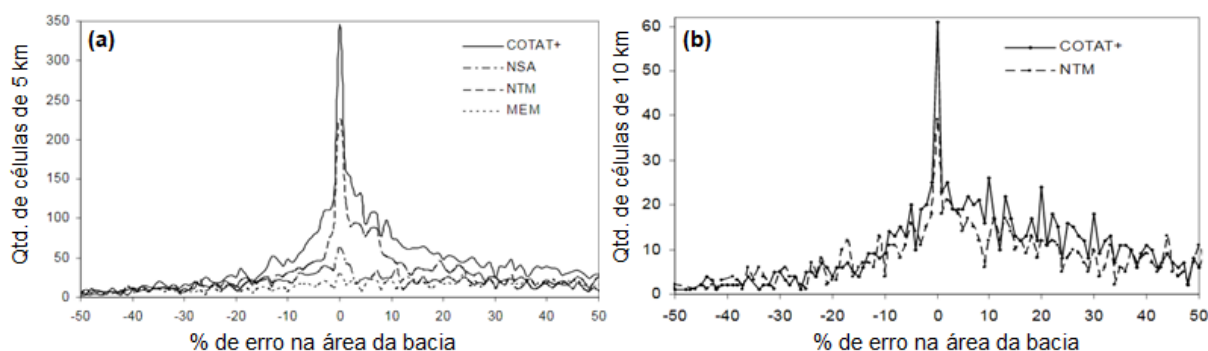


Figura 5 – Percentual de erro na área de delimitação das bacias entre o MDT de 50 m e as células para a resolução de 5 (a) e 10 km (b), provenientes da degradação para cada método. Apenas os erros de -50% e +50% são apresentados. O COTAT+ foi o método que apresentou os menores erros percentuais.

(Fonte: Adaptado de Davies e Bell, 2009).

O algoritmo COTAT+

O COTAT+ foi desenvolvido a partir do algoritmo COTAT, de Reed (2003), um algoritmo que considera que o caminhamento de fluxo pode ser transmitido para um de seus oito vizinhos, desde que atenda um limite previamente definido de área acumulada.

Ao aplicar o COTAT, Paz et al. (2006) notaram que o mesmo poderia levar à geração equivocada das direções de fluxo de baixa resolução em situações em que uma mesma célula (nomenclatura adotada para grades em geral) é cortada por rios paralelos, levando à escolha incorreta da direção de fluxo. Ou seja, ao invés de considerar o traçado da drenagem, a direção era escolhida com base no pixel com maior valor de área acumulada.

A Figura 6 ilustra uma situação em que a direção de fluxo é mal definida. Na parte (a) dessa figura, a direção de fluxo da célula C3 (amarela) é atribuída equivocadamente para C2 (azul), quando, na verdade, deveria seguir o caminho apresentado em (b) e fluir para B2 (rosa) ou B3 (marrom). Esse equívoco ocorre devido ao ilustrado em (c), onde a presença de rios paralelos leva à escolha da direção sem considerar o traçado do rio no interior da célula.

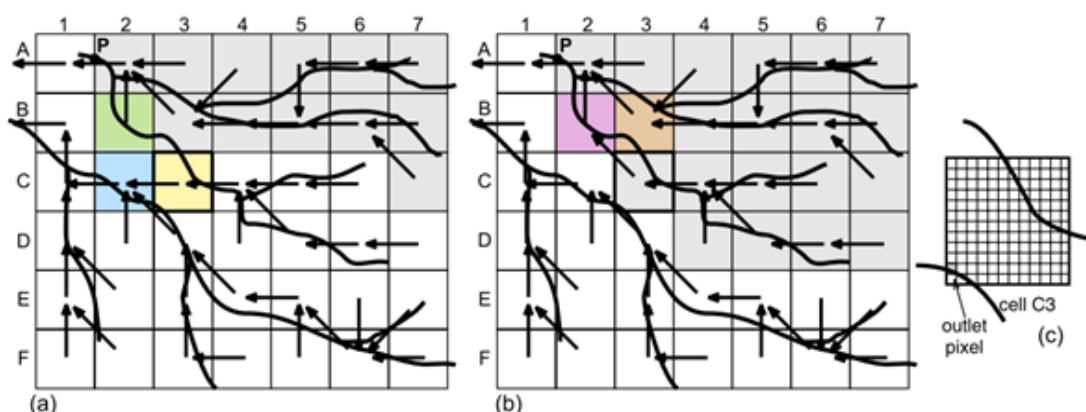


Figura 6 – Situação em que o COTAT resultaria em uma direção de fluxo mal definida. Em (a) a direção de fluxo da célula C3 (amarelo) é atribuída equivocadamente à C2 (azul), quando, na verdade, deveria ser atribuída à B3 (marrom) ou B2 (rosa), como ilustrado na situação (b). O motivo do equívoco é a presença de rios paralelos em (c).

(Fonte: Adaptado de Paz et al., 2006).

O COTAT+ determina as direções de fluxo de baixa resolução com base nas direções de fluxo e áreas acumuladas de alta resolução. Sua aplicação segue os passos apresentados a seguir:

- O algoritmo identifica o potencial pixel de saída, ou pixel exutório, de cada células de baixa resolução, uma vez que uma célula de baixa resolução é formada por vários pixels de alta resolução (Figura 7). Ao identificar esse pixel, com base na sua localização (próximo às bordas da célula) e investigação da sua área de drenagem à montante, ele é marcado como potencial exutório;

- Em seguida, ao analisar a célula novamente, o algoritmo determina qual dos pixels de borda drena a maior porção da célula, destacando-o em seguida – note que esse pixel não é necessariamente aquele escolhido inicialmente como potencial exutório;
- Rastreia-se o caminho percorrido pela drenagem, no interior da célula, na direção de montante do pixel inicialmente apontado como possível exutório;
- Ao encontrar uma junção de rio, o pixel com maior área acumulada de montante é selecionado. Se sua trajetória for superior ao valor do parâmetro caminho mínimo de montante (MUFP), definido pelo usuário, ele é selecionado como pixel exutório e a análise segue para a célula seguinte. Caso contrário, ele é novamente avaliado e se verifica se ele coincide com o mesmo pixel que drena a maior porção da célula. Em caso positivo, ele é escolhido como exutório, mesmo que não atenda ao MUFP;
- Caso não atenda a nenhum dos critérios especificados nos itens anteriores, ele é descartado e a análise segue para o pixel de borda com a segunda maior área de drenagem.

Após a escolha do pixel exutório, é atribuída a direção de fluxo da célula partindo do caminho de fluxo à jusante do pixel selecionado, até alcançar o potencial pixel de saída da célula seguinte. É subtraída a área de drenagem do pixel exutório inicial e do pixel potencial da célula vizinha, de modo que, caso esse valor seja igual ou superior ao parâmetro área mínima incremental (AT), o fluxo é atribuído em direção a essa célula. Do contrário, continua-se a percorrer a drenagem até o potencial pixel de saída de alguma célula vizinha cuja diferença de área entre ele e o pixel exutório atenda ao AT.

Para o COTAT+, considera-se também que cada pixel possui uma única direção de fluxo, seguindo o método D8. Paz et al. (2006) destacam que os diferenciais do COTAT+ em relação ao COTAT de Reed (2003) residem em: (i) identificar, a partir do caminho mínimo de montante (MUFP), se o rio no qual o pixel de borda está inserido está drenando de fato a célula; (ii) selecionar, caso nenhum pixel de saída válido seja encontrado, o pixel da última célula visitada, uma vez que a sua área acumulada é maior ou igual a das células que foram analisadas anteriormente; e (iii) comparar as áreas acumuladas pelo critério de área mínima incremental (AT).

A aplicação do COTAT+ para mudança de escala nas bacias dos rios Tapajós (530.000 km²) e Grande (145.000 km²) demonstrou ótimos resultados, havendo apenas

divergências inferiores a 4000 km² em pequenas áreas de drenagem, ocasionadas devido ao tamanho de 100 km² da célula de resolução grosseira (Figura 8).

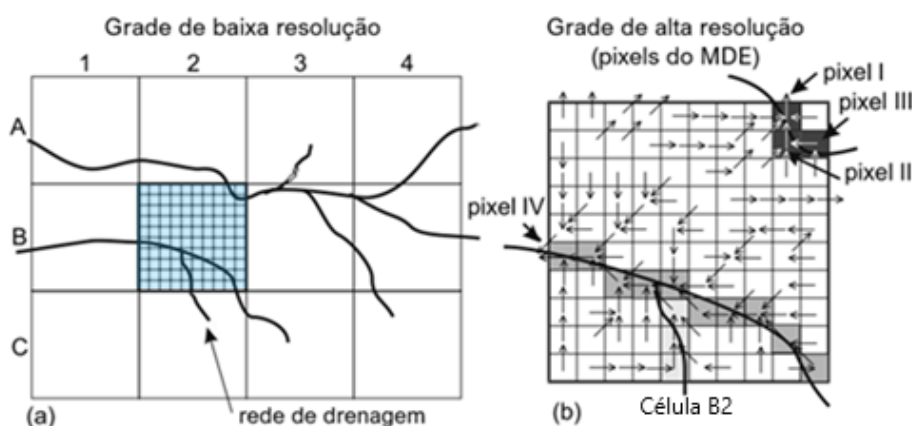


Figura 7 – Determinação do pixel exotório pelo COTAT+. Quanto mais escura for a cor do pixel, maior é a sua área de drenagem. Na célula B2 de baixa resolução, destacada em azul (a), mesmo o pixel I possuindo maior área acumulada, ele é rejeitado por causa do curto caminho de fluxo percorrido à montante no interior da célula (b). Pelo mesmo motivo, o pixel III também é rejeitado, sendo o pixel de saída de B2 o pixel IV. (Fonte: Adaptado de Paz et al., 2006).

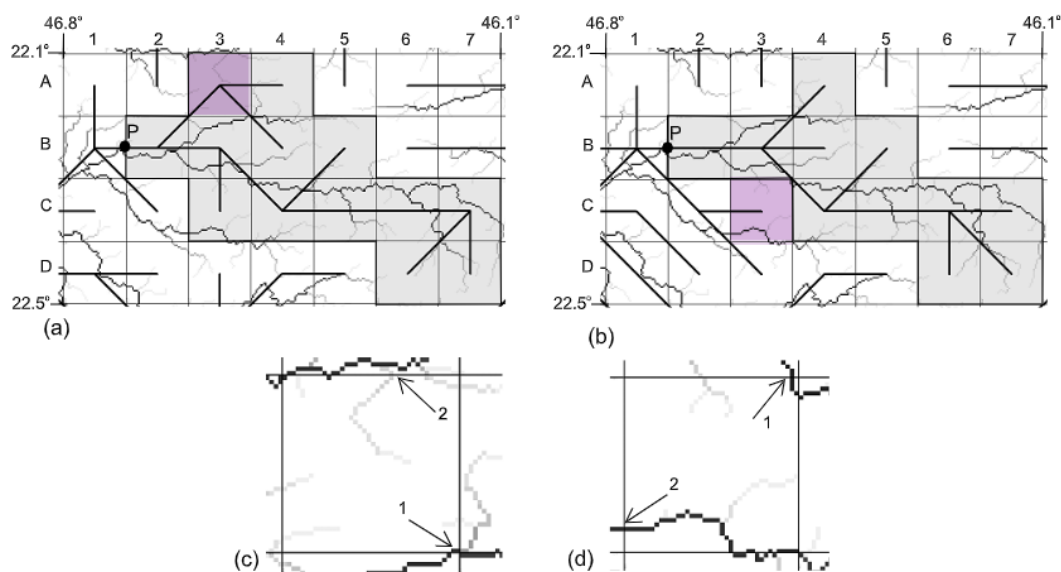


Figura 8 – Comparação entre duas drenagens determinadas pelo COTAT+ para um trecho da bacia do Rio Grande, considerando a adoção dos parâmetros (a) MUFP = 0 e AT = 100 km² e (b) MUFP = 1,5 km e AT = 100 km². Os pixels exotório das células A3 (c) e C3 (d), destacados em roxo, são indicados pelos pixels 1 ou 2, dependendo do conjunto de parâmetros escolhidos, alterando a área de contribuição de P (células cinzas). (Fonte: Adaptado de Paz et al., 2006).

Saraiva e Paz (2014) também aplicaram o COTAT+ para as bacias dos rios Tapajós (478.000 km²), São Francisco (642.000 km²), Paraíba (20.000 km²) e Uruguai

(206.000 km²), degradando das resoluções de 100 e 200 m para 10, 30 e 50 km. Os autores propuseram ainda uma abordagem de *multi-step* para o COTAT+, considerando saltos graduais na escala, com a transformação do dado de alta resolução em uma resolução intermediária e, posteriormente, na resolução baixa de interesse, preservando os padrões da drenagem.

A abordagem *multi-step* melhorou, em média, 6% da representação de direções de fluxo para as bacias de estudo (SARAIVA & PAZ, 2014). Entretanto, foi observado que, quanto maior a relação entre a área da bacia e da célula na resolução baixa, melhor a representação do *multi-step* em relação ao COTAT+ tradicional, impactando significativamente a representação dos rios. Apesar de apresentar resultados satisfatórios, a técnica ainda precisa ser mais explorada.

Outros algoritmos de *upscaling*

Outro exemplo de algoritmo de *upscaling* é o IHU (*Iterative Hydrography Upscaling*; EILANDER et al., 2021). Esse método é baseado no D8 para derivar as direções de fluxo e os parâmetros da drenagem, como comprimento dos rios e declividade, que possam ser aplicados a dados hidrográficos com resoluções inferiores a 1 km. Sua aplicação baseia-se em três etapas: iniciar a derivação das direções de fluxo na resolução grosseira, analisar o plano gerado e corrigir as direções errôneas.

O IHU foi aplicado por Eilander et al. (2021) na bacia hidrográfica do Rio Reno, considerando uma área de drenagem de 195.000 km² e um evento de escoamento simulado, para a mudança de escala de 90 m para 1, 10 e 30 km. Ao analisar os resultados encontrados e comparar o método desenvolvido com outros dois métodos de *upscaling*, o *Double Maximum Method* (DMM) e o *Effective Area Method* (EAM), Eilander et al. (2021) destacaram que o IHU gerou respostas satisfatórias, em especial por demonstrar-se sensível à variação da declividade e largura dos rios (Figura 9). Por ser automatizado, permite a rápida inserção de direções de fluxo de alta resolução em modelos hidrológicos distribuídos.

Apesar da diversidade de métodos de *upscaling*, nenhum testou a aplicabilidade desta metodologia frente a utilização de MDT com alta resolução espacial, com exceção de Moretti e Orlandini (2018). Em seu trabalho, objetivando uma melhor representação da

drenagem, estes autores propuseram o método de *upscaling Hydrography-Driven Coarsening* (HD).

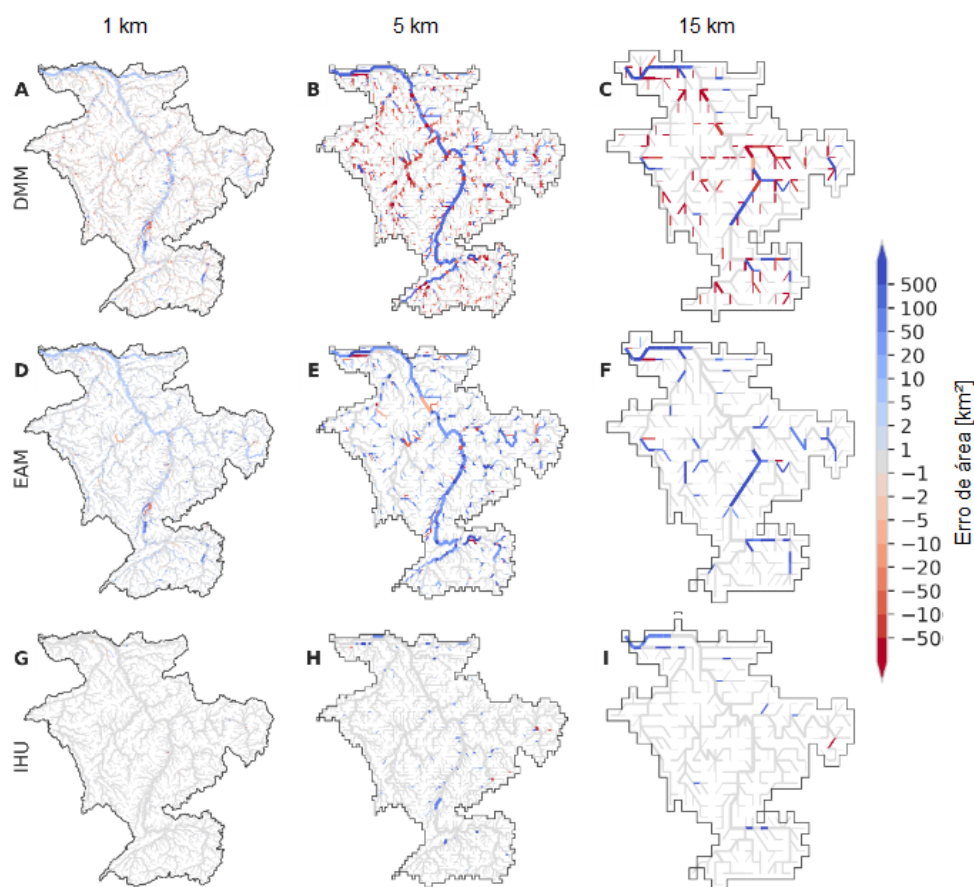


Figura 9 – Redes e áreas de drenagem do Rio Reno para as resoluções de 1, 10 e 30 km pelos métodos EAM, DMM e IHU. A cor azul indica erros positivos de superestimação e, vermelho, subestimação da direção da drenagem.

(Fonte: Adaptado de Eilander et al., 2021).

O método HD foi aplicado por Moretti e Orlandini (2018) para duas situações: uma área de estudo simulada matematicamente, criada com base na topografia dos Alpes Italianos, a *synthetic valley* (SV – 260 km²), e duas bacias hidrográficas italianas de relevo acidentado, a Crostolo (86 km²) e a Cordevole (690 km²). Como dado de referência, os autores utilizaram um MDT LiDAR de 1 m para analisar o desempenho do método sobre as bacias, e geraram um MDE com 10 m de resolução espacial para a área simulada.

Partindo da resolução espacial de 10 m, foram feitos saltos de escala para as resoluções de 20, 50, 100, 200 e 500 m e 1 km para o SV, e saltos de 1 m para 10, 50, 100, 200, 400 e 800 m, para áreas de estudo constituídas por bacias hidrográficas reais. Moretti

e Orlandini (2018) acrescentam que a escolha desses valores está associada às características da topografia e da hidrografia das bacias.

Ao analisar os resultados, Moretti e Orlandini (2018) observaram que, para ambos os casos considerados, o método HD demonstrou um resultado superior em relação aos métodos de reamostragem *Nearest Neighbor* (NN) e *Compound Method Coarsening* (CM), representando melhor a hidrografia, em especial em regiões de relevo acidentado (Figura 10a e b). Apesar de ser mais complexa do que o NN e o CM, a rotina para implementação do HD teve um rápido processamento.

2.5 Métricas de avaliação da rede de drenagem

A geração de redes de drenagem a partir de um procedimento, como a reamostragem ou o *upscaling*, por exemplo, implica na adoção de técnicas para avaliar a sua qualidade e validá-la frente às características físicas do próprio rio e da bacia hidrográfica ao qual se insere. Outro importante aspecto associado a essas técnicas e que deve ser considerado é a identificação de erros, que podem vir a prejudicar processamentos futuros, como a modelagem hidrológica, que utilizem essa rede de drenagem.

Dentre esses erros, pode-se destacar a exclusão ou inclusão errônea de áreas de drenagem, desequilíbrio do balanço hídrico e aumento ou redução do escoamento superficial e da infiltração, provocados pela delimitação da bacia hidrográfica ou pelo traçado da drenagem incorretos (SOUSA & PAZ, 2017). Na literatura, existe uma série de métricas que permitem analisar a rede de drenagem, levando em consideração aspectos importantes para a hidrologia, como a delimitação de bacia hidrográfica e análise do rio principal.

Sousa e Paz (2017) realizaram um levantamento, apontando as principais métricas utilizadas para a avaliação da rede de drenagem, aplicando-as à bacia hidrográfica do Rio Uruguai. Partindo da resolução de 100 metros, obtida por meio do método de reamostragem de interpolação bilinear do SRTM de 90 metros, foi proposta a degradação da rede de drenagem para as resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km, considerando a reamostragem pela média e a aplicação do algoritmo COTAT+. Para validação dos resultados, os autores utilizaram como referência a rede de drenagem vetorizada extraída manualmente a partir de imagens do Landsat 7.

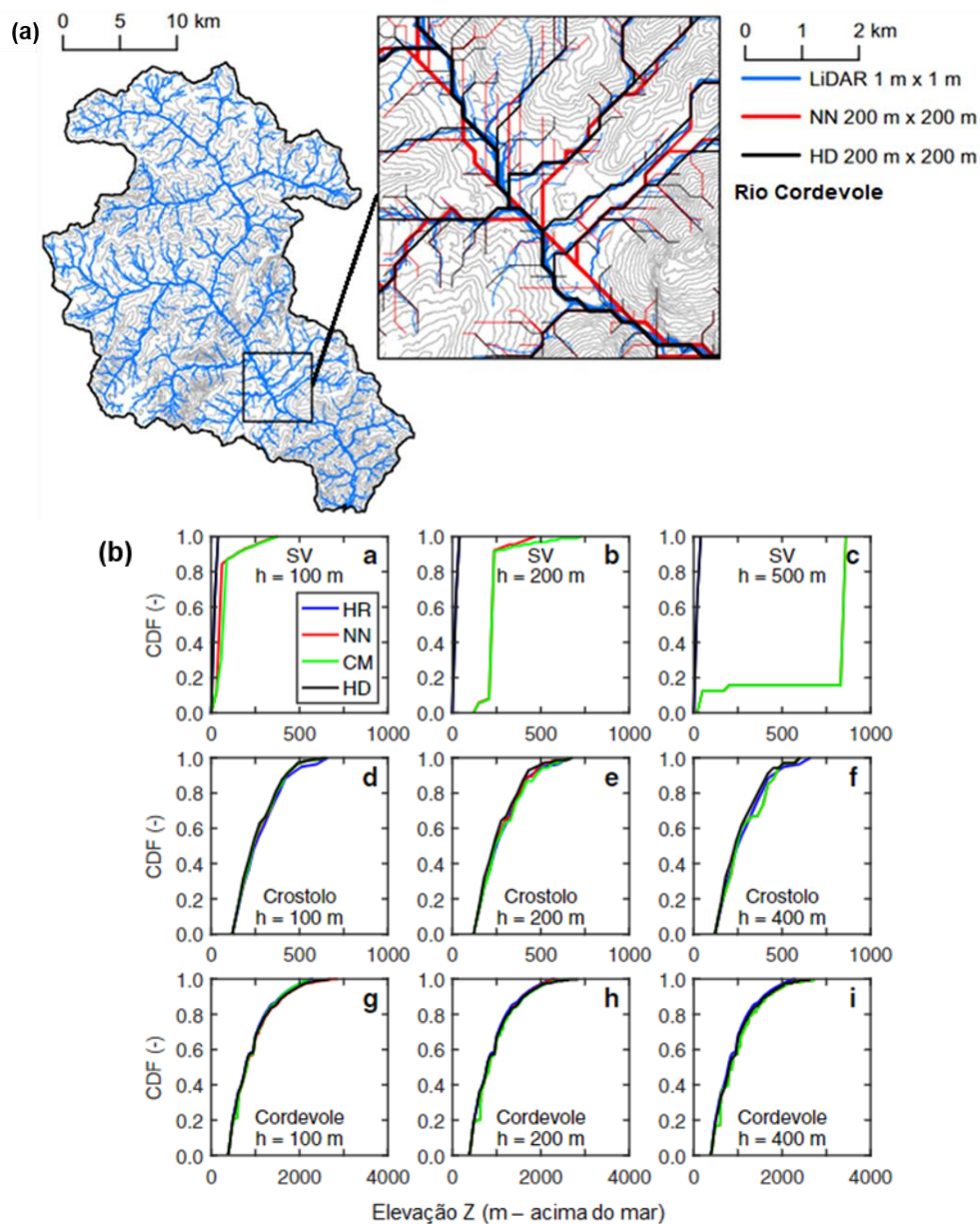


Figura 10 – (a) Comparação entre as redes de drenagem extraídas pelos métodos NN e HD (CM não representado por ter se comportado de forma semelhante ao NN) e a drenagem de referência LiDAR de 1 m.

E (b) Função de densidade acumulada (CDF) das elevações observadas, em dados topográficos de alta resolução (HR) e pelos métodos NN, CM e HD ao longo do SV (a-c), da bacia de drenagem do rio Crostolo (d-f), e da bacia de drenagem do rio Cordevole (g-i).

(Fonte: Adaptado de Moretti e Orlandini, 2018).

As principais métricas elencadas por Sousa e Paz (2017) estão apresentadas nos subtópicos subsequentes.

2.5.1 Inspeção visual

A inspeção visual se trata de uma métrica qualitativa baseada na interpretação visual de como a rede de drenagem sob avaliação consegue seguir os padrões espaciais de uma rede de referência. Idealmente deve ser implementada em conjunto com outras métricas quantitativas, a exemplo da contagem de células de direção de fluxo, para quantificar quantas células sofreram alteração em sua direção em relação à referência.

2.5.2 Características do rio e da bacia hidrográfica

Trata-se da extração de características e a comparação entre valores considerados de referência e obtidos de outra forma, levando em consideração fatores como a quantidade de nascentes, ordem da bacia, sinuosidade, comprimento do rio e densidade da drenagem. Essa métrica é uma forma indireta de avaliar a qualidade de uma rede de drenagem e traz consigo um elevado grau de incerteza por desconsiderar a influência da resolução espacial. Afinal, pode haver coincidência entre os valores das características e os valores de referência, sem necessariamente isso significar que a rede de drenagem está coerente.

Sousa e Paz (2017) destacam que essa métrica complementa outras, como a distância média ou porcentagem dentro do *buffer*, de modo que não deve ser utilizada para avaliar diretamente a rede de drenagem.

2.5.3 Delimitação de área de drenagem

Baseia-se na qualidade da delimitação da bacia hidrográfica, avaliando a semelhança entre bacias e quantificando o total de área omitida e incluída segundo uma referência. Destaca-se que esse tipo de abordagem não avalia a rede de drenagem em si.

2.5.4 Distância média (DM)

A DM pode ser compreendida como a distância perpendicular medida entre duas redes de drenagem. A partir da escolha de trechos isolados de rios, é quantificada a discordância entre os trechos escolhidos e os trechos da rede de drenagem referência.

Constrói-se polígonos ao longo do cruzamento entre as redes de drenagem e a DM é calculada dividindo-se o somatório de todas as áreas dos polígonos formados pelo comprimento da rede de referência (Figura 11a).

Apesar de ser uma métrica intuitiva, pressupõe-se que o traçado do rio de referência é preciso, de modo que quaisquer divergências são penalizadas. A literatura apresenta outras métricas semelhantes à DM, a exemplo da distância média relativa (DMR).

A DMR pode ser determinada ao dividir a DM por metade do lado da célula (pixel na resolução grosseira). Se $DMR = 0$, o rio de referência flui no centro dos pixels da rede de drenagem que está sendo analisada; $0 < DMR < 1$ significa que o rio de referência flui na região interna dos pixels; para $DMR = 1$, a rede de drenagem de referência flui nas bordas dos pixels da rede de drenagem analisada; $DMR > 1$, corresponde a situação em que a rede de drenagem de referência flui na área externa dos pixels da rede de drenagem que está sendo analisada (MENDONÇA, MARÇAL & PAZ, 2019).

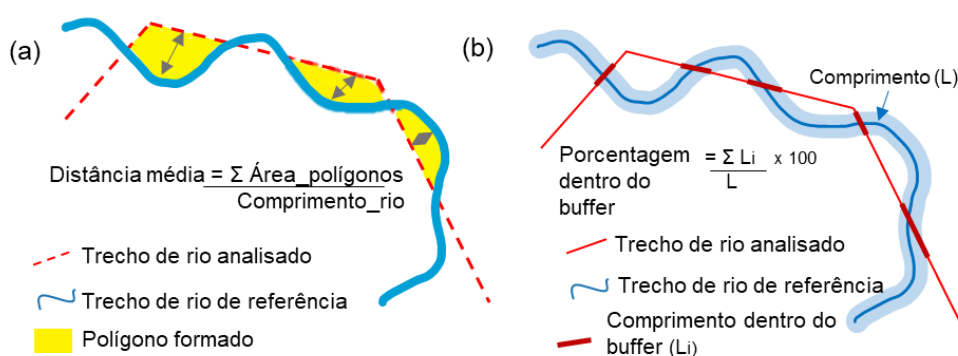


Figura 11 – Métricas para avaliação da rede de drenagem: (a) Distância Média e (b) Porcentagem dentro do buffer.

2.5.5 Porcentagem dentro do buffer (Percentage within buffer – PWB)

A PWB trata-se de uma métrica que permite mensurar a semelhança do traçado entre dois rios, demonstrando o quão bem conservada foram as características de uma rede de drenagem, comparando-a com uma de referência (CHEN et al., 2012). Sua aplicação baseia-se na construção de um *buffer* ao redor da rede de drenagem tida como referência, de modo que este sirva como um fator de tolerância para o traçado a ser analisado (Figura 11b).

Diferente da DM, no PWB, o *buffer* age como um fator de tolerância, onde a rede de drenagem que está sendo analisada não precisa necessariamente seguir o traçado exato da rede de referência. Sousa e Paz (2017) reforçam que a aplicação do PWB leva em consideração a inexatidão da localização da rede de referência e outros aspectos do próprio rio, como a largura, já que, por vezes, a rede digitalizada representa a linha central do rio, permitindo uma análise mais realista. No entanto, assim como a distância média, a porcentagem dentro do *buffer* também é aplicada para trechos isolados de rios.

Na literatura existem algumas abordagens que orientam quanto à escolha da largura do *buffer*. Zhou e Chen (2011) aplicaram um *buffer* com largura de 5 metros, referente à resolução espacial do MDE. Por sua vez, Davies e Bell (2009) adotaram um *buffer* correspondente a 1/5 da resolução espacial grosseira, enquanto Sousa e Paz (2017) consideraram larguras iguais a 1/5, 1/2 e 1 vez o tamanho do pixel das resoluções degradadas.

3 ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo, são apresentadas as características da bacia hidrográfica do Riacho das Garças, onde está inserida a sub-bacia escolhida como objeto de estudo. Ao todo, o capítulo subdivide-se em três tópicos. Inicialmente, é apresentada a localização da bacia, área e municípios pertencentes. Em seguida, tem-se a caracterização física, com apresentação do clima, relevo e tipos de solo. Por fim, é apresentada uma breve caracterização econômica da bacia como unidade de planejamento.

3.1 Localização e caracterização

A bacia hidrográfica do Riacho das Garças está localizada na porção oeste do estado de Pernambuco – Brasil, nas mesorregiões dos sertões de São Francisco/Central/Araripe, sob as coordenadas 08°08'48" S – 39°41'25" S e 39°41'25" W – 40°47'35" W, fazendo divisa ao norte com o estado do Piauí, e ao sul com o estado da Bahia (Figura 12; PERHPE, 2022). Abrange parcialmente os municípios de Dormentes, Lagoa Grande, Ouricuri, Parnamirim e Santa Maria da Boa Vista, e totalmente Santa Cruz e Santa Filomena.

Possui uma área total de 4.094,10 km², o que corresponde a 4,16% da área do estado, e seu rio principal, o Riacho das Garças, nasce no Riacho Caipora, no limite com o estado do Piauí, e desemboca no Rio São Francisco, com uma extensão total de 192 km (APAC, 2018). Encontra-se na UP (Unidade de Planejamento) 14 e seus afluentes mais importantes são os Riachos Água Preta, das Lagoas, da Cal, do Periquito, dos Campos, Mocambo, da Boa Vista, da Volta, Alegre, do Algodão e do Bom Fim.

3.2 Clima, solos e relevo

Devido à sua localização, a bacia do Riacho das Garças possui clima típico de semiárido, com precipitações irregulares, vegetação de caatinga e baixos índices de segurança hídrica, exceto no entorno do Açude Saco II e nas margens do Rio São Francisco (PERHPE, 2022). A umidade relativa do ar média anual oscila entre 55% e 60%,

com precipitação média anual acumulada variando entre 500 e 700 mm. Por outro lado, a evapotranspiração potencial média anual é de 2.200 a 2.400 mm.

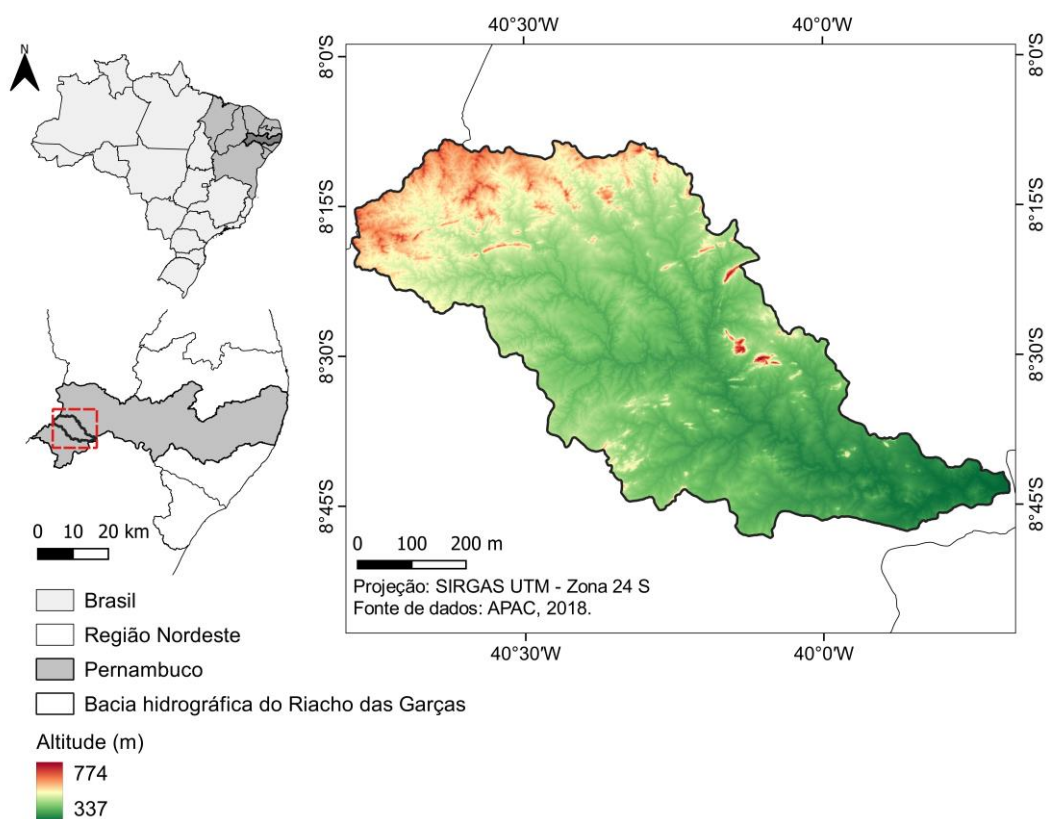


Figura 12 - Bacia do Riacho das Garças: Localização e MDE com variação de altitude.

A altitude média da bacia do Riacho das Garças é de 500 m, com cerca de 58% de todo o relevo entre 400 e 500 m, e predominância de relevo suave ondulado (50,9%) e plano (34,4%), havendo baixa variação de topografia em toda a sua extensão (ALVES & BARROS, 2021). Quanto à sua geomorfologia, destaca-se a presença de depressão sertaneja meridional (76,25%) (PERHPE, 2022). Em relação às classes de solo presentes na bacia, há uma preponderância de argissolo vermelho (38,54%) e argissolo vermelho-amarelo (20,65%).

3.3 Caracterização socioeconômica

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERHPE, 2022), há uma predominância da população rural sobre a urbana na bacia do Riacho das Garças, sendo identificada a menor taxa de urbanização de todo o estado, com cerca de

39%. O Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal (IFDM), desenvolvido com base no Índice de Desenvolvimento Humano (IDH – ONU), demonstrou a presença de desenvolvimento regular (0,4 – 0,6) a moderado (0,6 – 0,8).

No tocante à economia regional, tem-se a agropecuária como maior contribuinte de emprego e renda, com a criação de rebanhos de ovinos e caprinos e o cultivo de culturas perenes, como uva e banana, que reflete uma demanda hídrica majoritária para a irrigação em relação aos demais usos da água, como consumo humano e uso industrial (Figura 13).

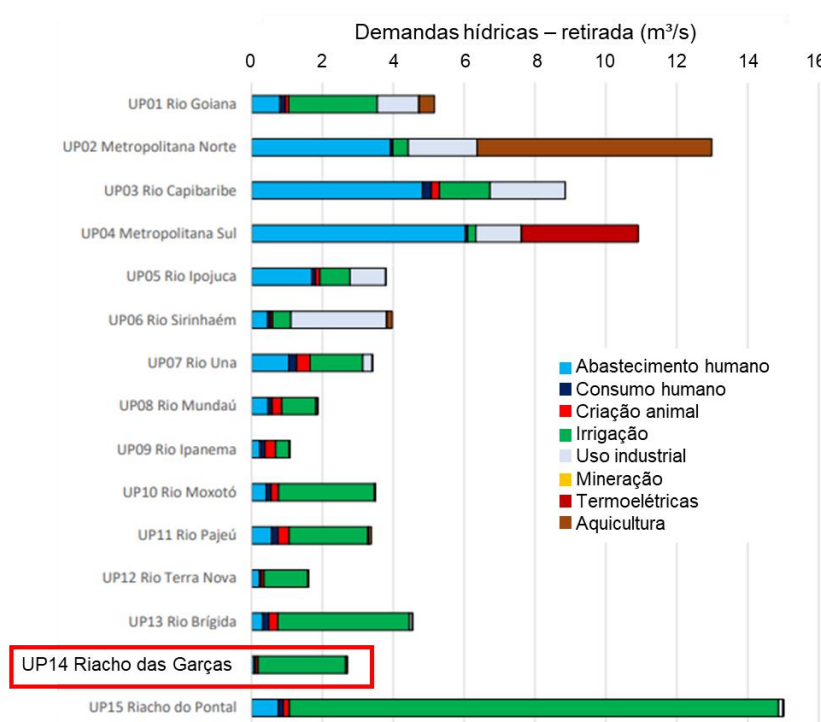


Figura 13 – Demandas de retirada de água por categoria de uso em cada UP, em especial a UP14 Riacho das Garças, destacada pelo retângulo vermelho.

(Fonte: Adaptado do PERH – PE (Produto 4: Diagnóstico Integrado), 2022).

A região de maior concentração agropecuária é a porção inferior da bacia, às margens do Rio São Francisco, integrando-se à Região Administrativa Integrada de Desenvolvimento do Polo Petrolina e Juazeiro.

3.4 Gerenciamento dos recursos hídricos na bacia

Apesar de sua extensão e importância econômica para a região em que se insere, a UP do Riacho das Garças não possui um Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) próprio,

fator que dificulta a gestão e o gerenciamento de seus recursos hídricos. O diagnóstico apresentado pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos destaca a vulnerabilidade da bacia, com escassez hídrica e reservatórios em estado avançado de eutrofização, além da problemática associada ao risco médio a alto de salinização.

Ainda que sua gestão esteja relacionada ao CBH São Francisco, é evidente a necessidade de implantação de uma CBH. Destaca-se, a importância da adoção de medidas objetivando a redução de índices de perdas de água na rede pública de abastecimento, que supera os 50%, melhoria nos serviços de saneamento ambiental e adoção de técnicas para mitigação e controle das taxas crescentes de salinização de reservatórios.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente, o item 4.1 traz uma visão geral acerca das etapas metodológicas consideradas, descrevendo-as brevemente. O item 4.2 discorre acerca da coleta e preparação do MDT LiDAR, com o recorte para a área de interesse e a remoção de depressões artificiais no terreno, enquanto o item 4.3 trata da extração de características hidrológicas, como as direções de fluxo e áreas acumuladas, que serviram como dado de entrada para o processamento do *upscaling* e avaliação de resultados.

Por sua vez, os itens 4.4 e 4.5 descrevem a escolha das resoluções espaciais degradadas e mostram como foram aplicadas as metodologias de mudança de escala reamostragem e *upscaling*, apontando as suas características, funcionamento do algoritmo COTAT+ e métricas para obtenção das redes de drenagem e bacias hidrográficas. O item 4.6 apresenta quais métricas foram consideradas para análise dos resultados obtidos nos itens anteriores.

O desenvolvimento desta pesquisa pode ser compreendido a partir do fluxograma ilustrado na Figura 14. O modelo digital de terreno (MDT) utilizado para a execução deste estudo foi extraído a partir de tecnologia LiDAR, com resolução espacial de 1 metro, de modo que suas especificações são apresentadas ao longo desta seção.

Em linhas gerais, a metodologia adotada compreende quatro etapas principais: (i) coleta, recorte e remoção de depressões artificiais no terreno do MDT LiDAR de 1 m; (ii) determinação das direções de fluxo, áreas acumuladas e extração de rede de drenagem e bacia hidrográfica do MDT LiDAR; (iii) aplicação da reamostragem pela média e do método de *upscaling* COTAT+ para as resoluções espaciais de 30 e 100 m, considerando como dados de entrada o MDT LiDAR e as direções de fluxo e áreas acumuladas de 1 m; e (iv) aplicação de métricas para avaliar a qualidade do traçado dos rios e da delimitação da bacia hidrográfica.

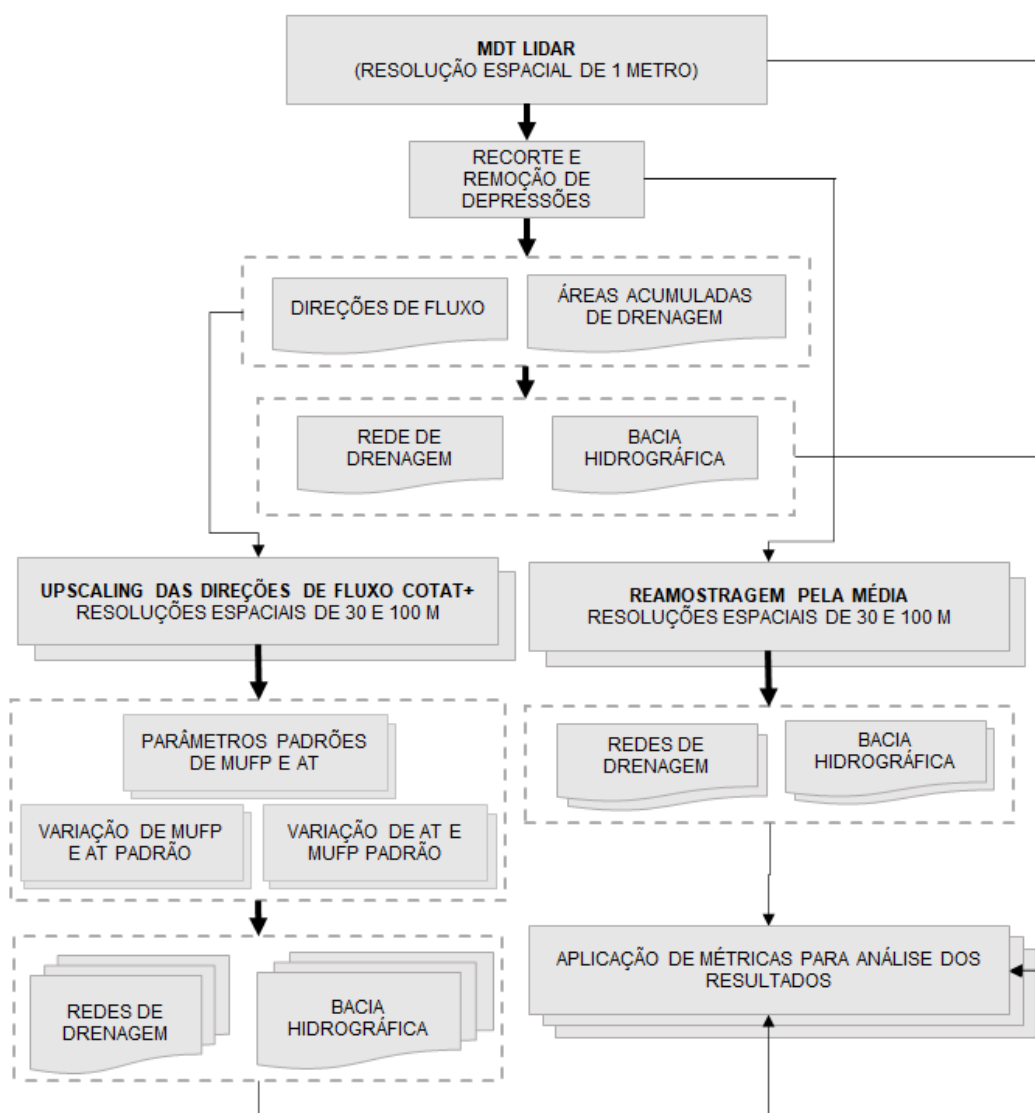


Figura 14 – Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.

4.1 Compatibilização dos dados

4.1.1 Coleta do MDT LiDAR

Como dito no tópico anterior, a fonte de dados utilizada para a execução desta pesquisa foi um MDT, obtido, com o auxílio do grupo de pesquisa, gratuitamente através do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D). O PE3D foi concebido no ano de 2014 com o intuito de realizar o recobrimento aerofotogramétrico e o perfilamento a laser, com a tecnologia LiDAR, de todo o estado de Pernambuco (CIRILO et al., 2014; CIRILO et al., 2015).

Os produtos gerados são MDS e MDT LiDAR nas escalas de 1:5000 e 1:10000, correspondendo às resoluções espaciais de 1 m e 50 cm, respectivamente, com densidade

de pontos de 1 ponto a cada 2 m², e ortofotos com resoluções nas escalas de 50 e 12 cm (PERNAMBUCO, 2016). Os pontos para geração do MDT e do MDS foram classificados pelo TerraScan, *software* de processamento de nuvens de pontos de varredura a *laser*.

Conforme o Relatório Final de Atividades, elaborado pelo Projeto de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE, 2017), os parâmetros para classificação automática do MDT foram definidos a partir da declividade de cada região, retornando dois grupos de pontos: os pertencentes ao terreno e os não pertencentes, associados a outros elementos presentes no terreno. Ainda, o mesmo relatório destaca que o MDS foi classificado considerando todos os elementos presentes no terreno, como vegetação e massa urbana, sendo os seus pontos constituintes resultado dos retornos do pulso *laser*.

De acordo com Cirilo et al. (2015), o território de Pernambuco (98.250 km²) foi subdividido em 12.962 cenas, com uma densidade aproximada de 1,3 pontos por m². No formato GeoTIFF, cada cena possui cerca de 2.400 linhas por 3.500 colunas, de modo que todas as cenas do estado representam um tamanho de arquivo superior a 500 gigabytes (MENDONÇA & PAZ, 2022).

4.1.2 Recorte do MDT LiDAR e remoção de depressões artificiais

Para abranger as dimensões da bacia hidrográfica do Riacho das Garças, foram concatenadas 739 cenas do MDT LiDAR do programa PE3D, sendo necessários, aproximadamente, 42 gigabytes de armazenamento. Devido às limitações de armazenamento e processamento computacional, bem como ao escopo desta pesquisa, foi realizado um recorte interno à bacia hidrográfica do Riacho das Garças, observando o MDT, as direções de fluxo e as áreas acumuladas, considerando uma cena com 10.000 linhas e 10.000 colunas (Figura 15).

No momento de coleta do MDT, é comum o surgimento de depressões artificiais, causadas, por exemplo, por clareiras na cobertura vegetal ou ruídos (FAIRFIELD & LEYMARIE, 1991). Com a definição do recorte, foi realizada a remoção de eventuais depressões artificiais indesejadas que, se não removidas, podem promover a ocorrência de fluxos descontínuos e interferir diretamente na qualidade da rede drenagem. A literatura apresenta uma série de algoritmos desenvolvidos com o intuito de remover essas depressões artificiais.

Neste estudo, aplicou-se a metodologia *Fill Sinks XXL*, presente no Sistema de Informações Geográficas (SIG) gratuito SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*). Desenvolvida por Wang e Liu (2006) para tratar especificamente do processamento de grande massa de dados, a metodologia *Fill Sinks XXL* foi descrita por Mendonça e Paz (2022) como a opção mais viável para tratamento de dados LiDAR.

Ao identificar depressões artificiais no terreno, o algoritmo realiza o seu preenchimento, considerando o valor mínimo ao qual aquele pixel precisa ser elevado para garantir o fluxo de água até a borda do MDT, conservando um caminho de fluxo descendente entre os pixels a partir de um gradiente mínimo de inclinação (WANG & LIU, 2006).

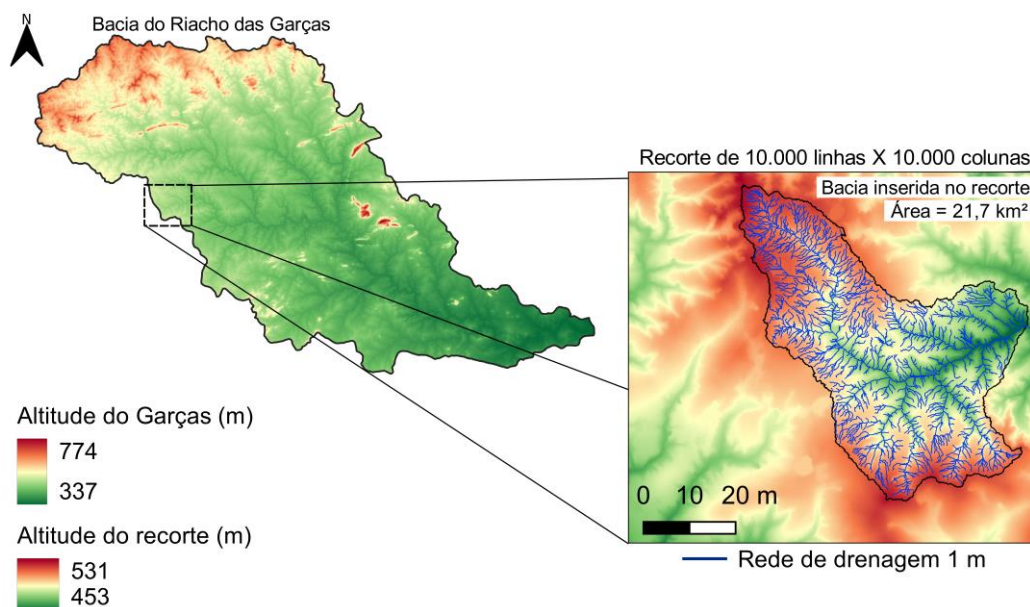


Figura 15 – Recorte do MDT com dimensões de 100 km² (10.000 linhas x 10.000 colunas) para representação da área de estudo: sub-bacia do Riacho das Garças.

4.2 Extração de parâmetros hidrológicos do MDT LiDAR

4.2.1 Obtenção das direções de fluxo

Com o MDT sem depressões, foram extraídas as direções de fluxo, dado de entrada do COTAT+ para execução do *upscaling*. Para a determinação das direções de fluxo a partir do MDT sem depressões, foi considerado o Método D8 (*Deterministic Eight Neighbors*; JENSON & DOMINGUE, 1988), de modo que, em uma janela 3 x 3, cada pixel possui apenas uma direção de fluxo.

4.2.2 Determinação das áreas acumuladas de drenagem

Após obter as direções de fluxo, foi determinado o arquivo *raster* de áreas acumuladas, também utilizado como dado de entrada do COTAT+. Para isto, foi aplicado o algoritmo *D8 Flow Accumulation*, presente no SIG SAGA, que segue uma abordagem do tipo *top-down*, ou de cima para baixo, onde o acúmulo das áreas é calculado partindo da célula mais alta para a mais baixa.

4.2.3 Determinação de rede de drenagem e delimitação de bacia hidrográfica

A determinação das redes de drenagem se deu a partir do *raster* de áreas acumuladas, com a adoção de um critério de área mínima que representasse a rede de drenagem como um todo e não somente os rios de maior porte. O parâmetro adotado para a definição da rede de alta resolução de 1 m foi de 0,005 km², visando ter uma rede de drenagem de referência densa o suficiente para o julgamento dos caminhos de fluxo nas resoluções grosseiras.

Como descrito, a rede de drenagem derivada do MDT de 1 m é tomada como referência para análise das redes de drenagem em resoluções espaciais grosseiras. Dessa forma, não há impacto no desenvolvimento deste estudo a incerteza quanto ao ponto exato de início de cada trecho de cabeceira da rede de drenagem.

Por sua vez, a bacia hidrográfica foi delimitada a partir da escolha de um exutório, tomando como base o rio principal. A análise das direções de fluxo e áreas acumuladas também auxiliou no processo de escolha do exutório. A bacia e a rede de drenagem obtidas para o recorte podem ser observadas na Figura 15.

4.3 Definição de resoluções espaciais

Para a aplicação do procedimento de mudança de escala, foram consideradas as seguintes resoluções: (i) de 1 m como alta resolução, original do MDT; e (ii) 30 m e 100 m como as resoluções degradadas, representando saltos de escala de 30 e 100 vezes, respectivamente.

Vale salientar que a mudança de 1 para 100 m, é comparável às degradações de resolução anteriores envolvendo o *upscaling* (e.g. PAZ et al., 2006; DAVIES & BELL, 2009; SARAIVA & PAZ 2014; SOUSA & PAZ, 2017), enquanto de 1 para 30 m é comparada a resolução mais fina comumente disponível em MDE gratuitos a nível global. Essa escolha baseou-se na crescente demanda por resoluções da ordem de 100 e 30 metros e para permitir a comparação dos resultados com os MDE de 30 e de 90 m do SRTM, por exemplo.

Outro fator levado em consideração foi o fato de carecer na literatura trabalhos que abordem a mudança de escala na ordem de metros, tendo em vista que os trabalhos anteriores tinham como foco a mudança de escala para resoluções da ordem de quilômetros, como Sousa e Paz (2017), que aplicaram o *upscaling* para mudança de resolução espacial de 100 m para 5, 10, 20 e 30 km.

A Tabela 2 apresenta as características do recorte nas resoluções de 1, 30 e 100 m, além da quantidade de linhas e colunas e o total de pixels analisados.

Tabela 2 – Características das resoluções espaciais adotadas nesta pesquisa.

Resolução espacial (m)	Quantidade de colunas	Quantidade de linhas	Total de pixels analisados
1	10.000	10.000	100.000.000
30	333	333	110.889
100	100	100	10.000

É interessante destacar que, apesar de ser um recorte relativamente pequeno, o total de pixels analisado é comparável ao total de pixels de 1 km e de 100 m de grandes bacias da América do Sul (Tabela 3), o que justifica o elevado custo computacional e de armazenamento demandado por dados LiDAR de 1 m.

Tabela 3 – Área e total de pixels, nas resoluções de 1 km e 100 m, de importantes bacias da América do Sul

Bacia hidrográfica	Área de drenagem (km²)	Total de pixels na resolução de 1 km	Total de pixels na resolução de 100 m
Rio Amazonas	7.500.000	7.500.000	750.000.000
Rio Uruguai	385.000	385.000	38.500.000
Rio São Francisco	641.000	641.000	64.100.000

4.4 Derivação de redes de drenagem nas resoluções degradadas

4.4.1 Reamostragem do MDT

A literatura apresenta uma variedade de técnicas de reamostragem que, em linhas gerais, a partir do MDT na resolução espacial de alta, reduz o número de linhas e colunas, degradando-o para uma resolução espacial baixa. A técnica de reamostragem escolhida para esta pesquisa foi a reamostragem pela média, que consiste na geração de células cujo atributo é resultante da média do atributo dos pixels inseridos em seu interior.

Nesse caso, o dado de entrada é o MDT de alta resolução. Ao obter o dado na resolução degradada, são extraídas as direções de fluxo, áreas acumuladas, rede de drenagem e bacia hidrográfica, analogamente ao apresentado nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3.

4.4.2 Upscaling das direções de fluxo

O algoritmo de *upsampling* escolhido para a execução deste estudo foi o COTAT+. Esta escolha baseou-se em seu desempenho observado em trabalhos anteriores (DAVIES & BELL, 2009; SOUSA & PAZ, 2017), destacando-se em relação a outras metodologias de mudança de escala, e por ser de domínio do grupo de pesquisa ao qual este trabalho se insere.

Aplicação do algoritmo COTAT+

A aplicação do algoritmo COTAT+ está sujeita à definição do valor de dois parâmetros, a área mínima incremental (AT) e o caminho mínimo a montante (MUFP). Paz et al. (2006) sugerem que o valor adotado para o AT seja ajustado para o tamanho da célula, que, no caso de 30 m, é 900 m², e de 100 m, 10.000 m², evitando a formação equivocada da rede de drenagem. Já para o MUFP, os autores destacam que sua escolha depende das grades de alta e de baixa resolução, sendo, idealmente, 1/5 do lado da célula, ou seja, 6 m e 20 m para o caso de células de 30 e 100 m de extensão, nessa ordem.

Davies e Bell (2009) testaram a aplicação do algoritmo frente à adoção dos valores indicados na bibliografia para os parâmetros, e avaliaram os resultados obtidos frente ao aumento desses valores, modificação necessária para se trabalhar com áreas

costeiras. Observou-se que, ao duplicar o valor MUFP e do AT houve o aumento da presença de direções diagonais, gerando efeitos positivos, como melhoria do fluxo para todo o Reino Unido, na resolução de 5 km, e negativos, como o desvio da drenagem de referência do rio Tamisa, na resolução de 2,5 km.

Outros trabalhos também aplicaram o COTAT+ para degradação da resolução de redes de drenagem, entretanto essa aplicação foi considerando apenas o valor indicado dos parâmetros (e.g. SARAIVA & PAZ, 2014; ROSIM et al., 2015; SOUSA & PAZ, 2017).

A aplicação do COTAT+ neste trabalho foi executada a partir de duas vertentes: a degradação do MDT LiDAR com resolução de 1 m para 30 m e de 1 m para 100 m, considerando a recomendação de Paz et al. (2006) para a adoção dos valores do MUFP e AT, e depois a aplicação do mesmo algoritmo, porém com a variação dos valores de MUFP e AT. Assim, após aplicar o algoritmo considerando os valores indicados dos parâmetros, fixou-se o valor padrão de AT e foram selecionados quatro valores arbitrários e simétricos em relação ao padrão para variação do MUFP, para cada resolução (Tabela 4).

Em seguida, ao fixar o MUFP no valor padrão, aplicou-se quatro variações para AT, representando os valores simétricos de redução e aumento sobre a área da célula, que é o valor de referência para esse parâmetro (Tabela 5). Assim foram geradas as direções de fluxo para as resoluções degradadas de 30 e 100 m com o valor padrão e oito variações para cada resolução, considerando as quatro variações do MUFP e as quatro do AT.

Tabela 4 – Variação dos valores de caminho mínimo de montante (MUFP) considerando o valor fixo padrão do parâmetro área mínima incremental (AT).

<i>Variação do parâmetro MUFP</i>			
<i>Resolução espacial (m)</i>	<i>Parâmetro AT (m²)</i>	<i>Valor absoluto de MUFP (m)</i>	<i>Valor de MUFP relativo à dimensão da célula</i>
30	900	3,0	1/10
		4,3	1/7
		6,0	1/5 (padrão)
		7,5	1/4
		10,0	1/3
100	10000	10,0	1/10
		14,3	1/7
		20,0	1/5 (padrão)
		25,0	1/4
		33,0	1/3

Tabela 5 – Variação dos valores de área mínima incremental (AT) considerando o valor fixo padrão do parâmetro caminho mínimo de montante (MUFP).

Variação do parâmetro AT				
<i>Resolução espacial (m)</i>	<i>Parâmetro MUFP (m)</i>	<i>Valor absoluto de AT (m)</i>	<i>Valor de AT relativo à área da célula</i>	<i>Variação percentual de AT em relação ao padrão</i>
30	6	450	1/2	-50%
		675	3/4	-25%
		900	1 (padrão)	---
		1125	5/4 (+25%)	+25%
		1350	3/2 (+50%)	+50%
100	20	5000	1/2 (-50%)	-50%
		7500	3/4 (-25%)	-25%
		10000	1 (padrão)	---
		12500	5/4 (+25%)	+25%
		15000	3/2 (+50%)	+50%

Obtenção de áreas acumuladas de drenagem na resolução degradada

As áreas acumuladas de drenagem para as resoluções degradadas foram geradas através de uma rotina computacional em linguagem Fortran, desenvolvida pelo grupo de pesquisa, que as determina com base nas direções de fluxo resultantes do *upscaling*. Ao todo foram obtidos dezoito *rasters* de áreas acumuladas nas resoluções espaciais de 30 e de 100 m, construídos a partir da escolha dos parâmetros MUFP e AT no valor padrão da bibliografia e variações.

Determinação das redes de drenagem na resolução degradada

Nas resoluções degradadas, as redes de drenagem foram construídas a partir da matriz de direções de fluxo, de modo que todo o caminhamento do fluxo se tornou rio, como se o limiar mínimo de área acumulada de drenagem fosse zero.

A escolha dessa metodologia baseou-se na ideia de analisar não somente aqueles trechos que são rios propriamente, mas sim analisar todo o contexto da drenagem. Foi adotada uma rotina computacional em Fortran de domínio do grupo de pesquisa para auxiliar na geração das redes de drenagem para as duas direções de fluxo de baixa resolução (30 e 100 m).

Delimitação das bacias hidrográficas na resolução degradada

A delimitação das bacias também foi realizada através de uma rotina em Fortran, fornecendo as direções de fluxo geradas pela variação dos parâmetros do COTAT+ e um *raster* indicando o exutório da bacia.

4.5 Métricas para avaliação dos resultados

A avaliação dos resultados baseou-se na adoção de métricas quantitativas e qualitativas, sendo estas a inspeção visual, distância média, porcentagem dentro do *buffer*, comprimentos de rio e análise de área de drenagem.

Todos os produtos gerados pela reamostragem e pelo *upsampling*, para 30 e 100 m, foram comparados aos produtos obtidos pelo processamento do MDT LiDAR de 1 m, tomado como dado de referência, e entre si, para ver qual se saiu melhor em seguir a referência. Destaca-se que esta pesquisa não tem como objetivo avaliar a acurácia da rede de drenagem ou da delimitação de bacia hidrográfica resultantes do MDT LiDAR de 1 m.

Como comentado nos tópicos anteriores, o enfoque das análises foi a sub-bacia principal interna ao recorte. A comparação entre as redes de drenagem baseou-se na sobreposição, sendo avaliado, a partir da inspeção visual, o quanto o fluxo se assemelhava ao do MDT de 1 m e ao *upsampling* com os parâmetros padrões de MUFP e AT.

Para a distância média, foram isolados os rios e quantificadas a distância entre eles e o rio principal de referência de 1 m. De forma semelhante, ocorreu a aplicação da porcentagem dentro do *buffer*, onde foi escolhido o valor de 1/5 do lado da célula de baixa resolução para a construção da largura do *buffer*. A escolha do valor de 1/5 se deu com base na literatura, onde, ao testar diferentes abordagens, Davies e Bell (2009) e Sousa e Paz (2017) perceberam que a faixa de 1/5, em comparação com outros valores, como 1/2 e 1 vez o lado da célula, permitia uma análise mais coerente.

Foram também analisados os comprimentos dos rios e, para as bacias hidrográficas, a similaridade quanto à delimitação, sendo quantificados os erros de omissão e inclusão, bem como a concordância entre as bacias, sendo a de referência a bacia padrão. Ainda, para a realização das análises, a rede de drenagem resultante do processamento do MDT

LiDAR de 1 metro foi subdividida em 20 trechos, além do rio principal, onde foram aplicadas as métricas descritas anteriormente (Figura 16).

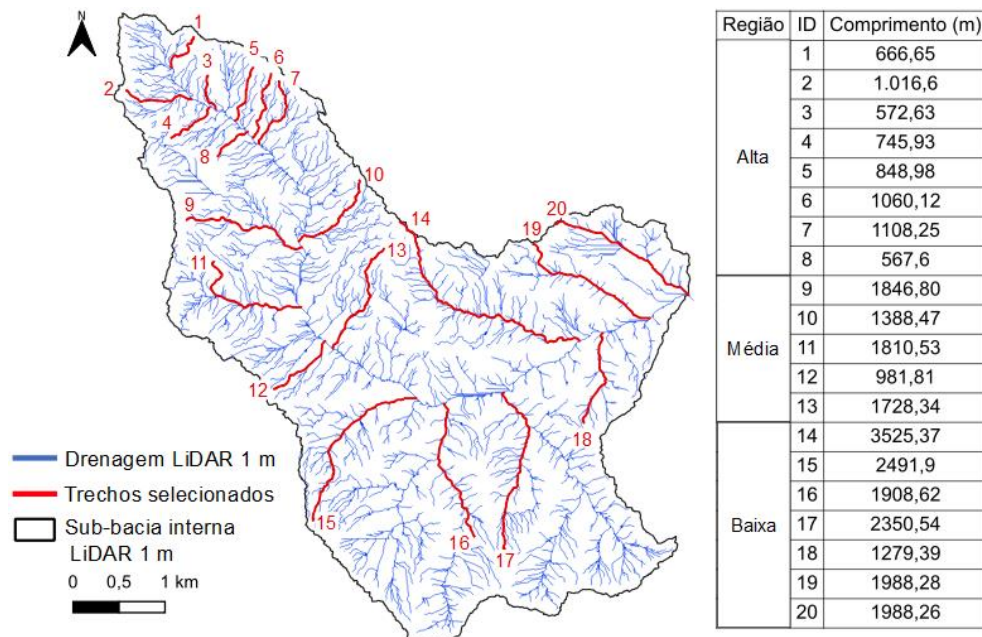


Figura 16 – Trechos da sub-bacia selecionados para a realização das análises.

Para a escolha dos trechos, considerou-se a área mínima e as confluências da drenagem. Essa metodologia de análise é adotada com o intuito de observar diferentes padrões ao longo da bacia hidrográfica, sendo aplicada na literatura, a exemplo de Paz et al. (2008), que consideraram os afluentes Peixe, Ijuí, Piratinim, Icamapuã e Quaraí, e a subdivisão em alto, intermediário e baixo, para a análise da bacia hidrográfica do Rio Uruguai extraída de MDE. Um outro exemplo é o estudo de Garcia e Paiva (2006), que subdividiram o Arroio Cancela (Santa Maria – RS) em seis sub-bacias e 4 trechos, e o de Rocha e Santos (2018), que admitiram a subdivisão dos trechos das bacias Aguapeí e Peixe (São Paulo) em alto, médio e baixo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Organização e apresentação dos resultados

Ao longo desta seção, são apresentados os resultados da obtenção de redes de drenagem pelas aplicações das abordagens de reamostragem e *upscaling*, considerando o valor padrão e as variações dos parâmetros MUFP e AT. As análises foram construídas de modo a comparar a reamostragem e o *upscaling* com a referência LiDAR de 1 metro; e as variações dos parâmetros MUFP e AT entre si e com o *upscaling* padrão e a referência de 1 metro.

Para diferenciar as aplicações do *upscaling*, chama-se de *upscaling* padrão ou valor padrão a aplicação onde foram considerados os valores indicados por Paz et al. (2006) para o MUFP e o AT. Ao se referir às variações desses parâmetros, é indicado qual valor de MUFP ou AT foi adotado, distinto do valor padrão.

Essa linha de raciocínio permite conduzir as análises de modo a identificar qual método de mudança de escala possui resultados mais satisfatórios ao degradar a informação. Além disso, possibilita avaliar se a variação dos parâmetros impacta, positivamente ou negativamente, a representação das redes de drenagem e bacias hidrográficas nas resoluções degradadas de 30 e 100 metros.

Os tópicos encontram-se organizados levando em consideração as métricas aplicadas para as análises. Por sua vez, os subtópicos dividem-se entre as resoluções, de modo que os resultados para a resolução de 30 metros estão em um tópico específico, assim como para a resolução de 100 metros.

5.2 Inspeção visual de redes de drenagem

5.2.1 Resolução espacial de 30 metros

Inicialmente, foram comparadas visualmente as redes de drenagem resultantes dos procedimentos de reamostragem e *upscaling* das direções de fluxo, considerando o valor padrão dos parâmetros MUFP e AT, com a rede de drenagem de referência (Figura 17). O *upscaling* padrão gerou uma representação satisfatória da rede de drenagem, com destaque

para o rio principal. No entanto, essa configuração de parâmetros apresentou dificuldade em representar o trecho 3, como destacado na Figura 17a.

A drenagem reamostrada conseguiu representar relativamente bem alguns rios de referência. Todavia, a representação proveniente do *upscaling* padrão se sobressaiu, acompanhando de forma mais fidedigna a sinuosidade e o traçado da rede obtida do MDT de 1 metro para a maioria dos trechos. Esse padrão de comportamento descrito para a reamostragem foi observado ao longo das regiões alta, média e baixa da bacia, como é possível analisar nos recortes a, b, c e d da Figura 17. Pode-se observar deslocamentos de confluências, em especial em a e d, e erros no traçado próximo à cabeceira dos trechos, como destacado em b e c.

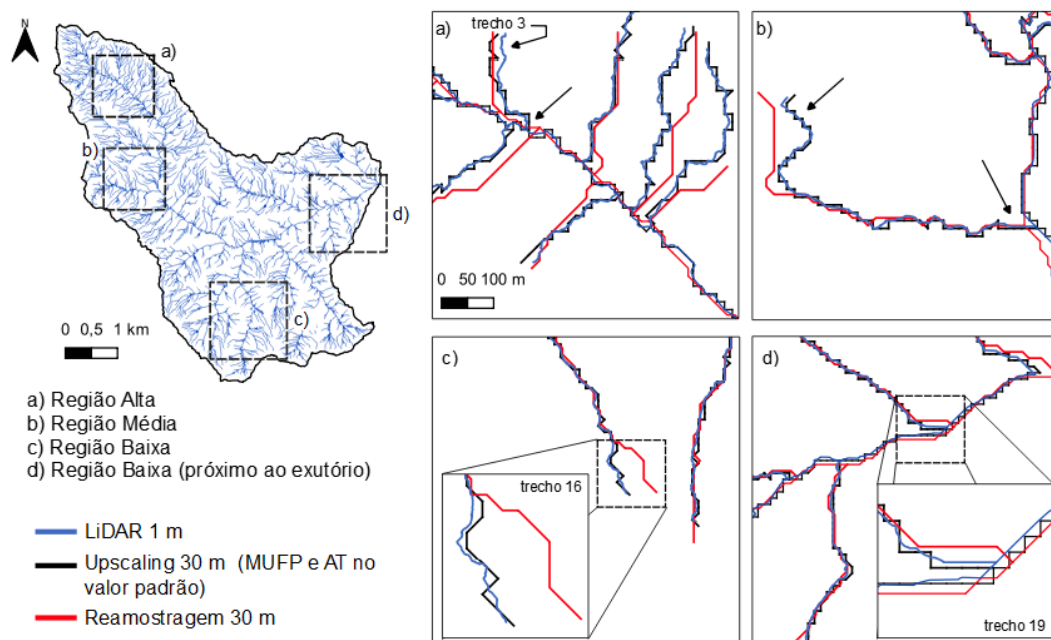


Figura 17 – Redes de drenagem resultantes da reamostragem (vermelho) e *upscaling* (preto), na resolução espacial de 30 metros, e a de referência LiDAR de 1 metro (azul). Os trechos destacados em a, b, c e d representam diferentes regiões ao longo da bacia.

A Figura 18 ilustra as principais características das redes de drenagem resultantes da adoção dos quatro valores de MUFP, além do padrão. De modo geral, as redes de drenagem resultantes das variações foram delineadas de forma semelhante entre si e ao *upscaling* padrão, com as principais discordâncias observadas nas regiões alta e média da bacia. No entanto, alguns trechos apresentaram melhorias em sua representação em relação ao padrão, apresentando um traçado semelhante aos de referência. A título de exemplo,

tem-se o trecho 3, que ao contrário do padrão, foi representado de forma satisfatória e similar à referência por todas as variações de MUFP (vide Figura 18a).

O trecho 6 apresentou melhora na representação próximo à sua cabeceira, mas com deslocamento da mesma, assim como observado para o trecho 7 (Figura 18b e Figura 18e). Um outro trecho cuja representação foi satisfatória para a variação do MUFP foi o trecho 8, onde, a adoção do MUFP de 4,3 m permitiu que o rio ficasse mais coerente com a referência de 1 m (Figura 18c).

As alterações são causadas pela mudança na direção de fluxo de cada variação de MUFP, assim, qualquer mudança na direção de fluxo de uma célula de baixa resolução provoca alteração no traçado do trecho. Como exemplo, tem-se o trecho 2, onde a adoção de um caminho mínimo de 10 m provocou uma mudança na direção de uma célula em relação ao padrão, alterando, nesse caso, de forma positiva o traçado (Figura 18g). Os trechos 14-20 apresentaram um traçado coerente com a referência de 1 metro tanto para o padrão como para as quatro variações de MUFP, sendo bem similares entre si.

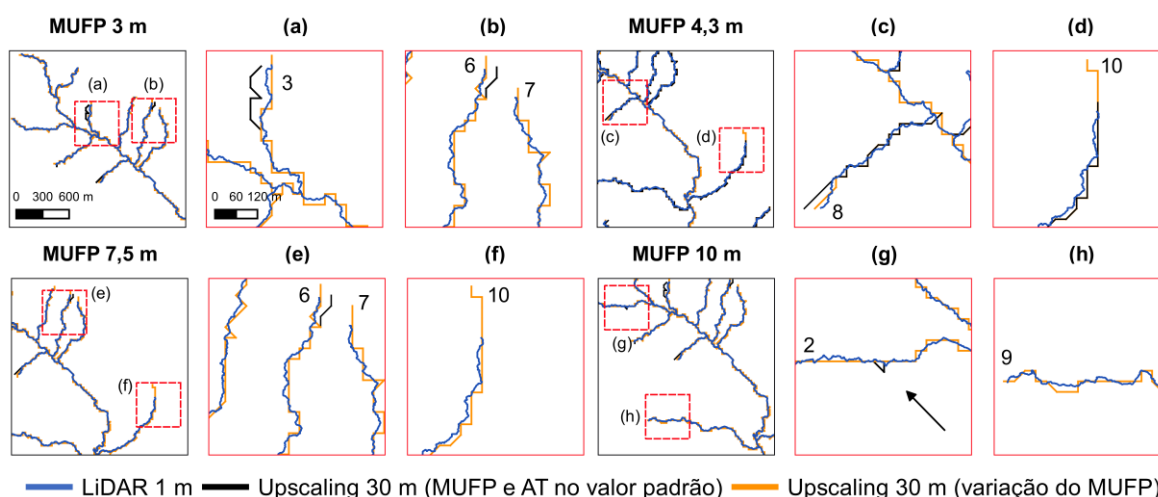


Figura 18 – Redes de drenagem extraídas do LiDAR de 1 metro (azul), do *upscaling* padrão (preto) e das quatro variações do MUFP (laranja). Recortes de (a) a (h) destacando semelhanças e diferenças no traçado. Os números em preto identificam o trecho que está sendo representado.

De maneira geral, para o MUFP de 3 e 10 m, 7 dos 20 trechos sofreram deslocamento de cabeceira, enquanto para o MUFP de 4,3 m esse valor subiu para 8 trechos. O MUFP de 7,5 m provocou a maior quantidade de alterações no posicionamento de cabeceiras, 16 ao todo. Quanto ao rio principal, foram identificadas modificações em sua nascente apenas para os MUFP de 4,3 e 7,5 m, sendo os traçados do rio das demais variações de MUFP próximos ao traçado do *upscaling* padrão (Figura 19).

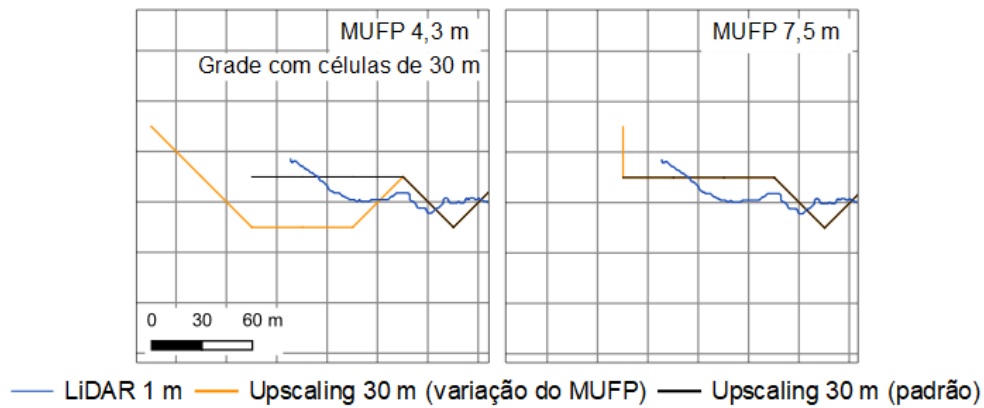


Figura 19 – Recorte da região de nascente do rio principal obtida a partir da aplicação do *upscaling*, com o padrão (preto) e a variação de parâmetros (laranja), e da referência LiDAR de 1 m (azul).

O traçado resultante das variações de AT para os 20 trechos estudados provocou mudanças nas três regiões da bacia (Figura 20). Ao contrário do MUFP, a drenagem se mostrou bem mais sensível às variações de AT. A maior alteração observada foi para o AT de 450 m², afetando o traçado dos 20 trechos. Os AT de 675 m², 1125 m² e 1350 m² provocaram alterações em 19 trechos, de modo que apenas o trecho 12, do AT de 675 m², e o trecho 20, dos AT 1125 m² e 1350 m², mantiveram-se iguais ao resultado com valor padrão do parâmetro.

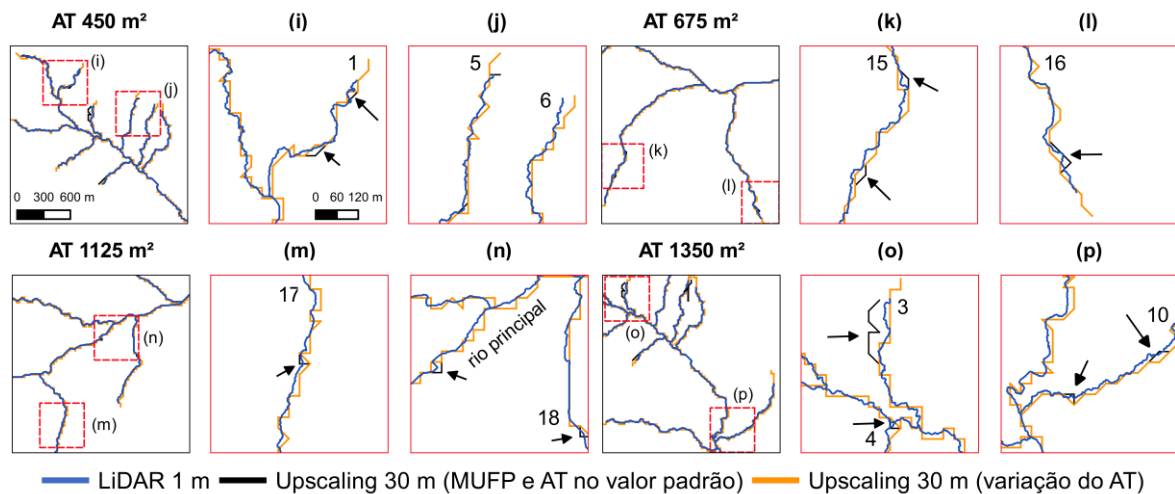


Figura 20 – Redes de drenagem extraídas do LiDAR de 1 metro (azul), do *upscaling* padrão (preto) e das quatro variações do AT (laranja). Recortes de (i) a (p) destacando semelhanças e diferenças no traçado. Os números em preto identificam o trecho que está sendo representado.

A variação do parâmetro AT, além de provocar o deslocamento da cabeceira de alguns trechos, alterou a representação do fluxo em outros. Na Figura 20i, a adoção do valor de 450 m² para o AT provocou melhorias no traçado do trecho 1, aproximando-o da

referência. Diferentemente, no trecho 17 (Figura 20m), a adoção de 1125 m² alterou o traçado, distanciando-o espacialmente da referência.

A Figura 21 apresenta de forma mais nítida algumas das divergências encontradas, como no trecho 1, para o AT de 450 m², trechos 6 e 7, para o AT de 675 m², trecho 12, para o de AT de 1125 m², e trecho 18, para o AT de 1350 m². Diferente dos trechos de afluentes, onde foram observados diversos pontos de melhora ou piora da drenagem em relação à referência, o rio principal apresentou, para todos os valores de AT, alterações na nascente do rio, representadas pelos AT de 1125 km² e 1350 km² na Figura 22, setas (1) e (2).

Ainda, na Figura 22 pode-se observar divergências pontuais no traçado do rio principal, identificadas apenas para os AT de 1125 km² e 1350 km² (setas (3) e (4)).

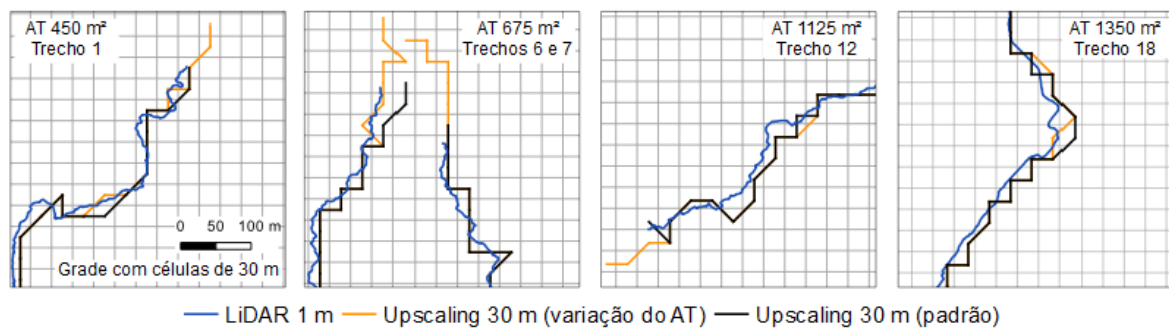


Figura 21 – Alterações no traçado dos trechos provocadas pela variação do parâmetro AT (laranja), em sobreposição com *upscaling*, com o padrão (preto) e a referência LiDAR de 1 m (azul).

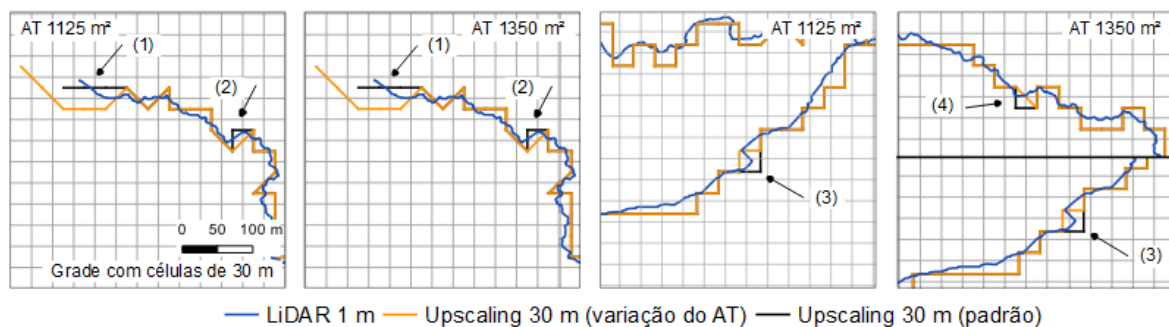


Figura 22 – Alterações no traçado do rio principal provocadas pela variação do parâmetro AT (laranja), em sobreposição com *upscaling*, com o padrão (preto) e a referência LiDAR de 1 m (azul). As setas enumeradas de (1) a (4) destacam pontos onde a drenagem do AT divergiu do padrão.

5.2.2 Resolução espacial de 100 metros

A degradação da resolução de 1 m para 100 m impactou de forma mais expressiva a qualidade da representação da rede de drenagem em comparação com a mudança para a

resolução de 30 m. O traçado da drenagem, devido ao tamanho da célula, com dimensões 100 vezes superiores que o pixel de 1 m, apresentou dificuldades em acompanhar a sinuosidade e as confluências do rio de alta resolução espacial.

Essa observação corrobora com o constatado por Davies e Bell (2009) ao degradar um MDE para várias resoluções espaciais. As autoras notaram que a discrepância espacial entre as redes de drenagem analisadas e a rede de drenagem de referência se tornava mais evidente à medida que a resolução espacial é reduzida.

O traçado da drenagem resultante da reamostragem, em comparação com o *upscaling* padrão, demonstrou dificuldade em seguir a rede de drenagem de referência, alterando, significativamente, o traçado e o comprimento dos trechos. Esse padrão de representação foi identificado para toda a extensão da bacia, com destaque para os recortes a, b, c e d, presentes na Figura 23.

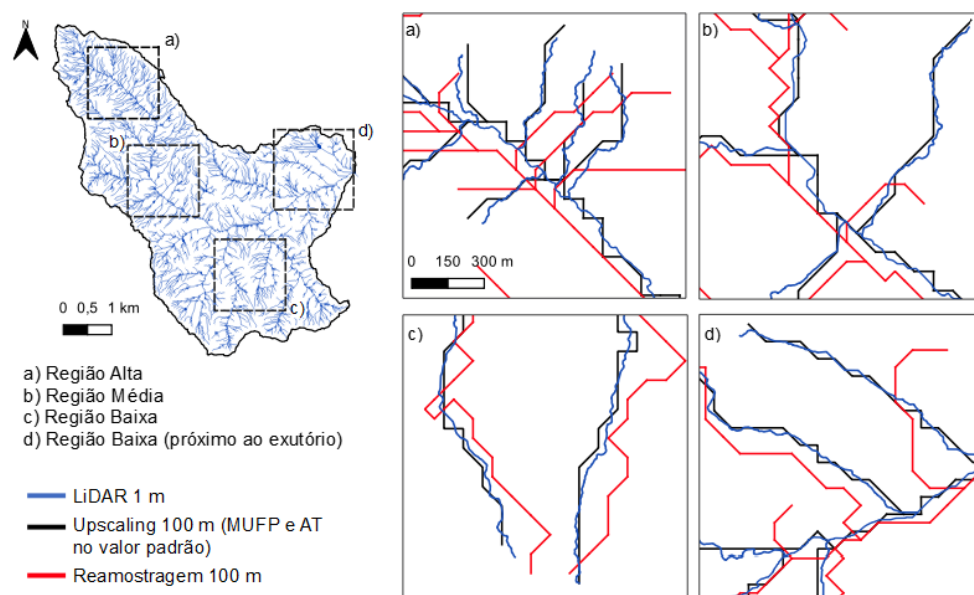


Figura 23 – Redes de drenagem resultantes da reamostragem (vermelho) e *upscaling* (preto), na resolução espacial de 30 metros, e a de referência LiDAR de 1 metro (azul). Os trechos destacados em a, b, c e d representam diferentes regiões ao longo da bacia.

A Figura 24 permite visualizar melhor o impacto da reamostragem de 100 m sobre o traçado da rede (zoom (2)) em comparação com a reamostragem na resolução de 30 m (zoom (1)), com destaque para os trechos 19 e 20. É evidente o quanto a degradação da resolução espacial por esse método prejudicou a representação dos rios, incluindo o rio principal. Na mesma imagem é possível também comparar o traçado do *upscaling* padrão

para as duas resoluções, onde a drenagem de 30 m consegue reproduzir melhor a sinuosidade da drenagem LiDAR de 1 m do que a de 100 m.

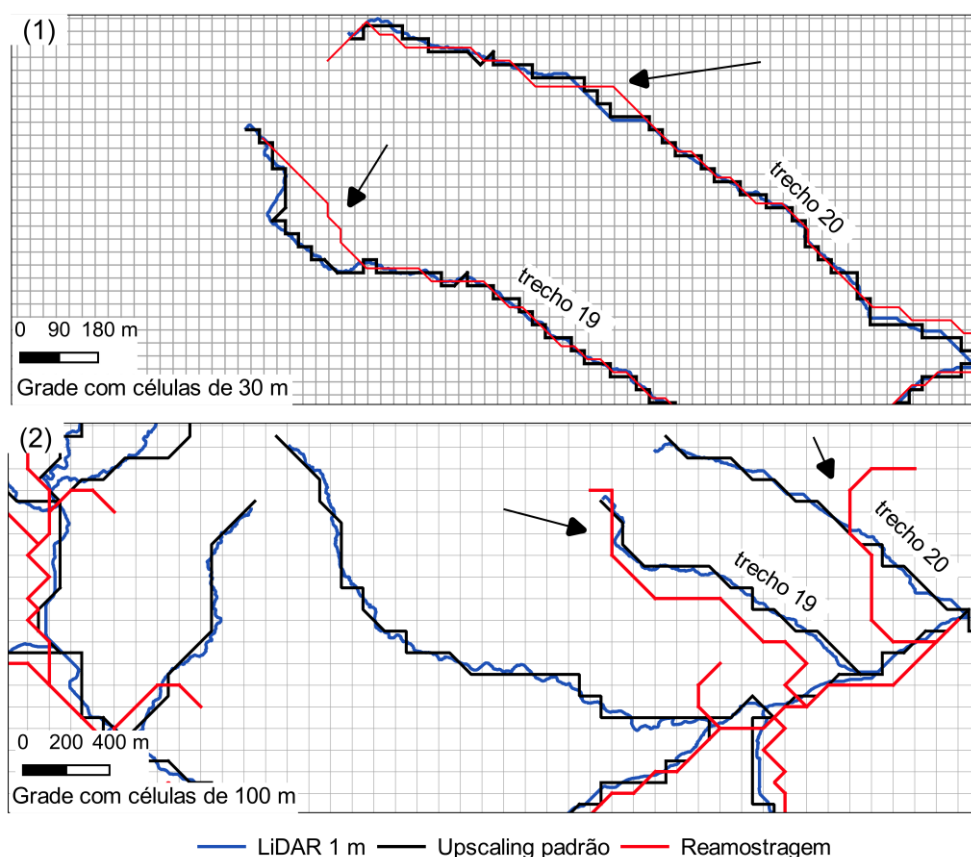


Figura 24 – Comparação visual entre as redes de drenagem resultantes do *upscaling* padrão (preto) e reamostragem (vermelha) com a de referência, o LiDAR de 1 m (azul). Em (1) tem-se as drenagens para a resolução de 30 m, enquanto em (2), para 100 m, com destaque para os trechos 19 e 20, identificados pelas setas.

Quanto ao MUFP, observou-se que, de modo geral, quanto menor o valor do parâmetro, maior a quantidade de alterações. Na Figura 25 são apresentadas as principais alterações observadas para a variação do MUFP. O MUFP de 10 m foi responsável pela maior quantidade de alterações no traçado em relação ao padrão, com 30% dos trechos alterados. Das alterações, apenas 2 trechos sofreram melhorias no traçado com o MUFP de 10 m, aproximando-se da referência. O trecho 13 foi um dos que sofreram piora no traçado ao tentar acompanhar uma pequena sinuosidade no ponto de cabeceira do trecho.

O MUFP de 14,3 m causou alteração em 15% dos trechos, de modo que o traçado desses trechos alterados coincide com os alterados pelo MUFP de 10 m. O MUFP de 25 m sofreu alteração apenas no trecho 10, caracterizando como uma melhoria em relação ao

padrão. Por sua vez, o MUFP de 33 m também sofreu alteração no trecho 10, assim como no trecho 11, sendo essas alterações caracterizadas por melhoria e piora, respectivamente.

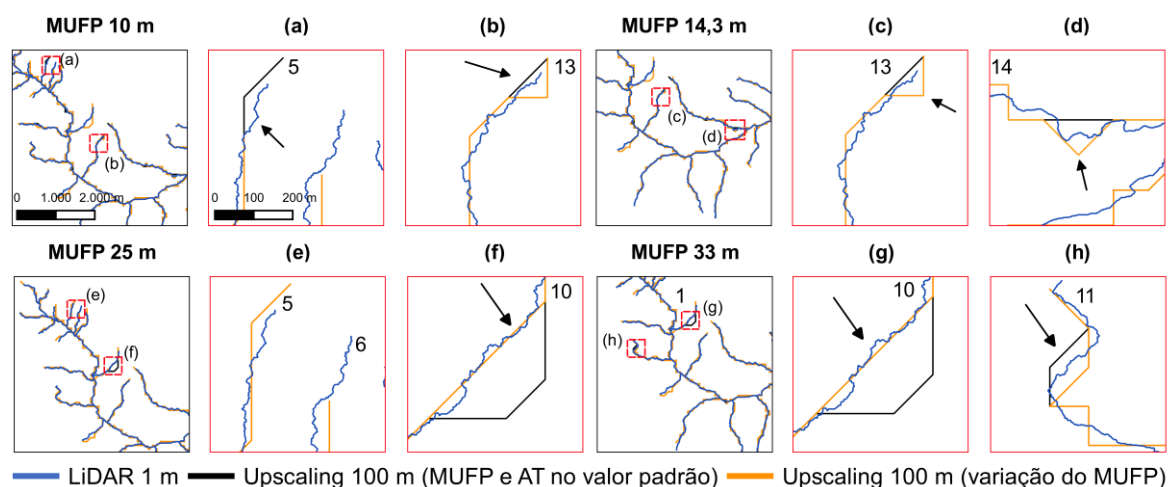


Figura 25 – Redes de drenagem extraídas do LiDAR de 1 metro (azul), do *upsaling* padrão (preto) e das quatro variações do MUFP (laranja). Recortes de (a) a (h) destacando semelhanças e diferenças no traçado. Os números em preto identificam o trecho que está sendo representado.

Para o rio principal, o MUFP de 10 m foi o responsável por alterar em três pontos o traçado do rio em relação ao padrão, sendo esses pontos entre os trechos 8 e 9, entre os trechos 11 e 12, e na cabeceira, sendo esta última a mais expressiva, ilustrada na Figura 26a. O MUFP de 14,3 m, semelhante ao de 10 m, alterou a drenagem em dois pontos, na cabeceira e entre os trechos 11 e 12, enquanto o MUFP de 33 m alterou entre os trechos 15 e 16 (Figura 26b). Por outro lado, o MUFP de 25 m não alterou o rio principal, de modo que o seu traçado seguiu exatamente o do rio resultante do padrão.

As análises para o AT estão ilustradas na Figura 27, onde é possível notar alterações nas regiões média e baixa da bacia para as quatro variações. Os trechos da região alta mantiveram seu traçado semelhante ao padrão para todas as variações. O AT de 5000 m² alterou o traçado de 45% dos trechos, onde, desse total, apenas três trechos ou 33% representaram melhorias, a exemplo do trecho 13, Figura 27i.

O AT de 7500 m² foi a variação que menos provocou alterações nos rios, sendo essa de apenas 20%, onde é possível perceber melhorias e pioras, a exemplo dos trechos 11 e 16 (Figura 27k-l, respectivamente). No caso dos valores de AT de 12500 m² e 15000 m², ambos alteraram o traçado em relação ao padrão em 25%, para os mesmos trechos (10, 14, 15, 17 e 20), porém com algumas divergências, como se nota nos recortes da Figura 27n-o.

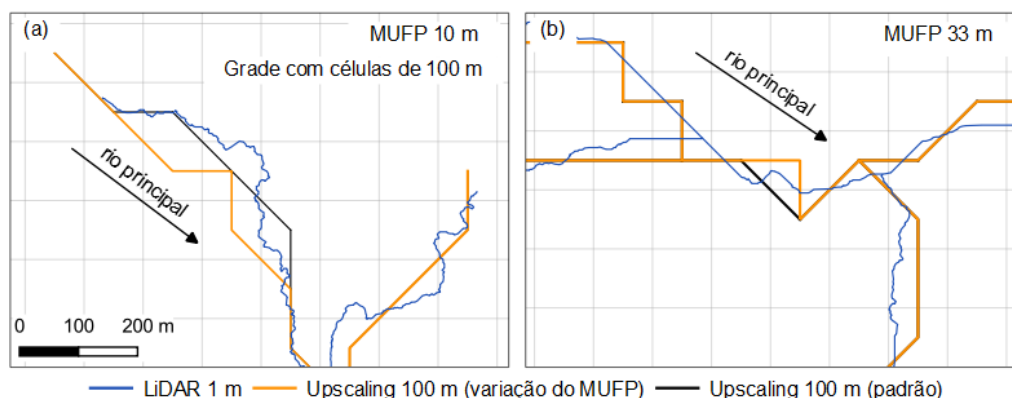


Figura 26 – Alterações no traçado do rio principal provocadas pela variação do parâmetro MUF (laranja), em sobreposição com *upsaling*, com o padrão (preto) e a referência LiDAR de 1 m (azul).

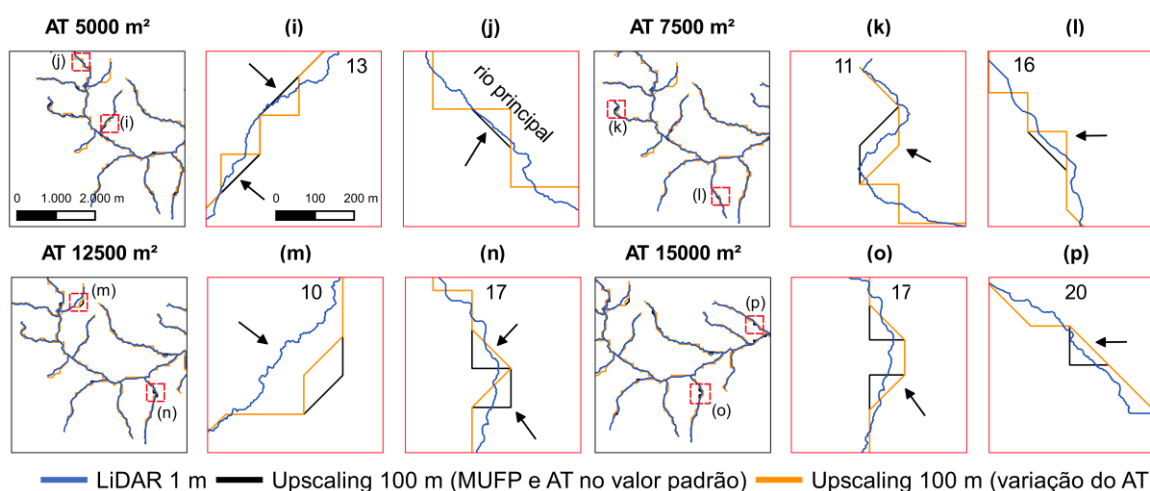


Figura 27 – Redes de drenagem extraídas do LiDAR de 1 metro (azul), do *upsaling* padrão (preto) e das quatro variações do AT (laranja). Recortes de (i) a (p) destacando semelhanças e diferenças no traçado. Os números em preto identificam o trecho que está sendo representado.

Assim como observado para o MUF, é interessante destacar que, apesar de algumas dessas alterações piorar a representação da drenagem, são tentativas de acompanhar o traçado de alta resolução. Para o rio principal, todas as variações de AT provocaram alteração no traçado, a exemplo do AT de 5000 m² e 15000 m², responsáveis por 7 e 3 alterações, respectivamente (Figura 28). Já o AT de 7500 m² e 12500 m² alteraram o rio em 3 e 2 pontos, nessa ordem.

A variação que gerou um rio principal mais coerente com a drenagem de referência foi o AT de 15000 m², enquanto todas as alterações do AT de 12500 m² resultaram na piora do traçado. É interessante destacar que, para as duas outras variações houve pontos de piora e melhora do traçado em relação à referência de 1 m.

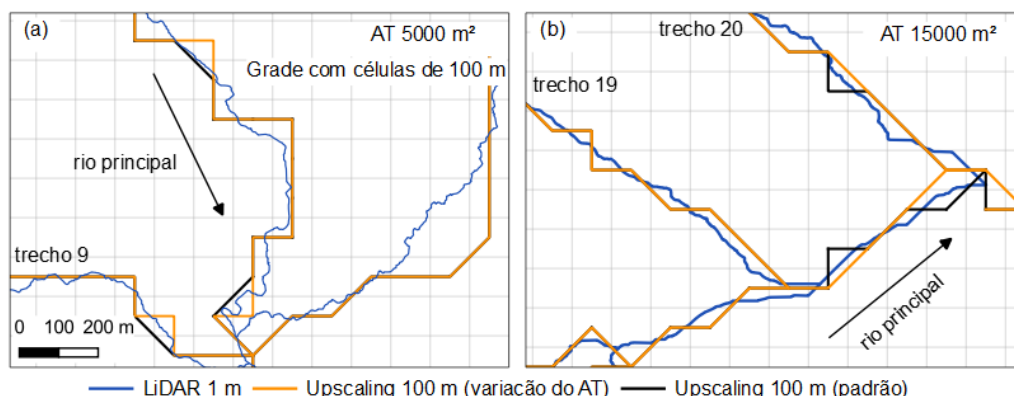


Figura 28 –Alterações no traçado do rio principal provocadas pela variação do parâmetro AT (laranja), em sobreposição com *upscaling*, com o padrão (preto) e a referência LiDAR de 1 m (azul).

5.3 Distância média entre redes de drenagem

5.3.1 Resolução espacial de 30 metros

A Tabela 6 apresenta os valores de DM, por trecho, pelos métodos de *upscaling* padrão e reamostragem, na resolução de 30 m. Ainda, na Figura 29 são apresentados os valores de distância média determinados por região para a bacia estudada.

Os trechos obtidos pelos procedimentos de reamostragem, para as regiões alta, média e baixa da bacia, apresentaram os maiores valores de DM, em comparação com aqueles provenientes do *upscaling*. Na região alta, a DM dos trechos da reamostragem apresentou o valor médio de 27,9 metros, um aumento de 257,3% em relação ao valor médio para o *upscaling* padrão, que foi de 7,8 metros. O trecho onde foi registrada a maior distância média da região é o 4, com uma DM de 53,3 metros, enquanto para o *upscaling*, o mesmo trecho apresentou uma DM de 6,6 metros.

Na região média, o trecho com maior DM foi o 11, com 20,5 metros, enquanto os demais trechos variaram entre 13 metros (trecho 13) e 11,6 metros (trecho 12), resultando em uma DM média de 13,8 metros para a região. Por outro lado, os valores do *upscaling* padrão apresentaram uma variação média entre si de 7,1 metros, sendo a maior distância de 8,0 metros (trecho 12).

A porção baixa da bacia apresentou DM semelhantes aos encontrados na parte média, com um DM médio de, aproximadamente, 14 metros para a reamostragem, e de 7,5 metros para o *upscaling* padrão. A Figura 17, apresentada na seção que trata da inspeção visual, permite visualizar o distanciamento espacial entre as redes de drenagem da

reamostragem, do *upsampling* e de referência, ilustrando a discrepância identificada nos resultados de DM.

Tabela 6 – Distância média dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do *upsampling* padrão na resolução de 30 m.

<i>Região</i>	<i>Trechos</i>	<i>Distância média (m)</i>	
		<i>Reamostragem</i>	<i>Upsampling padrão</i>
ALTA	1	29,5	7,5
	2	15,5	4,9
	3	22,3	15,6
	4	53,3	6,6
	5	9,4	4,8
	6	48,6	7,3
	7	23,9	7,3
	8	21,2	8,5
MÉDIA	9	12,3	6,6
	10	11,7	7,1
	11	20,5	6,8
	12	11,6	8
	13	13	7,2
BAIXA	14	8,5	7,2
	15	11,5	7,8
	16	25,7	7,3
	17	6,3	7
	18	12,2	8,6
	19	17,6	6,9
	20	15,9	7,9

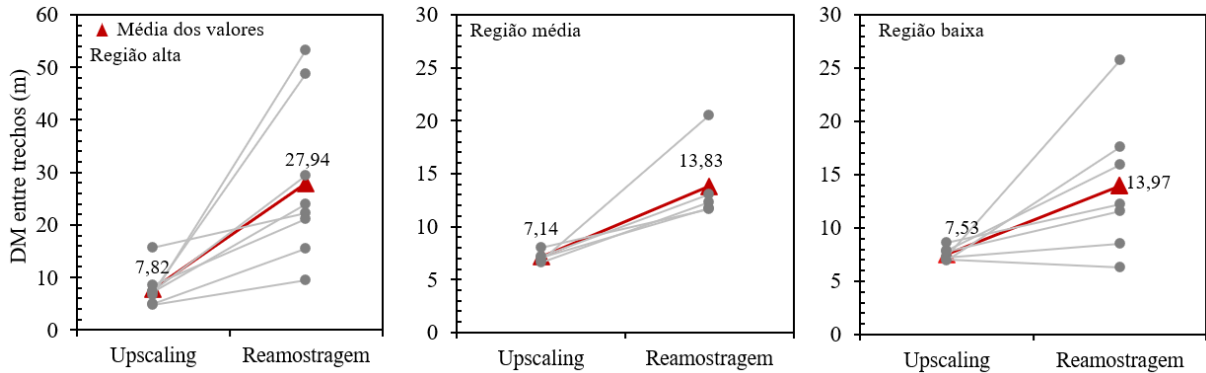


Figura 29 – Distância média entre trechos de rio do *upsampling* padrão e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.

A Tabela 7 e a Figura 30 ilustram os resultados para DM, considerando as variações dos parâmetros MUFP e AT. Para os 4 valores de MUFP adotados, o valor médio do parâmetro DM se comportou de forma semelhante para as três regiões

consideradas, oscilando entre 6,2 – 6,6 metros na região alta, 7,1 – 7,5 na média e 7,5 – 7,6 na baixa, sendo os valores mais baixos para o MUFP de 10 metros, e, os mais altos, para o MUFP de 7,5 metros.

Tabela 7 – Distância média dos trechos resultantes da aplicação do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT na resolução de 30 m.

Trechos	Distância média (m)							
	<i>MUFP</i> 3 m	<i>MUFP</i> 4,3 m	<i>MUFP</i> 7,5 m	<i>MUFP</i> 10 m	<i>AT 450</i> m ²	<i>AT 675</i> m ²	<i>AT 1125</i> m ²	<i>AT 1350</i> m ²
1	7,5	7,6	8,4	7,6	7,1	7,9	8,2	8,2
2	4,9	4,9	6,1	4,5	6,1	6,1	6,1	6,1
3	6,6	6,6	7,3	6,6	7,3	7,3	7,3	7,3
4	6,7	6,6	6,7	6,7	7,6	7,1	7,1	7,1
5	4,8	5,1	5,1	4,8	6,1	7,7	5,6	7,3
6	5,7	5,6	5,7	5,7	6,9	5,9	6,2	6,2
7	7,3	7,3	7,4	7,3	7,5	10,8	11,2	11,2
8	5,9	5,9	6,3	5,9	5,9	8,1	8,1	6,9
9	6,6	6,6	6,7	6,6	6,7	6,7	6,8	6,8
10	7,1	8,2	8,2	7,1	8,5	8,5	8,8	9,8
11	6,6	6,6	7,0	6,8	6,8	6,8	7,0	7,0
12	8,0	8,0	8,0	8,0	7,5	8,0	9,8	8,4
13	7,1	7,2	7,7	7,2	7,8	7,3	7,3	7,6
14	7,3	7,3	7,3	7,2	7,2	7,3	7,3	7,3
15	7,8	7,8	7,8	7,8	7,5	7,6	7,9	7,8
16	7,3	7,3	7,5	7,3	7,4	7,6	7,0	7,1
17	7,0	7,0	7,0	7,0	7,2	7,2	7,0	6,9
18	8,6	8,6	8,6	8,6	13,2	8,2	9,3	8,7
19	6,9	6,9	7,2	6,9	7,1	7,2	7,2	6,9
20	7,9	7,9	7,9	7,9	8,5	8,5	7,9	7,9

Para o AT, a variação da DM apresentou-se de forma semelhante ao comportamento observado para o MUFP, com variações entre 6,8 metros (AT de 450 m²) e 7,61 metros (AT 675 m²) para a porção alta, 7,46 metros (AT 450 m² e 675 m²) e 7,94 metros (AT 1125 m²) na região média, e 7,53 metros (AT 1350 m²) e 8,32 metros (AT 450 m²) na baixa (Figura 30). Visualmente, é possível perceber a proximidade dos traçados padrão e resultantes das variações com a rede de drenagem de referência (Figura 18 e Figura 20).

Nos trechos 3 e 18, foram quantificadas as maiores DM, sendo de 15,6 e 13,2 metros, respectivamente. Esses resultados foram obtidos ao aplicar o *upscaling* com os valores padrão de MUFP e AT, e para o AT de 450 m². O trecho 3 possui uma variação de

altitude média de 15 metros e sinuosidade de 1,6. Por sua vez, a altitude do trecho 18 varia entre 493,3 – 462,6 metros, com sinuosidade igual a 1,3. Logo, apesar de não possuírem características discrepantes dos demais trechos na resolução de 1 m, o incremento da DM pode ser explicado pelo próprio funcionamento do *upscaling*.

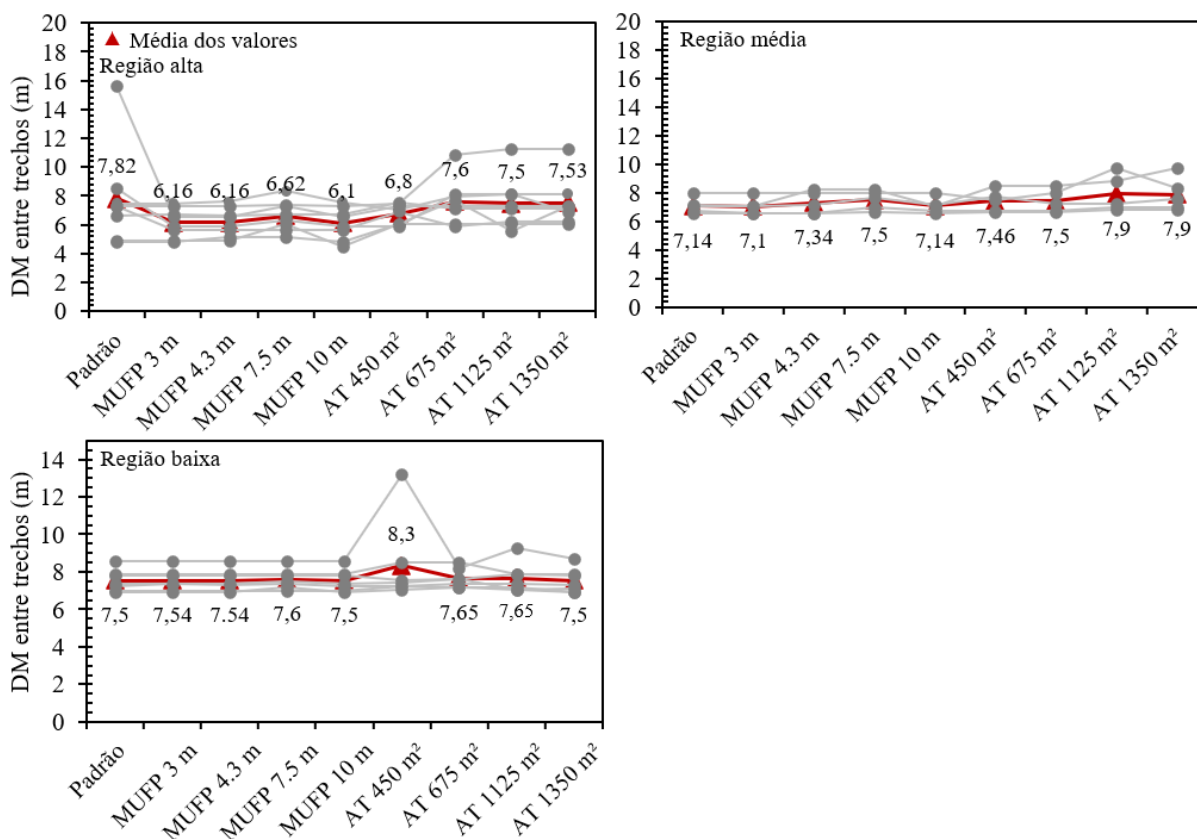


Figura 30 – Distância média entre trechos de rio do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

Por possuir dimensões 30 vezes superiores às do pixel de 1 metro, a célula de 30 metros teve dificuldades em seguir o traçado exato de alta resolução, aumentando a distância entre os rios, alterando a localização de suas nascentes ou até mesmo de todo o seu percurso. Essa constatação é discutida nos tópicos a seguir, de modo que fica evidente o impacto da degradação da resolução espacial nas demais características da drenagem, em especial o comprimento.

Quanto ao rio principal, a maior DM foi para a reamostragem, com 10,7 metros, enquanto para o *upscaling*, foi de 7,6 metros, para o MUFP de 3 m e AT de 675 m² (Figura 31). De modo geral, foi uma variação inferior à observada para os trechos, de modo que o rio principal foi representado de forma semelhante pelos dois métodos.

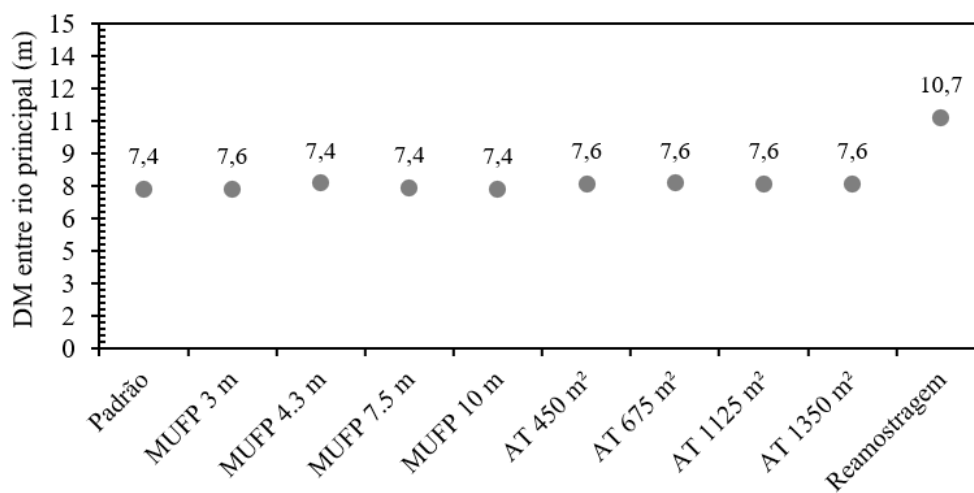


Figura 31 – Distância média entre os rios principais do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

5.3.2 Resolução espacial de 100 metros

As Tabelas 8 e 9 apresentam os valores por trecho obtidos para a DM de 100 m pelos métodos de *upscaling* padrão e variação de MUFP e AT, além da reamostragem.

Tabela 8 – Distância média dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do *upscaling* padrão na resolução de 100 m

Trechos	Distância média (m)	
	Reamostragem	Upscaling padrão
1	33,0	15,9
2	75,6	14,9
3	51,0	29,8
4	85,9	13,0
5	115,2	9,8
6	97,8	11,5
7	100,7	20,6
8	51,2	22,1
9	132,6	13,9
10	40,3	37,8
11	83,7	17,6
12	89,9	35,6
13	56,9	13,3
14	250,3	17,1
15	63,6	13,1
16	71,7	15,5
17	87,5	18,1
18	71,2	20,2
19	88,3	14,2
20	106,1	15,4

Tabela 9 – Distância média dos trechos resultantes da aplicação do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT na resolução de 100 m

Trechos	Distância média (m)							
	MUFP 10 m	MUFP 14,3 m	MUFP 25 m	MUFP 33 m	AT 5000 m ²	AT 7500 m ²	AT 12500 m ²	AT 15000 m ²
1	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9
2	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9
3	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8
4	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
5	5,6	5,6	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
6	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
7	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
9	16,9	13,9	13,9	13,9	13,4	13,9	13,9	13,9
10	37,8	37,8	13,1	13,1	37,8	37,8	30,6	30,6
11	17,6	17,6	17,6	17,6	19,6	17,6	17,6	17,6
12	35,6	35,6	35,6	35,6	35,6	35,6	35,6	35,6
13	14,3	14,3	13,3	13,3	14,8	14,8	13,3	13,3
14	16,1	16,1	17,1	17,1	18,1	17,6	17,5	17,7
15	13,1	13,1	13,1	15,5	13,5	13,1	13,4	14,4
16	15,5	15,5	15,5	15,5	15,7	15,7	15,5	15,5
17	18,1	18,1	18,1	18,1	17,2	18,1	16,2	16,5
18	22,5	20,3	20,2	20,3	20,2	20,2	20,2	20,2
19	14,2	14,2	14,2	14,2	15,8	14,4	14,2	14,2
20	17,4	15,4	15,4	15,4	15,0	15,4	15,5	15,5

Os trechos reamostrados pela média foram os que retornaram os maiores valores de DM para as três regiões da bacia estudada, com um DM médio de 76,3 metros para a alta, 80,7 metros para média e 105,53 metros para a baixa (Figura 32).

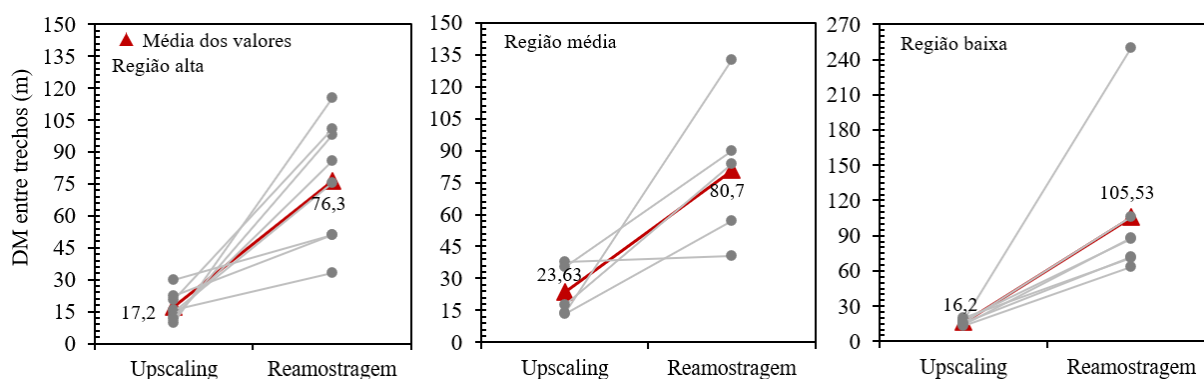


Figura 32 – Distância média entre trechos de rio do *upscaling* padrão e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.

Os trechos 14 e 20, com DM de 250,3 m e 106,1 m, respectivamente, sofreram as maiores alterações em seu traçado e localização ao serem degradados para a resolução de 100 m pela reamostragem. Esse padrão observado também se repete para os demais trechos, ilustrando a dificuldade da reamostragem em seguir a drenagem de referência, gerando erros de confluência e traçado, por exemplo.

A variação dos parâmetros MUFP e AT retornou valores de DM média próximos ao padrão nas regiões alta, média e baixa. Na porção alta da bacia, pode-se destacar o trecho 3, que retornou os maiores índices de DM para o padrão e todas as variações de MUFP e AT, de 29,83 metros (Figura 33). Um desempenho semelhante também foi obtido para esse mesmo trecho na resolução de 30 metros, mas apenas para o padrão.

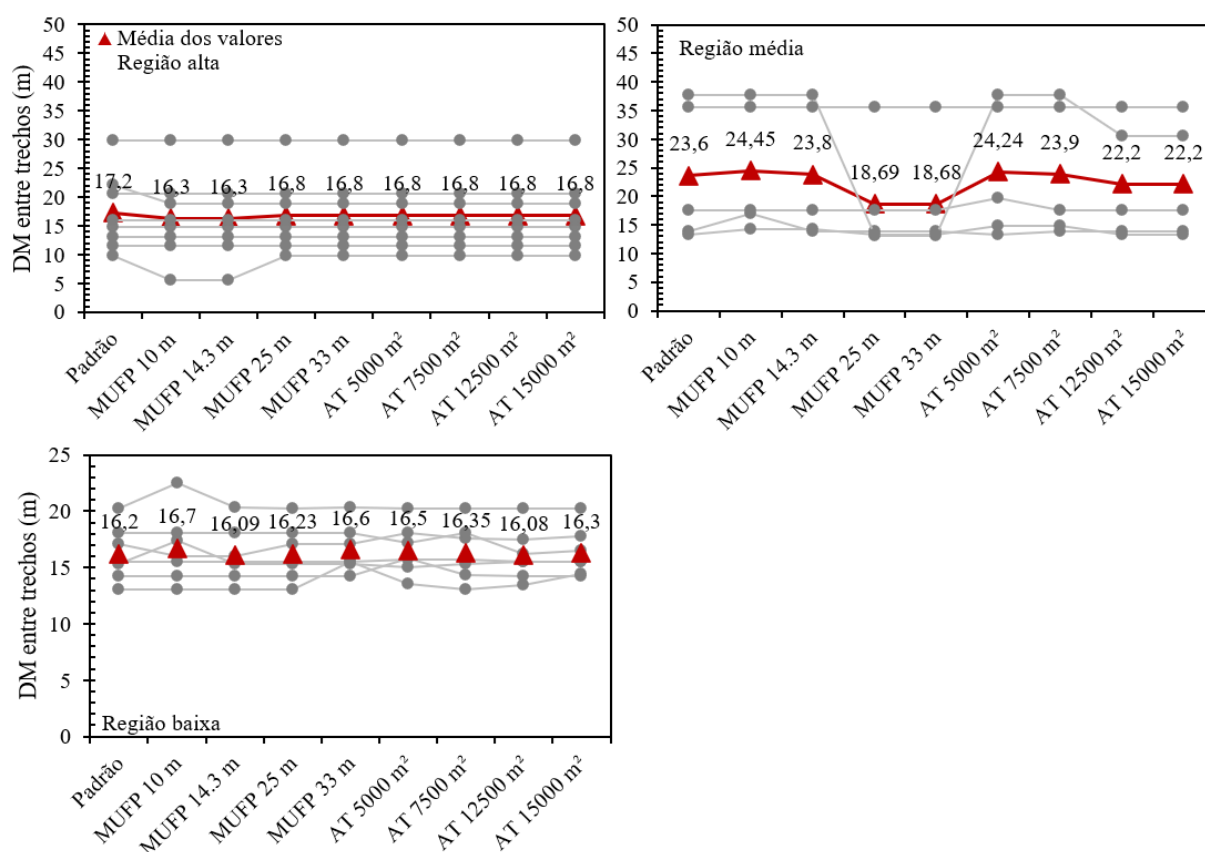


Figura 33 – Distância média entre trechos de rio do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

Ao degradar ainda mais a resolução espacial, agora em 100 vezes, as aplicações do *upscaling* onde foram variados o MUFP e AT apresentaram uma dificuldade ainda maior em representar os trechos, porém não tão grande comparadas à reamostragem. No

entanto, é notável o desempenho superior demonstrado pelo *upsampling*, com o padrão e todas as suas variações, sobre a reamostragem, de modo que o menor valor de DM da reamostragem é quase 6 vezes maior do que as menores DM do *upsampling* (MUFP de 10 e 14,3 m).

A Figura 34 apresenta a DM para o rio principal, onde a reamostragem também foi responsável pelo maior valor de DM, 258,26 metros. Já para o *upsampling*, as variações de MUFP e AT demonstraram um comportamento semelhante ao padrão, sendo o maior valor encontrado para o MUFP de 10 m (18,21 metros) e, o menor, para o MUFP de 25 m e AT de 7500 m² (ambos com 17,1 metros).

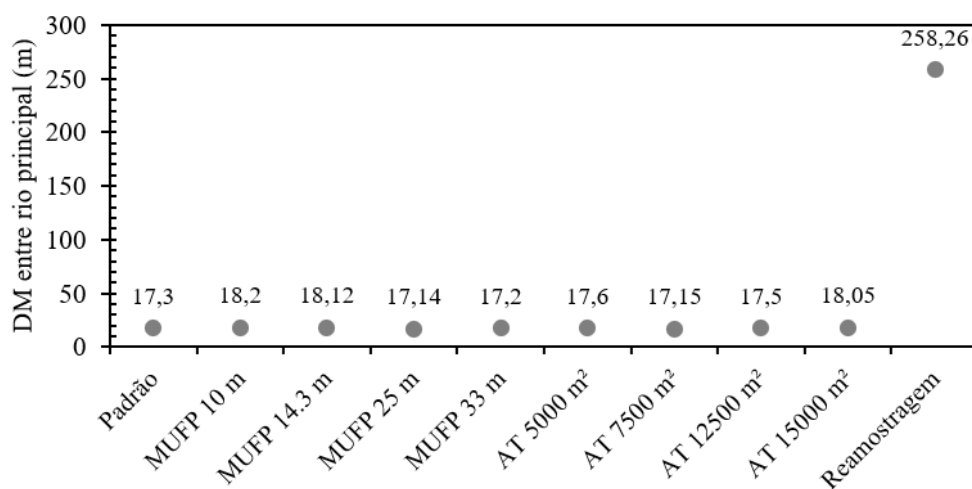


Figura 34 – Distância média entre os rios principais do *upsampling* padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.

O parâmetro DM aponta um desempenho superior do *upsampling* frente à reamostragem ao aumentar o salto de escala de 30 m para 100 m. Tal fato também foi constatado por outros autores, a exemplo de Davies e Bell (2009), que destacam como a aplicação da DM permite identificar a má qualidade da rede fluvial extraída pela reamostragem.

5.4 Porcentagem dentro do *buffer*

Para a aplicação da métrica PWB foi considerado um *buffer* com 1/5 da largura da célula de baixa resolução, ou seja, de 6 m (1/5 da célula de 30 m) e 20 m (1/5 da célula de 100 m). Ao contrário da DM, quanto maior o valor do PWB, melhor a qualidade da rede de

drenagem sobre avaliação, pois isso indica que maior parte do traçado da rede de drenagem analisada está espacialmente mais próximo da drenagem de referência.

5.4.1 Resolução espacial de 30 metros

A Figura 35 apresenta os resultados referentes à PWB para a resolução espacial de 30 metros. As Tabelas 10 e 11 apresentam os valores, por trecho, obtidos para a PWB de 30 m pelos métodos de *upscaling* padrão e variação de MUFP e AT, além da reamostragem.

Tabela 10 – PWB dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do *upscaling* padrão na resolução de 30 m.

Região	Trechos	Porcentagem dentro do buffer (%)	
		Reamostragem	Upscaling padrão
ALTA	1	0,0	24,7
	2	23,2	58,8
	3	0,0	19,7
	4	0,0	51,1
	5	16,5	56,2
	6	0,0	46,1
	7	3,5	46,4
	8	18,0	50,2
MÉDIA	9	29,9	51,9
	10	28,3	34,8
	11	33,9	47,2
	12	23,8	41,0
	13	23,9	44,1
BAIXA	14	39,6	50,5
	15	37,8	40,3
	16	30,1	46,0
	17	48,3	50,6
	18	37,1	41,9
	19	34,0	53,3
	20	48,4	45,0

A reamostragem apresentou um desempenho inferior ao *upscaling*, sendo a diferença mais expressiva para a região alta da bacia, com PWB médio de 7,6%, 6 vezes menor do que o *upscaling* padrão, com 44,1%. Ao caminhar em direção ao exutório, tem-se uma melhora significativa do traçado, para a reamostragem, com 27,9% na porção média e 39,3% na baixa. Ainda, os trechos 1, 3, 4 e 6 retornaram valor nulo para o PWB,

ou seja, não se encontram dentro do limite de tolerância do *buffer* de 6 metros existente ao redor da rede de drenagem. Por outro lado, o trecho 20 se sobressaiu em relação ao demais, com 48,4% de sua extensão inseridos no interior do *buffer*.

Tabela 11 – PWB dos trechos resultantes da aplicação do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT na resolução de 30 m

Trechos	Porcentagem dentro do <i>buffer</i> (%)							
	MUFP 3 m	MUFP 4,3 m	MUFP 7,5 m	MUFP 10 m	AT 450 m ²	AT 675 m ²	AT 1125 m ²	AT 1350 m ²
1	24,7	25,2	25,2	25,6	38,1	30,1	24,9	24,9
2	58,8	58,8	58,8	59,7	58,8	58,8	58,8	58,8
3	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1
4	50,7	51,1	50,7	50,7	51,9	51,1	51,1	51,1
5	56,2	56,2	56,2	56,2	52,7	52,7	56,2	54,7
6	53,9	53,9	53,9	53,9	49,8	57,6	53,9	53,9
7	46,4	46,4	46,4	46,4	46,4	46,4	45,1	45,1
8	52,7	52,7	52,7	52,7	52,7	50,2	50,2	52,7
9	51,7	51,7	51,7	51,7	53,2	51,7	51,7	51,7
10	34,8	34,8	34,8	34,8	32,8	32,8	31,0	27,8
11	48,1	48,1	47,2	47,2	48,1	48,1	47,2	47,2
12	41,0	41,0	41,1	41,0	43,9	41,0	36,4	38,2
13	44,1	44,1	44,1	44,1	42,5	44,1	44,1	45,3
14	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	49,7
15	40,3	40,3	40,4	40,4	43,9	41,4	40,9	39,8
16	46,0	46,0	46,0	46,0	45,7	45,2	46,0	46,9
17	50,6	50,6	50,5	50,6	52,0	51,3	50,3	51,2
18	41,9	43,5	41,9	41,9	44,2	45,0	36,9	39,9
19	53,6	53,4	53,4	53,6	54,3	53,4	53,4	53,4
20	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0

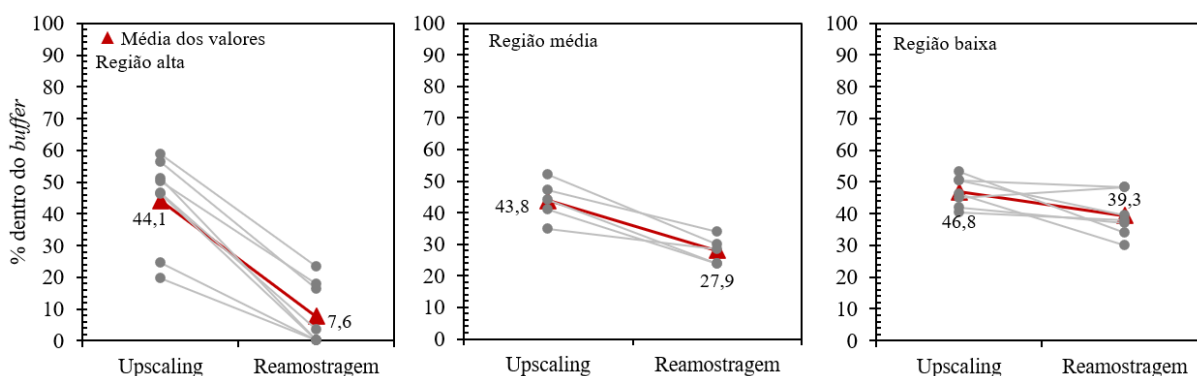


Figura 35 – PWB entre trechos de rio do *upscaling* padrão e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

No que tange ao *upscaling*, as médias dos trechos resultantes das quatro variações de MUFP e de AT se comportaram de forma semelhante à média do padrão para as três regiões, com um aumento de 9% para a região alta, redução de 1% para média e aumento inferior a 0,5% para a baixa (Figura 36).

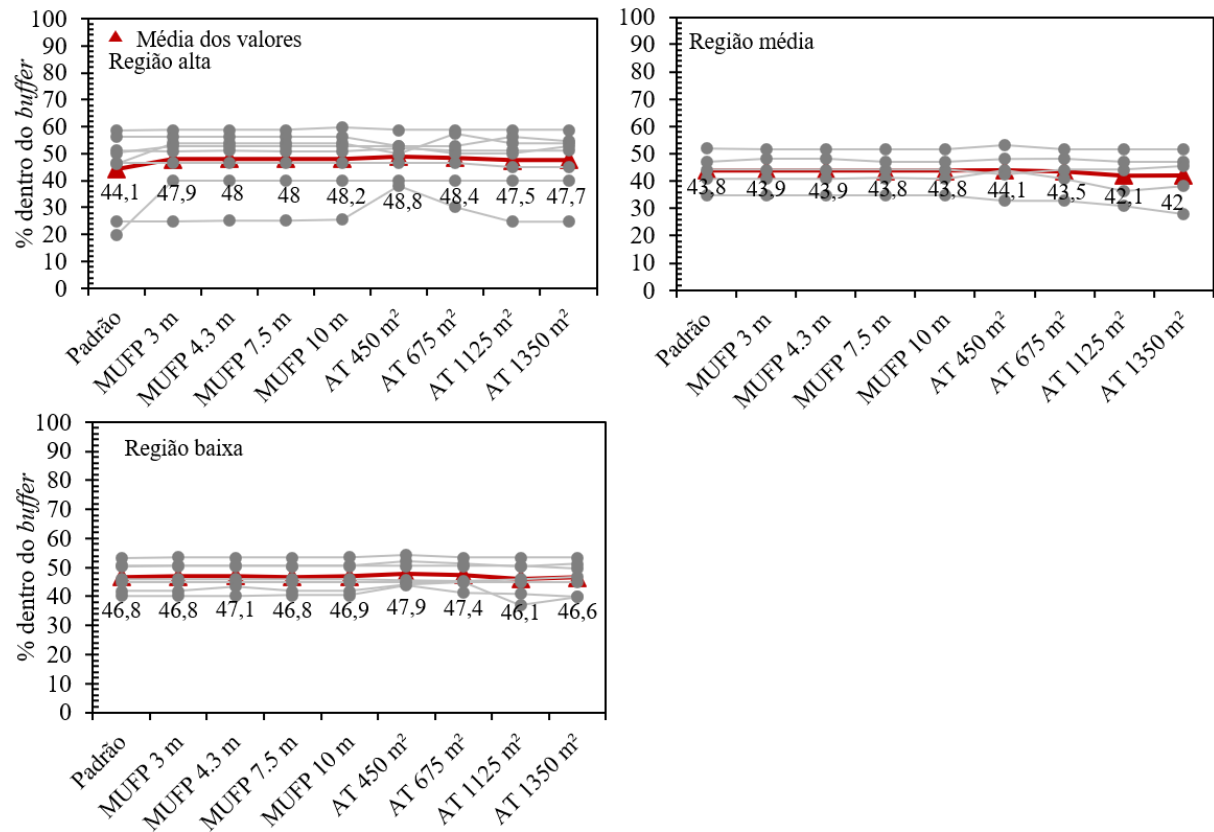


Figura 36 – PWB entre trechos de rio do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

O padrão apresentou um percentual de 44%, 43,8% e 46,8%, para as regiões alta, média e baixa, nessa ordem. Como esperado, o trecho com menor percentual dentro do *buffer* foi o trecho 3 com valores padrão, concomitantemente com a distância média. O trecho 2, tanto para o padrão como para as variações de MUFP e AT, destacou-se com 58,8% de seu comprimento inseridos no interior do *buffer*, com o trecho 6, do AT de 675 m², em segundo lugar com 57,6%.

Para o rio principal, o PWB da reamostragem foi de 36,9% (Figura 37). Ao contrário do observado para o DM, na resolução de 30 metros, a diferença entre a reamostragem e o *upscaling* para a métrica PWB foi bem mais expressiva. O rio principal

resultado da reamostragem apresentou um PWB de 36,9%, valor que é 31,6% menor do que o PWB do *upsampling* padrão, que é de 53,9%.

Esse resultado traduz a dificuldade do traçado reamostrado em acompanhar o caminhamento da rede de drenagem de alta resolução, distanciando-se ao longo de meandros e em pontos de confluência com os trechos. Tal fato acaba derivando uma rede de drenagem com muitas imprecisões, onde há o deslocamento espacial da drenagem. Para o trecho 1, a confluência sofreu um deslocamento de 41 metros, já para os trechos 5, 10 e 20, o distanciamento foi de 67,8 m, 130,9 m e 121,6 m, respectivamente.

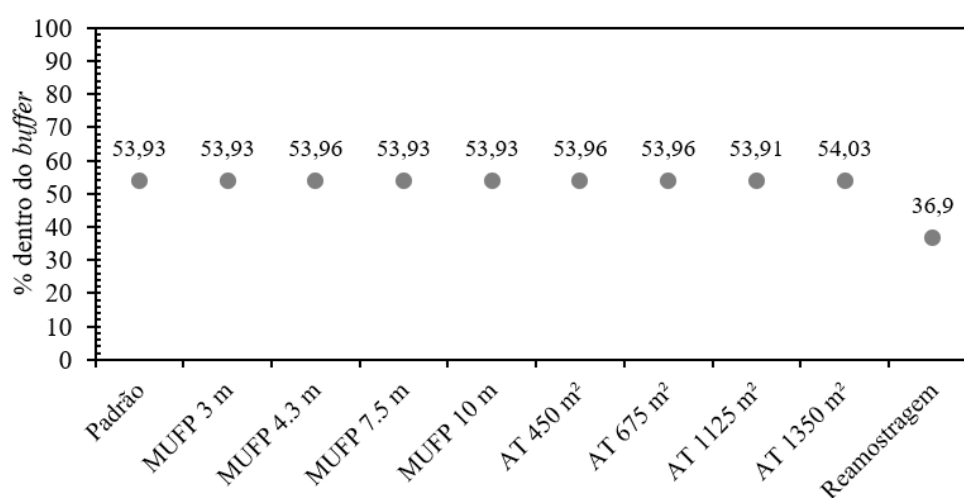


Figura 37 – PWB entre os rios principais do *upsampling* padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.

O PWB manteve-se em 53,9% para o padrão e as variações dos parâmetros na análise do rio principal. Um resultado semelhante foi observado por Sousa e Paz (2017), que, ao aplicar um *buffer* equivalente a 1/5 do pixel, perceberam que o PWB dos rios analisados oscilava entre 20% e 50%, com apenas dois rios superando os 60%. Como discutido no capítulo de Fundamentação Teórica, a escolha da largura do *buffer* influencia diretamente na avaliação das redes fluviais.

5.4.2 Resolução espacial de 100 metros

Ao degradar para a resolução de 100 m, a reamostragem apresentou um baixo desempenho comparativamente ao *upsampling*, em especial nas regiões média e baixa da bacia, onde apenas 5% e 4,3% do traçado, nessa ordem, está inserido na faixa de 20 metros, evidenciando a discrepância entre os dois métodos (Tabela 12; Figura 38). Na

região alta, o percentual foi de 15,8%, sendo o valor mais alto para o trecho 6, com 23,6%, e o mais baixo para o trecho 3, com 6,1%.

Tabela 12 – PWB entre trechos de rio do *upsampling* padrão e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

<i>Trechos</i>	<i>Porcentagem dentro do buffer (%)</i>	
	<i>Reamostragem</i>	<i>Upsampling padrão</i>
1	20,7	38,3
2	14,0	40,7
3	6,1	5,5
4	11,4	42,7
5	23,5	57,1
6	23,6	33,7
7	14,3	39,6
8	12,7	60,0
9	2,3	49,2
10	4,8	37,8
11	8,4	46,1
12	5,0	38,3
13	4,7	56,4
14	1,4	46,3
15	3,4	48,0
16	8,7	56,1
17	3,6	47,5
18	2,7	45,7
19	6,9	52,8
20	3,0	60,0

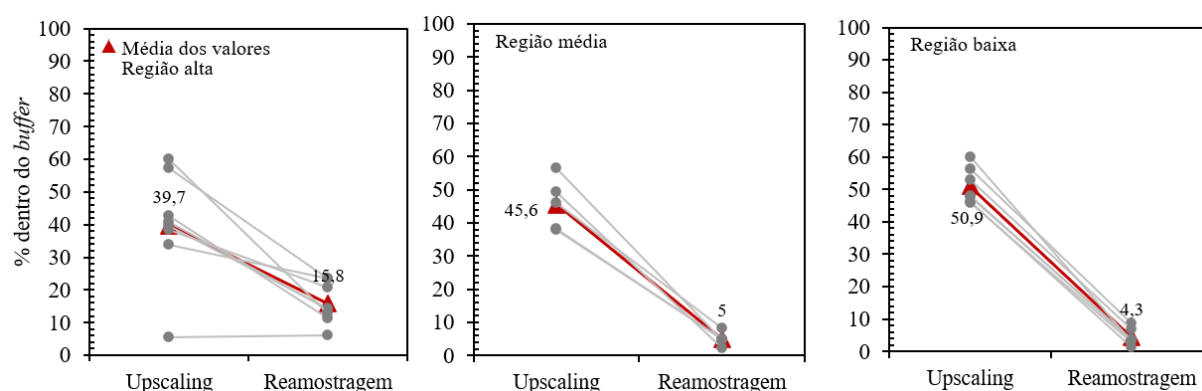


Figura 38 – PWB entre trechos de rio do *upsampling* padrão e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

Em relação aos trechos, a média percentual dentro do *buffer* apresentou valores semelhantes ao *upsampling* padrão, com resultados variando entre 38,8% e 38,1% para a região alta, 49,9% e 43,3% para a média e 52,1% e 49,9% na de baixa (Tabela 13; Figura

39). O trecho 3 foi o trecho com menor percentual de comprimento inserido no *buffer*, apenas 5,5%, tanto para o padrão, como para todos os valores de MUFP e AT.

Tabela 13 – PWB dos trechos resultantes da aplicação do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT na resolução de 100 m

Trechos	Porcentagem dentro do buffer (%)							
	MUFP 10 m	MUFP 14,3 m	MUFP 25 m	MUFP 33 m	AT 5000 m ²	AT 7500 m ²	AT 12500 m ²	AT 15000 m ²
1	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3
2	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7
3	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
4	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7
5	52,0	52,0	57,1	57,1	57,1	57,1	57,1	57,1
6	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7
7	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6
8	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4
9	40,9	49,2	49,2	49,2	54,3	49,2	49,2	49,2
10	37,8	37,8	58,0	58,0	37,8	37,8	37,8	37,8
11	46,1	46,1	46,1	46,8	44,7	46,8	46,1	46,1
12	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3
13	53,4	53,4	56,4	56,4	55,0	55,0	56,4	56,4
14	52,5	52,5	46,3	46,3	45,4	46,5	45,2	45,2
15	48,0	48,0	48,0	49,9	46,4	48,0	45,5	41,2
16	56,1	56,1	56,1	56,1	57,5	57,5	56,1	56,1
17	47,5	47,5	47,5	47,5	52,2	47,5	51,1	51,7
18	42,5	48,8	45,7	48,8	45,7	45,7	45,7	45,7
19	52,8	52,8	52,8	52,8	55,4	58,6	52,8	52,8
20	52,3	60,0	60,0	60,0	61,8	60,0	56,4	56,4

É importante destacar que, mesmo possuindo um valor inferior de PWB em comparação com os demais trechos, o percentual do trecho 3, para o *upscaling* padrão e as variações dos parâmetros, ainda é, aproximadamente, 4 vezes maior do que o menor valor de PWB da reamostragem, que foi de 1,4% (trecho 14). O trecho com maior desempenho geral foi o trecho 20, com um PWB médio de 58,5%.

A Figura 40 apresenta os valores de PWB do rio principal para a reamostragem e todas as variações do *upscaling*, incluindo o padrão. A reamostragem apresentou um desempenho inferior em relação ao *upscaling*, com um percentual de 8,21% diante dos 56,6% do *upscaling* padrão, onde essa diferença representa uma redução de 85,5% de PWB.

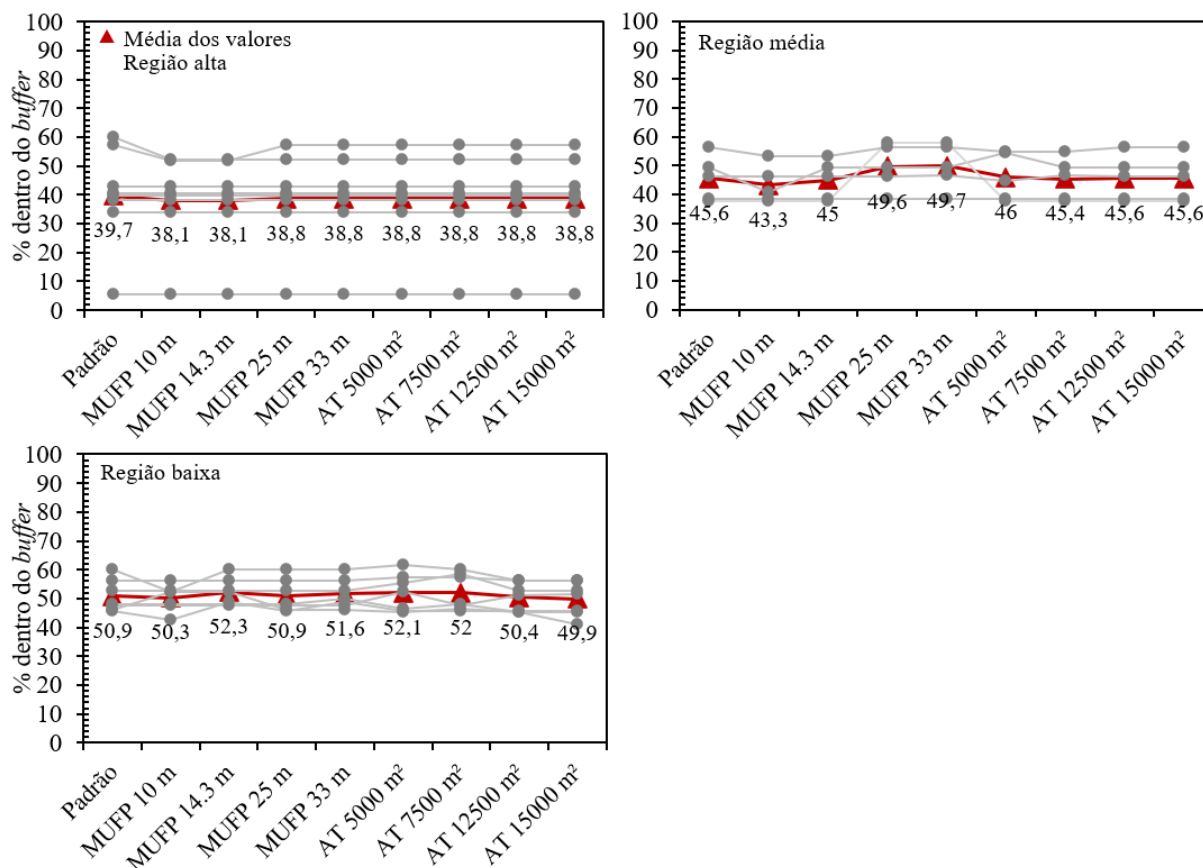


Figura 39 – PWB entre trechos de rio do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

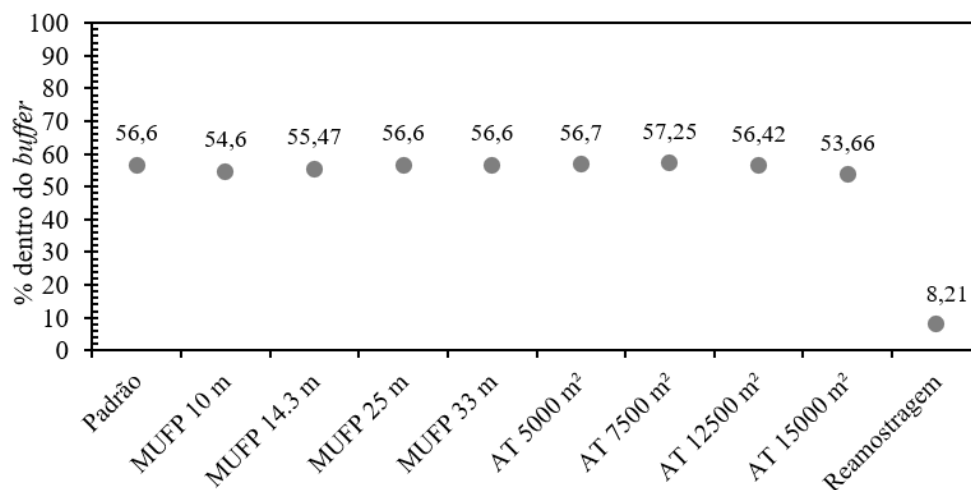


Figura 40 – PWB entre os rios principais do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

O *upscaling* padrão apresentou um desempenho semelhante para as resoluções de 30 m e 100 m na métrica do PWB, variando de 53,9% (resolução de 30 m) a 56,6% (resolução de 100 m). Entretanto, para a reamostragem, o percentual do rio inserido no

buffer, para a resolução de 100 m, foi 77,81% menor que o PWB encontrado para a reamostragem de 30 metros. Vale salientar que, apesar da largura da faixa adotada não ser a mesma em valor absoluto para as duas resoluções, para ambas foi considerada a relação de 1/5 do lado da célula de baixa resolução.

Quanto às aplicações do MUFP e AT, todas as variações dos parâmetros apresentaram um valor de PWB superior à 50%, sendo o menor valor encontrado de 53,66% (AT de 15000 m²), 6,5 vezes acima do valor de PWB do rio reamostrado. O maior valor foi para AT de 7500 m², 57,25%. De modo geral, nota-se que, em comparação com o padrão, a variação dos parâmetros MUFP e AT pouco impactou no desempenho geral da métrica PWB, assim como foi observado para o DM na resolução de 100 m.

Como era esperado, ao confrontar os resultados obtidos para a resolução de 100 m com os da resolução de 30 m, constata-se que, à medida que a degradação espacial aumenta, menor o comprimento total de trechos que se encontra inserido no interior do *buffer*.

Observando os valores de distância média e PWB resultantes dos procedimentos de mudança de escala, é possível perceber de forma clara que o aumento na distância espacial entre os rios está relacionado diretamente com a redução da resolução espacial (CHEN et al., 2012; YANG et al., 2014; SOUSA & PAZ, 2017). Ainda, assim como destacado por Yang et al. (2014), o aumento no tamanho da célula influencia o deslocamento espacial do rio, afetando o comprimento do traçado.

5.5 Análise dos comprimentos de rios

Neste tópico, foram analisadas as alterações no comprimento do rio principal e trechos do MDT LiDAR de 1 m frente à aplicação do *upscaling* e da reamostragem. Para a interpretação das alterações, vale ressaltar que os resultados mais satisfatórios são aqueles cuja variação encontra-se próximo de 0.

5.5.1 Resolução espacial de 30 metros

Na Tabela 14 são apresentados os valores de comprimento de cada trecho resultantes da reamostragem e do *upscaling* com os valores padrão para a resolução de 30 m.

Tabela 14 – Comprimentos dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do *upsampling* padrão para a resolução de 30 m.

Região	Trechos	Comprimento (m)	
		<i>Reamostragem</i>	<i>Upsampling padrão</i>
ALTA	1	302,1	542,7
	2	697,3	973,4
	3	312,4	547,9
	4	1003,7	730,2
	5	602,1	777,8
	6	789,4	998,3
	7	387,0	1095,7
	8	459,4	572,7
MÉDIA	9	1543,7	1881,7
	10	911,6	1260,4
	11	1524,0	1917,7
	12	761,6	1025,3
	13	1226,2	1743,9
BAIXA	14	2810,2	3966,3
	15	2045,6	2408,9
	16	1793,2	1946,0
	17	2151,1	2386,2
	18	1201,3	1305,9
	19	1618,3	2199,6
	20	2010,5	2289,7

Os gráficos apresentados na Figura 41 permitem visualizar de forma mais clara o comparativo da variação de comprimento entre a reamostragem e o *upsampling* padrão. Percebe-se que, para as três regiões da bacia, os trechos reamostrados sofreram uma redução média no comprimento de 21,3%, onde os trechos de 1 a 8 foram os mais afetados, com uma variação de -29,5% relativamente ao valor de referência, seguido pelos trechos de 9 a 13, com -23,61%, e os trechos 14 a 20, com -10,9%.

Vale salientar que variações negativas significam que o comprimento foi subestimado, enquanto as positivas, superestimado.

Apenas os trechos 4 e 20 sofreram variação positiva, com 34,6% e 1,1%, nessa ordem. Ou seja, os comprimentos totais sofreram alterações de 745,9 m (trecho 4) e 1988,3 m (trecho 20), na resolução de 1 m, para 1003,7 m (trecho 4) e 2010,5 m, na resolução de 30 m. Por outro lado, os trechos com maior redução do comprimento foram os trechos 7, com -65,1% (de 1108,25 m para 387 m), e 10, com -34,3% (de 1388,5 para 911,6). Os

trechos 16, 17 e 18 foram trechos que sofreram as menores variações de comprimento, com apenas 6%, 8,5% e 6,1%, nessa ordem.

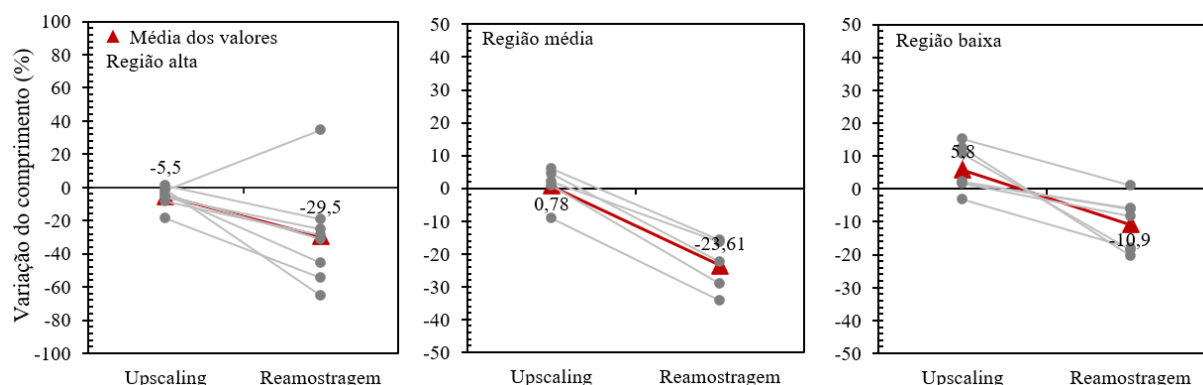


Figura 41 – Variação do comprimento entre trechos de rio do *upscaling* padrão e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.

Na análise trecho a trecho, o *upscaling* padrão apresentou variações médias inferiores a 6%, para subestimação e superestimação de comprimento, representando um traçado mais semelhante ao de alta resolução. Esse desempenho superior em relação à reamostragem também pode ser justificado pelos resultados discutidos nos tópicos referentes à distância média e porcentagem dentro do *buffer*.

Os resultados para as variações do MUFP e AT, e suas respectivas comparações com o *upscaling* padrão, podem ser observados na Tabela 15 e na Figura 42.

Para a região alta, a maior variação em relação à referência foi para o AT 1350 m², com um incremento médio de 6,6%, enquanto para o padrão houve uma redução média de 5,46% no traçado, a menor média para todos os produtos do *upscaling*. Nessa região uma variação em particular destaca-se das demais, a para o MUFP de 3 m, onde o trecho 8 sofreu um aumento de quase 100% em relação à referência, passando de 567,6 m para 1095,7 m. Ao mesmo tempo, o MUFP de 3 m também foi responsável pela maior redução de comprimento, no trecho 6, de 1060,12 m para 560,3 m, -47,1%.

Na região média, o maior valor médio encontrado foi para o AT de 675 m², com 5,93%, e o menor para o MUFP de 3 m, com -0,09%. Ainda, os trechos onde foram registradas as maiores alterações de comprimento foram o trecho 10, com variação de comprimento de -9,2% para o padrão, MUFP de 3 m e de 10 m, e o trecho 12, com 8,8% para o AT de 1125 m².

Tabela 15 – Comprimentos dos trechos resultantes da aplicação do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT para a resolução de 30 m.

Trechos	Comprimento (m)							
	<i>MUFP</i> 3 m	<i>MUFP</i> 4,3 m	<i>MUFP</i> 7,5 m	<i>MUFP</i> 10 m	<i>AT 450</i> m ²	<i>AT 675</i> m ²	<i>AT 1125</i> m ²	<i>AT 1350</i> m ²
1	542,7	585,2	615,2	572,7	632,8	632,8	572,7	572,7
2	973,4	973,4	1093,6	931	1093,6	1093,6	1093,6	1093,6
3	730,2	540,6	600,6	730,2	600,6	600,6	600,6	600,6
4	540,6	730,2	730,2	540,6	837,9	790,2	790,2	790,2
5	777,8	807,8	807,8	777,8	837,9	940,4	940,4	922,8
6	560,3	1095,7	590,3	1040,8	1015,9	1160,9	1143,3	1143,3
7	1040,8	1010,8	1040,8	1095,7	1155,8	1275,9	1300,8	1300,8
8	1095,7	560,3	1125,7	560,3	560,3	560,3	560,3	650,4
9	1851,6	1851,6	1881,6	1851,6	1924,1	1881,7	1911,7	1911,7
10	1260,4	1410,6	1941,7	1260,4	1428,2	1428,2	1393,0	1375,4
11	1899,2	1899,2	1410,6	1911,7	1959,3	1959,3	1941,7	1941,7
12	1025,3	1025,3	1026,1	1025,3	1042,9	1025,3	1067,8	1007,7
13	1713,9	1743,9	1786,4	1743,9	1828,9	1774,0	1774,0	1768,8
14	4008,8	4008,8	4008,8	3966,3	4026,4	4008,8	4008,8	3948,7
15	2229,7	2408,9	2469,0	1305,9	2534,2	2486,6	2469,0	2469,0
16	2289,7	1946,0	2018,5	2469,0	2011,2	1993,6	1916,0	2000,9
17	2408,9	2386,2	2384,6	1946,0	2474,1	2439,0	2368,6	2290,9
18	1946,0	1348,4	1305,9	2386,2	1618,7	1396	1300,8	1343,3
19	2386,2	2229,7	2259,7	2229,7	2337,3	2259,7	2259,7	2229,6
20	1305,9	2289,7	2289,7	2289,7	2379,8	2379,8	2289,7	2289,7

Por sua vez, nos trechos da região baixa, o MUFP de 3 m e o AT de 675 m² foram responsáveis pelas maiores superestimações médias, com 9,06% e 9,2%, nessa ordem. A menor variação média foi para o padrão, com 5,79%. Semelhante ao ocorrido para a região média, os trechos 18 (52,1%) e 20 (-34,3%) atingiram o maior valor de incremento e redução do comprimento. O trecho 15, para a variação de 675 m² do AT, sofreu a menor variação de comprimento, com uma redução de 2491,9 m para 2486,56 m (-0,2%).

Em relação ao rio principal, houve uma variação de -11,95% em seu comprimento após o procedimento de reamostragem de 1 para 30 m (Figura 43). Esse valor representa uma redução no traçado de 11090,72 m para 9765,6 m. Já para o *upscaling* padrão houve uma variação positiva de 15,42%, onde o comprimento do rio principal passou de 11090,72 m para 12801,32 m. Nesse caso, o comprimento do rio reamostrado se aproximou mais do comprimento do rio de referência, no entanto, note que esse

desempenho se refere apenas ao comparativo de comprimento, não significando o traçado foi melhor do que o do *upscaling*.

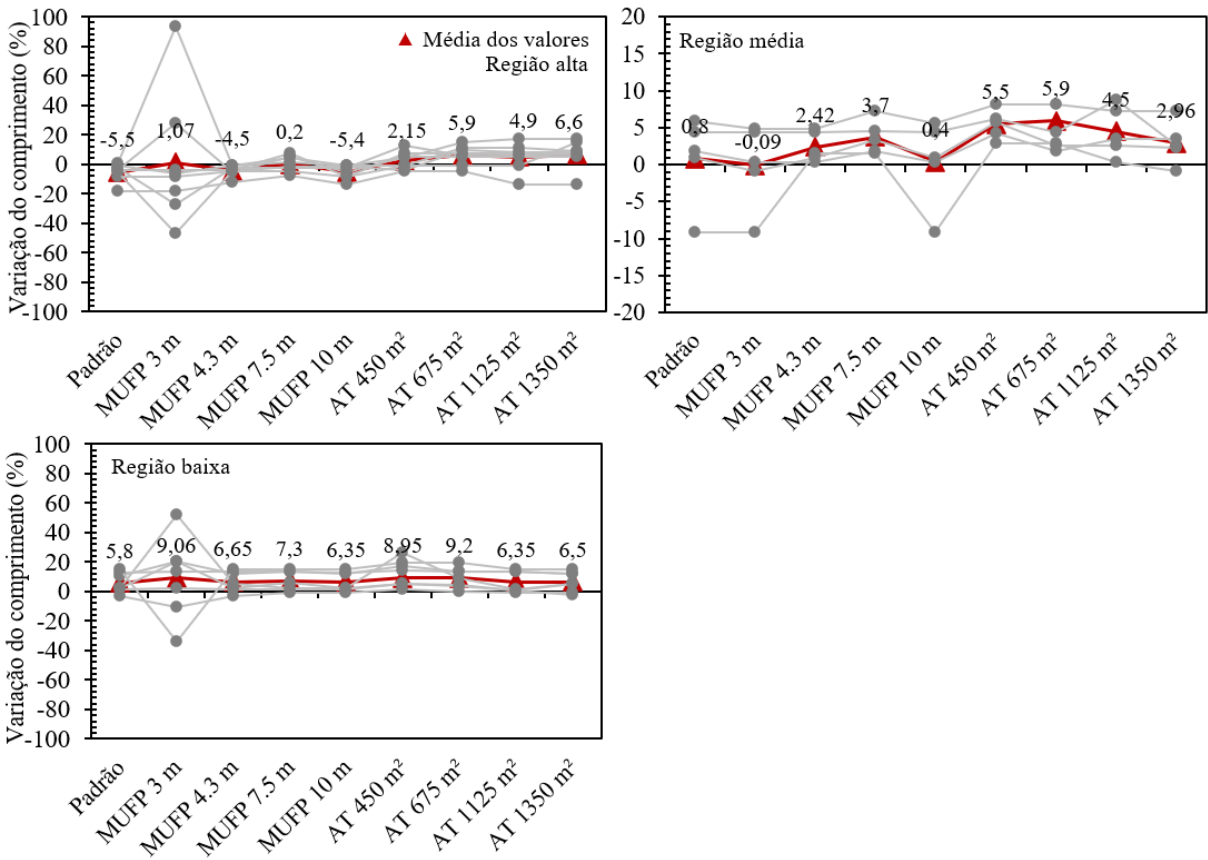


Figura 42 – Variação do comprimento entre trechos de rio do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

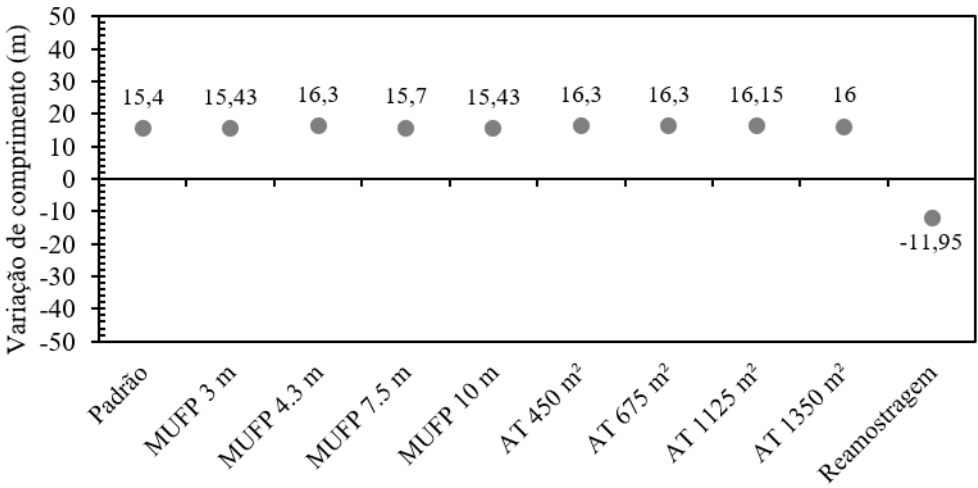


Figura 43 – Variação do comprimento entre os rios principais do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.

Ainda quanto ao rio principal, as variações do traçado sofridas pelo rio foram semelhantes para o padrão e os MUFP e AT adotados, de modo que houve a superestimação do rio para todos os casos. Os AT de 450 m² e 675 m² foram os responsáveis por aumentar em 16,31% o traçado (11090,72 m para 12899,2 m).

5.5.2 Resolução espacial de 100 metros

As análises para a resolução espacial de 100 m encontram-se apresentadas na Tabela 16 e na Figura 44.

Tabela 16 – Comprimentos dos trechos resultantes da aplicação da reamostragem e do *upsampling* padrão para a resolução de 100 m.

<i>Trechos</i>	<i>Comprimento (m)</i>	
	<i>Reamostragem</i>	<i>Upscaling padrão</i>
1	482,9	482,9
2	782,9	741,4
3	941,5	441,4
4	382,9	524,3
5	765,7	682,9
6	965,7	541,4
7	841,5	782,9
8	400,0	582,9
9	1360,7	1482,9
10	382,9	1224,3
11	1731,4	1607,2
12	1407,2	924,3
13	624,3	1348,6
14	1619,3	3007,3
15	2197,2	1824,3
16	2197,2	1665,8
17	1319,3	2183,0
18	382,9	1365,8
19	1790,0	1648,6
20	1324,3	1790,1

Na região alta, os trechos da reamostragem apresentaram um desempenho médio superior ao *upsampling* padrão, com uma variação de -13,39% em detrimento de -25,3%. O trecho 3 da reamostragem foi o responsável por superestimar em 64,4% o traçado do mesmo trecho na drenagem de referência (572,6 m para 941,5 m), o maior aumento

registrado. Ainda na região alta, as maiores reduções registradas foram para os trechos 4 (reamostragem) e 6 (*upscaling* padrão), com -48,7% e -48,9%, respectivamente.

Na região média também houve uma redução no traçado dos trechos de -24,73%. Os trechos médios resultantes do *upscaling* padrão também sofreram redução, porém, inferior a obtida na região alta, sendo de apenas -14,12%. Os trechos que mais sofreram alterações foram o 10 e o 12, da reamostragem, com uma variação de -72,4% (redução de 1388,5 m para 382,9 m) e 43,3% (de 981,8 m para 1407,2 m).

Para a região baixa, a redução média foi de 29,73% para a reamostragem, e 11,7% para o *upscaling* padrão. Semelhante às regiões alta e média, os trechos de baixa com maior alteração no comprimento foram provenientes do procedimento de reamostragem. O trecho 16 sofreu um aumento da ordem de 15,1%, fazendo com que o comprimento registrado para a referência de 1 metro variasse de 1908,62 m para 2197,2 m. Por outro lado, o trecho 18 teve seu comprimento reduzido em 70,1%. Ou seja, ao ser reamostrado, seu comprimento passou de 1279,4 m para 382,9 m.

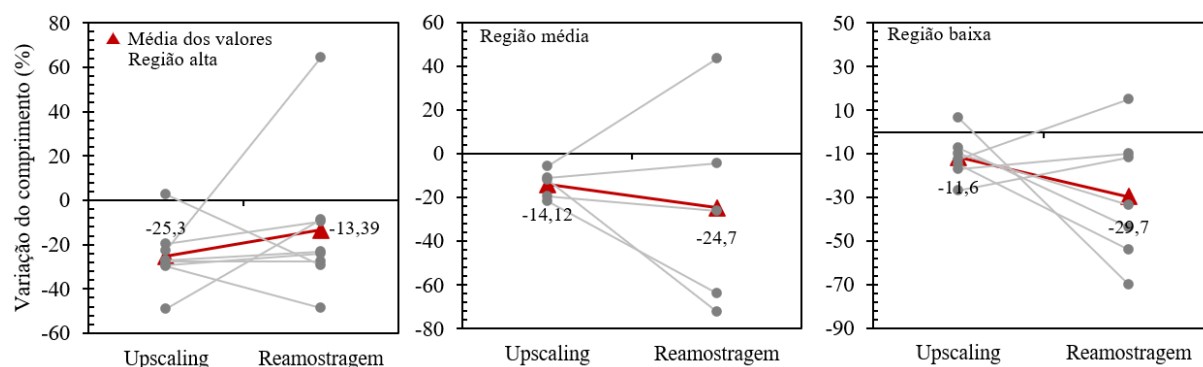


Figura 44 – Variação do comprimento entre trechos de rio do *upscaling* padrão e da reamostragem, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

A análise de comprimentos para os diferentes MUFP e AT do *upscaling* encontra-se na Tabela 17 e na Figura 45. O MUFP de 33 m e as quatro variações de AT apresentaram a mesma variação média, uma vez que seus trechos apresentaram o mesmo comprimento. Para os demais valores de MUFP e o padrão, houve reduções de comprimento, sendo a maior registrada para o trecho 7, do MUFP de 25 m (-51,1%). Apenas dois trechos apresentaram aumento no comprimento, o trecho 8 do MUFP de 25 m, com 37,9%, e o mesmo trecho para o padrão, com 2,7%, sendo este o que mais se aproximou do trecho 8 da referência.

Tabela 17 – Comprimentos dos trechos resultantes da aplicação do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT para a resolução de 100 m.

Trechos	Comprimento (m)							
	<i>MUFP</i> 10 m	<i>MUFP</i> 14,3 m	<i>MUFP</i> 25 m	<i>MUFP</i> 33 m	<i>AT 5000</i> m ²	<i>AT 7500</i> m ²	<i>AT 12500</i> m ²	<i>AT 15000</i> m ²
1	482,9	482,9	482,9	482,9	482,9	482,9	482,9	482,9
2	741,4	741,4	741,4	741,4	741,4	741,4	741,4	741,4
3	441,4	441,4	441,4	441,4	441,4	441,4	441,4	441,4
4	524,3	524,3	524,3	524,3	524,3	524,3	524,3	524,3
5	441,4	441,4	682,9	682,9	682,9	682,9	682,9	682,9
6	541,4	541,4	482,9	541,4	541,4	541,4	541,4	541,4
7	782,9	782,9	541,4	782,9	782,9	782,9	782,9	782,9
8	482,9	482,9	783,0	482,9	482,9	483,0	482,9	482,9
9	1482,9	1482,9	1482,9	1482,9	1541,5	1482,9	1482,9	1482,9
10	1224,3	1224,3	1107,2	1107,2	1224,3	1224,3	1224,3	1224,3
11	1607,2	1607,2	1607,2	1607,2	1724,3	1607,2	1607,2	1607,2
12	924,3	924,3	924,3	924,3	924,3	924,3	924,3	924,3
13	1407,2	1407,2	1348,6	1348,6	1465,8	1348,6	1348,6	1348,6
14	3190,1	3190,1	3007,3	3007,3	3124,4	3031,5	3031,5	3031,5
15	1824,3	1824,3	1824,0	1965,8	1882,9	1766	1765,8	1707,2
16	1665,8	1665,8	1665,8	1665,8	1724,3	1665,8	1665,8	1665,8
17	2183,0	2183,0	2183,0	2183,0	2241,5	2065,8	2065,8	2065,8
18	1424,3	1507,2	1365,8	1507,2	1365,8	1365,8	1365,8	1365,8
19	1648,6	1648,6	1649,0	1648,6	1824,4	1649,0	1648,6	1648,6
20	1790,1	1790,1	1790,1	1790,1	1848,6	1731,5	1731,5	1731,5

Assim como para a região alta, as variações médias para a região média demonstraram redução do comprimento para o padrão e as demais variações. Além disso, nenhum dos trechos apresentou superestimação do comprimento, apenas redução. A menor redução foi para o AT de 7500 m², com -27,5%, enquanto os demais variaram entre -14,12% e -15,8%, exceto o MUFP de 10 e 14,3 m, com -13,44% e o AT de 5000 m², com -10,83%. O trecho 12 de todas as variações foi o que apresentou menor variação do comprimento, com -5,9%, seguido pelo trecho 11 do AT 5000 m², com -4,8%.

Por fim, os resultados para as variações de comprimento na região baixa da bacia apresentaram semelhança com os do trecho médio, exceto para o trecho 18, que para todos apresentou aumento no comprimento, sendo esse aumento médio de 9,7%. Por outro lado, o trecho 15 sofreu maior redução, sendo essa de -21,1% no MUFP de 33 m, atingindo -21,5% no AT de 15000 m².

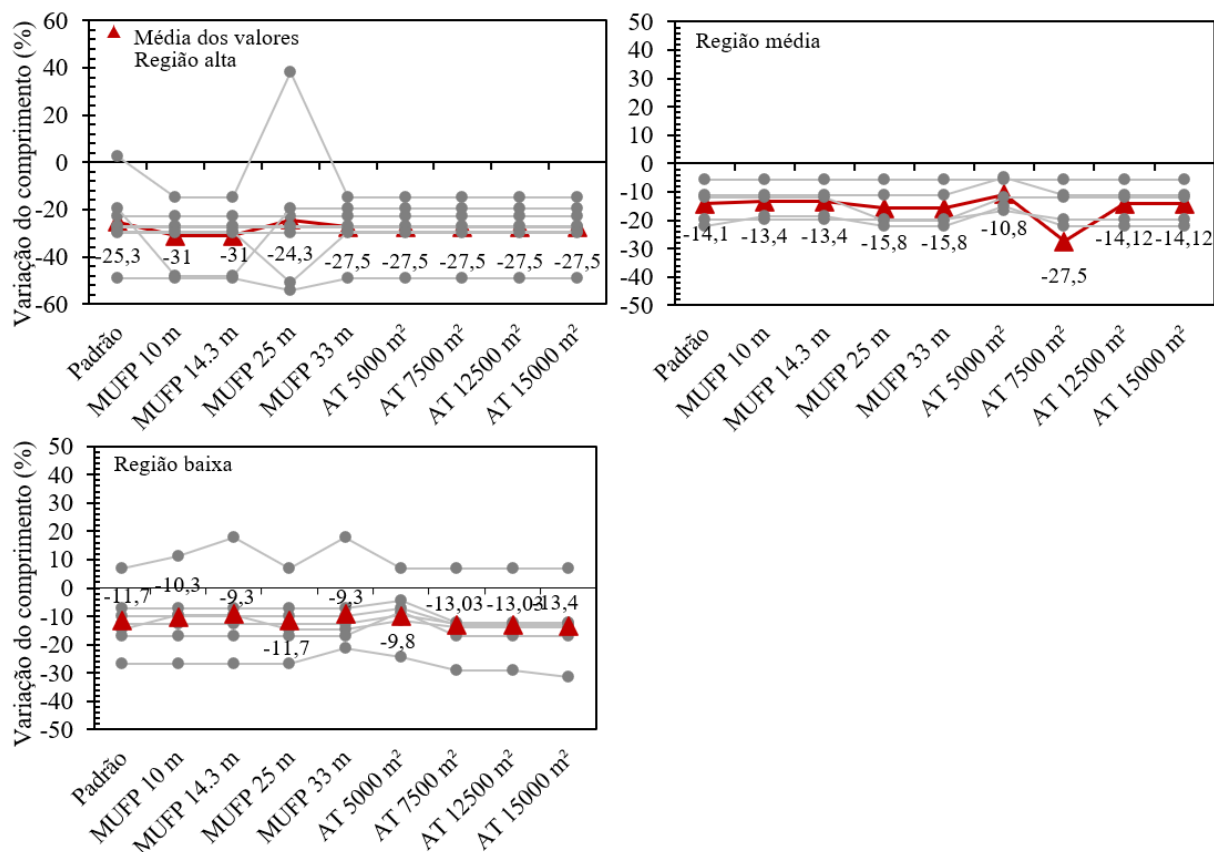


Figura 45 – Variação do comprimento entre trechos de rio do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, na resolução de 100 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro

No que se refere ao rio principal, a maior alteração foi inferior a 10%, com uma alteração no comprimento de 11.090,72 m para 10.120,05 m mediante a reamostragem do MDT (Figura 46).

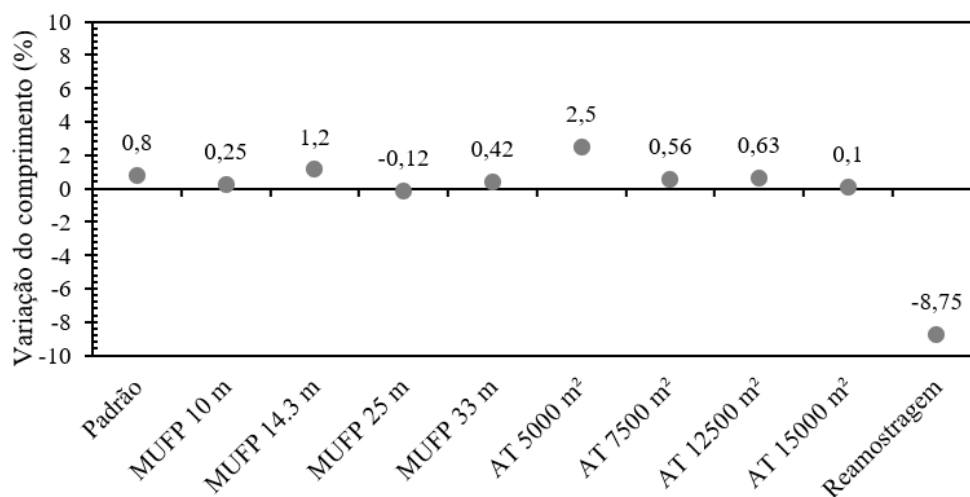


Figura 46 – Variação do comprimento entre os rios principais do *upscaling* padrão e das variações de MUFP e AT, e da reamostragem, na resolução de 30 metros, para o MDT LiDAR de 1 metro.

O rio principal proveniente do *upscaling* padrão apresentou um valor de comprimento bem próximo da referência, representando um acréscimo de área inferior a 1%. ao rio principal, diferentemente do que ocorreu para a resolução de 30 m.

Quanto às variações do *upscaling*, ao contrário dos trechos, observou-se que, apesar de pequenas, todas as alterações no rio principal estão relacionadas ao aumento em seu comprimento. A principal alteração observada foi para o AT de 5000 m², com um aumento de 279,6 metros, ou 2,52%.

De modo geral, as análises apresentadas demonstraram que a degradação, a partir da reamostragem e do *upscaling*, provoca a redução do comprimento dos trechos ao longo de toda a bacia. Essa diferença fica ainda mais evidente para a mudança de escala de 1 para 100 m. Na degradação de 1 para 30 m, por outro lado, é observado para o *upscaling* o incremento no comprimento, modo que o rio, com resolução espacial de 30 m, na tentativa de acompanhar o traçado e a sinuosidade dos meandros da rede de 1 m, acaba percorrendo um traçado em ‘zigue-zague’, aumentando o comprimento.

Sabe-se que a variação da resolução espacial pode alterar significativamente o traçado dos rios, que, por sua vez, pode vir a gerar discordâncias no mapeamento de bacias hidrográficas (WOODWOW, LINDSAY & BERG, 2016). Ao analisar os comprimentos resultantes dos trechos reamostrados e comparar seu desempenho com os resultados obtidos nas outras métricas, pode-se perceber a presença de traçados espacialmente distantes da referência, com os maiores valores de distância média e menores percentuais dentro do *buffer*.

Sousa e Paz (2017) discutem o quanto alterações dessa ordem sobre os rios podem influenciar, por exemplo, no desempenho da modelagem hidrológica, tendo em vista que os rios representam o fluxo de água sobre uma bacia. Wu, Li e Huang (2008) argumentam que mudanças no comprimento de rios podem alterar significativamente a determinação do intervalo de tempo entre a precipitação e a vazão máxima. Assim, a representação incorreta de rios afeta a previsão de cheias, além de alterar a percepção de risco à inundação, incluir erroneamente ou omitir áreas para a realização do balanço hídrico e afetar a modelagem de transporte de sedimentos, por exemplo.

5.6 Análise de áreas de drenagem

A análise das redes de drenagem baseada nas áreas de contribuição teve como enfoque investigar a variação de área das bacias hidrográficas delimitadas e o percentual de área de drenagem que foi omitida ou incluída, em relação à bacia de 1 metro proveniente do MDT LiDAR. Ao contrário das demais métricas, a análise desta teve como interesse a sub-bacia completa e não a divisão em trechos, tendo em vista a baixa variação de área observada para os diferentes valores dos parâmetros MUFP e AT, e do padrão do *upsampling*, além da reamostragem.

5.6.1 Resolução espacial de 30 metros

Para a resolução espacial de 30 metros, houve uma variação de área inferior a 1% para todas as variações do *upsampling* e para a reamostragem, sendo a média de variação igual a 0,29%, em relação a de alta resolução espacial. Para o procedimento de reamostragem pela média, a variação foi de 0,77%, com um valor de área de 21,89 km².

Tratando-se das bacias delimitadas a partir do *upsampling*, tanto para a aplicação dos parâmetros MUFP e AT nos valores padrão, como para as demais variações, foi observado um aumento da ordem de 0,24% na área de drenagem, onde a área da bacia passou de 21,73 km², na resolução de 1 m, para 21,8 km² (Figura 47). Era esperado que houvesse alguma variação de área ao comparar o padrão com as variações de AT e MUFP, assim como observado para a drenagem, no entanto, isso não ocorreu.

Essa variação percentual também foi observada ao quantificar o total de área que foi omitida ou erroneamente incluída, conforme ilustrado na Figura 48. A aplicação dos valores padrão do MUFP e AT no *upsampling* omitiu 0,53% de área e considerou um excedente de 0,76% relativamente à bacia hidrográfica de alta resolução espacial, assim como o AT de 450 m². Por outro lado, para as demais variações de MUFP e AT, o total de área omitida foi ligeiramente maior, de 0,76%, enquanto o total de área incluída se comportou de forma análoga à observada no padrão.

A reamostragem trouxe consigo os maiores valores observados, com uma omissão de 0,94% e inclusão de 1,65%. Apesar de seus valores se destacarem em relação ao do

upscaling, não se traduz como algo expressivo, com uma concordância de área superior a 99%.

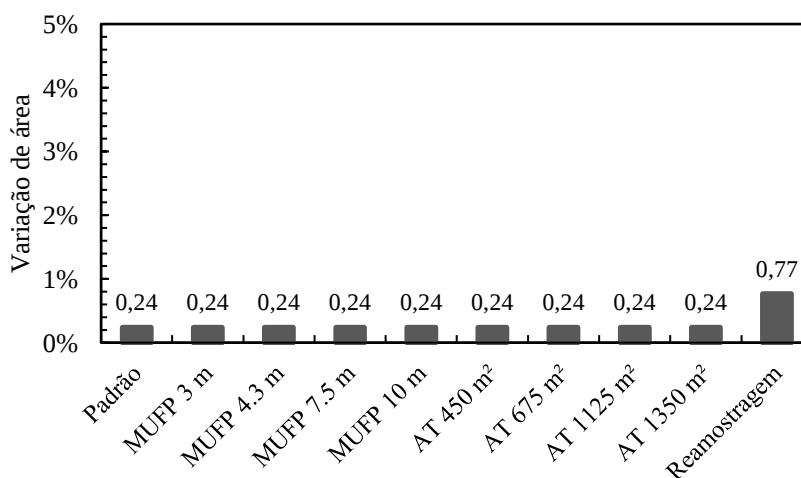


Figura 47 – Análise percentual da variação de área de drenagem após a aplicação das metodologias de mudança de escala para a resolução de 30 m.

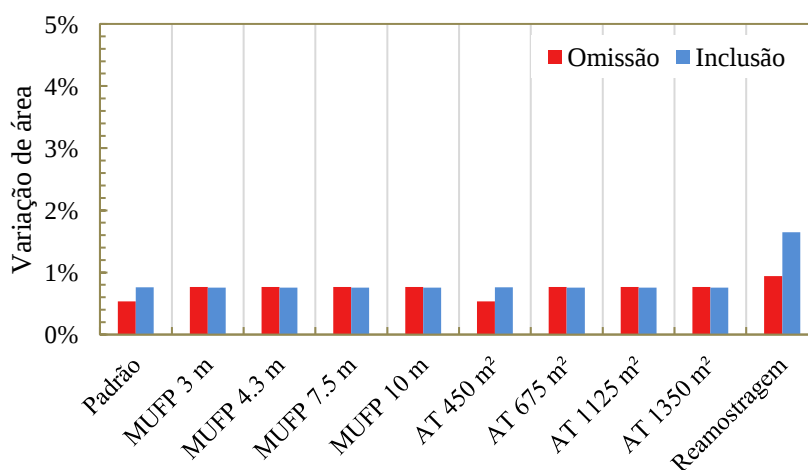


Figura 48 – Análise percentual do total de área de drenagem omitida ou incluída entre as bacias hidrográficas delimitadas a partir da variação dos parâmetros MUFP e AT para *upscaling*, o padrão e a reamostragem, na resolução de 30 metros, em comparação com a bacia extraída do MDT LiDAR de 1 m.

Essa sutil variação de área pode ser exemplificada a partir da Figura 49. De maneira geral, a bacia obtida pelo *upscaling* padrão apresentou uma delimitação semelhante à referência, havendo apenas divergências em seus limites, em especial no zoom 3 (Figura 49), causadas pela diferença de tamanho da célula de 30 m em relação ao pixel de 1m. Ao contrário do *upscaling*, as alterações causadas pela reamostragem são mais expressivas, em especial no exutório da bacia (Figura 49, zoom 4). No entanto, essa diferença não representou um grande aumento de área, sendo este inferior a 1%.

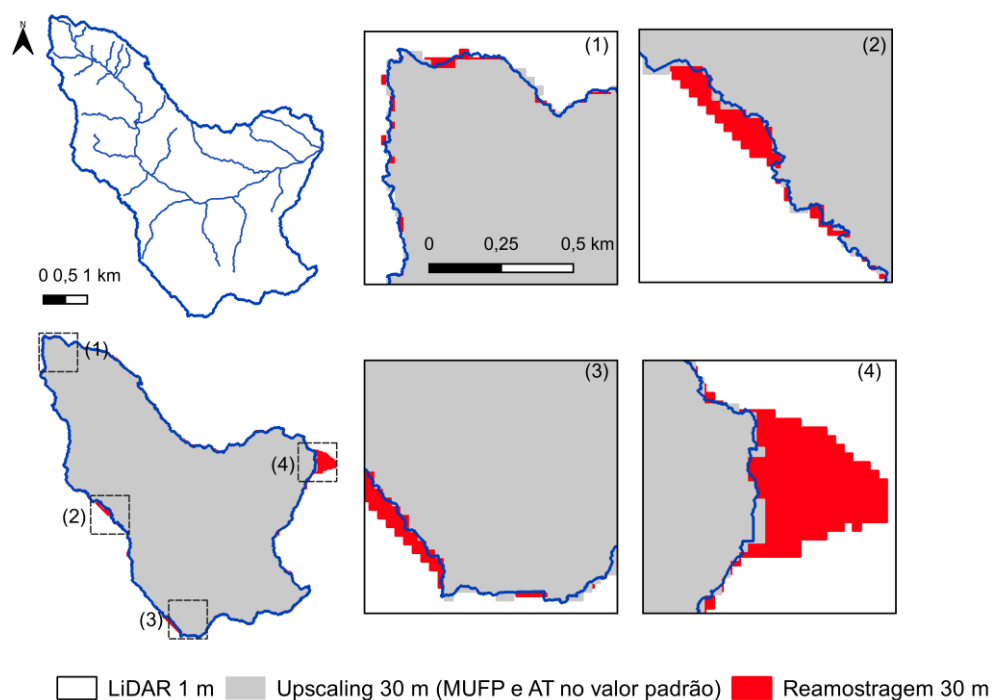


Figura 49 – Análise visual da delimitação de bacia hidrográfica na resolução espacial de 30 m.

5.6.2 Resolução espacial de 100 metros

Na resolução espacial de 100 metros, o aumento de área de drenagem em relação à bacia de referência ficou abaixo de 1,5%, sendo o maior valor observado de 1% (reamostragem). Para o *upsampling*, o maior aumento de área ocorreu ao adotar o MUFP como 10 e 14,3 metros, com uma área delimitada de 21,79 km² (0,26%) e 21,78 km² (0,22%), respectivamente (Figura 50). As demais variações concentraram um aumento de 0,08%, sendo de 0,13 % para o padrão e o MUFP de 15 metros.

Quanto à delimitação, as bacias na resolução de 100 metros apresentaram variações de omissão e inclusão mais expressivas do que para a resolução de 30 metros. Todavia, as variações não ultrapassaram 5%, como apresentado na Figura 51. A maior quantidade de área erroneamente incluída ou excluída foi no procedimento de reamostragem, com uma inclusão de aproximadamente 3%, e omissão de 2,2%.

O maior percentual de área omitida do *upsampling* foi para o MUFP de 10, 14,3 e 25 metros, com valores da ordem de 1,6%, e AT 7500 m², com omissão de 1,65%. Quanto à inclusão, esses mesmos parâmetros também se destacaram, com uma variação média de área de 1,8%.

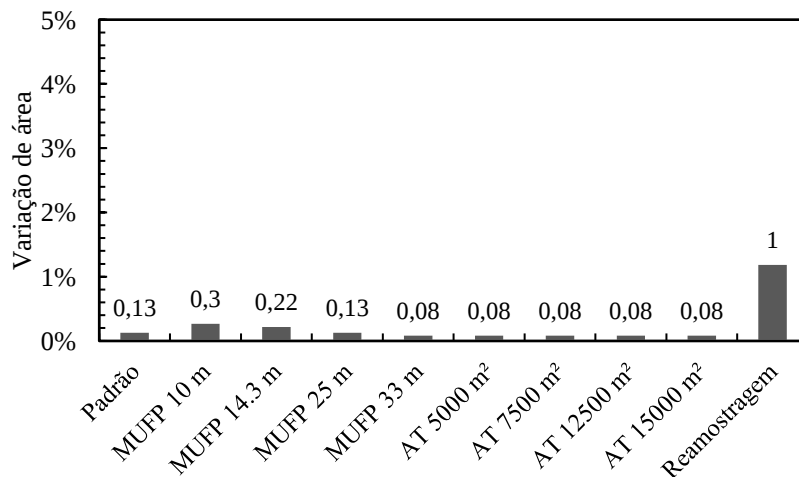


Figura 50 – Análise percentual da variação de área de drenagem após a aplicação das metodologias de mudança de escala para a resolução de 100 m.

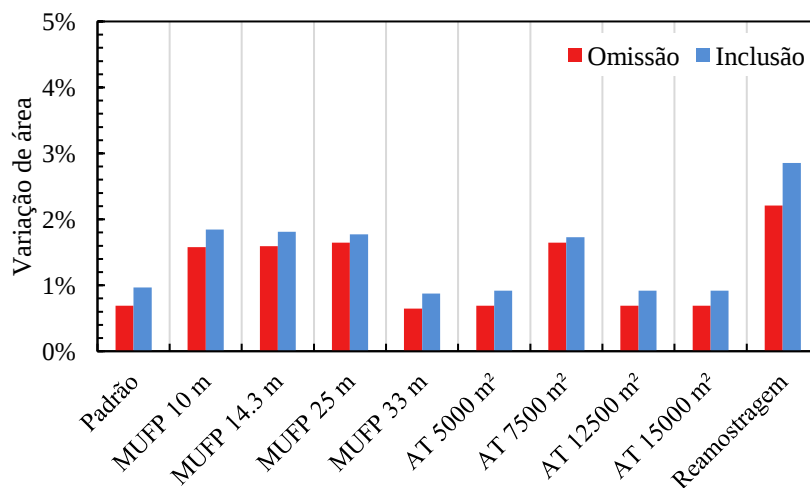
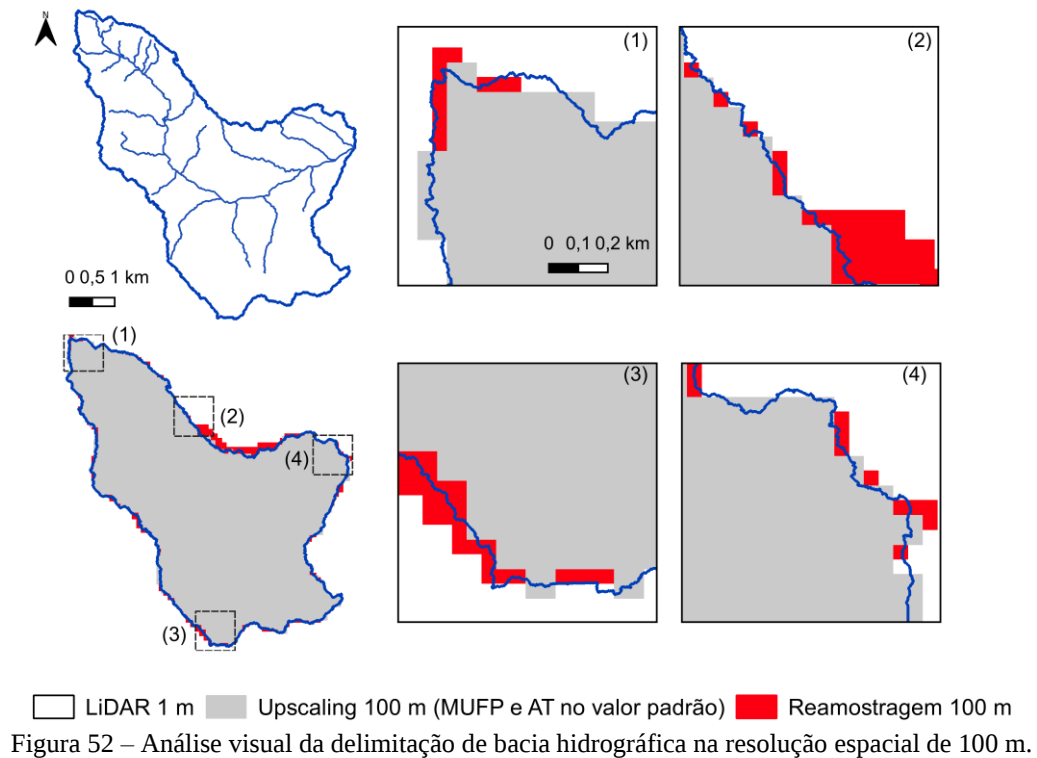


Figura 51 – Análise percentual do total de área de drenagem omitida ou incluída entre as bacias hidrográficas delimitadas a partir da variação dos parâmetros MUFP e AT, *upsaling* padrão e a reamostragem, na resolução de 100 metros, em comparação com a bacia extraída do MDT LiDAR de 1 m.

Na Figura 52 é possível observar a delimitação de bacia para a resolução de 100 m. Semelhante ao observado para a resolução de 30 m, a bacia resultado da reamostragem foi a que apresentou a delimitação mais discrepante em relação à referência, com destaque para os recortes 1, 2, 3 e 4.

Os resultados encontrados para área de drenagem corroboram com os achados descritos por Petroselli (2012). A autora aponta que, ao degradar um MDT LiDAR, perde-se poucas informações na escala da bacia hidrográfica. No entanto, pequenas variações podem influenciar na dinâmica dos processos hidrológicos.

Sousa e Paz (2017) destacam que alterações na delimitação da bacia hidrográfica, a exemplo da causada pela reamostragem, especialmente para a resolução de 100 m, podem vir a comprometer as estimativas de interceptação vegetal, evapotranspiração e infiltração. Wu, Li e Huang (2008) enfatizam a importância da área da bacia hidrográfica para a calibração do modelo hidrológico, tendo em vista sua aplicação, por exemplo, no cálculo de volumes de escoamento e na seleção de parâmetros.



6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

O procedimento de degradação do MDT deve prover ao usuário uma representação de qualidade da superfície, reduzindo os custos de processamento e armazenamento de dados. Nos últimos anos, a literatura se concentrou em estudar os procedimentos de mudança de escala de resoluções de 30 e 90 metros para resoluções da ordem de quilômetros, como 10, 20 e 30 km, por exemplo.

Acreditava-se que saltos de escala de 1 para 30 ou 100 m não causariam tanto impacto na representação da rede de drenagem. No entanto, os resultados apresentados neste trabalho demonstraram que claramente há impacto sob o traçado dos rios ao degradar de 1 para 30 m e de 1 para 100 m, tanto para a aplicação do *upscaling* das direções de fluxo, como para a reamostragem do MDT.

Foi possível concluir que a abordagem do *upscaling* de direções de fluxo resulta em redes de drenagem com melhor qualidade, quando comparada à reamostragem do MDT, como inferido pelas métricas de análise. Além disso, o aumento do salto de escala resultou em diferenças mais marcantes entre as duas metodologias analisadas. O desempenho superior do *upscaling* sobre a reamostragem se mostrou independente da escolha do valor dos parâmetros MUFP e AT, mediante as métricas de análise utilizadas.

A presença de parâmetros representa uma vantagem em métodos e modelos, pois permite uma maior flexibilidade ao usuário, calibrando-os de forma a encontrar os resultados mais satisfatórios. Por outro lado, também representa uma desvantagem, uma vez que necessita a realização de testes para definir um melhor ajuste.

No caso do COTAT+, percebeu-se que a variação dos parâmetros pouco influencia no traçado da rede de drenagem para as resoluções de 30 e de 100 metros. Logo, para a aplicação desse método de *upscaling* não se faz necessária a busca por parâmetros ajustados, sendo os valores indicados por Paz et al. (2006) suficientes para a obtenção de resultados promissores.

As redes de drenagem resultantes da reamostragem do MDT apresentaram maior distanciamento espacial em relação à rede de drenagem de 1 m (referência). Além disso, houve o deslocamento de confluências e maiores variações de comprimento, com

tendência de subestimar o traçado, ou seja, encurtar distâncias. As discrepâncias entre os métodos foram observadas principalmente na região baixa da bacia, onde há a presença de pequena variação de altitude.

Por outro lado, os resultados demonstraram baixa variação na delimitação das bacias hidrográficas geradas pelo *upscaling* e pela reamostragem, com impacto mínimo na área de drenagem diante da aplicação dos dois métodos. Nesse sentido, o método de mudança de escala não interfere de forma expressiva na delimitação de bacia hidrográfica, sendo indicado, para esta finalidade, a utilização da reamostragem do MDT, presente em diversos SIG.

6.2 Recomendações

O *upscaling* das direções de fluxo apresentou resultados satisfatórios ao representar a rede de drenagem extraída de MDT LiDAR de 1 metro. Dessa forma, recomenda-se que, em estudos onde há a necessidade de obter um traçado de qualidade da rede de drenagem, seja utilizado o *upscaling*, em especial o método COTAT+, testado neste trabalho.

Deslocamentos e distanciamento espacial, assim como a redução do comprimento do traçado de rios e de seus afluentes, podem vir a impactar severamente a realização de análises que utilizam essas informações como dado de entrada. O delineamento de manchas de inundação também pode sofrer alterações, assim como a antecipação incorreta de ondas de cheias simuladas, o menor amortecimento de vazões de pico, além de implicar nas estimativas de diluição de poluentes na água, por exemplo. Diante disso, recomenda-se que as redes de drenagem geradas nesta pesquisa sejam aplicadas na modelagem hidrológica com o intuito de avaliar os impactos de suas alterações sobre a quantificação de vazão e outros aspectos.

Na literatura são apresentados trabalhos que comparam os resultados do *upscaling* com redes de drenagem vetorizadas, extraídas a partir de imagens Landsat, a exemplo de Sousa e Paz (2017). No entanto, não há um comparativo entre a qualidade da representação da rede fluvial resultante do *upscaling* de dados LiDAR com redes de drenagem vetorizadas, que se aproximem do traçado real dos rios. Dessa forma, sugere-se que

estudos futuros se concentrem em avaliar a acurácia dos dados do MDT LiDAR, comparando-os a dados vetorizados.

Por fim, com a crescente disponibilidade de dados digitais a nível global, a exemplo do MERIT Hydro (YAMAZAKI et al., 2019), recomenda-se que trabalhos futuros se dediquem a avaliar o comparativo entre os resultados *upscaling* de 1 para 100 metros, por exemplo, com os resultados do processamento de MDE de 90 metros. Assim, a partir da aplicação de métricas de análise, será possível avaliar para quais situações deve-se utilizar o *upscaling* ou realizar o processamento básico do MDE para extração de redes de drenagem e delimitação de bacias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. T. A.; BARROS, V. H. O. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Riacho das Garças, Pernambuco, Brasil. **Revista do Semiárido de Visu**, v. 9, n. 2, pp. 131-142, 2021.

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. Bacias hidrográficas – **Riacho das Garças**. 2018. Disponível em: <<http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas/40-bacias-hidrograficas/210-bacia-riacho-das-garcas>>. Acesso em: jul. 22.

BANON, L. C. Árvores de decisão aplicadas à extração automática de redes de drenagem. 2013. 113 p. **Dissertação** (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

BARBER, C. P.; SHORTRIDGE, A. Lidar Elevation Data for Surface Hydrologic Modeling: Resolution and Representation Issues. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 32, n. 4, p. 401-410, 2005.

BARNES, R.; LEHMAN, C.; MULLA, D. An efficient assignment of drainage direction overflat surfaces in raster digital elevation models. **Computers & Geosciences**, v. 62, p. 128-135, 2014.

BECKER, J. H.; CENTENO, J. A. S. Avaliação de métodos de filtragem de nuvem de pontos derivados do sistema Laser Scanner aerotransportado para obtenção de MDT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 4, n. 65, p. 651-659, 2013.

BELL, V. A. et al. How might climate change affect river flows across the Thames Basin? An area-wide analysis using the UKCP09 Regional Climate Model ensemble. **Journal of Hydrology**, v. 442-443, p. 89-104, 2012.

BEVEN, K. J.; KIRBY, M. J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Science Bulletin**, v. 24, p. 43-69, 1979.

BUARQUE, D. C. et al. 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.

CAVALLI, M.; TAROLLI, P.; MARCHI, L.; FONTANA, G. D. The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. **Catena**, v. 73, p. 249-260, 2008.

CHEN, Y.; WILSON, J. P.; ZHU, Q.; ZHOU, Q. Comparison of drainage-constrained methods for DEM generalization. **Computers & Geosciences**, v. 48, p. 41-49, 2012.

CHEN, Z.; GAO, B.; DEVEREUX, B. State-of-the-Art: DTM generation on using Airborne LIDAR data. **Sensors**, v. 17, n. 1, 2017.

CIRILO, J. A. et al. 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.

CIRILO, J. A. et al. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. In: 12 SILUBESA - **Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**, Brasília, 2015.

COLLISCHONN, W.; et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878-895. 2007a.

COLLISCHONN, W. et al. Modelo hidrológico distribuído para previsão de vazões incrementais na Bacia do Rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, 2007b.

COURTY, L. G. et al. Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes. **Journal of Flood Risk Management**, v. 12, n. S1, 2019.

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, p. 17-28, 2009.

EILANDER, D. et al. A hydrography upscaling method for scale invariant parametrization of distributed hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, pp. 5287-5313, 2021.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 27, n. 5, p. 667-986, 1991.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; SORRIBAS, M. V.; PONTES, P. R. M. Sobre o início da rede de drenagem definida a partir dos Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 241-257, 2013.

FEKETE, B. M. *et al.* Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: Development, analysis, and control of error. **Water Resources Research**, v. 37, n. 7, p. 1955-1967, 2001.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da Bacia do Arroio Cancela – RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 99-108, 2006.

GÖRÜM, T. Landslide recognition and mapping in a mixed forest environment from airborne LiDAR data. **Engineering Geology**, v. 258, 105155, 2019.

GUTH, P. L. *et al.* Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. **Remote Sensing**, v. 13, 3581, 2021.

HIRT, C. **Digital Terrain Models**. In: Encyclopedia of Geodesy. Berlim, Heidelberg: Springer, 2015.

JABOYEDOFF, M. *et al.* Use of LIDAR in landslide investigations: a review. **Nat. Hazards**, v. 61, p. 5–28, 2012.

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

JONES, R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 9, p. 1051-1060, 2002.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. A new method for surface reconstruction from laser scanner data. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 53, p. 193-203, 1998.

LA TORRE, A. M.; BLYTH, E. M.; WEEDON, G. P. Using observed river flow data to improve the hydrological functioning of the JULES land surface model (vn4.3) used for regional coupled modelling in Great Britain (UKC2). **Geoscientific Model Dev.**, v. 12, p. 765,784, 2019.

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.

LIMA, D. M. *et al.* Avaliação da qualidade da rede de drenagem fornecida pelo MERIT Hydro: uma base de dados com a rede hidrográfica disponibilizada em escala global. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 2, 2022.

LIU, X. Airborne LiDAR for DEM Generation: some critical issues. **Progress in Physical Geography**, v. 32, n. 1, p. 31-49, 2008.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos Hidrológicos: Conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, 2012.

MELGAÇO, L. M.; SOUZA FILHO, C. R.; STEINMEYER, M. Comparação entre modelos digitais de elevação gerados por sensores ópticos e por radar. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** p. 1215-1220, 2005. Goiânia: INPE.

MENDONÇA, R. L.; MARÇAL, C. L. D.; PAZ, A. R. Efeito da resolução espacial e da fonte de dados de elevação sobre a caracterização da rede de drenagem. XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** p. 231-234, 2019. Santos: INPE.

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.

MENDONÇA, R. L.; PORTUGAL, J. L. Filtragem de dados LiDAR de área com relevo acidentado para geração de Modelo Digital do Terreno. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, 2018.

MORETTI, G.; ORLANDINI, S. Hydrography-driven coarsening of grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v. 54, n. 5, p. 3654-3672, 2018.

MUHADI, N. A. et al. The use of LiDAR-Derived DEM in flood applications: A review. **Remote Sensing**, v. 12, n. 14, 2020.

NAZERI, B.; CRAWFORD, M. Detection of outliers in LiDAR data acquired by multiple platforms over Sorghum and Maize. **Remote Sensing**, v. 13, n. 21, 2021.

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

OLIVERA, F.; RAINA, R. Development of large-scale gridded river networks from vector stream data. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 39, n. 5, p. 1235-1248, 2007.

O'LOUGHLIN, F. E. et al. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 49-59, 2016.

ORLANDINI, S. et al. Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 39, n. 6, 2003.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; SILVEIRA, A. L. L. Improvements in large-scale drainage networks derived from digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 42, n. 8, 2006.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; RISSO, A.; MENDES, C. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 11, p. 1584-1596, 2008.

PERH. **Atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco**. 2022. Disponível em: <<https://www.perhpe.com.br/>>. Acesso em: jul. 22.

PERNAMBUCO. Governo do Estado de Pernambuco - **Pernambuco Tridimensional**, 2016. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: jul. 22.

PETROSELLI, A. LIDAR Data and Hydrological Applications at the Basin Scale. **GIScience & Remote Sensing**, v. 49, n. 1, 2012.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 4, pp. 241-262, 2003.

REDDY, G. P. O.; KUMAR, N.; SAHU, N.; SINGH, S. K. Evaluation of automatic drainage extraction thresholds using ASTER GDEM and Cartosat-1 DEM: A case study from basaltic terrain of Central India. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 21, n. 1, pp. 95-104, 2018.

REED, S. M. Deriving flow directions for coarse-resolution (1–4 km) gridded hydrologic modeling. **Water Resources Research**, v. 39, n. 9, 2003.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, pp. 3469-3481, 2008.

REUTER, H. I. et al. A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy, and terrain parameters. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, pp. V-240-V-243, 2009.

ROCHA, P. C.; SANTOS, A. A. Análise hidrológica em bacias hidrográficas. **Mercator (Fortaleza)**, v. 17, 2018.

ROSENQVIST, A. et al. ALOS PALSAR: A pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 11, pp. 3307-3316, 2007.

ROSIM, S. et al. Drainage network definition for low resolution DEM obtained from drainage network extracted from high resolution DEM using upscaling processes. *In*: LOLLINO, G. et al. **Engineering Geology for Society and Territory**, v. 3, p. 271-274, 2015.

RUEDA, A.; NOGUERA, J. M.; MARTÍNEZ-CRUZ, C. A flooding algorithm for extracting drainage networks from unprocessed digital elevation models. **Computers & Geosciences**, v. 59, p. 116-123, 2013.

SARAF, A. K. et al. GIS based surface hydrological modelling in identification of groundwater recharge zones. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 4, 2004.

SARAIVA, A. G. S.; PAZ, A. R. Multi-step change of scale approach for deriving coarse-resolution flow directions. **Computers & Geosciences**, v. 68, p. 53-63, 2014.

SHAW, D. A.; MARTZ, L. W.; PIETRONIRO, A. A methodology for preserving channel flow networks and connectivity patterns in large-scale distributed hydrological models. **Hydrol. Process.**, v. 19, n. 1, p. 149-168, 2005.

SOUSA, T. M. I.; PAZ, A. R. How to evaluate the quality of coarse-resolution DEM-derived drainage networks. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 19, p. 3379-3395, 2017.

SOUSA FILHO, C. R.; CRÓSTA, A. P. Geotecnologias aplicadas à geologia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 147-152, 2003.

TADONO, T. et al. Precise global DEM Generation by ALOS PRISM. *In*: **Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, II-4, pp. 71-76, 2014.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, pp. 309-319, 1997.

TAROLLI, P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. **Geomorphology**, v. 216, p. 295-312, 2014.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, pp. 300-309, 2012.

VAZE, J.; TENG, J.; SPENCER, G. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, p. 1086-1098, 2010.

VOSSelman, G. **Slope based filtering of laser altimetry data**. In: International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Amsterdã, v. 33, p. 935-942, 2000.

WANG, M.; HJELMFELT, A. T.; GARBRECHT, J. DEM Aggregation for watershed modeling. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 36, p. 579-584, 2000.

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, 2006.

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. 1022-10929, 2016.

WU, H.; KIMBALL, J. S.; MANTUA, N.; STANFORD, J. Automated upscaling of river networks for macroscale hydrological modeling. **Water Resources Research**, v. 47, n. 3, 2011.

WU, M. et al. Impacts of DEM resolution and area threshold value uncertainty on the drainage network derived using SWAT. **African Journals Online**, v. 43, n. 3, 2017.

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, p. 210-223, 2008.

YAMAZAKI, D. et al. MERIT Hydro: A High-Resolution Global HydrographyMap Based on Latest Topography Dataset. **Water Resources Research**, v. 55, n. 6, p. 4509-5175, 2019.

YANG, C.; ZHAO, M.; WANG, C.; DENG, K.; JIANG, L.; XU, Y. Urban road DEM construction based on geometric and semantic characteristics. **Earth Science Informatics**, v. 13, pp. 1369-1382, 2020.

YANG, L.; MENG, X.; ZHANG, X. SRTM DEM and its applications advances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 14, 2011.

YANG, P.; AMES, D. P.; FONSECA, A.; ANDERSSON, 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.

ZHANG, K. et al. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 4, p. 872-882, 2003.

ZHAO, Z.; BENOY, G.; CHOW, T. L.; REES, H. W.; DAIGLE, J. L.; MENG, F. R. Impacts of accuracy and resolution of conventional and LiDAR based DEMs on parameters used in hydrologic modeling. **Water Resources Management**, v. 244, p. 1363-1380, 2010.

ZHOU, Q.; CHEN, Y. Generalization of DEM for terrain analysis using a compound method. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 38-45, 2011.

ZHOU, Q. **Digital Elevation Model and Digital Surface Model**. In: International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology (eds D. Richardson, N. Castree, M.F. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu and R.A. Marston), 2017.

ZINK, M. et al. TanDEM-X: The New Global DEM Takes Shape. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 2, n. 2, p. 8-23, 2014.