



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA URBANA E AMBIENTAL



**AVALIAÇÃO DE ERROS E DE EFEITOS DE ESCALA PARA A REDE DE
DRENAGEM DETERMINADA DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE) DO
SRTM**

ALZIRA GABRIELLE SOARES SARAIVA

JOÃO PESSOA – PB
2013

ALZIRA GABRIELLE SOARES SARAIVA

**AVALIAÇÃO DE ERROS E DE EFEITOS DE ESCALA PARA A REDE DE
DRENAGEM DETERMINADA DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE) DO
SRTM**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Urbana e Ambiental da Universidade Federal da
Paraíba, como requisito para obtenção do título
de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz

JOÃO PESSOA – PB
2013

S243a Saraiva, Alzira Gabrielle Soares.

Avaliação de erros e de efeitos de escala para a rede de drenagem determinada do Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM / Alzira Gabrielle Soares Saraiva.- João Pessoa, 2013.

120f.

Orientador: Adriano Rolim da Paz

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT

1. Engenharia urbana e ambiental. 2. Rede de drenagem.
3. Mudança de escala. 4. Direção de fluxo.

UFPB/BC

CDU: 624:504(043)

ALZIRA GABRIELLE SOARES SARAIVA

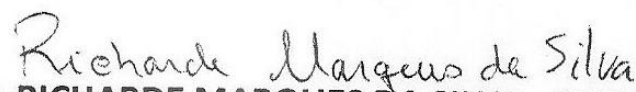
**AVALIAÇÃO DE ERROS E DE EFEITOS DE ESCALA PARA A REDE DE
DRENAGEM DETERMINADA DO MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO (MDE) DO
SRTM**

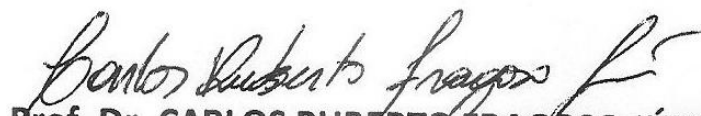
Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para obtenção do título de Mestre.

João Pessoa, 10 de maio de 2013.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. ADRIANO ROLIM DA PAZ – UFPB
Orientador


Prof. Dr. RICARDE MARQUES DA SILVA - UFPB
Examinador Interno


Prof. Dr. CARLOS RUBERTO FRAGOSO JÚNIOR – UFAL
Examinador Externo

JOÃO PESSOA – PB

2013

ii

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus,
porque sem Ele nada poderia fazer.

Aos meus pais, pelo amor concedido e por
sempre incentivar-me nos estudos.

Ao meu namorado, por toda a compreensão e
amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele eu nada posso fazer. Ele é o meu refúgio e fortaleza, em todos os momentos, nEle posso descansar. A minha alma se alegra no Senhor, por todos os seus benefícios. Faço minhas as palavras do salmista Davi, no verso primeiro e segundo do salmo 103 que diz: “Bendize, ò minha alma, ao Senhor, e tudo que há em mim bendiga o seu santo nome. Bendize, ò minha alma, ao Senhor, e não te esqueças de nenhum de seus benefícios.”

Aos meus pais, Genário e Lúcia, que sempre me incentivaram nos estudos, apoiando-me no que era preciso, pelo amor, paciência e orações. Vos amo muito.

À minha vovó, Maria da Neves, pelo incentivo e apoio.

Às minhas irmãs Danielly e Cibelle, que me ajudaram em oração e nos momentos de cansaço sempre me deram palavras de força. E à minha pequenina sobrinha Camilla.

Ao meu amado namorado, Laio, por sua compreensão e amor, que me ajudou em todos os momentos.

Ao professor, Dr. Adriano Rolim da Paz, pela oportunidade de poder ampliar meu leque de conhecimento. Agradeço por toda a assistência, incentivo, pelo aprendizado adquirido e por meio desse, a contribuição na minha vida acadêmica.

Aos meus colegas e amigos da pós-graduação, em especial a Antônio Henrique e a Valeriano que compartilharam juntamente comigo dessa caminhada.

Ao Antônio Felix e à Clara Gadelha pela contribuição na pesquisa.

Às minhas amigas, Anna Raquel, Thaís Benevides, Renata Rafael, Aynara Dilma e a professora Dr. Ruceline Paiva Lins, pelas palavras de força e por vossas orações.

Ao Luiz Eduardo pela assistência na impressão do trabalho.

Aos examinadores, professores, Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior (UFAL) e Dr. Richarde Marques da Silva (UFPB), por terem aceitado o convite para serem membros da banca.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPB.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro fornecido no desenvolvimento desta pesquisa.

E à todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

Muito obrigada!

“Há um rio cujas correntes alegam a cidade de Deus, o santuário das moradas do Altíssimo. Deus está no meio dela; não será abalada; Deus ajudará ao romper da manhã.”

(Salmos: 46. 4 e 5)

RESUMO

O MDE do SRTM tem sido largamente utilizado na derivação da rede drenagem e aplicado a diversos tipos de estudos ambientais. No entanto, muitas vezes não é possível trabalhar com a sua resolução original. Isso ocorre quando o estudo é aplicado a grandes áreas e devido ao elevado processamento computacional é necessário a mudança de escala para baixa resolução. Dependendo do método utilizado para a derivação da rede de drenagem obtida de baixa resolução, pode-se adquirir um produto de melhor ou de pior qualidade. A escolha incorreta do método aliada a perda de informação existente nesse processo pode resultar em uma rede incoerente quando comparada a uma rede de drenagem considerada como referência. Esta pesquisa identificou erros nos traçados e nas características físicas de quatro bacias hidrográficas (Paraíba (20.000 km²), São Francisco (640.000 km²), Tapajós (500.000 km²) e Uruguai (207.000 km²)) e nos seus principais afluentes de forma qualitativa e quantitativa. As comparações das redes extraídas das imagens do SRTM em diferentes escalas e métodos (reamostragem, *upscaling* direto, *upscaling* gradual) foram realizadas em relação à rede de drenagem de alta resolução obtida do MDE para as análises qualitativas e para as comparações quantitativas com a rede vetorizada das imagens do ETM+/ LANDSAT 7. Verificou-se que os traçados da drenagem obtidos por reamostragem apresentaram várias incoerências principalmente quando a mudança de escala foi maior, esses erros refletiram sobre área, formato de bacias e traçados da rede de drenagem. Os erros foram mais graves nas bacias de maior área de drenagem. Já as redes de drenagem obtidas por *upscaling* de direções de fluxo foram de melhor qualidade para mudança de escala por essas se apresentarem mais coerentes com a drenagem de alta resolução. O método de *upscaling* gradual foi o que apresentou melhor desempenho em três bacias das quatro analisadas. As análises quantitativas referentes a área e distância média entre as redes de drenagem, extraída do MDE, e a vetorizada da imagem LANDSAT, apresentaram-se coerentes com as análises qualitativas, apontando o método de *upscaling* de direções de fluxo na modalidade gradual com melhor desempenho e o método de reamostragem com os piores resultados. Observou-se que as áreas das bacias mostraram-se coerentes com a análise visual, indicando que os métodos de *upscaling* nas modalidades direta e gradual se aproximaram mais das bacias de alta resolução e apresentaram valores muito próximos entre si, tanto qualitativamente quanto quantitativamente. A modalidade direta de *upscaling* foi a que apresentou melhor desempenho e o procedimento de reamostragem foi o que apresentou mais incoerências. Por se descaracterizar das bacias de referência, principalmente para o São Francisco e Tapajós para as quais se trabalhou com mudança de escala maior. Percebeu-se que a influência dos métodos e da mudança de escala sobre os valores dos comprimentos e sinuosidade dos rios, algumas vezes repercutiram sobre a métrica gerada não conseguindo expressar a real qualidade da rede de drenagem analisada, mascarando o resultado. Isso pode ser evidenciado quando confrontado a análise estatística e a qualitativa para o método de reamostragem. No entanto, apesar de encontrar alguns rios com essas incoerências, os *upscaling* direto e gradual conseguiram apresentar um maior número de rios com melhor desempenho. Conclui-se que independente das características das bacias estudadas, o método de reamostragem do MDE não é o procedimento mais adequado na obtenção de redes de drenagem de baixa resolução espacial. O método de *upscaling* de direções de fluxo nas modalidades direta e gradual são mais indicados para essa finalidade, sendo o gradual o que apresentou melhor desempenho na avaliação dos traçados para as bacias estudadas nesta pesquisa.

Palavras-chave: Rede de drenagem, Mudança de escala, direção de fluxo

ABSTRACT

The SRTM-DEM has been widely used for deriving drainage networks and for several different environmental studies. However, sometimes it is not possible to work with the original spatial resolution of the available DEM, mainly when the study area is large owing to the increase in computational cost, requiring the DEM to be resampled to a coarse resolution. According to the method used for deriving coarse-resolution drainage networks, the quality of the result can be quite different. The wrong choice of the method together with the inherent loss of information within this process may result in a river drainage network incoherent relative to an available network considered as correct. For this reason, this research aimed at identifying the errors present in flow paths and in the physical characteristics of four large-scale watersheds (Paraíba (20.000 km²), São Francisco (640.000 km²), Tapajós (500.000 km²) and Uruguai (207.000 km²)) and its major tributaries in both qualitative and quantitative ways. The comparisons between the drainage networks extracted from DEMs with different spatial resolutions and using different methods (DEM resampling, direct upscaling, multi-step upscaling) were carried out relatively to a high-resolution drainage network obtained from processing the original SRTM-DEM for the qualitative analysis, while for the quantitative analysis the drainage network manually digitized over ETM+/ LANDSAT 7 satellite images was used. The flow paths obtained through the methods of DEM resampling showed strong incoherencies mostly when the change in scale was large, and these errors influenced the area and shape of watersheds and also the quality of the derived drainage network, being stronger for the larger watersheds. The drainage networks obtained through the flow directions upscaling were of better quality because they reproduced more closely the high-resolution network. The multi-step upscaling method showed the better performance for three of the four study areas. The quantitative analysis relative to area and mean distance measured between the DEM-derived drainage network and that one obtained from LANDSAT images showed to be coherent to the qualitative analysis, indicating the multi-step upscaling method as the one of better performance, and the resampling procedure as the worst one. The results in terms of watershed areas comparison were coherent to the visual inspection, showing that the upscaling process reproduced quite well the values obtained in the high resolution, both quantitatively and qualitatively. The direct upscaling procedure obtained the best performance while the resampling method resulted in the largest inconsistencies regarding these two aspects, resulting in watershed delimitation totally different from the actual, mostly for São Francisco and Tapajós watersheds, in which the change in scale was larger. The influence of the methods used and of the change in scale over the length and sinuosity of river reaches was detected, sometimes resulting that the result was not very well presented. This can be highlighted when the numerical analysis is compared to the qualitative analysis for results obtained with the resampling procedure. However, although inconsistencies were presented for some river reaches, the upscaling procedure was able to have the largest number of river reaches with the best results. It can be concluded that independent on the characteristics of the watershed to be studied, the resampling procedure is not an adequate method for obtaining coarse-resolution drainage networks. The flow directions upscaling procedure is the most recommend method to be used in this situation, and the multi-step version of this method is the one with best performance when evaluating the flow paths for the study cases of this research.

Keywords: drainage networks, change in scale, flow direction

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Escolha da direção de fluxo pela maior declividade, indicando em qual sentido ocorre a drenagem. Possíveis direções de fluxo para um dos oito pixels ou célula.....	27
Figura 2. (a) Geração de linhas irreais na determinação da rede de drenagem em áreas planas pelo método D8. (b) Minimização de erros gerados na extração da rede de drenagem em áreas planas com método D8 utilizando um fator de aleatoriedade.	27
Figura 3. Comparação entre redes de drenagem determinadas na resolução espacial de 2,5 km (linhas grossas pretas) por diferentes algoritmos de upscaling e a rede de drenagem considerada de referência (linhas finas azuis).....	30
Figura 4. Comparação entre as redes de drenagem de referência (linha contínua) e a extraída do MDE do SRTM (linha tracejada).....	31
Figura 5. Critérios de avaliação de similaridade entre rede de drenagem, por diferentes métodos: (a) área da bacia, (b) distância média.	32
Figura 6. Organograma da metodologia do trabalho	35
Figura 7. Localização da bacia do rio Paraíba no Estado da Paraíba.....	37
Figura 8. Localização da bacia do rio São Francisco.....	38
Figura 9. Localização da bacia do rio Tapajós.	39
Figura 10. Localização da bacia do rio Uruguai.	40
Figura 11. (A) MDE referente às 12 cenas do SRTM (malha de 5° x 5°) selecionadas para a região da bacia do rio São Francisco na resolução espacial de 200 m. (B) Aplicação de máscara na região de mar.....	46
Figura 12. Determinação do pixel exutório no algoritmo COTAT+. (a): Célula de baixa resolução. (b): Zoom em uma célula do modelo hidrológico. O pixel I possui maior área de drenagem acumulada, mas por ter comprimento do curso d'água dentro da célula menor do que CMM é rejeitado para pixel exutório; pelo mesmo motivo o pixel III é rejeitado; o pixel IV é então testado e aceito para pixel exutório da célula.....	50
Figura 13. Definição da direção de fluxo nas células (baixa resolução) pelo algoritmo COTAT+, com base nas informações dos pixels (alta resolução). Na célula 2: (a) O Pixel Exutório (PE2) drenará para a célula 3 se a diferença das áreas de drenagem acumuladas do PE2 (pixel inicial) e o PE3 (pixel testado) for maior que o valor pré-estabelecido da AIM (b); A célula 2 só drenará para célula 4, caso a condição anterior não seja atendida encontrando o pixel PE4 como exutório (c).....	50
Figura 14. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Paraíba com mudança de escala de 100 m para 1 km pelo método de reamostragem.	57

Figura 15. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Paraíba com mudança de escala de 100 m para 10 km pelo método de reamostragem.	57
Figura 16. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio São Francisco com mudança de escala de 200 m para 1 km pelo método de reamostragem.....	58
Figura 17. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio São Francisco com mudança de escala de 200 m para 5 km pelo método de reamostragem.....	58
Figura 18. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio São Francisco com mudança de escala de 200 m para 50 km pelo método de reamostragem.....	59
Figura 19. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Tapajós com mudança de escala de 200 m para 1 km pelo método de reamostragem.	60
Figura 20. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Tapajós com mudança de escala de 200 m para 5 km pelo método de reamostragem.	60
Figura 21. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Tapajós com mudança de escala de 200 m para 50 km pelo método de reamostragem.	61
Figura 22. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Uruguai com mudança de escala de 100 m para 1 km pelo método de reamostragem.	62
Figura 23. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Uruguai com mudança de escala de 100 m para 5 km pelo método de reamostragem.	62
Figura 24. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Uruguai com mudança de escala de 100 m para 30 km pelo método de reamostragem.	63
Figura 25. Visão geral da rede de drenagem da bacia do Rio Paraíba pelo método de <i>upscaling</i> direto (A) e gradual (B) na resolução 10 km.	64
Figura 26. Método de <i>upscaling</i> direto (à esquerda) e gradual (à direita), na resolução de 10 km, com grau de relevância alto para o segunda modalidade em trecho do rio Paraíba.	66
Figura 27. Método de <i>upscaling</i> direto (à esquerda) e gradual (à direita), na resolução de 10 km, com grau de relevância alto para a primeira modalidade, em trecho do rio Paraíba.	67
Figura 28. Método de <i>upscaling</i> direto (à esquerda) e gradual (à direita), na resolução de 10 km, com grau de relevância baixo para a primeira modalidade, em trecho do rio Paraíba.....	67
Figura 29 Método de <i>upscaling</i> direto (à esquerda) e gradual (à direita), na resolução de 10 km, com grau de relevância equivalente para as duas modalidades, em trecho do rio Paraíba.....	68

Figura 30. Visão geral da rede de drenagem da bacia do Rio São Francisco pelo método de <i>upscaling</i> direto (A) e gradual (B) na resolução 50 km.	69
Figura 31. Visão geral da rede de drenagem da bacia do Rio Tapajós pelo método de <i>upscaling</i> direto (à direita) e gradual (à esquerda) na resolução 50 km.	71
Figura 32. Visão geral da rede de drenagem da bacia do Rio Uruguai pelo método de <i>upscaling</i> direto (A) e gradual (B) na resolução espacial 30 km.	73
Figura 33. Rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Paraíba, considerados como base.....	75
Figura 34. Formação de áreas entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Paraíba.	76
Figura 35. Distância média entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Paraíba.	76
Figura 36. Rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio São Francisco, considerados como base.....	77
Figura 37. Formação de áreas entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio São Francisco.....	78
Figura 38. Distância média entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio São Francisco.....	79
Figura 39. Mapa de área entre o trecho do baixo rio São Francisco, obtido pelo método de reamostragem na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.....	80
Figura 40. Mapa de área entre o trecho do baixo rio São Francisco, obtido pelo método de <i>upscaling</i> direto na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.	80
Figura 41. Mapa de área entre o trecho do baixo rio São Francisco, obtido pelo método de <i>upscaling</i> gradual na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT...	81
Figura 42. Mapa de área entre o trecho do baixo rio São Francisco, de alta resolução (200 m), e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.....	81
Figura 43. Rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Tapajós, considerados como base.....	82
Figura 44. Formação de áreas entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Tapajós.	83

Figura 45. Distância média entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Tapajós.	84
Figura 46. Mapa de área entre o rio Tapajós, obtido pelo método de reamostragem na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.....	85
Figura 47. Mapa de área entre o rio Tapajós, obtido pelo método de <i>upsampling</i> direto na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.....	85
Figura 48. Mapa de área entre o rio Tapajós, obtido pelo método de <i>upsampling</i> gradual na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.....	86
Figura 49. Mapa de área entre o rio Tapajós, de alta resolução (200 m), e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.	86
Figura 50. Rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Uruguai, considerados como base.....	87
Figura 51. Formação de áreas entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Uruguai.	88
Figura 52. Distância média entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Uruguai.	89
Figura 53. Comparação visual das áreas da bacia do rio Paraíba em diferentes métodos e resoluções.....	91
Figura 54. Gráfico do erro percentual da área da bacia do rio Paraíba em diferentes métodos em relação à de alta resolução espacial (100 m).	91
Figura 55. Comparação visual das áreas da bacia do rio São Francisco em diferentes métodos e resoluções.	92
Figura 56. Gráfico de erro percentual da área da bacia do rio São Francisco em diferentes métodos em relação à de alta resolução espacial (200 m).	92
Figura 57. Comparação visual das áreas da bacia do rio Tapajós em diferentes métodos e resoluções.....	94
Figura 58. Gráfico do percentual de erro da área da bacia do rio Tapajós em diferentes métodos em relação à de alta resolução espacial (200 m).	94
Figura 59. Comparação visual das áreas da bacia do rio Uruguai em diferentes métodos e resoluções.....	95
Figura 60. Gráfico do percentual de erro da área da bacia do rio Uruguai em diferentes métodos em relação à de alta resolução espacial (100 m).	96

Figura 61. Gráfico do percentual de erro dos comprimentos dos rios da bacia do Paraíba em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.....	97
Figura 62. Gráfico do percentual de erro dos comprimentos dos rios da bacia do São Francisco em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.....	98
Figura 63. Mapa da distribuição dos rios vetorizados das imagens LANDSAT e da rede extraída das imagens SRTM pelo método de reamostragem.....	99
Figura 64. Gráfico do percentual de erro dos comprimentos dos rios da bacia do Tapajós em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.....	100
Figura 65. Gráfico do percentual de erro dos comprimentos dos rios da bacia do Uruguai em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.....	102
Figura 66. Gráfico do percentual de erro da sinuosidade dos rios da bacia do Paraíba em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.....	104
Figura 67. Gráfico do percentual de erro da sinuosidade dos rios da bacia do São Francisco em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.....	105
Figura 68. Gráfico do percentual de erro da sinuosidade dos rios da bacia do Tapajós em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.....	107
Figura 69. Gráfico do percentual de erro da sinuosidade dos rios da bacia do Uruguai em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Rotinas computacionais utilizadas na pesquisa.....	36
Tabela 2. Imagens LANDSAT utilizadas na vetorização das redes de drenagem de referência.....	42
Tabela 3. Valores de área acumulada mínima adotados para cada rede de drenagem das bacias estudadas.	47
Tabela 4. Resoluções utilizadas no método de reamostragem para as bacias estudadas ..	48
Tabela 5. Valores adotados no <i>upscaling</i> direto para os parâmetros do algoritmo COTAT+.....	52
Tabela 6. Valores adotados no <i>upscaling</i> gradual e fornecidos aos parâmetros do COTAT+.....	53
Tabela 7. Comparação do desempenho entre os procedimentos de <i>upscaling</i> direto e gradual para a bacia do rio Paraíba.	65
Tabela 8. Grau de relevância entre as diferenças ocorridas nos resultados dos métodos de <i>upscaling</i> de direções de fluxo para a bacia do rio Paraíba.	65
Tabela 9. Comparação do desempenho entre os procedimentos de <i>upscaling</i> direto e gradual para a bacia do rio São Francisco.....	69
Tabela 10. Grau de relevância entre as diferenças ocorridas nos resultados dos métodos de <i>upscaling</i> de direções de fluxo para a bacia do rio São Francisco.....	70
Tabela 11. Comparação do desempenho entre os procedimentos de <i>upscaling</i> direto e gradual para a bacia do rio Tapajós.	71
Tabela 12. Grau de relevância entre as diferenças ocorridas nos resultados dos métodos de <i>upscaling</i> de direções de fluxo para a bacia do rio Tapajós.....	72
Tabela 13. Comparação do desempenho entre os procedimento de <i>upscaling</i> direto e gradual para a bacia do rio Uruguai.	72
Tabela 14. Grau de relevância entre as diferenças ocorridas nos resultados dos métodos de <i>upscaling</i> de direções de fluxo para a bacia do rio Uruguai.	74
Tabela 15. Percentual de erro da área da bacia do rio Paraíba em diferentes métodos comparada à bacia de alta resolução.	90
Tabela 16. Percentual de erro da área da bacia do rio São Francisco em diferentes métodos comparada à bacia de alta resolução.	93

Tabela 17. Percentual de erro da área da bacia do rio Tapajós em diferentes métodos comparada à bacia de alta resolução.	93
Tabela 18 . Percentual de erro da área da bacia do rio Uruguai em diferentes métodos comparada à bacia de alta resolução.	95
Tabela 19. Valores dos comprimentos dos rios em quilômetros para a bacia do rio Paraíba em diferentes métodos comparada a rede vetorizada da imagem LANDSAT.	97
Tabela 20. Valores dos comprimentos dos rios em quilômetros para a bacia do rio São Francisco em diferentes métodos comparada a rede vetorizada da imagem LANDSAT.	98
Tabela 21. Valores dos comprimentos dos rios em quilômetros para a bacia do rio Tapajós em diferentes métodos comparada a rede vetorizada da imagem LANDSAT.	99
Tabela 22. Valores dos comprimentos dos rios em quilômetros para a bacia do rio Uruguai em diferentes métodos comparada a rede vetorizada da imagem LANDSAT.	101
Tabela 23. Valores da sinuosidade dos rios para a bacia do rio Paraíba em diferentes métodos comparados aos resultados obtidos para a rede vetorizada da imagem LANDSAT.	103
Tabela 24. Valores da sinuosidade dos rios para a bacia do rio São Francisco em diferentes métodos comparados aos resultados obtidos para a rede vetorizada da imagem LANDSAT.	105
Tabela 25. Valores de sinuosidade dos rios para a bacia do rio Tapajós em diferentes métodos comparados aos resultados obtidos para a rede vetorizada da imagem LANDSAT.	106
Tabela 26. Valores da sinuosidade dos rios para a bacia do rio Uruguai em diferentes métodos comparados aos resultados obtidos para a rede vetorizada da imagem LANDSAT.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIM- Área Incremental Mínima

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CMM - Caminho Mínimo de Montante

COTAT+ - Cell Outlet Trancing with an Area Theshold

D8 - Deterministic eight neighbours

EGM 96 - Earth Gravitational Model 1996

ETM + - Enhanced Thematic Mapper Plus

GPS - Global Positioning System

JAXA - Agência Espacial Japonesa

LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite

MDE - Modelo Digital de Elevação

MNT - Modelo Numérico do Terreno

NASA - Agência Espacial Americana

NINA - National Imagery and Mapping Agency

PA - Pará

PB - Paraíba

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

WGS 84 - World Geographic System 1984

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.2 OBJETIVOS	21
2 PROCESSAMENTO DO MDE DO SRTM NA EXTRAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM	22
2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS BACIAS HIDROGRAFICAS	22
2.2 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE).....	23
2.2.1 Tipos e características gerais.....	23
2.2.2 Aplicações de MDE para estudos ambientais	24
2.2.3 MDE do SRTM.....	25
2.3 PROCESSAMENTO DO MDE	26
2.3.1 Direções de fluxo	26
2.3.2 Áreas acumuladas de drenagem.....	27
2.3.3 Rede de drenagem.....	28
2.3.4 Delimitação de bacias hidrográficas	28
2.3.5 Comprimentos da drenagem	28
2.3.6 Reamostragem.....	29
2.3.7 <i>Upscaling</i> de direções de fluxo.....	29
2.4 FORMAS DE COMPARAÇÃO ENTRE REDES DE DRENAGEM.....	30
2.5 ERROS NA REDE DE DRENAGEM DERIVADA DO MDE.....	33
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 VISÃO GERAL.....	35
3.2 ESTUDOS DE CASO	36
3.2.1 Bacia do rio Paraíba	36

3.2.2 Bacia do rio São Francisco	38
3.2.3 Bacia do rio Tapajós	39
3.2.4 Bacia do rio Uruguai	40
3.3 REDE DE DRENAGEM A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT.....	41
3.4 REDE DE DRENAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO A PARTIR DO MDE DO SRTM	44
3.4.1 Obtenção e preparação do MDE	44
3.4.2 Determinação da rede de drenagem	46
3.4.3 Delimitação da bacia hidrográfica	47
3.4.4 Determinação de comprimentos da rede de drenagem	48
3.5 REDE DE DRENAGEM DE BAIXA RESOLUÇÃO VIA REAMOSTRAGEM DO MDE DO SRTM.....	48
3.5.1 Reamostragem do MDE	48
3.5.2 Processamento do MDE reamostrado.....	49
3.6 REDE DE DRENAGEM DE BAIXA RESOLUÇÃO VIA MÉTODO DE UPSCALING DE DIREÇÕES DE FLUXO	49
3.6.1 Método COTAT+.....	49
3.6.2 Aplicação do método de <i>upscaling</i> de forma direta.....	52
3.6.3 Aplicação do método de <i>upscaling</i> de forma gradual.....	52
3.7 AVALIAÇÃO DAS REDES DE DRENAGEM.....	53
3.7.1 Visão geral	53
3.7.2 Avaliação do traçado da rede de drenagem	53
3.7.3 Avaliação da delimitação das bacias hidrográficas.....	55
3.7.4 Avaliação de comprimentos de trechos de rio	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 AVALIAÇÃO DOS TRAÇADOS DA REDE DE DRENAGEM.....	56

4.1.1 Comparação visual.....	56
4.1.1.1 Rede de drenagem por reamostragem em várias resoluções espaciais	56
4.1.1.2 Rede de alta resolução, <i>Upscaling</i> direto e <i>Upscaling</i> gradual.....	63
4.1.2 Quantificação da área formada entre os traçados e distância média entre os traçados 74	
4.2 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS BACIAS.....	90
4.2.1 Comparação da delimitação das bacias hidrográficas.....	90
4.2.2 Comparação dos comprimentos dos rios	96
4.2.3 Comparação das sinuosidades.....	103
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	110
5.1 CONCLUSÕES	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade crescente de dados de sensoriamento remoto proporciona a obtenção de uma grande quantidade de informações, sem que haja contato físico direto com o objeto de interesse (HOLZ, 1995; JENSEN, 2009; LILLESAND, 1999; NOVO, 1999). Isso possibilita a realização de estudos de diversas naturezas, com maior automatização de dados espaciais, permitindo melhor gerenciamento, rapidez e integração de informações e, consequentemente, melhor tomada de decisão.

O avanço das geotecnologias, em especial as de sistemas e sensores de satélite, faz com que aspectos como resolução espacial e espectral estejam cada vez mais refinados, podendo extrair informações peculiares de diferentes alvos e podendo ser aplicados a diversas áreas do conhecimento. Para isso, é necessária a utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que permitam a extração e o tratamento dos dados. Existem muitas opções de *programas computacionais para essa finalidade*, seja de origem comercial ou gratuita, o que permite maior disseminação da utilização dessas ferramentas de geoprocessamento pela comunidade científica. Além de diversos produtos de sensoriamento remoto.

Um desses produtos bastante utilizados é o Modelo Digital de Elevação (MDE), que é um conjunto de dados topográficos obtidos mediante sistemas orbitais, em formato raster, que cobrem grande parte da superfície terrestre (FLORENZANO, 2008; MOORE *et al.*, 1991). Um exemplo desse tipo de conjunto de dados são as imagens provenientes do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), que possuem informações da altimetria do terreno com resolução espacial de 30 m para Estados Unidos e de 90 m para o restante do mundo, sendo bastante popularizado na comunidade científica e utilizado em diversos trabalhos, por serem disponibilizados gratuitamente.

Dados topográficos também podem vir de outras fontes como medidas de campo com GPS (*Global Positioning System*) em modo diferencial, cartas topográficas, sensoriamento óptico (técnicas de fotogrametria) e com dados de radar obtidos de plataformas aéreas ou orbitais (FLORENZANO, 2008; JENSEN, 2009). Entretanto, dados orbitais proporcionam maior acesso, facilidade e praticidade. Ao mesmo tempo em que isso traz o benefício da rapidez na obtenção das informações, induz à desconsideração de erros sistemáticos associados a tais dados ou a produtos obtidos pelo processamento desses dados.

Vários produtos derivados do MDE do SRTM são aplicados a estudos em diversas áreas, como análise tectônica (ROSSETTI *et al.*, 2013), mapeamentos de unidades sedimentares (ANDRADES FILHO *et al.*, 2013), morfométrica, geomorfológica

(AUGUSTO, VIADANA 1998; CARVALHO, LATRUBESSE 2004; FLORENZANO, 2008), modelagem hidrológica (PAZ, COLLISCHONN 2007; SÁ, *et al.*, 1993; SANTOS, ZEILHOFER 2003; SILVA, EWEN 2000), entre outras aplicações de grande importância ambiental, social e econômica. No entanto, esses dados muitas vezes não são capazes de representar todas as variações topográficas existentes dentro de uma área, devido às próprias limitações do sensor remoto, à interferência da informação gerada no momento da aquisição da imagem como, por exemplo, a influência da vegetação na obtenção da altimetria do terreno, à resolução espacial da imagem, às limitações na representação de áreas planas. Esses erros podem repercutir sobre tais análises.

Um dos produtos também adquiridos por meio dos dados topográficos é a extração de redes de drenagem, que é um dos procedimentos de grande aplicabilidade para estudos ambientais, podendo constituir muitas vezes a única fonte de informações disponível, principalmente, para grandes bacias (BUARQUE *et al.*, 2008; PAZ *et al.*, 2007).

Existem diversas pesquisas onde a rede de drenagem constitui uma das bases sobre a qual é desenvolvido o estudo ambiental, de forma que erros no traçado dos rios podem repercutir cumulativamente sobre todo o restante da análise. Por exemplo, na escolha de áreas alternativas de localização de barramentos para construção de hidroelétricas (LARENTIS *et al.*, 2010), para identificação de áreas potenciais para implantação de aterros sanitários (SILVA, PINHEIRO 2010), e influenciar os resultados provenientes de simulações em modelos hidrológicos (BUARQUE *et al.*, 2008; PAZ *et al.*, 2007).

Erros típicos foram identificados quando a resolução espacial do MDE não é capaz de representar os meandros da rede de drenagem, ou quando a resolução espacial do MDE tem dimensão inferior à largura do rio (PAZ *et al.*, 2007; PAZ, COLLISCHONN 2008). Esses erros comprometem as redes de drenagem a serem geradas, podendo produzir informações com características diferentes entre a drenagem real e a extraída computacionalmente (RENNÓ; SOARES 2001). Mas, são necessários também mais estudos nesse sentido, principalmente relacionando tais erros com as características físicas dos rios, pois quando a representação dos meandros é inferior ou superior à largura do rio, isso pode refletir sobre a sinuosidade e conseqüentemente no seu comprimento.

Além disso, existe carência de mais informação quanto ao efeito de mudança de escala¹. Pois, muitas vezes ao se trabalhar com grandes áreas torna-se fundamental a utilização de dados de baixa resolução espacial, para facilitar o processamento computacional ou para compatibilizar com outros planos de informação disponíveis. Devido a essa

¹ Mudança de escala: O termo escala pode ser utilizado com diferentes denotações (LONGLEY *et al.*, 2005). Neste trabalho, a atribuição significa mudança de resolução espacial.

necessidade, em vários estudos os dados do SRTM são reamostrados para uma resolução mais baixa. No entanto, ao degradar a sua resolução espacial, pode-se produzir resultados bastante incoerentes quando utilizado para posterior derivação das redes de drenagem (PAZ, 2008; REED, 2003; SHAW *et al.*, 2005).

Diante desse problema, observa-se a necessidade de novos métodos para extração da rede de drenagem em baixa resolução. Alguns autores recomendam a derivação da rede de drenagem de baixa resolução a partir da rede de drenagem de alta resolução, via um processo denominado de *upscaling* de direções de fluxo (PAZ *et al.*, 2006; SHAW *et al.*, 2005; REED, 2003; OLIVERA *et al.*, 2002). Estudos indicam que esse processo tende a preservar melhor as informações do traçado da hidrografia, quando trabalha-se com diferentes escalas, do que o processo de reamostragem do MDE (PAZ *et al.*, 2006; TATSCH *et al.*, 2009). No entanto, ainda existe a necessidade de estudos que avaliem as potencialidades e erros gerados nesse procedimento.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem por objetivo geral identificar erros nos traçados e nas características físicas de quatro bacias hidrográficas e nos seus principais afluentes de forma qualitativa e quantitativa.

Os objetivos específicos consistem em:

- Investigar os erros da rede de drenagem para diferentes escalas pelos métodos de reamostragem e *upscaling* direto e gradual;
- Relacionar os erros da rede de drenagem com as características dos rios;
- Investigar o desempenho método do *upscaling* gradual em relação ao *upscaling* direto na preservação do traçado dos rios e ao método de reamostragem.

2 PROCESSAMENTO DO MDE DO SRTM NA EXTRAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM

2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS BACIAS HIDROGRAFICAS

A bacia hidrográfica pode ser considerada a unidade ecossistêmica e morfológica que melhor reflete os impactos das interferências antrópicas, onde é possível estudar de forma integrada as inter-relações entre os diversos elementos da paisagem (LINS, 2006; SETTI *et al.*, 2000;).

As características físicas das bacias, como área de drenagem, sinuosidade e relevo são de grande utilidade, pois permitem determinar a variação no espaço dos elementos do regime hidrológico (VILLELA; MATTOS, 1975). Essas características compõem importante grupo de fatores que influem no direcionamento do escoamento.

Uma bacia hidrográfica é um sistema que integra relevo e drenagem e sua delimitação fundamenta-se em critérios geomorfológicos e consiste em uma unidade fisiográfica da superfície terrestre, limitada por um divisor topográfico (BOTELHO, 1999).

A geomorfologia, por sua vez, é a ciência que estuda as formas de relevo, sua gênese, composição e os processos que nela atuam (FLORENZANO, 2008), estando diretamente relacionada à declividade, que consiste na inclinação do relevo em relação ao plano horizontal (FLORENZANO, 2008; OLIVEIRA; BRITO, 1998). No contexto de bacia hidrográfica, a declividade controla em boa parte a velocidade com que se dá o escoamento superficial (VILLELA; MATTOS, 1975; LINSLEY *et al.* 1975). Quanto mais íngreme for o terreno, mais rápido será o escoamento superficial, o tempo de concentração será menor e os picos de enchentes maiores. Essa característica física também têm grande influência nos processos de erosão e infiltração.

A sinuosidade de um curso d'água é definida como o quociente entre o comprimento do curso d'água medido ao longo do talvegue e a distância em linha reta entre a cabeceira e a foz. Assim, trata-se de um fator controlador da velocidade de fluxo, pois, quanto maior esse parâmetro, maior a dificuldade encontrada pelo canal no seu caminho à foz, portanto menor a velocidade (VILLELA; MATTOS, 1975).

Em grandes bacias hidrográficas verifica-se mais nitidamente que as características físicas mudam ao longo do rio, ou seja, as mudanças geomorfológicas que acontecem na bacia hidrográfica desde a cabeceira até a foz fazem com que a declividade, largura e sinuosidade do curso d'água variem ao longo do seu percurso. Quando comparados o alto, médio e baixo curso da bacia verifica-se, por exemplo, que o rio torna-se menos sinuoso à medida que se

aproxima da foz, em virtude da baixa declividade nesse trecho do rio. No baixo curso, a tendência é do rio se tornar mais largo devido a maior facilidade de espraiamento frente às menores declividades do terreno e à consequente dinâmica entre deposição de sedimentos e erosão das margens. Devido a essa variação, em muitos estudos hidrológicos que analisam características geomorfológicas de bacias e cursos d'água derivados trabalha-se com os trechos alto, médio e baixo separadamente (PAZ; COLLISCHONN, 2007).

2.2 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)

2.2.1 Tipos e características gerais

O MDE (Modelo Digital de Elevação) é uma matriz que representa a distribuição geográfica de elevações (MOORE *et al.*, 1991), podendo ser visto também como um plano de informações que descreve a altitude, ponto a ponto, de uma determinada área (FLORENZANO, 2008). As imagens de radar para a produção de MDE podem ser obtidas por meio de interferometria, que é o processo pelo qual as imagens de radar de um mesmo local no terreno são registradas por antenas em diferentes localizações ou tempos diferentes, o que permite medidas muito precisas sobre o deslocamento de qualquer ponto específico na imagem (JENSEN, 2009).

Existem dois grandes conjuntos principais de dados topográficos obtidos mediante sistemas orbitais, que cobrem uma grande parte da superfície terrestre. O primeiro se refere aos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), gerados pela Agência Espacial Norte Americana (NASA) e disponibilizados gratuitamente no seu portal (<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>). O outro conjunto de informações disponíveis foi gerado a partir de imagens do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), desenvolvido pela Agência Espacial Japonesa (JAXA) que se encontra a bordo do satélite TERRA e seus produtos possuem resolução espacial de 30 m (JAXA, 2011).

Os dados topográficos na forma de MDE permitem a análise do espaço geográfico em três dimensões e possibilita a obtenção de variáveis morfométricas, ou seja, a caracterização do relevo por meio de variáveis quantitativas como a altitude, declividade e diversos outros produtos derivados.

2.2.2 Aplicações de MDE para estudos ambientais

A representação topográfica na forma de MDE tem sido largamente utilizada na derivação de diversas informações sobre a morfologia e a superfície terrestre (FLORENZANO, 2008; JENSON, 1991), como para a obtenção de características hidrológicas de bacias hidrográficas (direção do escoamento, área acumulada, rede de drenagem, comprimentos de rios, áreas acumuladas, etc). A determinação dessas características pode ser realizada por meio de *software* de SIG (BUARQUE *et al.*, 2008; OLIVEIRA; MAIDMENT, 1999).

Os modelos hidrológicos requerem um grande número de informações de entrada, principalmente quando se trata de modelos hidrológicos distribuídos, que se caracterizam por discretizar a bacia em unidades espaciais. Dessa forma, tem-se a representação da variabilidade espacial das características físicas da bacia, assim como da precipitação e vazão. Devido a essa característica, os MDEs aliados a técnicas de geoprocessamento são fontes de dados para obtenção de planos de informação necessários para a modelagem hidrológica. Para que esses modelos venham de fato representar e simular situações que ocorram no mundo real é fundamental que os dados de entrada sejam de boa qualidade. Em virtude disso, alguns autores alertam sobre a qualidade dos dados de entrada e discutem o aprimoramento de metodologias na extração da rede de drenagem, principalmente, para dados obtidos em baixa resolução, para os quais pode haver incoerências nos traçados devido à perda de informação. Nesses casos é indicada a derivação da rede de drenagem de baixa resolução a partir de dados de alta resolução, por conseguir preservar melhor esse plano de informação (PAZ *et al.*, 2007; REED, 2003; SÁ *et al.*, 1993; SILVA; EWEN, 2000).

A obtenção da rede de drenagem é uma informação relevante também para outros tipos de estudos, como na escolha de áreas potenciais para implantação de aterros sanitários. Para a implantação desse tipo de empreendimento deve ser obedecida uma distância mínima dos corpos d' água. De acordo com a NBR 13896 (ABNT, 1997) essa distância deve ser maior que 200 m, devido à possível contaminação das águas superficiais e subterrâneas. As muitas questões a respeito da disponibilidade de água de boa qualidade ressaltam a importância da determinação da rede de drenagem com o mínimo de erro possível, principalmente quando se trata de fatores de potenciais riscos ao meio ambiente, sociedade e economia, para que a utilização desse plano de informação não venha comprometer os corpos d' água podendo causar conflitos na escolha dessas áreas. Um exemplo da utilização da hidrografia e de outros planos

de informação fundamentais para determinação de áreas potenciais para aterro sanitário fazendo uso de dados SRTM está disposto em Silva e Pinheiro (2010).

Outra aplicação que faz uso da rede de drenagem extraída do MDE do SRTM consistiu na identificação de áreas com maior presença de água empoçada e com baixa velocidade de fluxo no Estado de Minas Gerais, para identificação da distribuição de caramujos causadores da esquistossomose (MOURA *et al.*, 2005). A localização dos rios com características favoráveis para a ocorrência do caramujo, principalmente no período de estiagem, possibilitou o mapeamento das áreas potenciais para o desenvolvimento dessa doença de veiculação hídrica, sendo uma medida preventiva à saúde pública.

Outros estudos realizados utilizando dados topográficos na forma de MDE, particularmente os dados provenientes do SRTM, podem ser direcionados à análise morfométrica, geomorfológica e atualização cartográfica (AUGUSTO; VIADANA, 1998; CARVALHO; LATRUBESSE, 2004; FLORENZANO, 2008).

Com isso, verifica-se que a extração da rede de drenagem a partir do MDE do SRTM em várias áreas do conhecimento é de grande importância para estudos que envolvem problemáticas de caráter urbano e ambiental.

2.2.3 MDE do SRTM

O projeto SRTM é fruto da cooperação entre a NASA e a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) que produziu dados por interferometria de radar, sendo o primeiro a usar esse tipo de cobertura e não de fotogrametria. Os dados foram coletados pelo sensor em fevereiro de 2000, operando na Banda C e X, para adquirir os dados topográficos em mais de 80% da superfície terrestre do planeta (FLORENZANO, 2008).

O processamento dos dados SRTM resultou na formação de um MDE mundial. Os MDEs para os EUA foram gerados para uma resolução espacial de 30 m (0,00025°), e de 90 m (0,0008333°) para o resto do mundo (FLORENZANO, 2008). O *datum* horizontal e o elipsóide de referência adotado foram o WGS84 (World Geodetic System 1984), enquanto o referencial vertical é o geóide EGM96 (Earth Gravitational Model 1996).

Foi realizada uma análise preliminar dos dados SRTM e foram identificados alguns erros, sendo alguns desses informados pelo próprio fornecedor (VALERIANO, 2004). No entanto, os erros não inviabilizam o uso dos produtos em diversos estudos, pois esses são de fácil correção e atualmente já são disponibilizados corrigidos.

2.3 PROCESSAMENTO DO MDE

Com base no MDE é possível a extração da rede de drenagem, a determinação das direções de fluxo, das áreas acumuladas de drenagem, a delimitação de bacias hidrográficas e a derivação de vários outros planos de informações. Essas informações são utilizadas para caracterizar bacias hidrográficas e servem como subsídios para inúmeros estudos ambientais que levem em conta o fator espacial e a relação com a topografia ou hidrologia.

2.3.1 Direções de fluxo

Existem diferentes métodos para a extração de informações a partir do MDE. Para fins hidrológicos, o plano de informação principal obtido a partir de um MDE é a matriz de direções de fluxo. A partir dela, se obtém as áreas acumuladas de drenagem, o caminhamento dos cursos d'água, a delimitação de bacias e outras informações.

As direções de fluxo consistem em um plano de informações do tipo raster, cujo atributo em cada pixel da imagem significa a indicação para qual pixel vizinho drena o escoamento do pixel em questão.

A obtenção das direções de fluxo e área acumulada de drenagem foi inicialmente proposta por Jenson e Domingue (1988), com o método D8 na sua versão original, e posteriormente modificada por diversos autores. Tais modificações visaram principalmente melhorar a abordagem empregada para determinação das direções de fluxo em áreas planas (TIANQI *et al.*, 2003) e incrementar a eficiência computacional (GONG; XIE, 2009), ou seja, gerar algoritmos capazes de processar grandes quantidades de dados em reduzido tempo.

Usualmente ainda é utilizado com mais frequência o algoritmo D8 (Deterministic Eight-Neighbours), no qual tem-se que cada pixel drena para um de seus oito vizinhos escolhendo a direção que proporcione a maior declividade. A maior declividade é calculada pela diferença de elevação entre o pixel vizinho e o pixel central, dividida pela distância entre eles (JENSON; DOMINGUE, 1988; PLANCHON; DARBOUX, 2001) (Figura 1). Entretanto, esse algoritmo apresenta tendência na atribuição de direções de fluxo gerando linhas paralelas irreais na drenagem quando esses são aplicados a áreas planas (Figura 2). Por isso, alguns autores recomendam o uso de um fator de aleatoriedade para eliminar essa tendência e consequentemente os erros a ele atribuídos (PAZ *et al.*, 2006; FAIRFIELD; LEYMARIE, 1991).

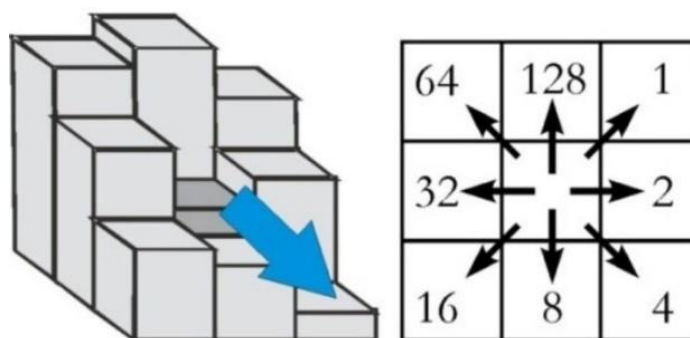


Figura 1. Escolha da direção de fluxo pela maior declividade, indicando em qual sentido ocorre a drenagem. Possíveis direções de fluxo para um dos oito pixels ou célula.

Fonte: Buarque, et al. (2009).

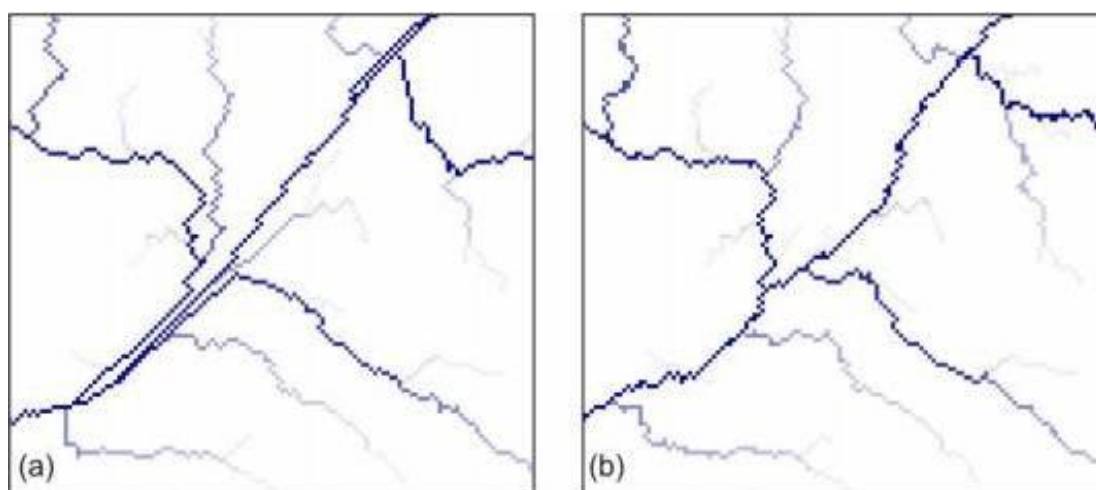


Figura 2. (a) Geração de linhas irreais na determinação da rede de drenagem em áreas planas pelo método D8. (b) Minimização de erros gerados na extração da rede de drenagem em áreas planas com método D8 utilizando um fator de aleatoriedade.

Fonte: Paz (2008).

2.3.2 Áreas acumuladas de drenagem

A área acumulada é a área de drenagem que contribui para cada pixel. Para a geração deste plano de informação cada pixel recebe um valor correspondente ao somatório das áreas de todos os pixels de montante. Esse valor pode ser expresso em quantidade de pixels ou em unidades de área propriamente (por exemplo, km^2). As áreas acumuladas de drenagem são calculadas geralmente em termos de área, principalmente para grandes regiões, nas quais se trabalha com coordenadas geográficas (latitude-longitude). Isso porque à medida que se distancia do equador e se aproxima dos pólos ocorre distorção quanto à área superficial plana dos pixels, fazendo com que cada pixel tenha uma área superficial distinta dos demais.

2.3.3 Rede de drenagem

Este plano de informação é determinado a partir das áreas acumuladas de drenagem. Adota-se um valor mínimo de área de drenagem para denotar o início da rede de drenagem, de forma que os pixels com área contribuinte igual ou maior ao valor adotado são considerados integrantes da rede de drenagem e os pixels com área inferior são desconsiderados.

Diversos estudos procuraram identificar a relação da área de contribuição mínima para formação de cursos d'água em função das características físicas da bacia, como geologia, solo, vegetação, relevo, etc (MCNAMARA *et al.*, 2006; MONTGOMERY; DIETRICH 1988). Mas tal relação não foi estabelecida de forma geral e ainda é alvo de pesquisas, de forma que se costuma adotar um valor arbitrário para a área de drenagem mínima que constitui o início da rede de drenagem.

2.3.4 Delimitação de bacias hidrográficas

A delimitação da bacia hidrográfica faz uso dos produtos de direção de fluxo, área acumulada e rede de drenagem. Para essa delimitação, é necessário determinar o exutório da bacia. A delimitação da bacia considera o fato de que qualquer escoamento partindo de um pixel que pertence ao MDE deve possuir um caminho de fluxo a jusante até o exutório (BUARQUE *et al.*, 2008).

Geralmente delimitam-se dentro da bacia principal várias sub-bacias, que são determinadas a partir dos pontos de confluência entre dois trechos de rios. Esse detalhamento nas áreas de contribuição do escoamento identifica as sub-bacias e discretiza as análises topográficas da bacia.

2.3.5 Comprimentos da drenagem

A partir do produto raster de direção de fluxo pode ser gerado outro plano de informação referente ao comprimento da drenagem. Este produto armazena em cada pixel a distância acumulada do trecho de interesse, podendo ser medido até a cabeceira do rio ou em relação a sua foz, ou mesmo de outro ponto de referencia dentro da bacia. Através deste plano de informação pode-se extrair o maior caminho de fluxo na bacia estudada e a distância que este trecho está em relação ao ponto de referencia adotado.

2.3.6 Reamostragem

O processo de reamostragem, método muito utilizado pela sua simplicidade e rapidez, consiste em agregar as informações topográficas do MDE de alta resolução e gerar um MDE de baixa resolução e a partir desse obter as direções de fluxo e demais produtos derivados desse. Em geral, realiza-se a degradação do MDE tomando a média dos valores dos pixels de alta resolução para gerar o valor do pixel de baixa resolução correspondente.

A degradação da resolução espacial do MDE ocorre principalmente quando se trabalha com grandes áreas, a fim de facilitar o processamento computacional. Outro motivo para a realização desse processo é tornar compatíveis os vários produtos utilizados em uma análise envolvendo vários planos de informação de diferentes resoluções espaciais.

Esse procedimento leva a uma grande perda de informação na representação topográfica quando a mudança de escala é muito grande (por exemplo, reamostrar um MDE de 90 m para 9 km). Como consequência, o processamento desse MDE degradado gera redes de drenagem pouco precisas (PAZ, 2008; SHAW *et al.*, 2005; REED, 2003) e que, na maioria das vezes, demandam excessivas correções manuais para efetivamente utilizar tais informações em estudos hidrológicos ou de outra natureza.

2.3.7 Upscaling de direções de fluxo

O método de *upscaling* (ou seja, mudança de escala, de uma grade mais detalhada para uma mais grosseira) consiste na derivação da rede de drenagem de baixa resolução a partir da de alta resolução. Nessa abordagem, em vez de mudar de escala o MDE, faz-se tal mudança para as direções de fluxo, que é a informação básica que estabelece a conectividade dos caminhos de fluxo. O uso do *upscaling* para converter uma grade de alta resolução em uma de baixa é uma medida para conservar informações importantes da rede de drenagem (YAMAZAKI, 2009). Alguns algoritmos foram propostos na literatura seguindo essa metodologia, como Shaw *et al.* (2005), Reed (2003), Olivera *et al.* (2002), Wang *et al.* (2000), O'Donnell *et al.* (1999) e Paz *et al.* (2006).

Segundo Paz *et al.* (2006) o uso do algoritmo de *upscaling* para a Bacia do Rio Grande reduziu drasticamente a demanda por correções manuais na rede de drenagem gerada para aplicação no modelo hidrológico, diminuindo tempo de preparo dessas informações a serem inseridas no mesmo. Além disso, apresentou excelente coerência com a rede de

drenagem de alta resolução. Quando comparando esses resultados com os obtidos do MDE reamostrado foram identificadas diversas incoerências na rede traçada.

Em estudo desenvolvido por Davies e Bell (2009), foram avaliados quatro métodos de *upscaling* de direções de fluxo, visando gerar redes de drenagem para todo o território do Reino Unido e, em particular, para as bacias dos rios Severn e Tamisa. Partindo das informações na resolução espacial de 50 m, a aplicação dos métodos por tais autores visou determinar redes de drenagem de resolução 5, 10, 15 e 20 km para todo o Reino Unido, e nas resoluções de 0,5, 1,0, 2,5 e 5 km para as duas bacias específicas. Os resultados obtidos, pelos quatro algoritmos de *upscaling*, indicaram que os métodos de Paz *et al.* (2006), referido por COTAT+, e de Olivera *et al.* (2002), referido por NTM, tiveram os melhores desempenhos, considerando as redes de drenagem geradas em todas as escalas e características topográficas da área de estudo (Figura 3).

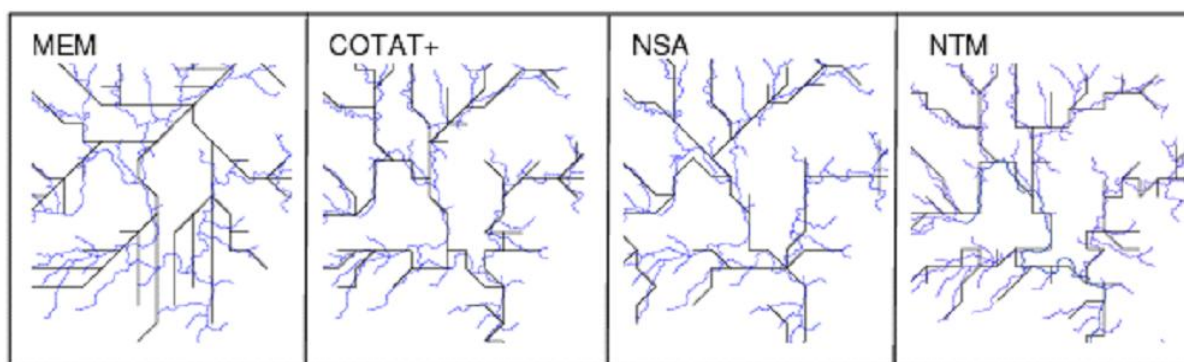


Figura 3. Comparação entre redes de drenagem determinadas na resolução espacial de 2,5 km (linhas grossas pretas) por diferentes algoritmos de *upscaling* e a rede de drenagem considerada de referência (linhas finas azuis).

Fonte: Davies e Bell (2009).

2.4 FORMAS DE COMPARAÇÃO ENTRE REDES DE DRENAGEM

Estudos que trabalham com redes de drenagem derivadas de diferentes procedimentos ou comparam redes de drenagem de diferentes fontes, ou para avaliar um novo procedimento metodológico comparando-se os resultados a uma rede de drenagem de referência, precisam avaliar o grau de similaridade entre essas redes (Figura 4). Os procedimentos principais utilizados consistem em avaliar em termos de comprimentos dos cursos d' água ou em termos do traçado da rede de drenagem.

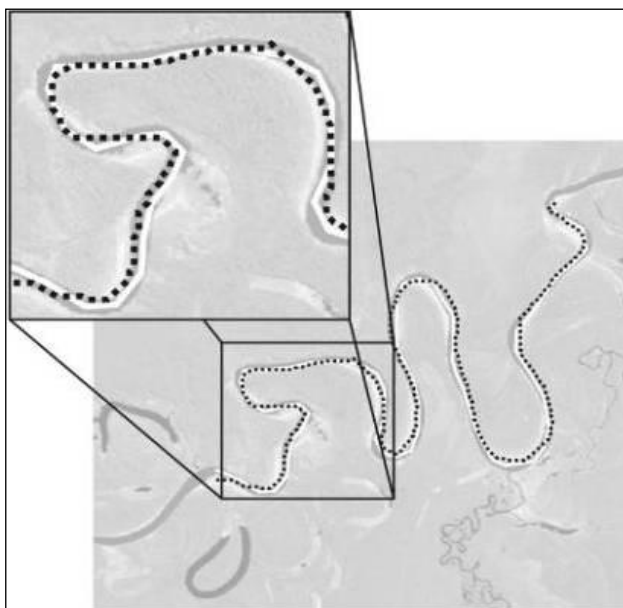


Figura 4. Comparação entre as redes de drenagem de referência (linha contínua) e a extraída do MDE do SRTM (linha tracejada).

Fonte: Buarque *et al.* (2009)

A comparação dos comprimentos dos cursos d'água consiste simplesmente em avaliar os comprimentos obtidos de duas redes de drenagem, sendo uma delas considerada como referência. A diferença entre elas é o resultado dos erros quantitativos do comprimento de trechos de rio específicos, os quais são utilizados como indicador do grau de similaridade entre as duas redes de drenagem.

Porém, tal avaliação é limitada porque rios com comprimentos semelhantes não necessariamente significam que possuam o mesmo traçado e, com isso, esse indicador de erro deve ser utilizado com ressalvas, idealmente em conjunto com outras formas de avaliação.

Para comparação do traçado dos cursos d'água, alguns critérios são adotados para avaliar a similaridade do traçado dessas redes, como a análise visual, distância média, área entre os trechos de rio e área de drenagem (DAVIES; BELL, 2009; TATSCH *et al.*, 2009) (Figura 5).

Um exemplo de análise visual, dentre outras realizadas, foi aplicada à bacia dos rios Mogi-Guaçu e Pardo, localizada na região hidrográfica do Paraná, na bacia do Rio Grande, entre a região a nordeste do estado de São Paulo e sudoeste de Minas Gerais, no qual foram comparados dois tipos de rede de baixa resolução com a de alta, extraída do MDE do SRTM (Tatsch *et al.*, 2009). Com esse método foi possível identificar que a rede de drenagem obtida pelo método de *upscaling* gradual (derivação das direções de fluxo de alta para a intermediária, e desta para a baixa resolução) obteve melhor desempenho que o *upscaling* direto (de alta para baixa resolução)

em termos de qualidade de drenagem, representando de forma mais coerente a rede de drenagem de alta resolução (TATSCH *et al.*, 2009).

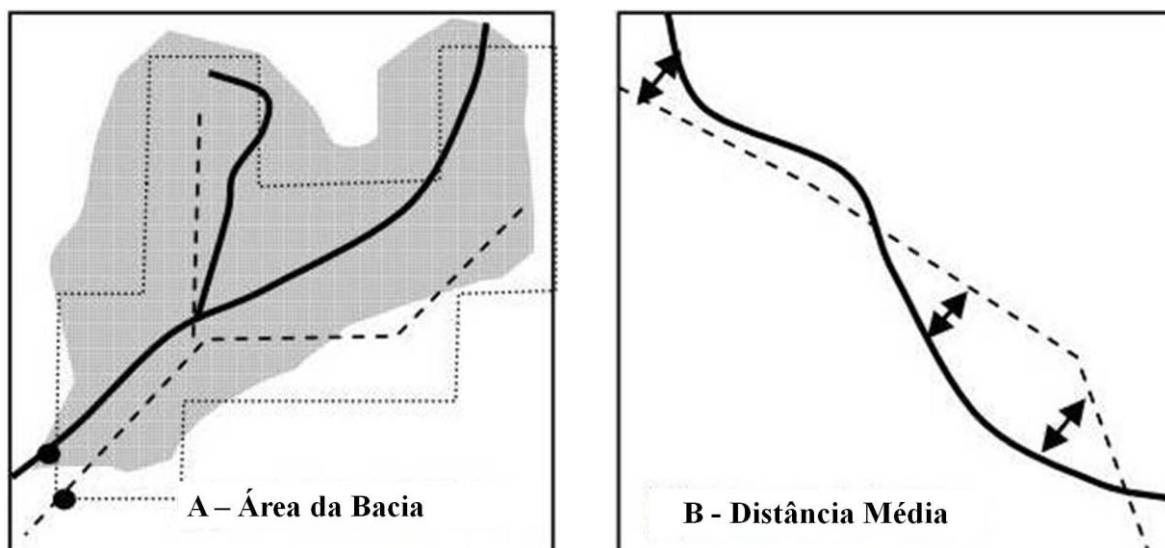


Figura 5. Critérios de avaliação de similaridade entre rede de drenagem, por diferentes métodos: (a) área da bacia, (b) distância média.

Fonte: Davies e Bell (2009).

A comparação da área de drenagem consiste em simplesmente avaliar as áreas das bacias hidrográficas delimitadas a partir das redes de drenagem em comparação (Figura 5-a). Esse método tem a mesma limitação do método de comparação baseado nos comprimentos de trechos de rio, já que a concordância entre as áreas de drenagem não necessariamente representa concordância do traçado da rede.

Para a comparação entre as redes de drenagem pelo método da distância média, é calculada a distância perpendicular entre cada trecho de rio ponto a ponto e, em seguida, calculada a média desses valores (Figura 5-b). A partir desse procedimento, pode-se determinar também a área dos polígonos que se formam entre os dois traçados comparados.

Nos procedimentos de análise da distância média e da área entre as redes de drenagem são comparados os traçados dos rios e verificado se as redes de drenagem estão deslocadas ou apresentam um traçado diferente da drenagem real.

Uma série de análises quantitativas foi realizada por Davies e Bell (2009) para comparar diferentes algoritmos de derivação de redes de drenagem de baixa resolução a partir da de alta, extraída de um MDE. A aplicação foi realizada para três áreas de estudo, o Reino Unido, a bacia do rio Severn e do rio Tâmesa. Os procedimentos realizados foram de análise visual, distância média, área entre os trechos de rio, porcentagem dentro do *buffer* e área de drenagem. Por meio

dessa avaliação foi possível apresentar os pontos fortes e fracos dos quatro métodos testados, apontando aos usuários condições necessárias para a escolha do método mais adequado para a aplicação desejada.

Outra comparação de métodos foi realizada por Buarque *et al.* (2009). Nessa análise foram utilizados cinco métodos de geração de direções de fluxo a partir do MDE, avaliando-os quanto ao desempenho na definição da rede de drenagem em áreas planas. Também foi analisada a hidrografia vetorial otocodificada disponibilizada pela Agência Nacional de Águas na escala 1:1.000.000. A avaliação de erros, também, foi realizada com base na rede vetorizada fundamentada em imagens LANDSAT georeferenciadas. Esse estudo foi aplicado a dois trechos de rios, o Purus, afluente do rio Solimões e o Ituxi, afluente do rio Purus. Foram utilizadas duas maneiras de contabilização de erros: áreas geradas entre as redes analisadas e por análise de distância (*buffer*).

2.5 ERROS NA REDE DE DRENAGEM DERIVADA DO MDE

O MDE do SRTM muitas vezes não é capaz de representar todas as variações topográficas existentes dentro de uma área, devido às próprias limitações do sensor remoto, à contaminação da informação gerada no momento da aquisição da imagem, à resolução espacial do raster, às características físicas da bacia, à ocorrência de áreas planas e a influência da vegetação na obtenção da altimetria.

Erros típicos foram identificados quando a resolução espacial do MDE não é capaz de representar os meandros dos rios, ou quando a resolução espacial tem dimensão inferior à largura do mesmo (PAZ *et al.*, 2007; PAZ; COLLISCHONN, 2008). Esses erros por sua vez comprometem as redes de drenagem a serem geradas, podendo produzir informações com características diferentes entre a drenagem real e a extraída computacionalmente, podendo influenciar os resultados provenientes das simulações realizadas na modelagem hidrológica (RENNÓ; SOARES, 2001).

Com a maior divulgação e facilidade de utilização de ferramentas de geoprocessamento, a caracterização da rede de drenagem a partir do MDE tem ocorrido de forma bastante prática. Ao mesmo tempo em que isso traz o benefício da rapidez na obtenção das informações, induz à desconsideração de erros sistemáticos associados a esse procedimento. Como geralmente o plano de informações referente à rede de drenagem constitui uma das bases sobre a qual é desenvolvido o estudo ambiental, erro no traçado dos rios pode repercutir sobre todo o restante da análise. Por exemplo, em estudos para verificação de alternativas de

localização de barramentos para construção de hidroelétricas (LARENTIS *et al.*, 2010), erros na drenagem alteram significativamente o processo de seleção das melhores áreas, como delimitação do lago para o barramento e a profundidade do mesmo.

Outro fator que pode acarretar na inserção de erros na rede a ser gerada é a necessidade de trabalhar com produtos de baixa resolução. O método utilizado para derivar as direções de fluxo de baixa resolução influencia no plano de informação a ser produzido (BUARQUE *et al.*, 2009; DAVIES; BELL, 2009; PAZ *et al.*, 2006).

A repercussão de erros para grades de baixa resolução espacial pode ocorrer na representação dos traçados dos rios e nas características físicas da bacia, como área de drenagem, comprimento dos rios e sinuosidade, quando comparados a uma rede de alta resolução.

Torna-se fundamental, portanto, melhorar a identificação de problemas que usualmente ocorrem ao derivar uma rede de drenagem a partir do MDE, para que as diversas pesquisas que venham a utilizar esse plano de informações possam considerar as incertezas existentes nesses produtos e de como esses erros possam repercutir sobre as análises geradas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 VISÃO GERAL

Essa pesquisa foi dividida em seis etapas (Figura 6). Na primeira etapa foram utilizadas imagens ETM+/LANDSAT 7 para vetorização da rede de drenagem, tomada como referência. Na segunda etapa obteve-se a rede de drenagem a partir do MDE do SRTM em alta resolução espacial. A etapa três consistiu no processamento das imagens SRTM utilizando o método de reamostragem para várias resoluções espaciais. Na quarta etapa foram geradas redes de drenagem pelo procedimento de *upscaling* direto, a partir das informações geradas para o MDE do SRTM de alta resolução. A quinta etapa consistiu na realização do *upscaling* gradual, isto é, a aplicação da mudança de escala das direções de fluxo por etapas, de alta resolução para intermediária e dessa para baixa. Na sexta etapa foi realizada a comparação dos traçados e das características físicas da rede de drenagem obtidas do SRTM em diferentes resoluções espaciais com a drenagem vetorizada da imagem LANDSAT.

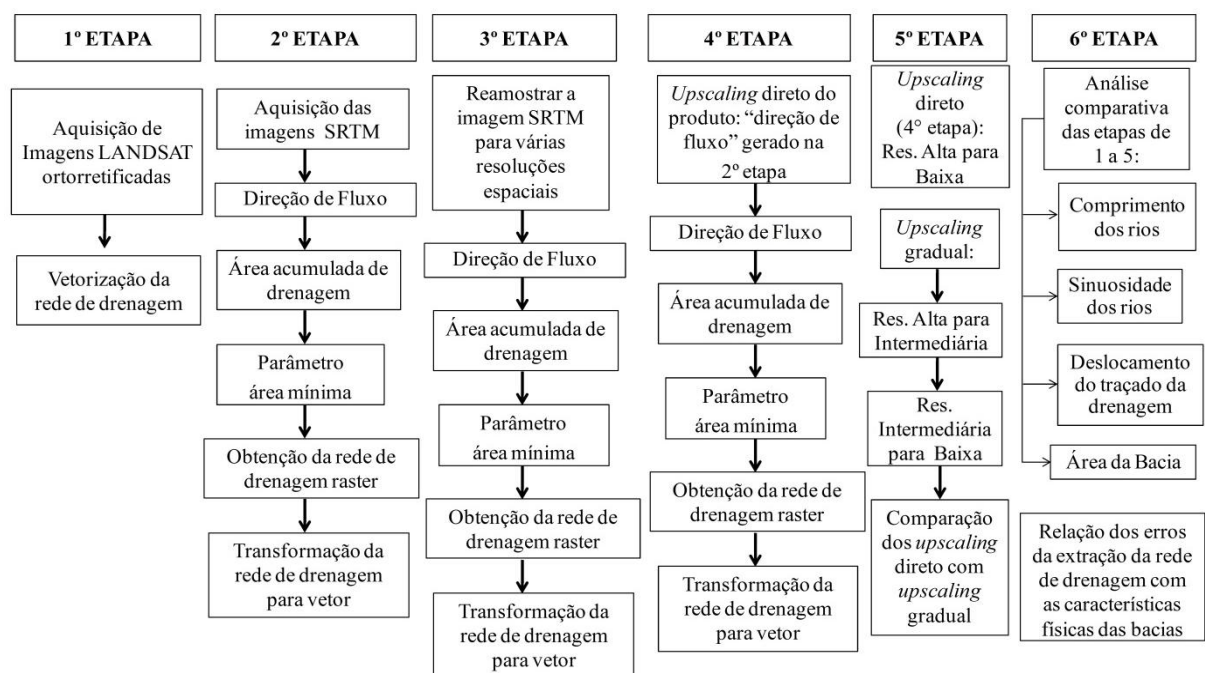


Figura 6. Organograma da metodologia do trabalho

Os procedimentos foram efetuados pelas rotinas computacionais (Tabela 1) descritas em Paz *et al.* (2006) e Paz (2008) e com auxílio de *softwares* de geoprocessamento, sendo repetidos para cada uma das quatro bacias tomadas como estudo de caso. Essas rotinas computacionais

foram desenvolvidas inicialmente visando a preparação de informações de entrada para o modelo hidrológico de grandes bacias denominado MGB-IPH (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

Tabela 1. Rotinas computacionais utilizadas na pesquisa

Rotinas Fortran	Descrição
MNTAlta4A	Utilizado para o processamento de Modelo Digitais de Elevação para obtenção de direções de fluxo, seguindo o método D8, com introdução de um fator de aleatoriedade e tratamento de dado para áreas planas.
DirFluxo	Utilizada para realizar o procedimento de <i>upscaling</i> de direções de fluxo, ou seja derivar as direções de fluxo de baixa a partir dos planos de informação de direções de fluxo e área acumulada de alta resolução.
AreaAcu	Gera as áreas acumuladas de drenagem a partir da matriz de direções de fluxo.
DelBacia	Gera a delimitação de bacias hidrográficas a partir das direções de fluxo e da indicação do exutório.
Drenagem	Gera um arquivo vetorial referente à drenagem das células, a partir das direções de fluxo de baixa resolução.
Caminho	Determina o caminho de fluxo e o perfil longitudinal ao longo desse caminho entre dois pontos quaisquer de uma rede de drenagem.

3.2 ESTUDOS DE CASO

Como estudo de caso para esta pesquisa foram selecionadas quatro bacias hidrográficas, que são as bacias do rio Paraíba, São Francisco, Tapajós e Uruguai. Trata-se de bacias consideradas de grandes dimensões (área de drenagem superior a 10.000 km²), mas localizadas em regiões de diferentes características físicas e climáticas, o que constitui um conjunto de dados mais diversificado para avaliação dos objetivos propostos nesta pesquisa.

3.2.1 Bacia do rio Paraíba

A bacia do rio Paraíba está inserida totalmente no Estado da Paraíba e fica compreendida entre as latitudes 6°51'31" e 8°26'21" Sul e as longitudes 34°48'35" e 37°2'15"; Oeste. Essa é a segunda maior bacia localizada no Estado da Paraíba (Figura 7), com área de

aproximadamente 20.000 km² e seus principais afluentes são os rios Taperoá, Gurinhém e Paraibinha (PARAÍBA, 2012).

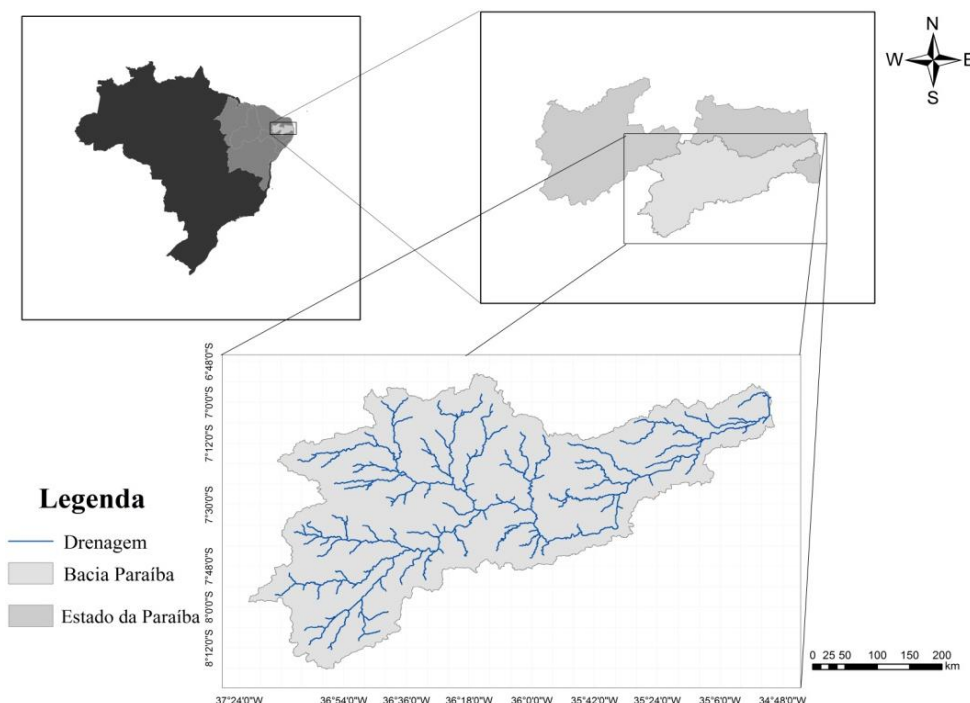


Figura 7. Localização da bacia do rio Paraíba no Estado da Paraíba.

O rio Paraíba nasce na região semiárida, integra as mesorregiões da Borborema, do Agreste e a sua foz atinge o litoral, desaguando no Oceano Atlântico. O clima da bacia apresenta uma variabilidade associada à transição do árido para o úmido. Os meses mais secos vão de agosto a janeiro, sendo o mês de outubro o mais seco e os mais chuvosos de fevereiro a julho, com ênfase para o mês de março (ARAÚJO *et al.*, 2009). As regiões de menor índice pluviométrico estão localizadas no alto curso do rio Paraíba com 200 mm e os maiores índices próximos ao litoral podendo atingir 1400 mm (ARAÚJO *et al.*, 2009). O alto curso do rio apresenta média anual pluviométrica em torno de 500 mm, por estar localizada na região mais seca do país, o Cariri paraibano, com estação seca de 8 a 10 meses (XAVIER *et al.*, 2012). Essa bacia apresenta temperaturas elevadas durante o ano todo, com pequena queda nos meses de inverno (MARCUIZZO *et al.*, 2012).

A vegetação nativa presente nessa bacia é em boa parte típica do bioma Caatinga e na região próxima ao litoral do bioma Mata Atlântica. O uso do solo na bacia é intensivamente utilizado para agropecuária (MARCUIZZO *et al.*, 2012)

A geologia da bacia, principalmente, o alto e o médio curso, é composta em sua maioria por rochas cristalinas. No baixo curso, o rio Paraíba atravessa coberturas

sedimentares que compõem a formação barreiras, sendo a feição geomorfológica mais comum, o tabuleiro costeiro (XAVIER *et al.*, 2012). A característica de formação geológica do alto e médio curso do rio indica solos rasos e de baixa permeabilidade.

3.2.2 Bacia do rio São Francisco

A bacia hidrográfica do rio São Francisco é uma bacia de domínio da União por abranger vários Estados brasileiros, estando localizada predominantemente na região nordeste do país. Este rio nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais e passa por uma pequena porção de Goiás e do Distrito Federal e atravessa a Bahia, Pernambuco e sua desembocadura se dá no Oceano Atlântico entre os Estados de Sergipe e Alagoas (COLLISCHONN, 2006; MAGALHÃES, 2005) (Figura 8). Essa bacia está limitada pelas latitudes 7° e 21° sul e longitudes 36° e 48° oeste, com área de aproximadamente 640.000 km².

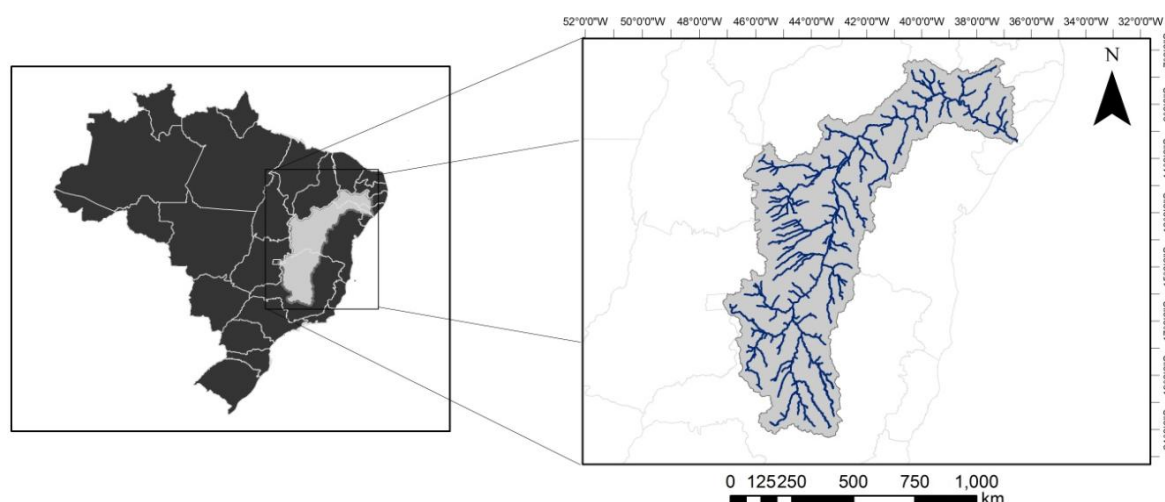


Figura 8. Localização da bacia do rio São Francisco.

Neste trabalho a bacia do São Francisco foi dividida em três regiões: alto, médio e baixo curso, sendo que cada região possui uma densa hidrografia e características físicas peculiares. A região alta apresenta topografia ligeiramente acidentada, com serras e terrenos ondulados; o médio curso corresponde a condições climáticas de uma região tropical semi-árida; e a parte baixa da bacia, antes de chegar à foz possui um trecho denominado das grandes quedas, esse é o segundo maior declive do rio principal, situado entre as usinas hidrelétricas de Itaparica e Xingó, posteriormente a isso, segue em baixa declividade até o oceano Atlântico (SILVA, 2005).

As condições climáticas dessa bacia são do tipo quente seco, por estar boa parte inserida na região semi-árida do país e compreender uma parte significativa do Polígono das

Secas, e quente úmido, onde predominam outros fatores como altitude e influência litorânea. Essa região também sofre influência dos fenômenos El Niño e La Niña que refletem no seu clima. A precipitação pluviométrica média anual pode variar entre 1.400 mm, verificados nas nascentes do rio São Francisco, e 350 mm, entre Sento Sé (BA) e Paulo Afonso (BA). A temperatura média anual oscila de 18 °C a 27 °C (SILVA, 2005).

3.2.3 Bacia do rio Tapajós

A bacia do rio Tapajós abrange os Estados do Mato Grosso, Pará e uma pequena porção do Amazonas, por isso é uma bacia de domínio da União. Essa bacia está situada entre as latitudes 2° e 15° Sul e 53° e 61° Oeste (Figura 9). O rio Tapajós é um dos principais afluentes do rio Amazonas, tendo sua confluência na cidade de Santarém (PA), onde conta com cerca de 500.000 km² de área de drenagem (COLLISCHONN *et al.*, 2008).

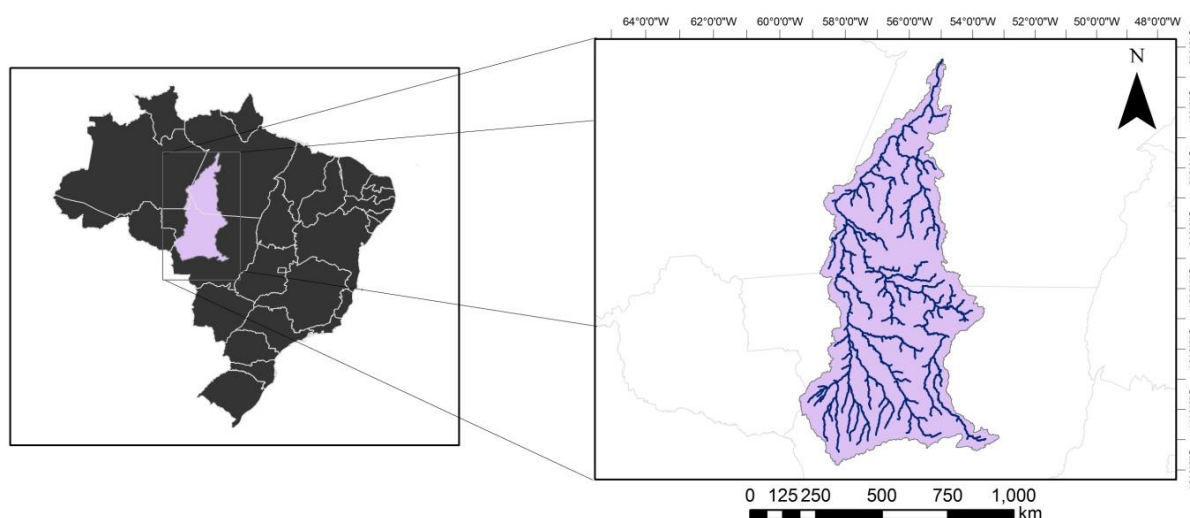


Figura 9. Localização da bacia do rio Tapajós.

Os principais afluentes do Tapajós são os rios Juruena, Jamanxim e Teles Pires. O rio principal é cortado na região central da bacia pela Serra do Cachimbo, a qual condiciona a drenagem do rio Teles Pires para oeste, de forma que o rio Tapajós corre um longo trecho bem próximo ao seu divisor de águas (COLLISCHONN, 2006).

As condições climáticas da bacia do Tapajós são de alto índice pluviométrico médio anual, variando entre 1.800 mm a 2.300 mm, isso decorre da sua localização geográfica de baixas latitudes (próximo ao Equador), influenciada pela zona de convergência intertropical. O período chuvoso da região abrange os meses de outubro a abril (COLLISCHONN, 2006; COLLISCHONN *et al.*, 2008).

O bioma predominante na área é de Floresta Amazônica, mas o desflorestamento vem dando lugar ao avanço agropecuário. Essa mudança na paisagem pode repercutir sobre a hidrografia e o clima da região.

Em estudo desenvolvido por Collischonn (2006), o mapeamento de solos na região da bacia do Tapajós foi dividido em cinco classes. A primeira apontou que 41% dos solos são latossolos, que possuem alto teor de argila e grande profundidade, ocorrem normalmente em áreas planas ou suavemente onduladas. A segunda classe de solo, de maior predominância foi o podzólico, que correspondeu a 29% da bacia, esse solo é na sua maior parte argiloso. A terceira classe foi de areias quartzosas equivalendo a 19% da bacia, esses são solos porosos. A quarta classe foi de solos de características mais impermeáveis corresponderam a 6% da bacia e a quinta e última classe foram às áreas de várzea.

3.2.4 Bacia do rio Uruguai

A bacia do rio Uruguai é de domínio da União por ocupar áreas pertencentes ao Brasil, Argentina e Uruguai. A área da bacia em território brasileiro é de, aproximadamente, 177.000 km² e encontra-se totalmente na porção sul, abrangendo municípios dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (BUARQUE *et al.*, 2008; PAZ *et al.*, 2008). A área de drenagem da bacia do rio Uruguai possui cerca de 207.000 km² (Figura 10).

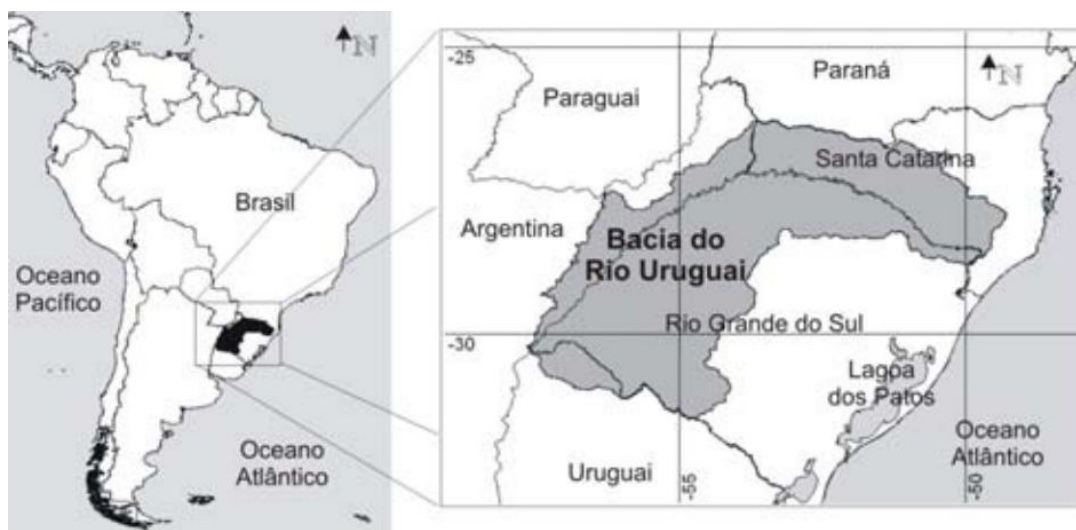


Figura 10. Localização da bacia do rio Uruguai.

Fonte: Paz *et al.* (2007)

Os principais afluentes da bacia do Uruguai são os rios do Peixe, localizado no alto curso do rio principal, Icamaquã, Piratinim, Ijuí, esses três últimos situados no médio curso do rio, e o Quaraí, afluente pertencente a parte baixa da bacia do rio Uruguai.

O clima da região é temperado com chuvas em todas as estações do ano. A precipitação média anual varia entre 1300 mm a mais de 2000 mm e a temperatura no período mais frio oscila de -3°C a 18°C e nos meses mais quentes com valor superior a 22°C (ANDREOLLI, 2003).

A vegetação original da bacia era de floresta, com exceção das regiões mais elevadas em que a predominância é da vegetação típica do bioma Campos. Todos os solos dessa bacia tem textura altamente argilosa, devido a sua origem rochosa ser de basalto. Essa característica tem influência hidrológica, devido à baixa capacidade de armazenamento de água que tem esses solos (ANDREOLLI, 2003).

Um estudo de mapeamento dos solos da bacia do rio Uruguai, do ponto de vista hidrológico, foi desenvolvido por Collischonn (2001) agrupando os tipos de solos de acordo com suas características físicas, a partir do mapa de levantamento do RADAM Brasil. Os solos foram agrupados em três classes. O primeiro grupo foi o latossolo com 46% da área da bacia, que correspondem a solos muito argilosos e de profundidade. O segundo grupo é formado pela associação de Brunizém Avermelhado e solos Litólicos com 40% da bacia, esses são solos menos profundos que o primeiro grupo e com menor capacidade de armazenamento de água. A terceira classe correspondeu a 14% de solos do tipo Cambissolo Bruno Húmico e alguns tipos de solos litólicos, que ocorrem nas regiões mais altas da bacia, esse é caracterizado por solos pouco profundos e conseqüentemente de maior escoamento superficial.

3.3 REDE DE DRENAGEM A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT

Foram utilizadas imagens LANDSAT 7/ ETM+ e LANDSAT 5/ TM, disponibilizadas gratuitamente no portal *Earth Science Data Interface* (ESDI) no endereço eletrônico, <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>. Essas imagens são ortorretificadas, tendo como elipsóide de referência o WGS 84 e o sistema de coordenadas geográficas. As imagens utilizadas na vetorização estão presentes na Tabela 2. Foi levada em consideração na escolha desses rasters a baixa cobertura de nuvens.

Tabela 2. Imagens LANDSAT utilizadas na vetorização das redes de drenagem de referência

Bacia	Órbita/Ponto (P/ R)	Data	Satélite/Sensor
Paraíba	P214/ R65	04 de agosto de 2001	LANDSAT 7/ ETM+
	P215/ R65	11 de novembro de 2000	
	P215/ R66	11 de novembro de 2000	
São Francisco	P220/ R73	23 de março de 2001	LANDSAT 7/ ETM+
	P220/ R72	23 de março de 2001	
	P220/ R69	27 de junho de 2001	
	P220/ R68	27 de junho de 2001	
	P219/ R74	20 de agosto de 200	
	P219/ R73	07 de agosto de 2001	
	P219/ R72	07 de agosto de 2001	
	P219/ R71	23 de agosto de 2001	
	P219/ R70	21 de setembro de 2000	
	P219/ R69	20 de agosto de 2000	
	P219/ R68	20 de agosto de 2000	
	P218/ R74	26 de junho de 2000	
	P218/ R73	23 de abril de 2000	
	P218/ R72	10 de junho de 2000	
	P218/ R71	09 de maio de 2000	
	P218/ R70	10 de abril de 2001	
	P218/ R69	10 de abril de 2001	
	P218/ R68	16 de agosto de 2001	
	P218/ R67	22 de março de 2000	
	P218/ R66	1 de novembro de 2000	
	P217/ R67	10 de setembro de 2001	
	P217/ R66	10 de setembro de 2001	
	P216/ R66	30 de setembro de 1999	
	P215/ R67	07 de maio de 2001	
	P214/ R67	21 de outubro de 2006	
Tapajós	P229/ R69	30 de junho de 1988	LANDSAT 5/ TM
	P229/ R68	22 de julho de 1996	
	P229/ R67	17 de julho de 1994	
	P229/ R66	23 de junho de 1997	
	P229/ R65	23 de junho de 1997	
	P228/ R70	23 de junho de 1988	
	P228/ R68	10 de julho de 1994	
	P228/ R67	18 de junho de 1992	
	P228/ R66	21 de junho de 1993	
	P228/ R64	26 de junho de 1992	
	P228/ R63	02 de julho 1997	
	P227/ R70	05 de julho de 1992	

Tabela 2. Imagens LANDSAT utilizadas na vetorização das redes de drenagem de referência (continuação)

Bacia	Órbita/Ponto (P/ R)	Data	Satélite/Sensor
Tapajós	P227/ R69	05 de julho de 1992	LANDSAT 5/ TM
	P227/ R68	06 de agosto de 1992	
	P227/ R67	25 de abril de 2001	LANDSAT 7/ ETM+
	P227/ R66	18 de junho de 2006	LANDSAT 5/ TM
	P227/ R65	25 de junho de 1997	
	P227/ R64	21 de julho de 1992	
	P227/ R62	14 de agosto de 1986	
	P226/ R70	20 de agosto de 1990	
	P226/ R69	17 de julho de 1989	
	P226/ R68	27 de julho de 1988	
	P225/ R70	21 de junho de 1989	
Uruguai	P225/ R81	24 de abril de 2000	LANDSAT 7/ ETM+
	P224 / R81	28 de janeiro de 2000	
	P225/ R80	24 de abril de 2000	
	P224/ R80	28 de janeiro de 2000	
	P224/ R79	06 de julho de 2000	
	P223/ R80	15 de março de 2002	
	P223/ R79	15 de março de 2002	
	P222/ R79	24 de setembro de 1999	
	P221/ R79	12 de novembro de 2002	
	P221/ R80	15 de junho de 2000	
	P220/ R80	07 de maio de 2000	

Após a aquisição dessas imagens foi aplicada a composição colorida nas bandas 5, 4 e 3 nos canais vermelho, verde e azul, respectivamente, visando obter melhor diferenciação dos corpos hídricos.

Essas imagens de resolução espacial 30 m foram usadas para vetorizar a rede de drenagem das bacias estudadas. Essa vetorização foi tomada como referência e comparada com os traçados dos rios extraídos das imagens SRTM segundo diferentes procedimentos (reamostragem e *upscaling*).

Após a conclusão da vetorização da drenagem foi realizada a edição desses vetores, quando houve sobreposição desses, devido à cobertura entre as faixas imageadas. Esse procedimento foi realizado por não ter sido viável a realização dos mosaicos das imagens LANDSAT para cada bacia, em decorrência do processo se tornar muito lento, devido à quantidade de imagens trabalhadas. Entretanto, isto não resultou em prejuízos para a rede de referência obtida a partir de tais imagens. Posteriormente à vetorização, foram computados os

valores de comprimento dos rios. Com essas informações e a partir das cotas do terreno dos dados SRTM, determinou-se a sinuosidade, pela comparação entre o comprimento medido ao longo do traçado do rio com o comprimento em linha reta.

O interesse na sinuosidade é por se tratar de uma característica física dos rios que possui aspectos diferentes ao longo do seu percurso, geomorfologicamente relacionada à declividade do rio, área de drenagem e largura, e que pode ser usada como indicadora de diferentes tipos de erros presentes na rede de drenagem derivada de MDEs. Na cabeceira, o rio apresenta uma maior sinuosidade e é mais estreito, o que dificulta a extração exata desse caminho de fluxo na rede de drenagem derivada de um MDE – há a tendência de meandros serem perdidos nessa drenagem. No trecho próximo à foz, na parte baixa da bacia, há baixas declividades e o rio torna-se mais largo e menos sinuoso. O traçado pode ser mais facilmente seguido pela drenagem extraída do MDE, mas contudo pode haver uma falsa sinuosidade se o tamanho do pixel do MDE for superior à largura do rio.

3.4 REDE DE DRENAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO A PARTIR DO MDE DO SRTM

3.4.1 Obtenção e preparação do MDE

A aquisição das imagens SRTM foi feita gratuitamente a partir do Geoportal CSI, na página eletrônica <<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>>. Essas imagens são disponibilizadas em quadros de 5° x 5° contendo o MDE na resolução espacial de aproximadamente 90 m.

As bacias estudadas estão inseridas em mais de uma cena do SRTM e por ser necessária a formação de um retângulo completo que contemple a área em estudo foi realizado um procedimento para incluir os vários quadros em uma única imagem, exemplo aplicado à bacia do rio São Francisco (Figura 11 a). Contempladas todas as cenas em um só arquivo foi aplicado um recorte para definir a janela de trabalho, deixando uma folga, já que nessa pesquisa trabalhou-se com mudanças de escala.

Por se trabalhar com várias escalas, múltiplas entre si, ao mesmo tempo do recorte foi realizada a reamostragem do MDE da resolução original (0,0008333° ou ~90 m) para 0,001° (ou ~100 m; bacias do rio Paraíba e do rio Uruguai) e para 0,002° (~ 200 m; bacias do rio São Francisco e do rio Tapajós). Para as bacias de maior área de drenagem não foi possível gerar as direções de fluxo a partir do MDE na resolução espacial de 0,001° (~100 m) devido ao elevado custo computacional. Esse procedimento foi viável a partir do MDE na

resolução $0,002^\circ$ (200 m), por isso os dados considerados de alta resolução para as maiores bacias, São Francisco e Tapajós, foram nessa resolução espacial. Já para as bacias de menor área de drenagem, Paraíba e Uruguai, foi possível gerar as direções de fluxo a partir do MDE na resolução $0,001^\circ$ (~ 100 m). Não se optou gerar esse plano de informação a partir do MDE de $0,002^\circ$ (200 m) para tais bacias para que os produtos considerados nesse estudo como de alta resolução fossem as de maior detalhamento possível, já que se tratam de bacias menores em relação ao do São Francisco e Tapajós. Mesmo as bacias tendo resoluções de partida diferentes, isso não prejudica as análises realizadas, pois a questão principal é o salto de escala entre as resoluções de alta e baixa resolução em cada bacia.

As escalas de baixa resolução trabalhadas variaram de $0,01^\circ$ (~ 1 km) a $0,5^\circ$ (~ 50 km), conforme a bacia e o procedimento testado. Esses testes indicaram a possibilidade de se trabalhar para as bacias de maior área de drenagem com mudança de escala maior que as bacias menores. Foi levada em consideração nessas mudanças que a bacia não perdesse as características de formato e da rede de drenagem em relação à bacia obtida do MDE do SRTM de alta resolução, adotada para cada bacia. Outro motivo que levou trabalhar-se com os dados de alta resolução com os valores anteriormente informados foi o processamento computacional, principalmente para as grandes bacias. Daqui em diante, ao longo do restante deste texto as resoluções espaciais trabalhadas serão referidas apenas pelo valor nominal equivalente em unidades planas, pela maior facilidade de interpretação.

Para algumas das bacias estudadas, a janela de trabalho continha uma grande região de mar, de forma que foram aplicadas máscaras para diminuir o processamento computacional (Figura 11 b) As regiões de mar representam áreas planas no MDE do SRTM o que gera elevado custo computacional para determinação das direções de fluxo, de forma desnecessária.

Depois de realizado todo o preparo do MDE do SRTM, no formato raster, e definida a alta resolução trabalhada para cada bacia, obteve-se o dado de entrada para gerar os planos de informações de interesse.

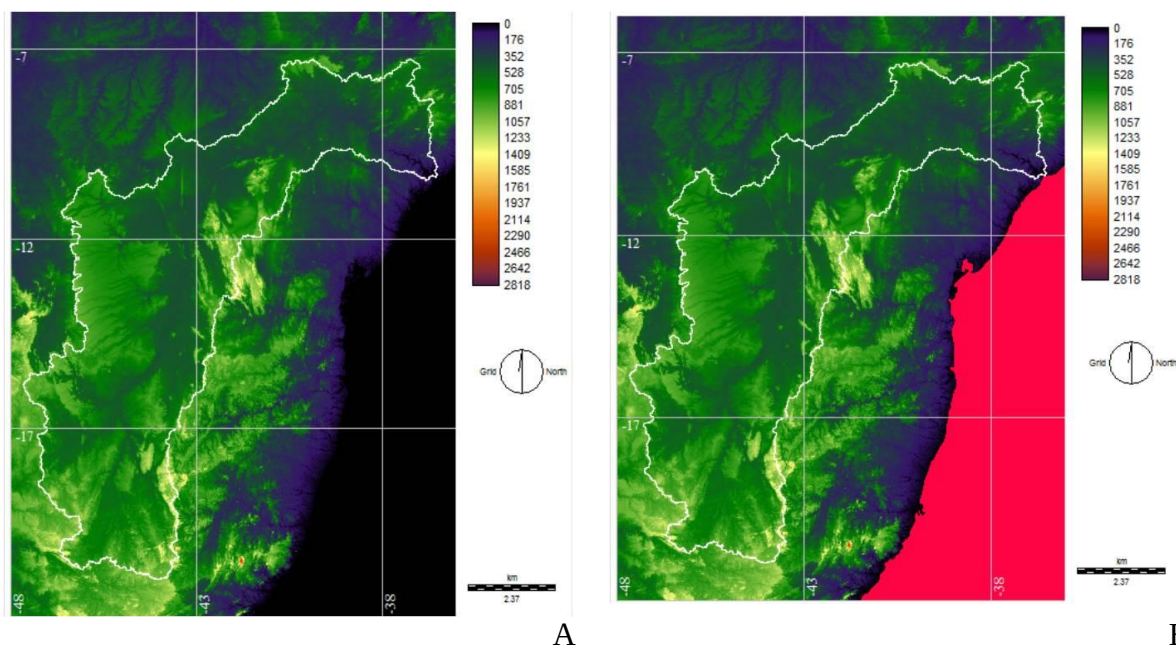


Figura 11. (A) MDE referente às 12 cenas do SRTM (malha de 5° x 5°) selecionadas para a região da bacia do rio São Francisco na resolução espacial de 200 m. (B) Aplicação de máscara na região de mar.

3.4.2 Determinação da rede de drenagem

Com o MDE preparado, pôde-se gerar os planos de informação por meio de rotinas desenvolvidas em linguagem Fortran e *softwares* de geoprocessamento para operações auxiliares de manipulação de arquivos raster e vetoriais.

Para determinação das direções de fluxo utilizou-se a rotina MNTAlta4A, cujo algoritmo de cálculo segue o algoritmo D8, mas inserindo um fator de aleatoriedade na busca por direções de fluxo em áreas planas, visando evitar a formação de drenagem paralela (PAZ, 2008; BUARQUE *et al.*, 2009). Essa rotina gerou o raster contendo as direções de fluxo correspondentes ao MDE de alta resolução, de modo que cada pixel da imagem assumiu um dos oito valores que indica para qual pixel vizinho drena o escoamento.

Os arquivos de saída foram uma imagem contendo a direção de fluxo de cada pixel e o MDE modificado pelo algoritmo. A determinação das direções de fluxo pelo algoritmo MNTAlta4A apresentou tempo de processamento elevado com o aumento do número de linhas e colunas. Para a bacia do rio São Francisco, por exemplo, a rotina levou 15 dias ininterruptos para gerar as direções de fluxo na resolução de 200 m.

A partir do arquivo de direções de fluxo de alta resolução foi gerado o plano de informações referente às áreas acumuladas de drenagem por meio da rotina AreaAcu, que produziu um raster de mesma resolução espacial e onde cada pixel corresponde um valor

referente a sua área de drenagem. Nessa rotina, determina-se a área superficial de cada pixel em unidades planas levando-se em conta sua posição geográfica, a fim de corretamente contabilizar a equivalência entre unidades geográficas e planas conforme a latitude.

A rede de drenagem no formato raster foi obtida a partir das áreas acumuladas de drenagem pelo critério da definição de um valor de área mínima. Esse valor foi definido com base na rede vetorizada, das imagens LANDSAT superpondo esse plano de informação com a área acumulada, a fim de identificar a área acumulada mínima mais adequada para cada bacia em estudo (Tabela 3). Isso foi feito de forma a torna mais próximo possível a rede comparada com a rede de referência.

Os pixels com área igual ou superior a esse valor mínimo foram considerados como pertencentes à rede de drenagem. Com isso, determinou-se a drenagem de alta resolução por reclassificação, onde os pixels com área acumulada inferior ao estipulado receberam valor zero e os de valor maior ou igual receberam valor um.

O valor adotado como área acumulada mínima repercute diretamente na quantidade de trechos de rio, nos comprimentos dos trechos de rio e na densidade de drenagem. Entretanto, nesta pesquisa esse efeito foi eliminado, já que as comparações realizadas entre trechos de rio obtidos por diferentes procedimentos foram realizadas considerando sempre os pontos equivalentes de início e final de cada trecho. As redes de drenagem em formato raster foram em seguida convertidas para o formato vetorial.

Tabela 3. Valores de área acumulada mínima adotados para cada rede de drenagem das bacias estudadas.

Bacia	Área Acumulada Mínima (km²)
Paraíba	50
São Francisco	100
Uruguai	20
Tapajós	100

3.4.3 Delimitação da bacia hidrográfica

Para delimitação das bacias hidrográficas foi utilizada a rotina Delbacia, no qual foi necessário fornecer alguns arquivos de entrada: direção de fluxo, exutório da bacia e máscara, caso tenha sido utilizada nas etapas anteriores, todos os arquivos no formato raster. O exutório da bacia foi escolhido com base na visualização das áreas acumuladas de drenagem, no qual é possível identificar o pixel de maior área de drenagem representativo do exutório da bacia. O arquivo final correspondeu à bacia no formato raster, sendo posteriormente convertida para vetor.

3.4.4 Determinação de comprimentos da rede de drenagem

A determinação dos comprimentos dos rios foi obtida utilizando a rotina "Caminho.exe". Foram fornecidos como arquivos de entrada a direção de fluxo, área acumulada, delimitação bacia, MDE e dois pontos indicando o início e final do trecho a ser calculado, todos esses no formato raster.

Os produtos gerados por esse algoritmo foram um arquivo raster indicando o traçado percorrido entre os dois pontos segundo o mapa de direções de fluxo, e outro raster indicando a distância acumulada ao longo percurso, indicado no caminho entre os pontos, medida em quilômetros. O comprimento de cada trecho de rio analisado corresponde à distância total acumulada entre os dois pontos selecionados.

3.5 REDE DE DRENAGEM DE BAIXA RESOLUÇÃO VIA REAMOSTRAGEM DO MDE DO SRTM

3.5.1 Reamostragem do MDE

O processo de reamostragem do MDE reduz o número de linhas e colunas de uma imagem, degradando a resolução espacial. Para esse procedimento foi utilizado o algoritmo do tipo agregação que consiste na geração de um novo pixel de resolução mais grosseira com atributo igual à média dos atributos dos pixels correspondentes na resolução mais detalhada. As resoluções trabalhadas nessa pesquisa para o método de reamostragem, para cada bacia analisada, estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4. Resoluções utilizadas no método de reamostragem para as bacias estudadas

Bacia	Mudança de escala da grade do MDE	Baixa resolução
Paraíba	100 m para 1 km	1 km
	100m para 10 km	10 km
São Francisco	200 m para 1 km	1 km
	200 m para 5 km	5 km
	200 m para 50 km	50 km
Tapajós	200 m para 1 km	1 km
	200 m para 5 km	5 km
	200 m para 50 km	50 km
Uruguai	100 m para 1 km	1 km
	100 m para 5 km	5 km
	100 m para 30 km	30 km

3.5.2 Processamento do MDE reamostrado

Os procedimentos de obtenção das direções de fluxo, área acumulada de drenagem, delimitação da bacia e determinação de comprimentos dos rios para os MDEs reamostrados foram efetuados de forma análoga aos descritos nos itens 3.3.2 a 3.3.4.

3.6 REDE DE DRENAGEM DE BAIXA RESOLUÇÃO VIA MÉTODO DE UPSCALING DE DIREÇÕES DE FLUXO

3.6.1 Método COTAT+

Antes de descrever o método, convencionou-se, para maior entendimento, que os elementos de baixa resolução espacial são referidos como células e os elementos de alta resolução (produtos derivados do MDE do SRTM na resolução de partida, descrito no item 3.4.1) são denominados de pixels.

A geração dos arquivos de direções de fluxo e as áreas de drenagem acumuladas de alta resolução servem como informação para a derivação das direções de fluxo de baixa resolução, segundo o processo denominado de *upscaling de direções de fluxo*.

Nesta pesquisa, o algoritmo utilizado para a realização desse procedimento foi o COTAT+, nome dado por Davies e Bell (2009) ao algoritmo de Paz *et al.* (2006), desenvolvido a partir do trabalho de Reed (2003). Esse algoritmo está implementado na rotina computacional DirFluxo4 e consiste basicamente em duas etapas.

Na primeira etapa o algoritmo escolhe o pixel exutório que apresenta a maior área de drenagem da célula (elemento da grade de baixa resolução) que está sendo analisada. Essa decisão é tomada com base nos planos de informação de alta resolução (direção de fluxo e área acumulada de drenagem). Outra condição a ser tomada ainda na primeira etapa é o rio a montante obedecer à condição de comprimento mínimo pré-estabelecido no algoritmo, geralmente correspondente a 1/5 da dimensão da célula (Figura 12).

Na segunda etapa, decide-se para qual célula a jusante o pixel em questão irá drenar. Para essa decisão considera-se a Área Incremental Mínima (AIM), um parâmetro que interfere sobre a escolha de direções de fluxo ortogonais ou diagonais. Quanto maior o valor da AIM maior será a quantidade de trechos diagonais da rede de drenagem (Figura 13).

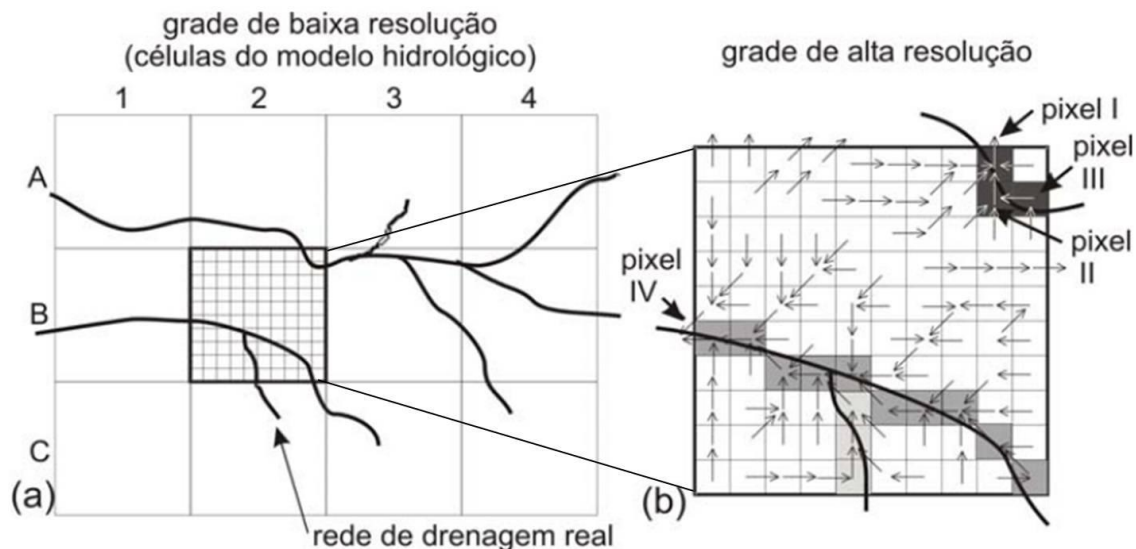


Figura 12. Determinação do pixel exutório no algoritmo COTAT+. (a): Célula de baixa resolução. (b): Zoom em uma célula do modelo hidrológico. O pixel I possui maior área de drenagem acumulada, mas por ter comprimento do curso d'água dentro da célula menor do que CMM é rejeitado para pixel exutório; pelo mesmo motivo o pixel III é rejeitado; o pixel IV é então testado e aceito para pixel exutório da célula.

Fonte: Paz (2008).

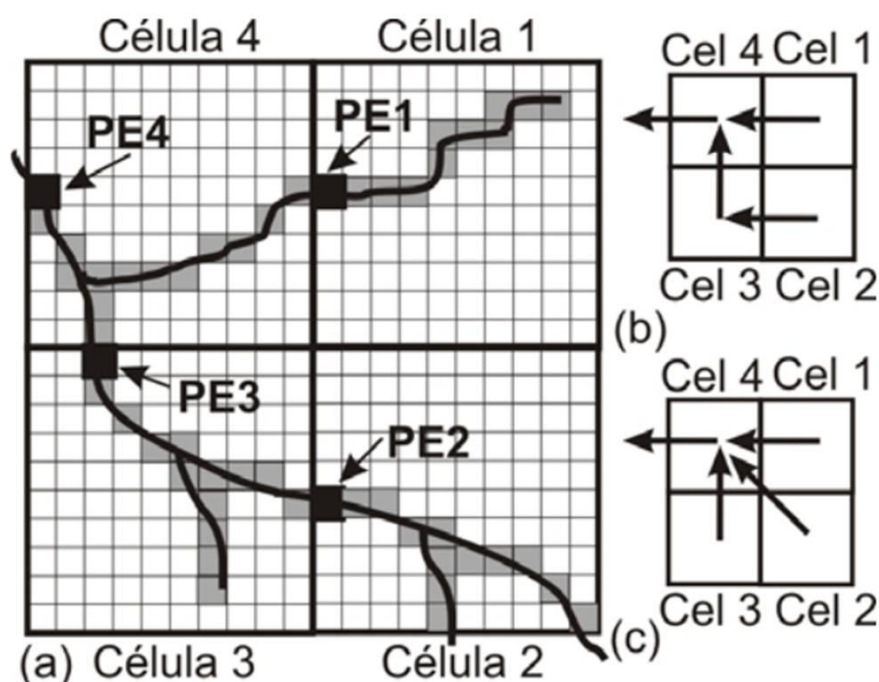


Figura 13. Definição da direção de fluxo nas células (baixa resolução) pelo algoritmo COTAT+, com base nas informações dos pixels (alta resolução). Na célula 2: (a) O Pixel Exutório (PE2) drenará para a célula 3 se a diferença das áreas de drenagem acumuladas do PE2 (pixel inicial) e o PE3 (pixel testado) for maior que o valor pré-estabelecido da AIM (b); A célula 2 só drenará para célula 4, caso a condição anterior não seja atendida encontrando o pixel PE4 como exutório (c).

Fonte: Paz (2008).

A seleção do pixel exutório consiste em, inicialmente, identificar o pixel dentro da célula que contém a maior área de drenagem acumulada. Esse pixel é pré-selecionado como pixel exutório, mas precisa ser testado para certificar dessa escolha. Quantifica-se, em seguida, o comprimento do caminho de fluxo principal a montante desse pixel exutório que está dentro da célula em análise. Se esse caminho for maior do que um valor mínimo pré-estabelecido (parâmetro CMM – Caminho Mínimo de Montante, escolhido pelo usuário), o pixel pré-selecionado é aceito como pixel exutório. Em caso contrário, esse pixel é descartado e o pixel com segunda maior área de drenagem acumulada dentro da célula é pré-selecionado. Testa-se o comprimento do caminho a montante desse pixel, sendo escolhido como pixel exutório se passar no teste ou rejeitado se não passar. Esse procedimento é repetido até encontrar um pixel que satisfaça ao critério do CMM.

O valor recomendado por Paz *et al.* (2006) para CMM corresponde a 1/5 da dimensão da célula e esse foi o critério utilizado para definir o pixel exutório das células neste trabalho durante a aplicação do algoritmo COTAT+. Tal parâmetro influencia na determinação das direções de fluxo de baixa resolução, conforme descrição do método.

A seleção de pixels exutórios é repetida para cada célula da janela de trabalho. Após essa etapa, para cada célula será percorrido o caminho de fluxo a partir do pixel exutório, para jusante, ou seja, para fora da célula, conforme o mapa de direções de fluxo. O caminhamento é percorrido pixel a pixel até encontrar algum pixel exutório de uma célula vizinha. Nesse momento, faz-se o teste da área incremental mínima (AIM): se a diferença entre as áreas acumuladas do pixel exutório de partida e o recém-encontrado for maior ou igual ao valor de AIM, o caminhamento deve ser encerrado. A direção de fluxo da célula em análise é então atribuída como sendo apontando para essa célula dentro da qual o caminhamento foi encerrado. Se a diferença entre as áreas acumuladas do pixel exutório de partida e o recém-encontrado for inferior a AIM, o caminhamento prossegue até alcançar outro pixel exutório. Faz-se o teste do AIM para decidir se prossegue ou não o caminho. Caso o caminhamento saia da vizinhança da célula (janela 3x3) em análise sem ter sido atendido o critério AIM, a direção de fluxo vai ser no sentido da última célula da vizinhança percorrida.

O valor recomendado por Paz *et al.* (2006) para AIM corresponde ao quadrado da resolução da célula, isto é, a área da célula. Tal parâmetro interfere sobre a tendência em determinar direções de fluxo ortogonais ou diagonais. Quanto maior o valor da AIM maior será a quantidade de trechos diagonais da rede de drenagem. O ideal é que haja uma distribuição equilibrada entre trechos diagonais e ortogonais.

3.6.2 Aplicação do método de *upscaling* de forma direta

A aplicação do procedimento de *upscaling* de direções de fluxo na forma direta consistiu na derivação da rede de drenagem na resolução baixa de interesse, a partir das informações da alta resolução. O algoritmo COTAT+ utilizou como arquivos de entrada os planos de informação de direção de fluxo e área acumulada obtidos no item 3.3.

Após fornecer os arquivos de entrada foi necessário informar ao algoritmo, os dois parâmetros que influenciam na drenagem gerada. O primeiro dado inserido foi o Caminho Mínimo de Montante (CMM). O arquivo resultante foi a direção de fluxo de baixa resolução.

Os parâmetros adotados para cada bacia estudada estão apresentados na Tabela 5, obedecendo as recomendações sugeridas por Paz *et al.* (2006) na escolha desses valores.

Tabela 5. Valores adotados no *upscaling* direto para os parâmetros do algoritmo COTAT+.

Bacia	Upscaling Direto (Grade alta para baixa resolução)	Baixa Resolução	CMM (km) (1/5) * Res. Baixa	AIM (km ²) (Res. Baixa) ²
Paraíba	100 m para 10 km	10 km	2	100
Uruguai	100 m para 30 km	30 km	6	900
São Francisco	200 m para 50 km	50 km	10	2500
Tapajós	200 m para 50 km	50 km	10	2500

3.6.3 Aplicação do método de *upscaling* de forma gradual

O procedimento *upscaling* de direções de fluxo de forma gradual é uma variação do procedimento de *upscaling* direto. A diferença entre esses métodos é a aplicação do algoritmo por etapas, ou seja, o processamento é realizado com intervalos menores de escala, obtendo-se a mudança da direção de fluxo de alta resolução para uma resolução intermediária e dessa para a baixa resolução. Os critérios adotados na escolha dos parâmetros CMM e AIM obedecem à mesma regra descrita no item 3.5.2.

A Tabela 6 apresenta as escalas intermediárias adotadas para cada bacia em estudo com os valores dos parâmetros informados ao algoritmo.

Tabela 6. Valores adotados no *upscaling* gradual e fornecidos aos parâmetros do COTAT+.

Bacia	Upscaling Gradual (Grades intermediárias)	Resolução Baixa	CMM (km) (1/5) * Res. Baixa	AIM (km²) (Res. Baixa)²
Paraíba (20034,0 km ²)	100 m para 1 km	1 km	0,2	1
	1 km para 10 km	10 km	2	100
Uruguai (206316,4 km ²)	100 m para 1 km	1 km	0,2	1
	1 km para 5 km	5 km	1	25
	5 km para 30 km	30 km	6	900
São Francisco (641347,0 km ²)	200 m para 1 km	1 km	0,2	1
	1 km para 5 km	5 km	1	25
	5 km para 50 km	50 km	10	2500
Tapajós (477865,0 km ²)	200 m para 1 km	1 km	0,2	1
	1 km para 5 km	5 km	1	25
	5 km para 50 km	50 km	10	2500

3.7 AVALIAÇÃO DAS REDES DE DRENAGEM

3.7.1 Visão geral

Para a avaliação das redes de drenagem foram utilizadas rotinas em linguagem Fortran e o *software* ArcGis 9.3. As redes de alta e baixa resolução extraídas a partir do MDE foram comparadas às redes vetorizadas das imagens ETM+/LANDSAT 7, tomadas como base nas análises. Com isso, foi possível avaliar o grau de similaridade entre as redes, por meio da comparação dos traçados, dos comprimentos e da delimitação das bacias hidrográficas.

3.7.2 Avaliação do traçado da rede de drenagem

As análises referentes à avaliação do traçado das redes de drenagem obtidas por diferentes métodos e resoluções foram realizadas de forma qualitativa e quantitativa. A primeira foi realizada com base na rede de drenagem extraída do MDE do SRTM de alta resolução e a segunda comparada à rede vetorizada das imagens LANDSAT, em ambos os casos as redes foram tomadas como referências.

A avaliação qualitativa consistiu em uma comparação visual, observando-se o desempenho do traçado dos rios obtidos pelos diferentes métodos. Foi realizada a contagem do número de células que apresentaram direções de fluxo diferentes entre os dois procedimentos de *upscaling*, avaliando o que apresentou melhor qualidade de drenagem ou se ambos foram equivalentes em termos de representação dos traçados quando comparada à rede de alta resolução do SRTM. Essa contagem não foi realizada para o método de reamostragem por esse ter desempenho bem abaixo dos demais e porque o intuito dessa contagem foi de avaliar o método que apresentou melhores resultados.

Também foi avaliado o grau de relevância da diferença entre as direções de fluxo obtidas pelos procedimentos de *upscaling* gradual e direto. Esse grau consistiu em avaliar o quanto a mudança na direção de fluxo de uma ou mais células interferiram na qualidade da rede de drenagem de baixa resolução gerada, comparando o desempenho entre os métodos em relação à drenagem de alta resolução obtida do MDE do SRTM.

Em alguns casos, a mudança de direção de fluxo de uma célula pode levar a uma mudança considerada relevante na rede de drenagem como um todo – seja pela confluência entre dois rios que não deveriam confluir, ou mudança significativa do ponto de confluência ou da área de contribuição de uma sub-bacia. Em outros casos, a mudança na direção de fluxo atribuída a uma célula tem pequenas ou até nenhuma repercussão. Por exemplo, quando se trata de uma célula de cabeceira, o impacto é restrito a uma ou duas células, ou quando há mais de uma direção de fluxo aceitável para ser atribuída à célula, por passar dois ou mais rios por dentro dela. Assim, as células cujas direções de fluxo resultantes dos procedimentos de *upscaling* direto e gradual foram diferentes entre si foram classificadas em alta ou baixa relevância. Foi verificada as células que diferiram nos dois métodos e quais conseguiram preservar melhor a rede em relação a drenagem de referência. Levando isso em consideração, a alta relevância correspondeu à capacidade do método evitar uma incoerência de grande repercussão na rede de drenagem de baixa resolução em relação à drenagem de alta resolução. Já a de baixa relevância difere apenas no impacto do método evitar o erro, que é importante, mas é de pequena repercussão sobre a rede de drenagem de baixa resolução.

Um dos critérios quantitativos adotado para avaliar as redes de drenagem de baixa resolução geradas dos procedimentos de reamostragem, *upscaling* direto e gradual foi o de averiguar a formação de áreas entre essas e a drenagem vetorizada das imagens LANDSAT, contabilizando a distância média entre as mesmas. Para obtenção dessa distância calculou-se a razão entre o somatório das áreas formadas entre as redes pelo comprimento do rio vetorizado para o trecho analisado.

3.7.3 Avaliação da delimitação das bacias hidrográficas

Foram analisadas quantitativamente as áreas das bacias estudadas obtidas pelos métodos de reamostragem, *upscaling* direto e gradual. Esses valores foram comparados com a bacia resultante da drenagem de alta resolução do SRTM, verificando quanto à ocorrência de subestimativa ou superestimativa.

3.7.4 Avaliação de comprimentos de trechos de rio

A avaliação dos comprimentos de rios consistiu simplesmente em comparar os valores obtidos para os comprimentos oriundos de duas redes de drenagem em análise. Obtiveram-se os erros quantitativos do comprimento para os trechos de rio, os quais foram utilizados como indicadores do grau de similaridade entre as duas redes de drenagem em termos numéricos.

O cálculo da sinuosidade foi obtido pela razão do comprimento do rio segundo seu traçado pelo comprimento medido em linha reta (BUARQUE *et al.*, 2008).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO DOS TRAÇADOS DA REDE DE DRENAGEM

4.1.1 Comparação visual

A primeira análise dos traçados foi de caráter qualitativo, no qual foi verificada a similaridade entre as drenagens de alta resolução extraídas do MDE do SRTM, tomada como referência, e as derivadas por diferentes métodos e resoluções espaciais.

A comparação visual foi realizada entre diferentes escalas obtidas pelo método de reamostragem e a drenagem de alta resolução. A outra fase das análises correspondeu ao desempenho dos traçados pelos diferentes métodos de *upsampling* de direções de fluxo, também em relação em relação a drenagens de alta resolução extraídas do MDE do SRTM, contabilizando-se o número de células que divergiram e apresentaram melhores resultados.

4.1.1.1 Rede de drenagem por reamostragem em várias resoluções espaciais

Para as quatro bacias estudadas nesta pesquisa foram realizadas a extração da rede de drenagem pelo método de reamostragem em várias resoluções espaciais.

Na bacia do rio Paraíba, as mudanças de escala adotadas foram de 100 m para 1 km e de 100 m para 10 km. O trecho do rio em detalhes na Figura 14 mostra que essa mudança para 1 km se apresenta coerente aos traçados da rede de drenagem na resolução 100 m. No entanto, os rios obtidos na escala 10 km (Figura 15) não representaram de forma geral a rede de alta resolução, devido algumas células drenarem para o rio Paraibinha, enquanto, deveriam corresponder a outro afluente do rio principal, erro considerado grave por não conseguir representar a drenagem real. Como esse erro não ocorreu quando a mudança de escala foi para 1 km, isso indica que à medida que se trabalha com resoluções mais baixas, mais susceptíveis a erros estará a drenagem obtida.

Foram obtidas para a bacia do rio São Francisco as redes de drenagem por reamostragem nas resoluções 1 km, 5 km e 50 km. Observou-se para esse método que as mudanças de escala menores (Figuras 16 e 17) conseguiram preservar esse plano de informação quando equiparados à drenagem na resolução espacial de 200 m. Para a mudança de escala de 50 km ocorreu erro muito grave de representação do traçado quando comparada com a rede de alta resolução, extraída do MDE do SRTM. A desembocadura do rio São Francisco localiza-se entre os Estados de Alagoas e

Sergipe, entretanto utilizando-se o método de reamostragem para derivação da rede de drenagem na resolução 50 km, a foz da bacia resultou entre os Estados do Maranhão e Piauí (Figura 18).

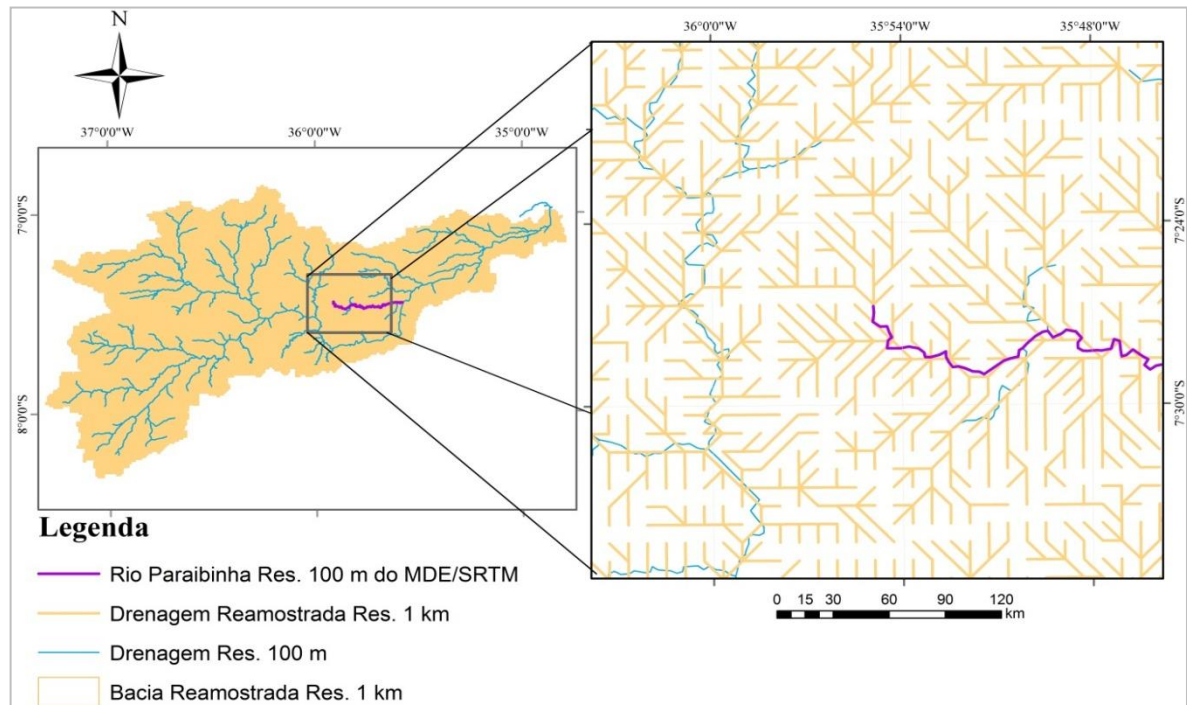


Figura 14. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Paraíba com mudança de escala de 100 m para 1 km pelo método de reamostragem.

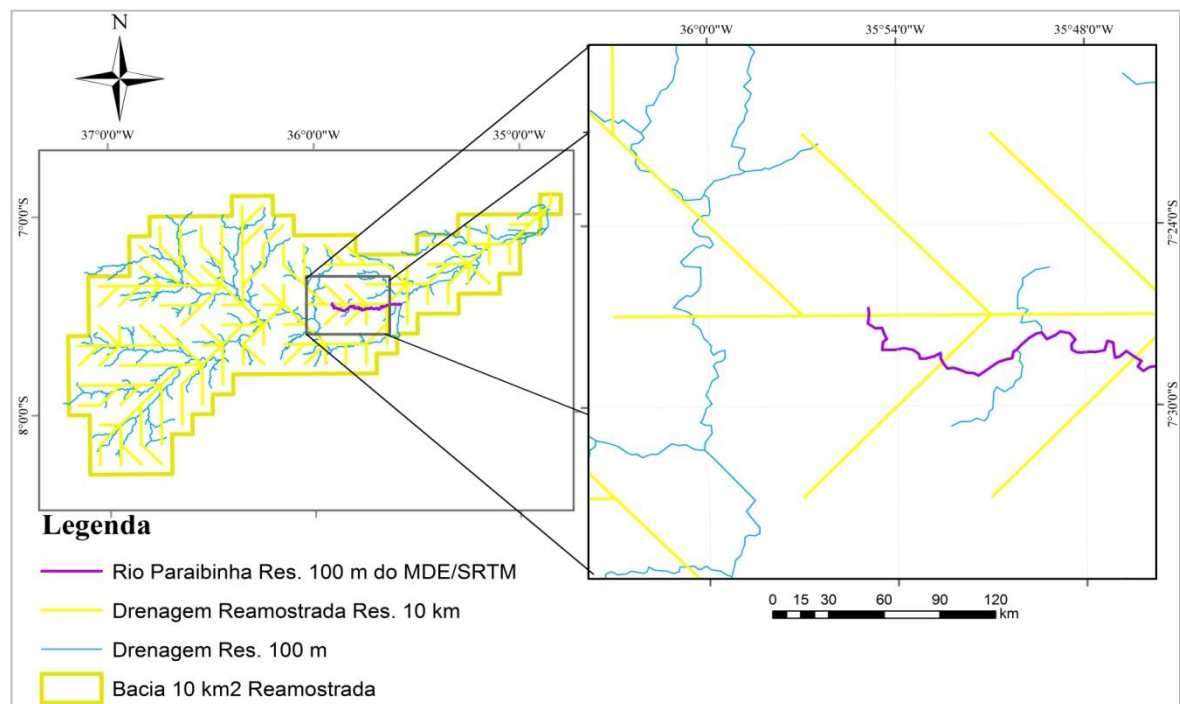


Figura 15. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Paraíba com mudança de escala de 100 m para 10 km pelo método de reamostragem.

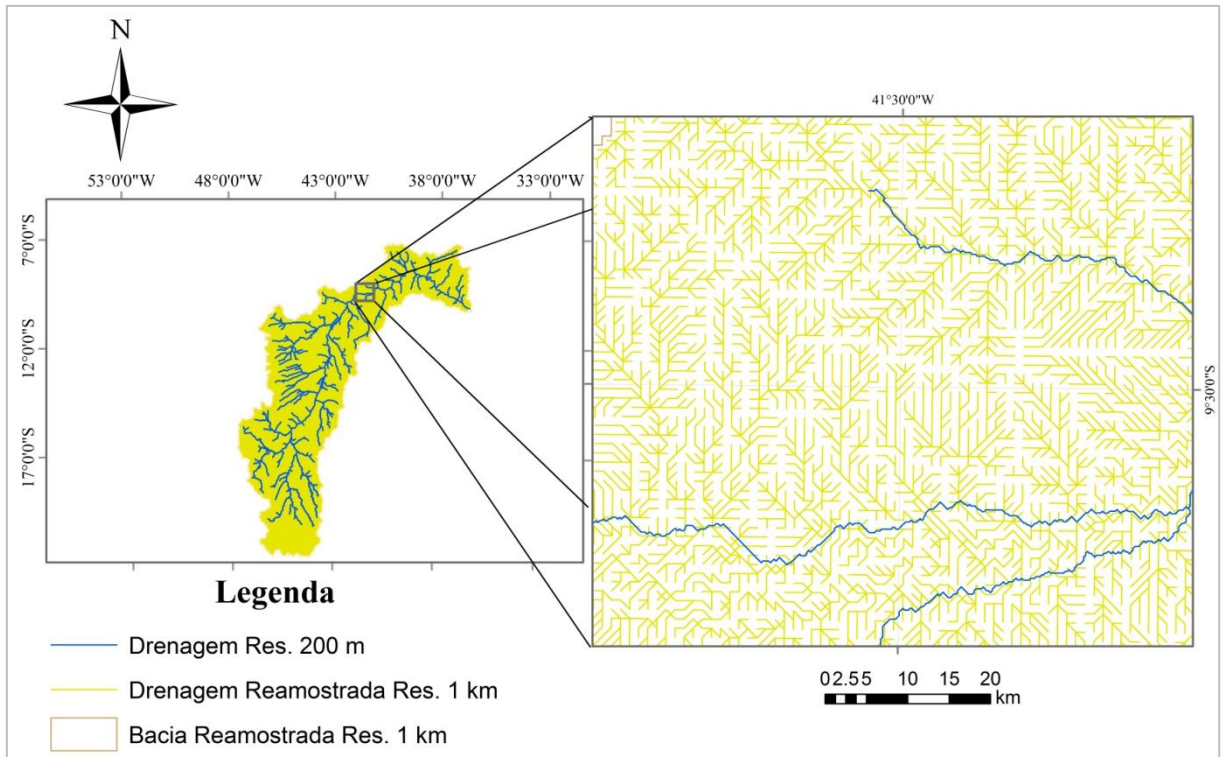


Figura 16. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio São Francisco com mudança de escala de 200 m para 1 km pelo método de reamostragem.

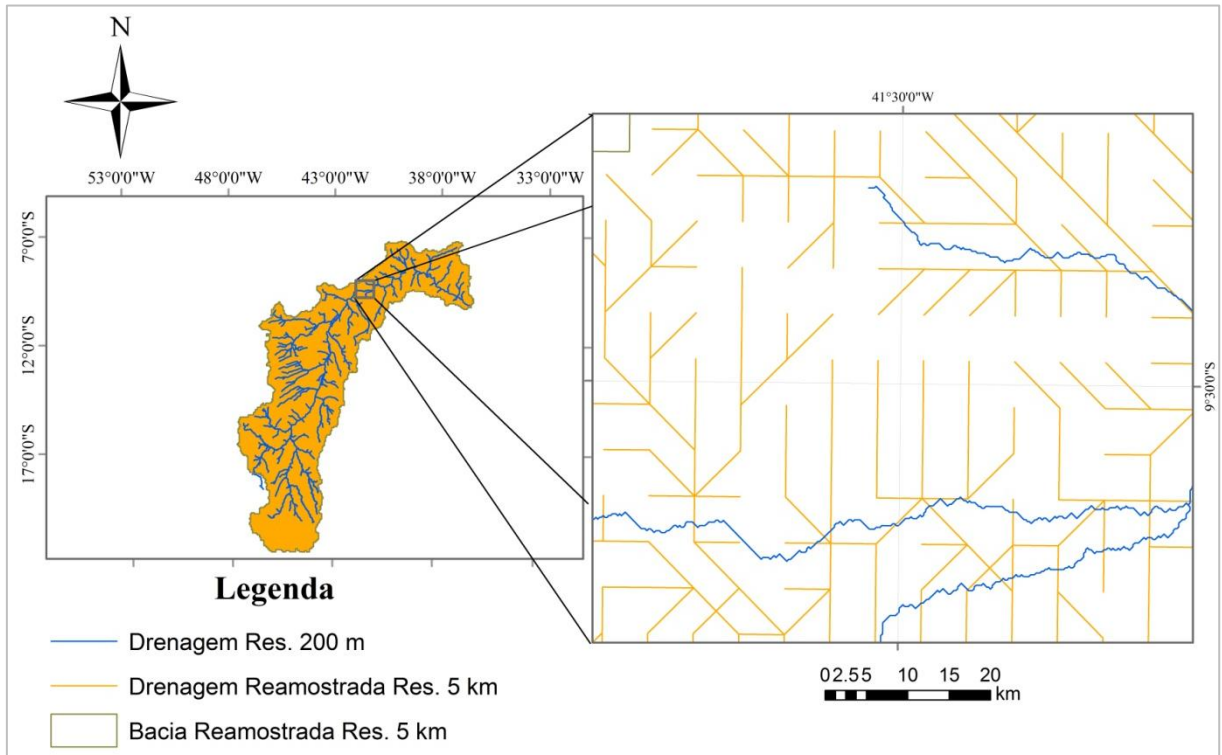


Figura 17. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio São Francisco com mudança de escala de 200 m para 5 km pelo método de reamostragem.

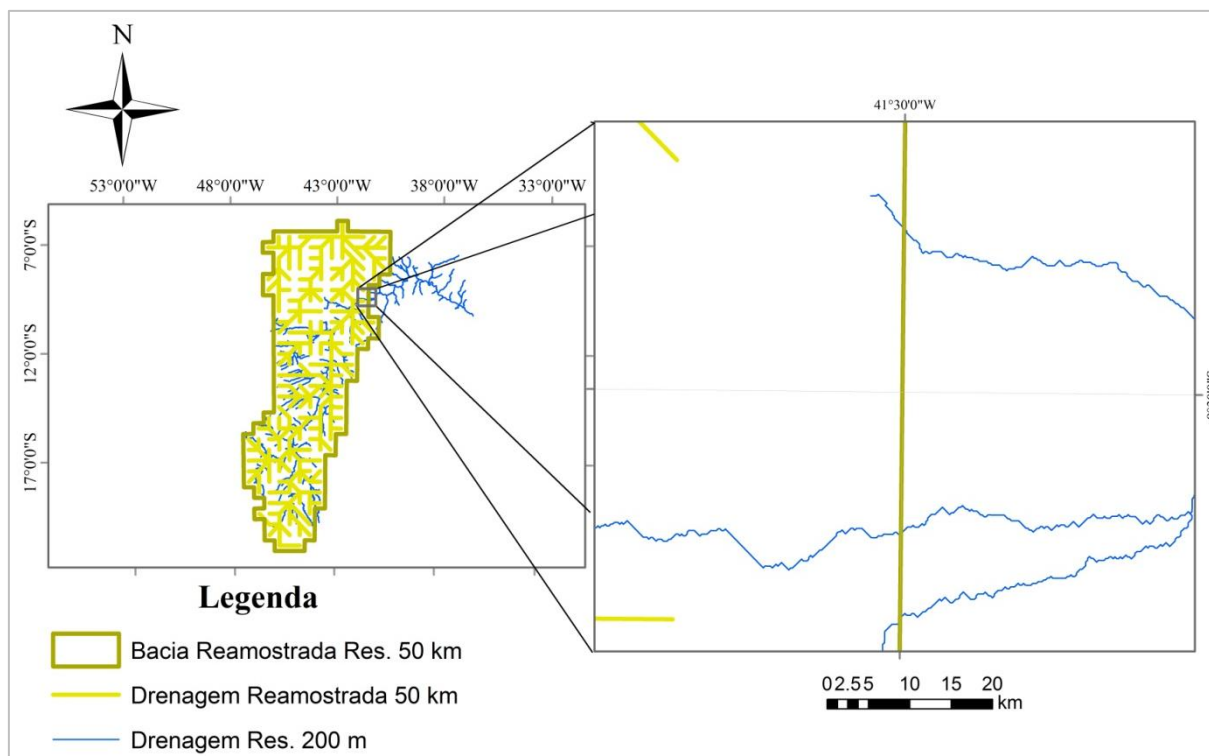


Figura 18. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio São Francisco com mudança de escala de 200 m para 50 km pelo método de reamostragem.

Assim como na bacia do São Francisco foi trabalhado com mudanças de escala para a bacia do rio Tapajós de 200 m para 1 km, 5 km e 50 km, pelo método de reamostragem.

Analizando a região em detalhe apresentada nas Figuras 19, 20 e 21 aplicado a todas as resoluções trabalhadas, verificou-se que desde a escala de 1 km (Figura 19) a drenagem de maior área acumulada e comprimento não conseguiu ser bem representada. Em vez da direção de fluxo da célula ocorrer para o rio de maior representatividade ocorreu para uma célula de cabeceira, de menor importância. Esse problema também foi notório na resolução 5 km e pode ser visualizado na área destacada por um retângulo vermelho na Figura 20.

À medida que a mudança de escala foi aumentando o problema de representação do traçado foi sendo agravado como é evidenciado na Figura 21, onde a drenagem mal conseguiu ser representada quando comparada a de alta resolução. Na resolução 50 km, os erros se tornaram mais bruscos não apenas nesse trecho, mas para toda a bacia, ocorrendo mudança inclusive na desembocadura do rio, o que ocasionou alterações no formato e na área da bacia.

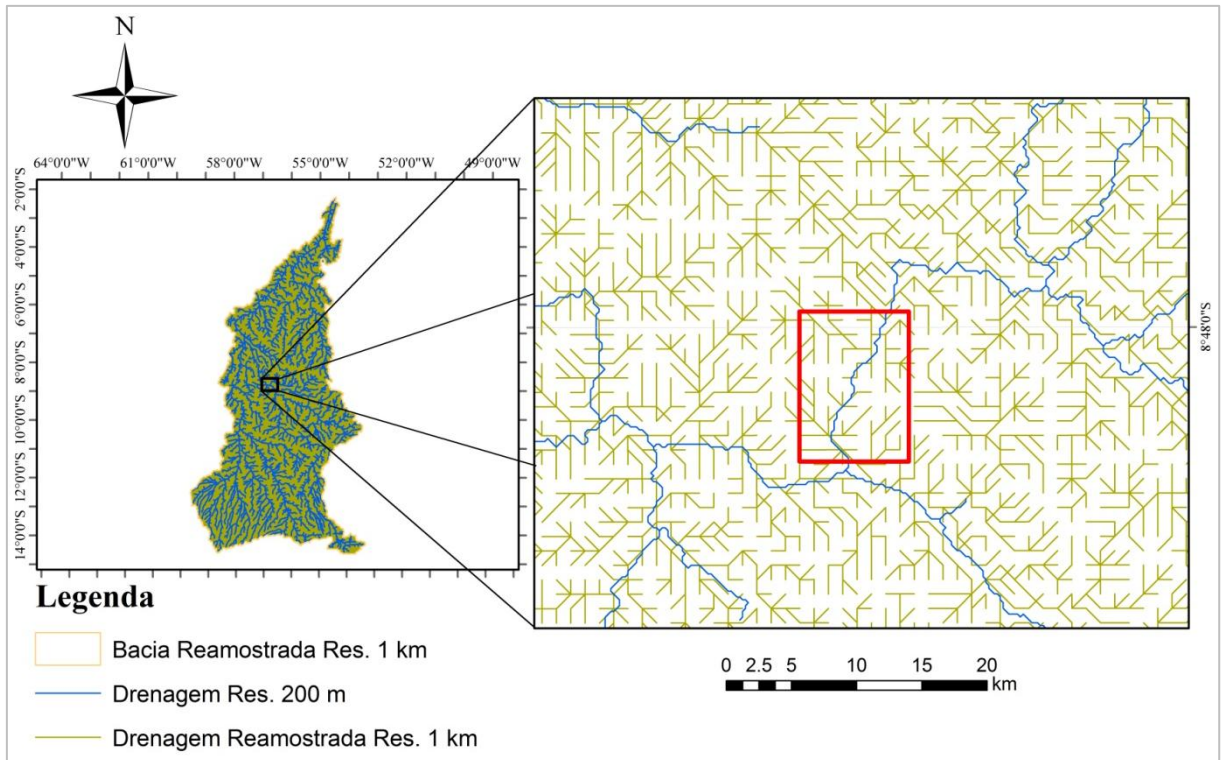


Figura 19. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Tapajós com mudança de escala de 200 m para 1 km pelo método de reamostragem.

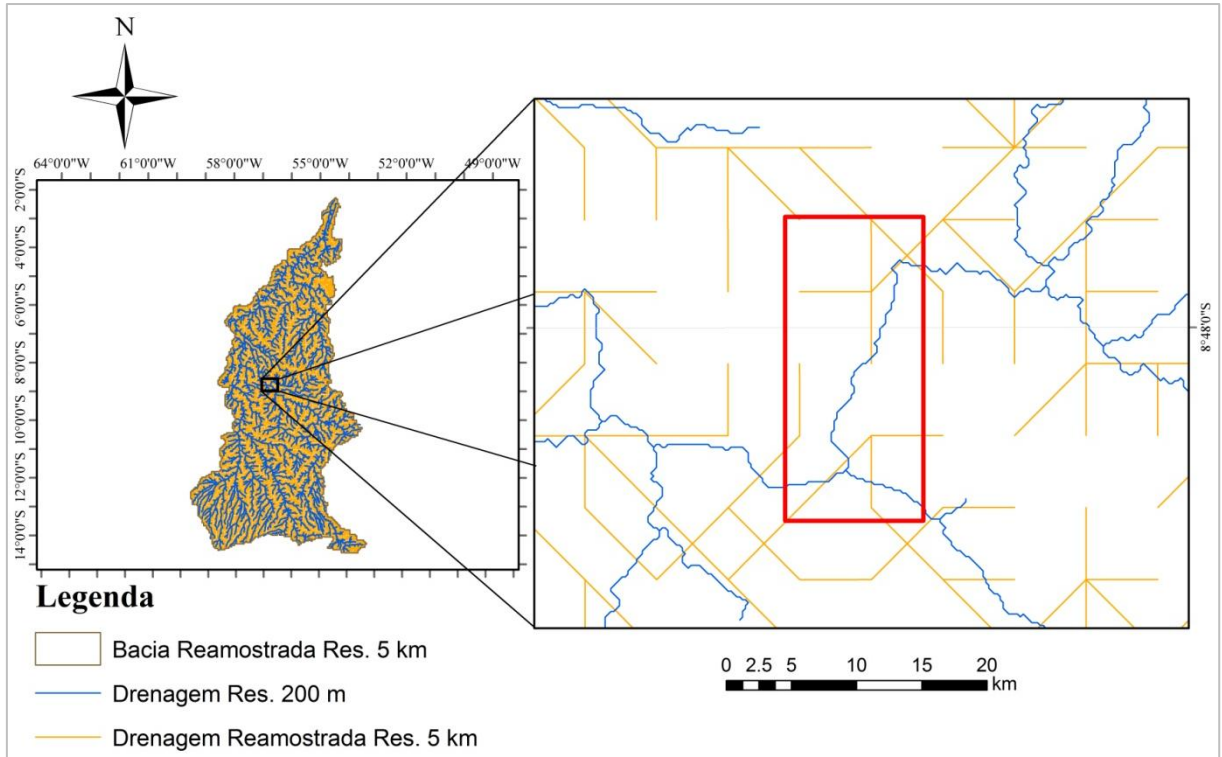


Figura 20. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Tapajós com mudança de escala de 200 m para 5 km pelo método de reamostragem.

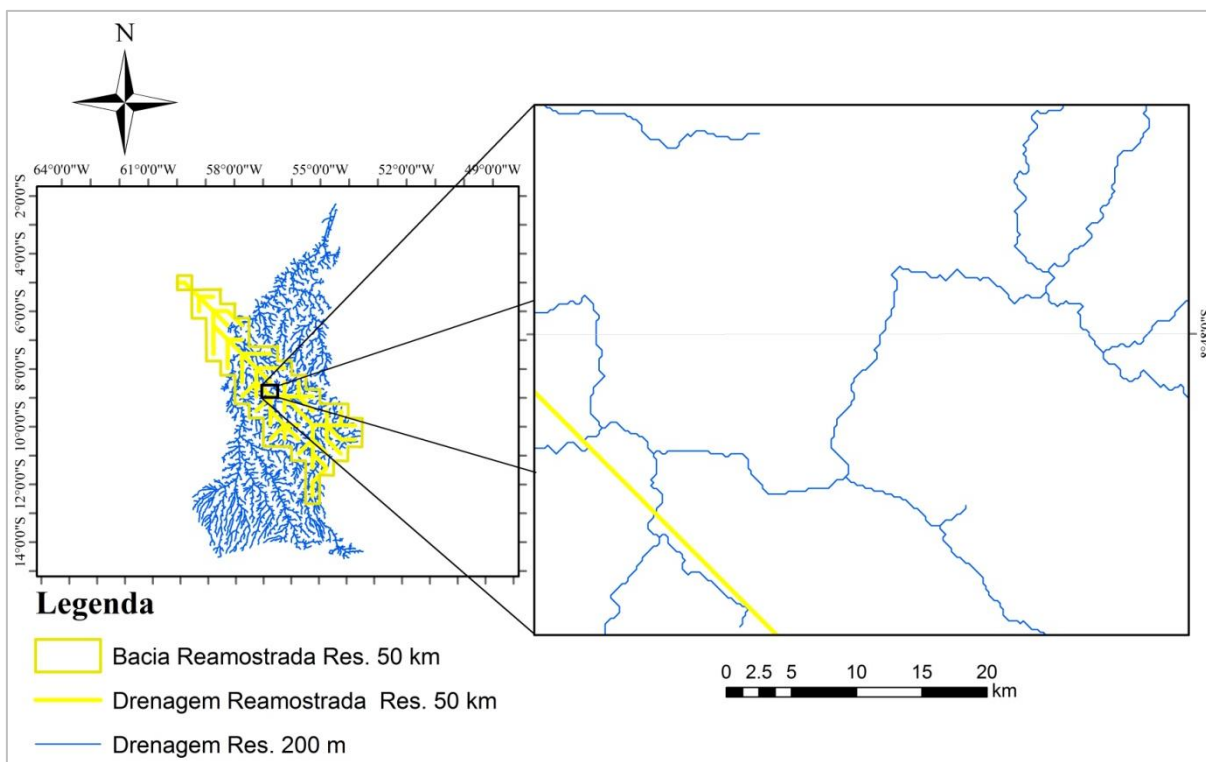


Figura 21. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Tapajós com mudança de escala de 200 m para 50 km pelo método de reamostragem.

As resoluções adotadas utilizando o método de reamostragem para a bacia do rio Uruguai foram 1 km, 5 km e 30 km. Como esperado, no trecho avaliado para todas as escalas verificou-se que a rede que melhor correspondeu a de alta resolução foi a de 1 km (Figura 22). Na resolução de 5 km foi possível observar que a mesma não apresentou bom desempenho dos traçados no trecho avaliado, por não ter conseguido representar todos os rios na parte alta da bacia (Figura 23). Na escala de 30 km (Figura 24) a rede não representada foi maior do que na de 5 km, verificando-se a perda de informação à medida que se degradou as imagens SRTM de alta resolução.

Nas quatro bacias estudadas foi observado que independente da área da bacia e da densidade de drenagem o método de reamostragem apresentou incoerências ao traçar a rede de baixa resolução, principalmente, quando a mudança de escala foi maior. No entanto, as bacias de maior porte evidenciaram erros de maior gravidade, alterando não apenas alguns traçados de rios, mas também, desembocadura e a área da bacia. Em alguns trechos de rios foi identificado que até mesmo em mudanças de escala menores, erros de representação de cunho grave foram encontrados.

Os problemas resultantes da utilização desse método requerem cuidados e demanda de tempo na correção das direções de fluxo incoerentes, para que as redes de drenagem derivadas nessas resoluções espaciais possam ser utilizadas para estudos ambientais diversos.

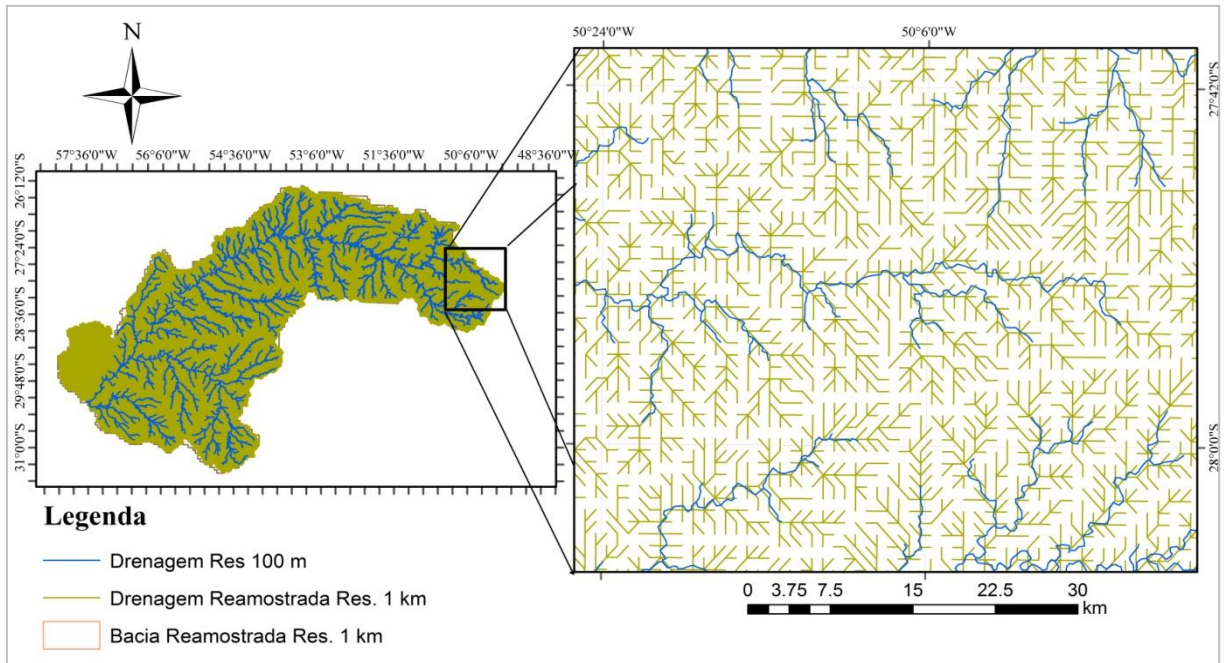


Figura 22. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Uruguai com mudança de escala de 100 m para 1 km pelo método de reamostragem.

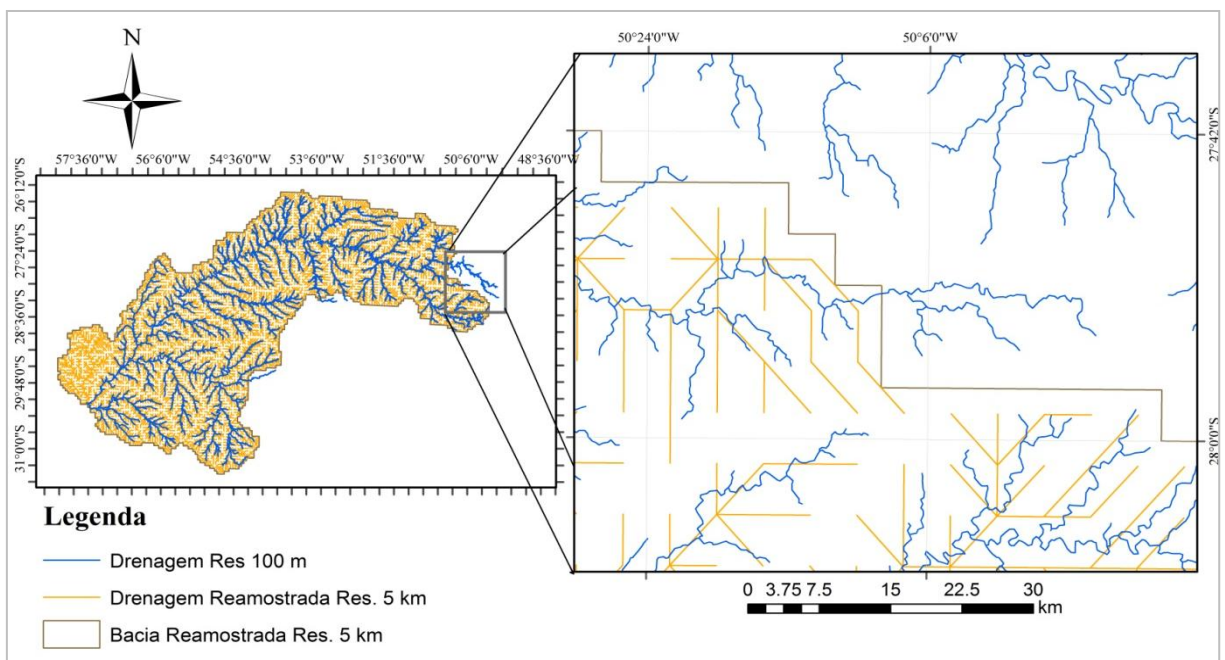


Figura 23. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Uruguai com mudança de escala de 100 m para 5 km pelo método de reamostragem.

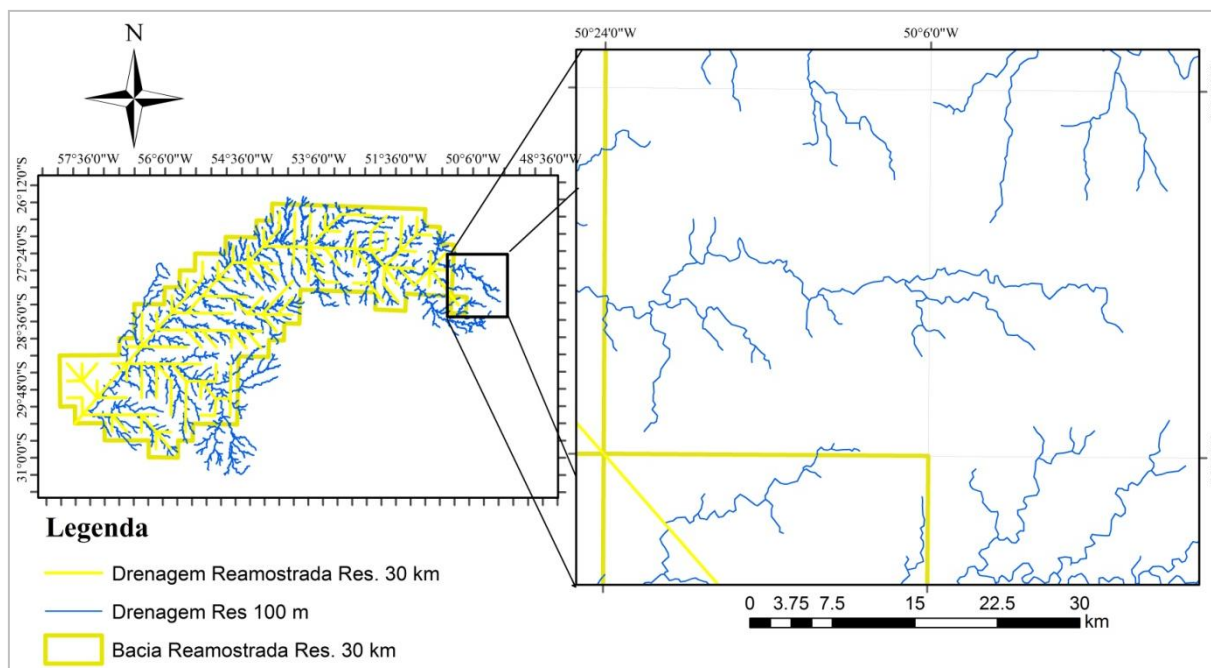


Figura 24. Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Uruguai com mudança de escala de 100 m para 30 km pelo método de reamostragem.

4.1.1.2 Rede de alta resolução, *Upscaling* direto e *Upscaling* gradual

Nessa etapa da análise visual, a rede de drenagem de alta resolução extraída do MDE do SRTM foi utilizada como base na comparação com os vetores de rios de baixa resolução obtidos pelos métodos de *upscaling* de direções de fluxo na modalidade direta (de alta para baixa resolução) e gradual (por etapas, da resolução alta para a intermediária, e desta para a baixa resolução) para todas as quatro bacias estudadas.

A derivação da rede de drenagem pelo método de *upscaling* apresentou melhor desempenho, para todas as bacias, em relação ao processo de reamostragem, corroborando com Paz *et al.* (2006), Shaw *et al.* (2005), Reed (2003), Olivera *et al.* (2002), Wang *et al.* (2000) e O'Donnell *et al.* (1999) para obtenção de uma rede de drenagem mais coerente com a rede de drenagem de referência para ser inserida, por exemplo, em modelos hidrológicos.

A rede de drenagem da bacia do rio Paraíba pode ser visualizada de forma geral pelos métodos de *upscaling* direto (Figura 25 A) e gradual (Figura 25 B) na escala de 10 km, comparada com a drenagem na resolução espacial de 100 m. É possível observar no mapa algumas diferenças na determinação da direção de fluxo nas duas modalidades avaliadas. Dessa forma, para comparar esses resultados foram contabilizados os casos onde as direções geradas pelos dois procedimentos foram diferentes, verificando-se qual método apresentou

melhor desempenho ou se ambos foram equivalentes em termos de representação dos traçados da rede de drenagem em relação à extraída em alta resolução.

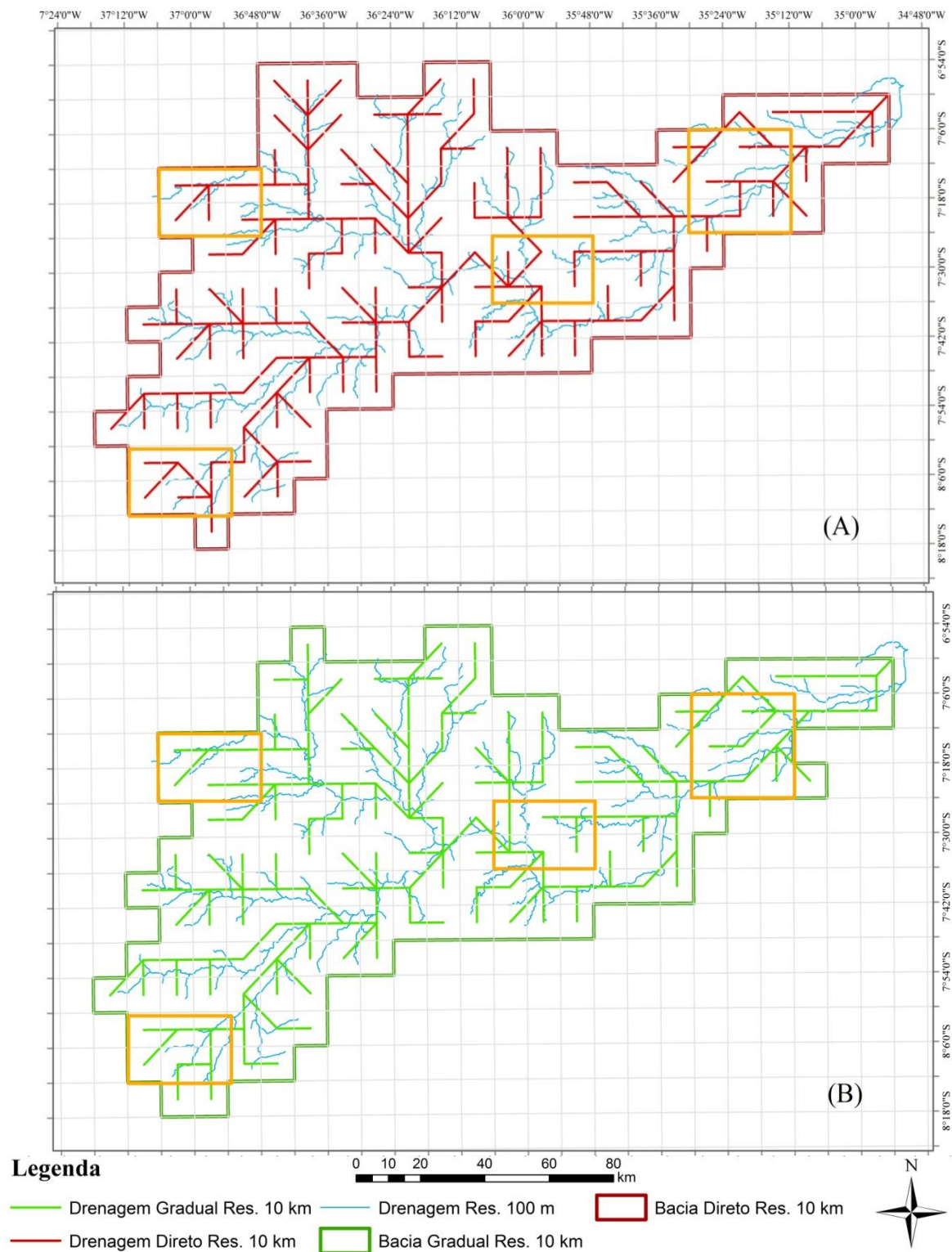


Figura 25. Visão geral da rede de drenagem da bacia do Rio Paraíba pelo método de *upscaling* direto (A) e gradual (B) na resolução 10 km.

O desempenho entre os procedimentos de *upscaling* para a bacia do rio Paraíba, com base nos critérios qualitativos, indicou que não ocorreram diferenças significativas entre os dois métodos. Dentro da área da bacia, 9,3% das células apresentaram direções de fluxo diferentes. Dessas células, o método que mostrou melhor desempenho na representação da direção de fluxo foi o *upscaling* gradual com 60% dos resultados em relação ao *upscaling* direto, que obteve 20% de resultados favoráveis, sendo os outros 20% correspondentes à situação de equivalência entre eles em termos de qualidade da drenagem (Tabela 7).

Tabela 7. Comparação do desempenho entre os procedimentos de *upscaling* direto e gradual para a bacia do rio Paraíba.

Procedimento com melhor desempenho (em % das células com direção de fluxo diferente)				Células com direções de fluxo diferentes	Células com direção de fluxo idêntica	Total de células da bacia
<i>Upscaling</i> direto	<i>Upscaling</i> gradual	Equivalentes Direto x Gradual	Total das células com direções de fluxo diferentes			
20%	60%	20%	100%	9,3%	90,7%	162

Também foi analisada a representação das redes de drenagens obtidas pelos métodos de *upscaling* gradual e direto pelo grau de relevância, classificadas em alta ou baixa. Foi verificada as células que diferiram nos dois métodos e quais conseguiram preservar melhor as mesmas em relação à drenagem de 100 m de resolução. Dessa forma, 40% dos melhores resultados do *upscaling* gradual foram de baixa relevância e 20% de alta relevância, contra 13,3% de baixa relevância do *upscaling* direto e 6,7% de alta (Tabela 8).

Tabela 8. Grau de relevância entre as diferenças ocorridas nos resultados dos métodos de *upscaling* de direções de fluxo para a bacia do rio Paraíba.

Grau de relevância	Procedimento com melhor desempenho (em % das células com direção de fluxo diferente)	
	<i>Upscaling</i> direto	<i>Upscaling</i> gradual
Baixa	13,3%	40%
Alta	6,7%	20%
Total	20%	60%

Um exemplo de melhor desempenho e alta relevância na bacia do rio Paraíba obtido pelo procedimento de *upscaling* gradual é apresentado na Figura 26. Nesse exemplo, o método de *upscaling* gradual levou à preservação do rio de maior área de drenagem e comprimento, evitando que um rio de menor porte tivesse prioridade sobre o de maior representação, problema esse que não foi evitado no *upscaling* direto, levando à formação da célula de cabeceira, destacada na cor laranja, ocasionando erro grave no traçado da rede quando comparado ao de alta resolução.

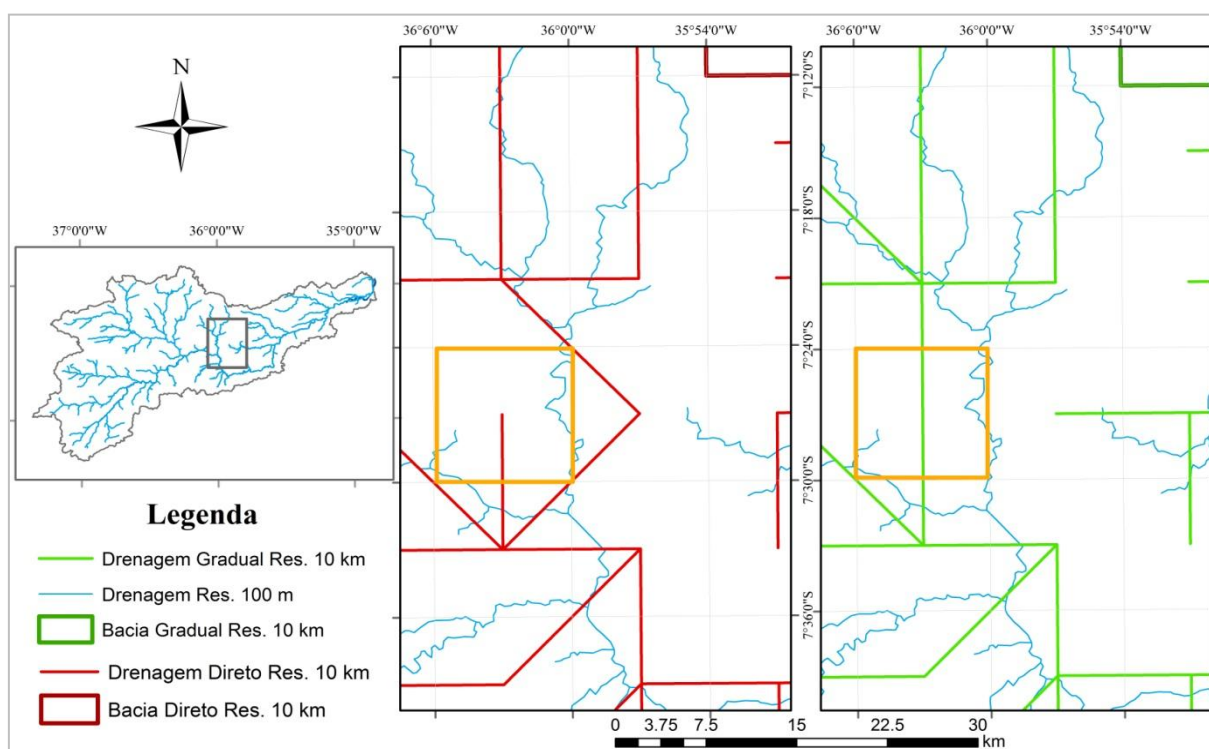


Figura 26. Método de *upscaling* direto (à esquerda) e gradual (à direita), na resolução de 10 km, com grau de relevância alto para o segunda modalidade em trecho do rio Paraíba.

Na Figura 27 têm-se o exemplo de alta relevância para o método de *upscaling* direto que conseguiu preservar melhor o traçado considerado como referência. Ao inverso da modalidade gradual que deixou de representar um afluente do rio Paraíba para drenar para outro curso d'água impossibilitando a representação real desse trecho analisado.

Um exemplo do grau de relevância baixo aplicado ao *upscaling* direto pode ser observado na Figura 28, nas áreas destacadas em laranja. A drenagem obtida pelo *upscaling* direto configura-se mais próximo da drenagem de alta resolução, apresentando melhor desempenho que a modalidade gradual, mas que não apresentou grandes impactos de conservação do traçado em relação à drenagem de referência. Ou seja, a diferença obtida nos resultados entre os dois métodos não se traduz em impactos muito importantes em termos da representação do traçado dos rios para

estudos que venham a ser feitos com esses resultados, no entanto, apesar do impacto não ser de grande relevância, a modalidade direta foi melhor que a gradual.

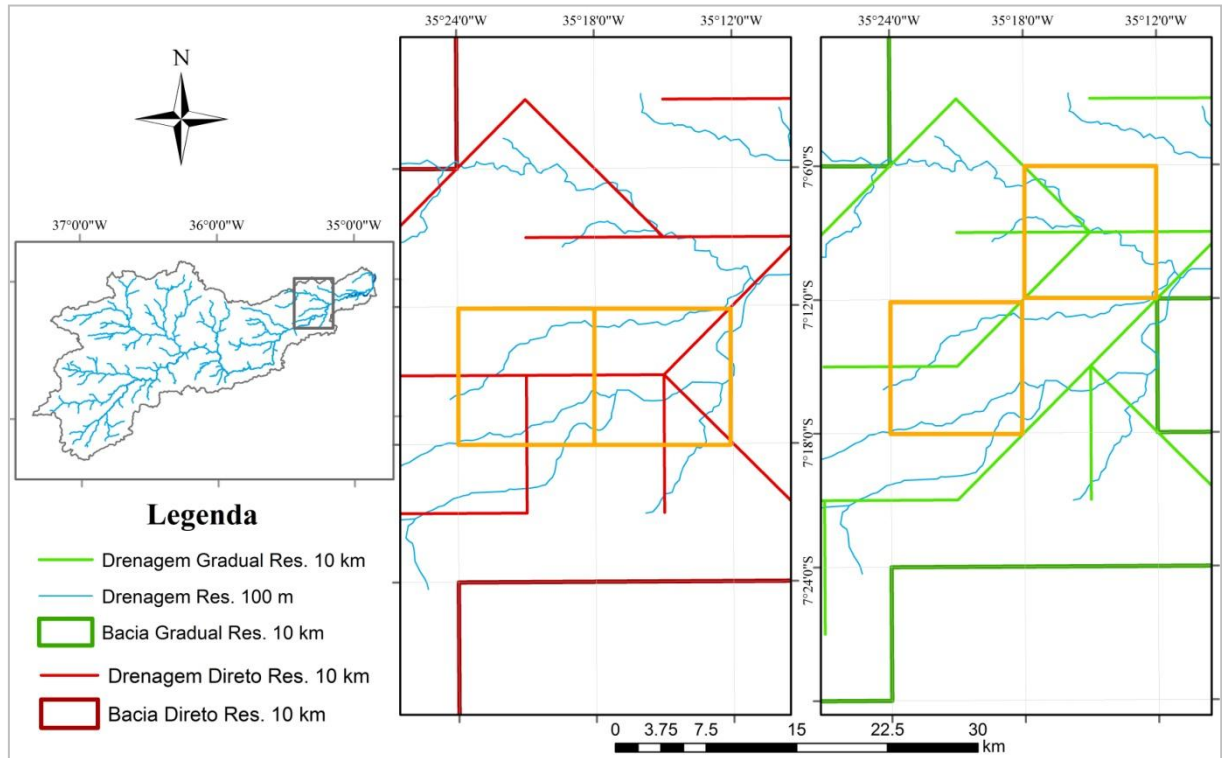


Figura 27. Método de *upscaling* direto (à esquerda) e gradual (à direita), na resolução de 10 km, com grau de relevância alto para a primeira modalidade, em trecho do rio Paraíba.

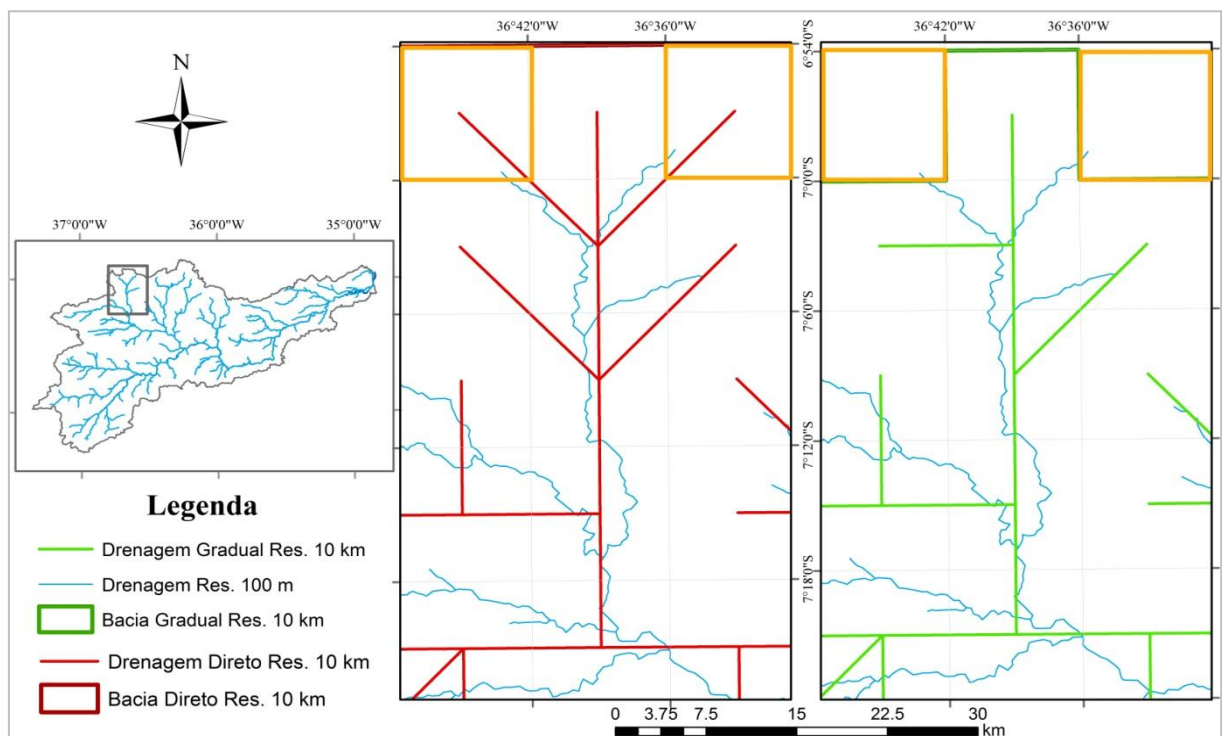


Figura 28. Método de *upscaling* direto (à esquerda) e gradual (à direita), na resolução de 10 km, com grau de relevância baixo para a primeira modalidade, em trecho do rio Paraíba.

A equivalência entre os métodos ocorreu principalmente nas situações de início da rede de drenagem, que são as células de cabeceira, onde em uma mesma célula pertencem rios de áreas de drenagem e comprimento com valores semelhantes (Figura 29). As duas redes de drenagem traçadas podem ser consideradas corretas, já que a escolha de se a célula em destaque na Figura 29 deveria ter seu escoamento direcionado para a célula vizinha superior ou à direita não tem solução pré-determinada e pode ser considerada subjetiva, devido à limitação inerente em se representar a morfologia do terreno com células quadradas. Esse fato não se restringiu apenas à bacia do rio Paraíba, mas se aplicou também às demais bacias estudadas.

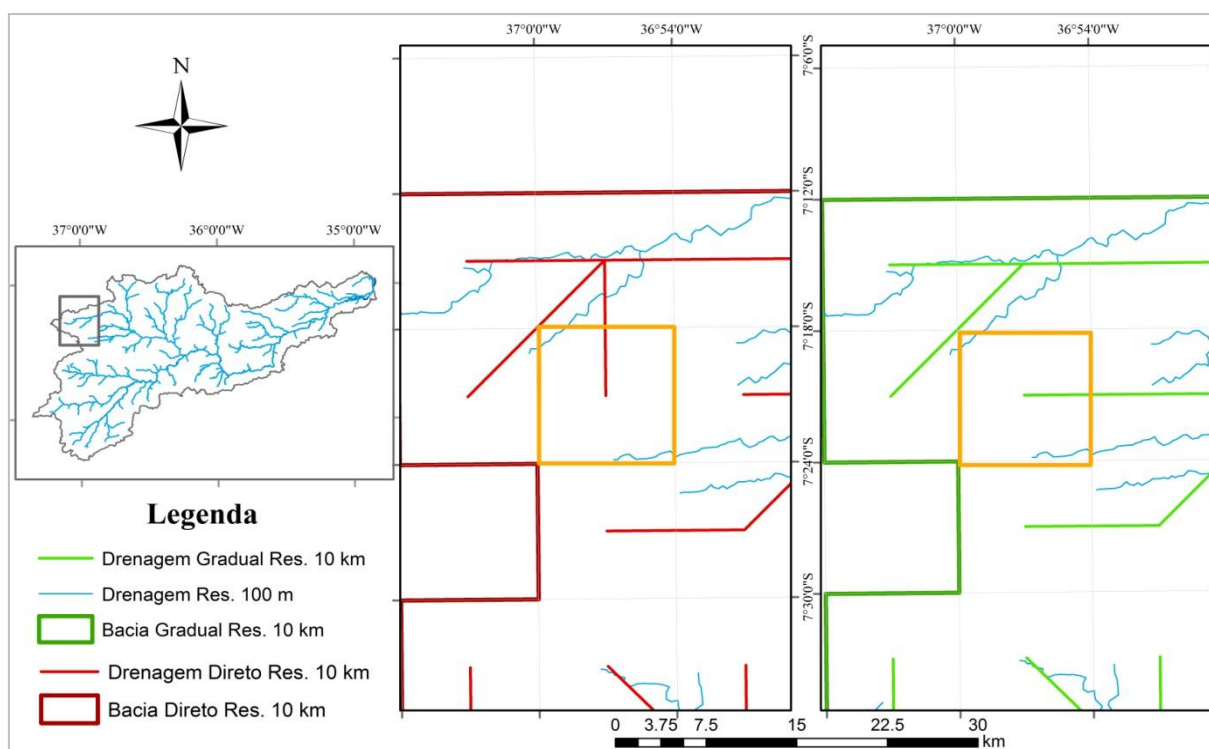


Figura 29 Método de *upscaling* direto (à esquerda) e gradual (à direita), na resolução de 10 km, com grau de relevância equivalente para as duas modalidades, em trecho do rio Paraíba.

Os critérios descritos e exemplificados para a bacia do Paraíba se aplicam às outras bacias estudadas, onde são apenas contabilizados percentualmente o método de melhor desempenho e o grau de relevância desses procedimentos.

Para a bacia do rio São Francisco, as duas modalidades de *upscaling* testadas se apresentaram coerentes com a drenagem de alta resolução e diferiram entre si em poucos trechos, alguns dos quais podem ser visualizados na Figura 30, nas áreas destacadas na cor laranja.

Foi avaliado que o método de *upscaling* obteve melhor desempenho contabilizando as células que apresentaram distinções na atribuição das direções de fluxo. As abordagens de

upscaling direto (Figura 30 A) e gradual (Figura 30 B) diferiram na determinação das direções de fluxo em aproximadamente 13% das células da bacia. Analisando essa diferença entre os dois métodos, o *upscaling* gradual apresentou melhor resultado com 55,6% de células drenando coerentemente com a rede de drenagem na resolução 200 m, contra 7,4% do *upscaling* direto, e mostraram-se equivalentes nessa determinação em 37% das células (Tabela 9).

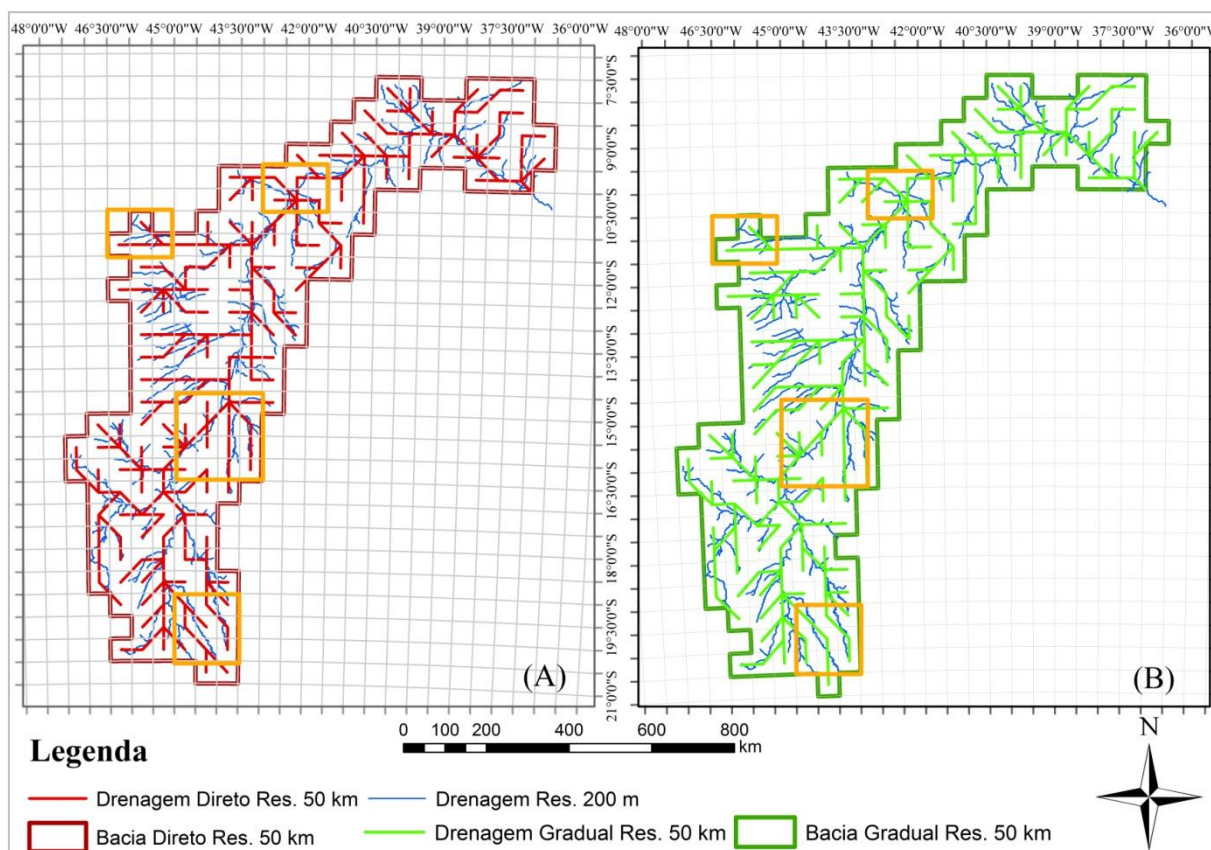


Figura 30. Visão geral da rede de drenagem da bacia do Rio São Francisco pelo método de *upscaling* direto (A) e gradual (B) na resolução 50 km.

Tabela 9. Comparação do desempenho entre os procedimentos de *upscaling* direto e gradual para a bacia do rio São Francisco.

Procedimento com melhor desempenho (em % das células com direção de fluxo diferente)				Células com direções de fluxo diferentes	Células com direção de fluxo idêntica	Total de células da bacia
<i>Upscaling</i> direto	<i>Upscaling</i> gradual	Equivalentes Direto X Gradual	Total das células com direções de fluxo diferentes			
7,4%	55,6%	37%	100%	13%	87%	207

Verificou-se a relevância entre os métodos de *upscaling* nas células que apresentaram diferenças de fluxo para resultados de baixo grau correspondendo a 7,4% para a modalidade direta contra 40,8% da gradual. E para os resultados de alta relevância 14,8% das células obtidas por *upscaling* gradual se apresentaram nessa categoria, contra 0% do direto (Tabela 10).

Tabela 10. Grau de relevância entre as diferenças ocorridas nos resultados dos métodos de *upscaling* de direções de fluxo para a bacia do rio São Francisco.

Grau de relevância	Procedimento com melhor desempenho (em % das células com direção de fluxo diferente)	
	<i>Upscaling</i> direto	<i>Upscaling</i> gradual
Baixa	7,4%	40,8%
Alta	0%	14,8%
Total	7,4%	55,6%

As diferenças das direções de fluxo entre as modalidades de *upscaling* para a bacia do rio Tapajós também foram pequenas, algumas dessas estão destacadas na cor laranja na Figura 31. No entanto, diferentemente do que ocorreu com as outras bacias (considerando apenas as células que favoreceram algum dos métodos), a bacia do Tapajós apresentou um maior número de células com melhor desempenho para o *upscaling* direto e na sua maioria de relevância alta. Isso pode estar relacionado com a topografia da bacia, pois diferentemente das demais bacias estudadas, o rio Tapajós percorre bem próximo ao divisor de águas. Essa característica física também está descrita em Collischonn *et al.* (2008) e Collischonn (2006).

Comparando o desempenho das duas modalidades verificou-se que a diferença na determinação das direções de fluxo foi de 6,96% das células da bacia, a menor dentre as bacias estudadas. Desse total, o *upscaling* direto apresentou melhor desempenho com 27,3% em relação à rede de drenagem na resolução 200 m, contra a modalidade gradual que obteve 18,2% das células. No entanto, o que predominou foi a equivalência na determinação dos traçados da rede drenagem com 54,5% (Tabela 11).

Tabela 11. Comparação do desempenho entre os procedimentos de *upscaling* direto e gradual para a bacia do rio Tapajós.

Procedimento com melhor desempenho (em % das células com direção de fluxo diferente)				Células com direções de fluxo diferentes	Células com direção de fluxo idêntica	Total de células da bacia
<i>Upscaling</i> direto	<i>Upscaling</i> gradual	Equivalentes Direto X Gradual	Total das células com direções de fluxo diferentes			
27,3%	18,2%	54,5%	100%	6,96%	93,04%	158

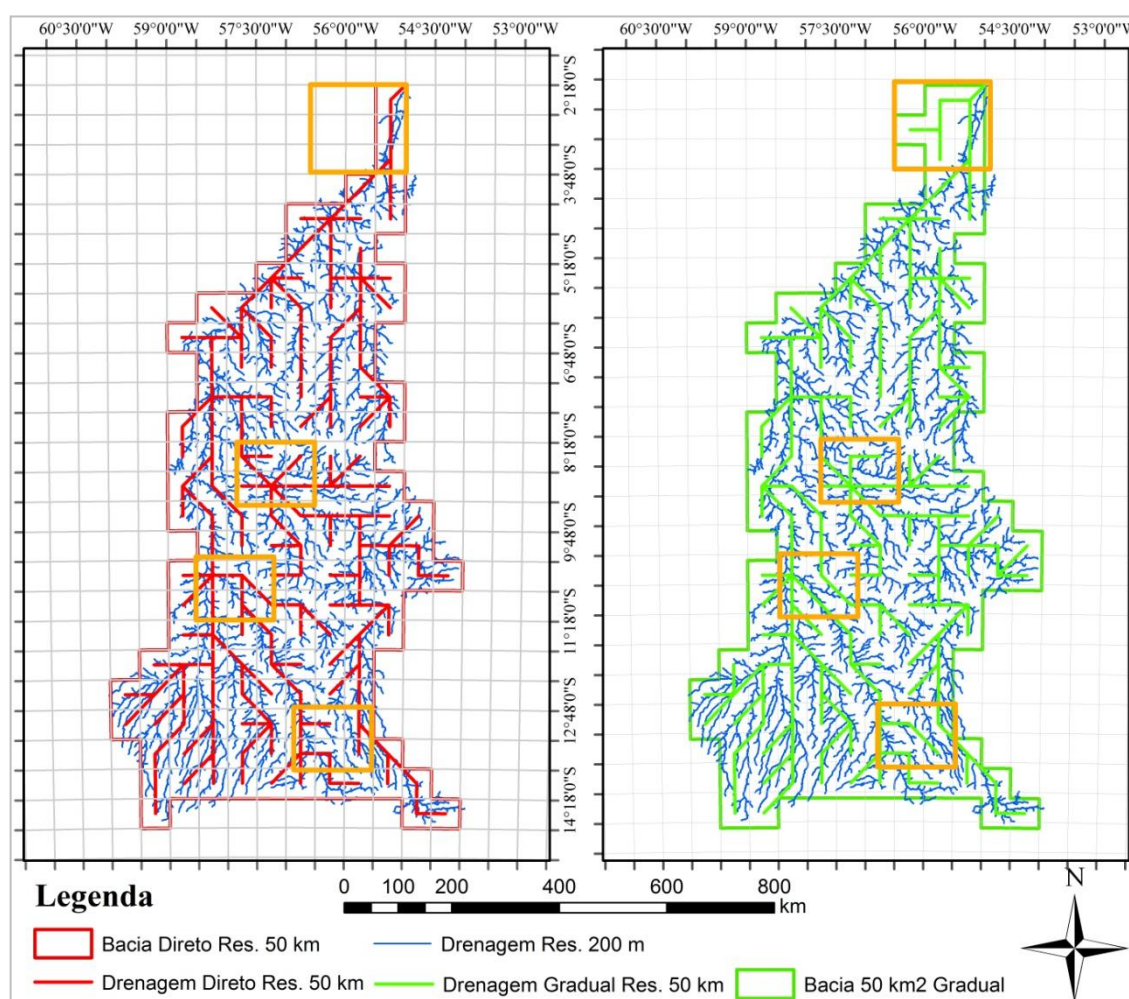


Figura 31. Visão geral da rede de drenagem da bacia do Rio Tapajós pelo método de *upscaling* direto (à direita) e gradual (à esquerda) na resolução 50 km.

Analisando o grau de relevância entre os dois métodos de *upscaling* estudados verificou-se que 18,2% do total das células que diferiram apresentaram alta relevância pelo *upscaling* direto, contra 0% do *upscaling* gradual (Tabela 12).

Tabela 12. Grau de relevância entre as diferenças ocorridas nos resultados dos métodos de *upscaling* de direções de fluxo para a bacia do rio Tapajós.

Grau de relevância	Procedimento com melhor desempenho (em % das células com direção de fluxo diferente)	
	<i>Upscaling</i> direto	<i>Upscaling</i> gradual
Baixa	9,1%	18,2%
Alta	18,2%	0%
Total	27,3%	18,2%

Para a bacia do rio Uruguai também foi avaliado o desempenho dos dois métodos de *upscaling*, como pode ser observado na Figura 32, onde estão destacadas algumas áreas em laranja. As diferenças entre essas modalidades foram as maiores entre as bacias analisadas, correspondendo a 15% das células da bacia do Uruguai com direções de fluxo distintas.

Verificou-se que 50% das células que diferenciaram nas direções de fluxo entre os *upscaling* direto e gradual foram consideradas equivalentes entre si, seguida da modalidade gradual com 32,4% das células da bacia com melhor desempenho e por último do *upscaling* direto com 17,6% (Tabela 13).

Tabela 13. Comparação do desempenho entre os procedimento de *upscaling* direto e gradual para a bacia do rio Uruguai.

Procedimento com melhor desempenho (em % das células com direção de fluxo diferente)				Células com direções de fluxo diferentes	Células com direção de fluxo idêntica	Total de células da bacia
<i>Upscaling</i> direto	<i>Upscaling</i> gradual	Equivalentes Direto X Gradual	Total das células com direções de fluxo diferentes			
17,6%	32,4%	50%	100%	15%	85%	226

Apesar do *upscaling* gradual ter apresentado maior número de células com melhor desempenho na determinação da direção de fluxo, o *upscaling* direto conseguiu evitar 8,8% de erros de relevância alta que não foram alcançados, para essa bacia, na modalidade gradual, pois correspondeu a 5,9%, mas por sua vez apresentou correções com maior percentual em relevância baixa com 26,5% (Tabela 14).

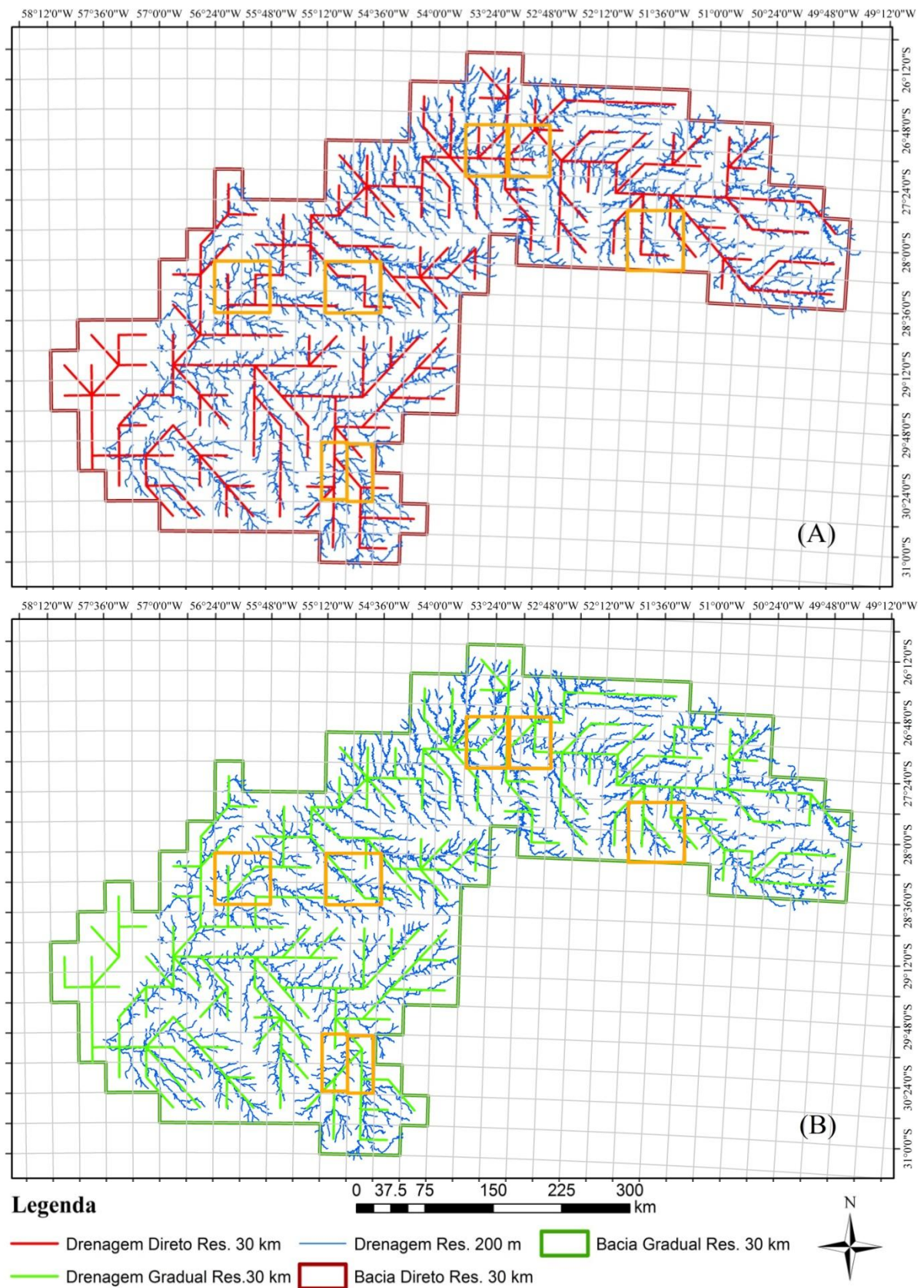


Figura 32. Visão geral da rede de drenagem da bacia do Rio Uruguai pelo método de upscaling direto (A) e gradual (B) na resolução espacial 30 km.

Tabela 14. Grau de relevância entre as diferenças ocorridas nos resultados dos métodos de *upscaling* de direções de fluxo para a bacia do rio Uruguai.

Grau de relevância	Procedimento com melhor desempenho (em % das células com direção de fluxo diferente)	
	<i>Upscaling</i> direto	<i>Upscaling</i> gradual
Baixa	8,8%	26,5%
Alta	8,8%	5,9%
Total	17,6%	32,4%

Os resultados obtidos pelo método de reamostragem apresentaram para todas as bacias incoerências no traçado da rede de drenagem, consideradas na maioria das vezes como graves. O melhor desempenho ocorreu pelos métodos de *upscaling* de direções de fluxo nas modalidades direta e gradual.

O percentual de células com direção de fluxo diferentes variou de 6,96% para bacia do Tapajós até 15% para a bacia do Uruguai. O método de *upscaling* gradual apresentou melhor desempenho para as bacias do Paraíba com 60%, São Francisco com 55,6% e Uruguai com 32,4%, para essa última bacia a predominância foi de células com direção de fluxos equivalentes. A bacia do Tapajós também apresentou predominância de células equivalentes seguida do *upscaling* direto com 27,3%. A variação no percentual encontrada para as bacias pode estar relacionada com a localização espacial das mesmas, sob influências climáticas, tipos de vegetação e características geomorfológicas distintas para cada bacia.

4.1.2 Quantificação da área formada entre os traçados e distância média entre os traçados

Nessa etapa foram realizadas as análises quantitativas para avaliar as redes de drenagem de baixa resolução geradas pelos procedimentos de reamostragem, *upscaling* direto e gradual. Essa avaliação consistiu em averiguar a formação de áreas entre essas redes e os rios vetorizados das imagens ETM+/LANDSAT 7, considerados como referência, e realizar o cálculo de distância média entre eles.

Para a bacia do Paraíba foram vetorizados quatro rios, o Paraíba e os seus três principais afluentes: Taperoá, Paraibinha, Gurinhém (Figura 33).

Observou-se que os resultados obtidos em alta resolução do SRTM apresentaram valores de área e distância média menores que nas outras resoluções espaciais, o que indica

uma maior aproximação com os rios vetorizados, como esperado. Os valores de área formados entre as redes de drenagem variaram entre 5 km² a aproximadamente 78 km² e a distância média de 0,21 km a 0,09 km (Figura 34).

Os melhores resultados para baixa resolução, com maior proximidade com os rios considerados como base, foi pelo método *upscaling*. As duas modalidades, gradual e direta, diferiram em termo de área com percentual máximo de 37% para o rio Paraibinha e foram iguais para o rio Taperoá. O método que apresentou melhor desempenho foi o *upscaling* gradual para os rios Paraíba e Gurinhém (Figuras 34 e 35).

Quando comparado o método de *upscaling* ao de reamostragem foi verificado que esse último obteve maior valor de área e distância média (Figuras 34 e 35). Isso pode ser observado principalmente para o rio Taperoá, no qual o valor de área pelo método de reamostragem apresentou aproximadamente 150% acima do obtido pelo método de *upscaling*.

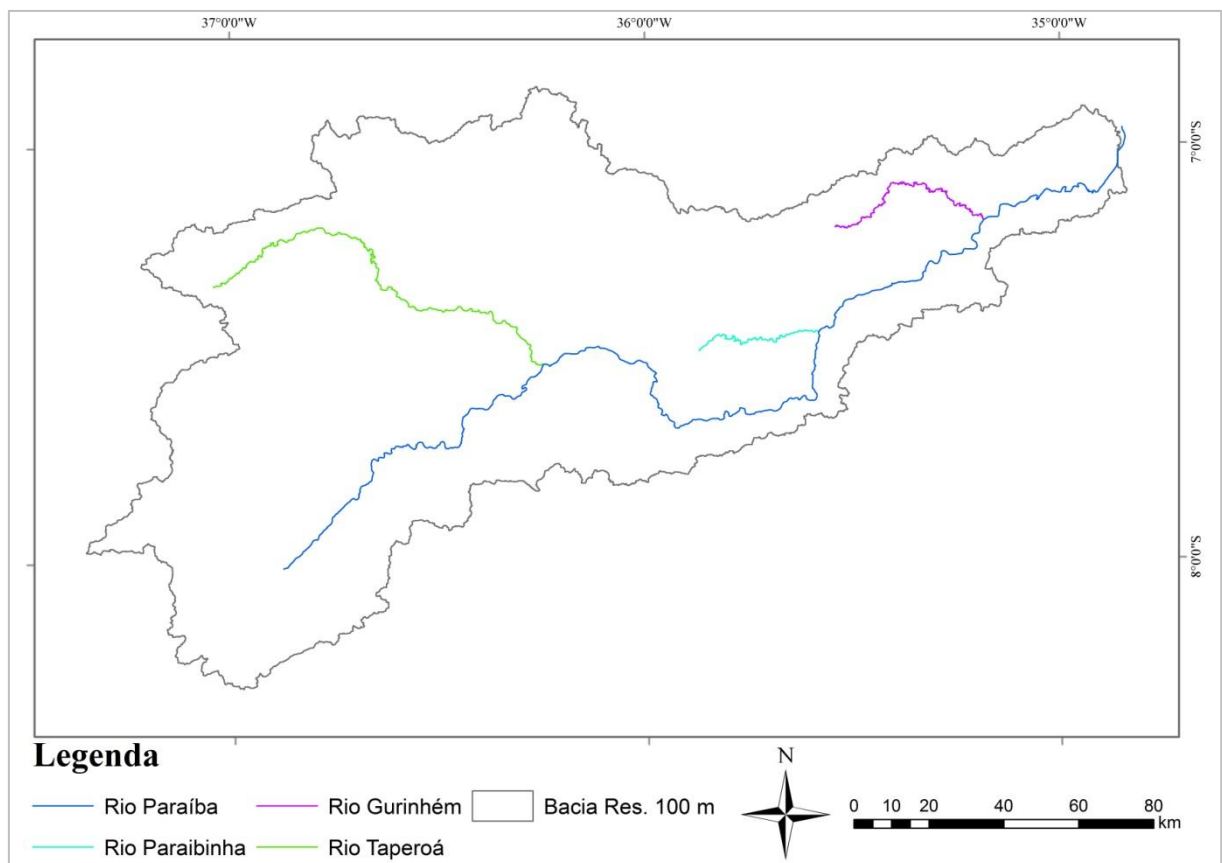


Figura 33. Rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Paraíba, considerados como base.

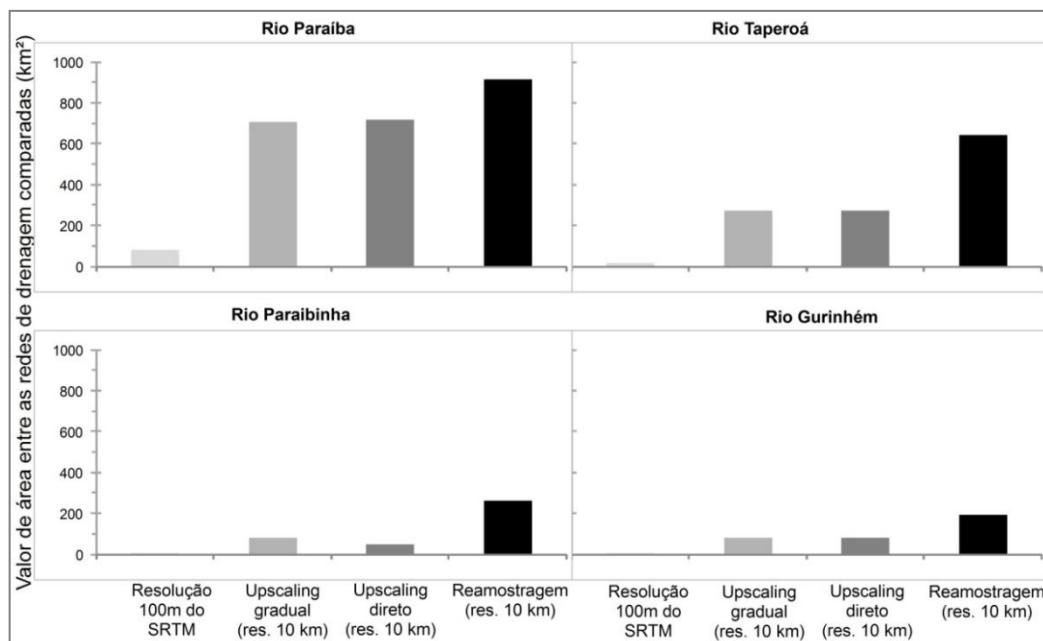


Figura 34. Formação de áreas entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Paraíba.

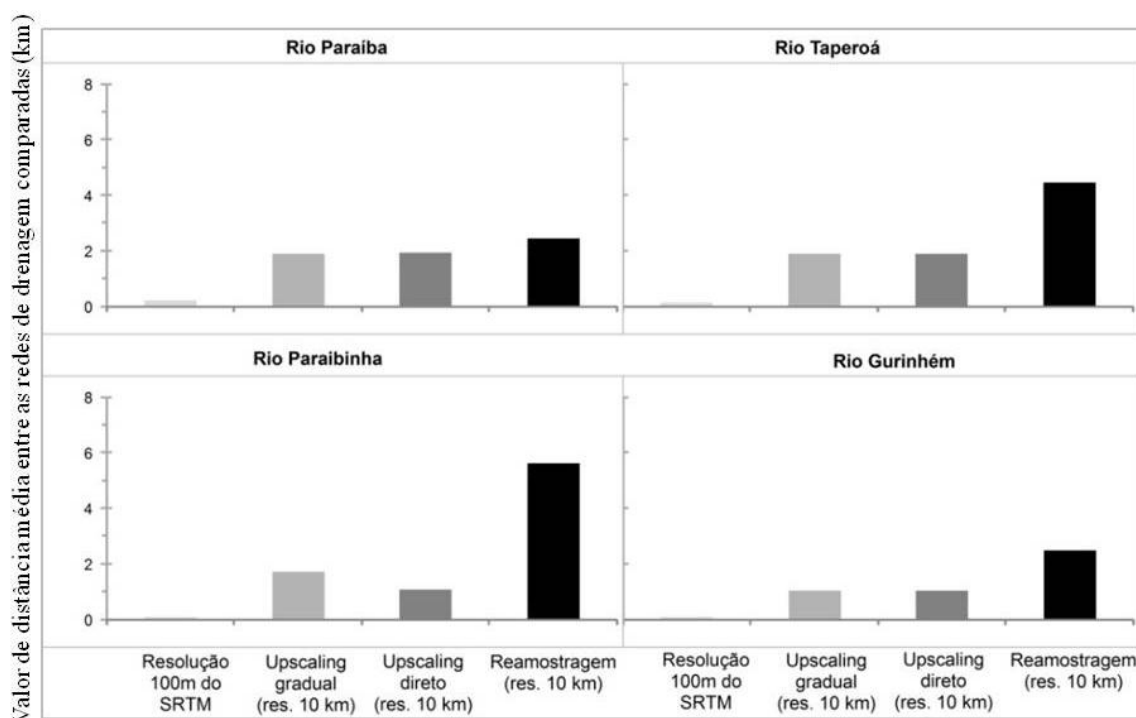


Figura 35. Distância média entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Paraíba.

Para a bacia do rio São Francisco foram vetorizados cinco afluentes: rio Verde Grande, Paracatu, Grande, Das Velhas e Correntes. O rio principal foi dividido em três trechos (alto, médio e baixo) por ser uma bacia de grandes dimensões. Dessa forma, as análises de características físicas poderão ser mais bem avaliadas (Figura 36).

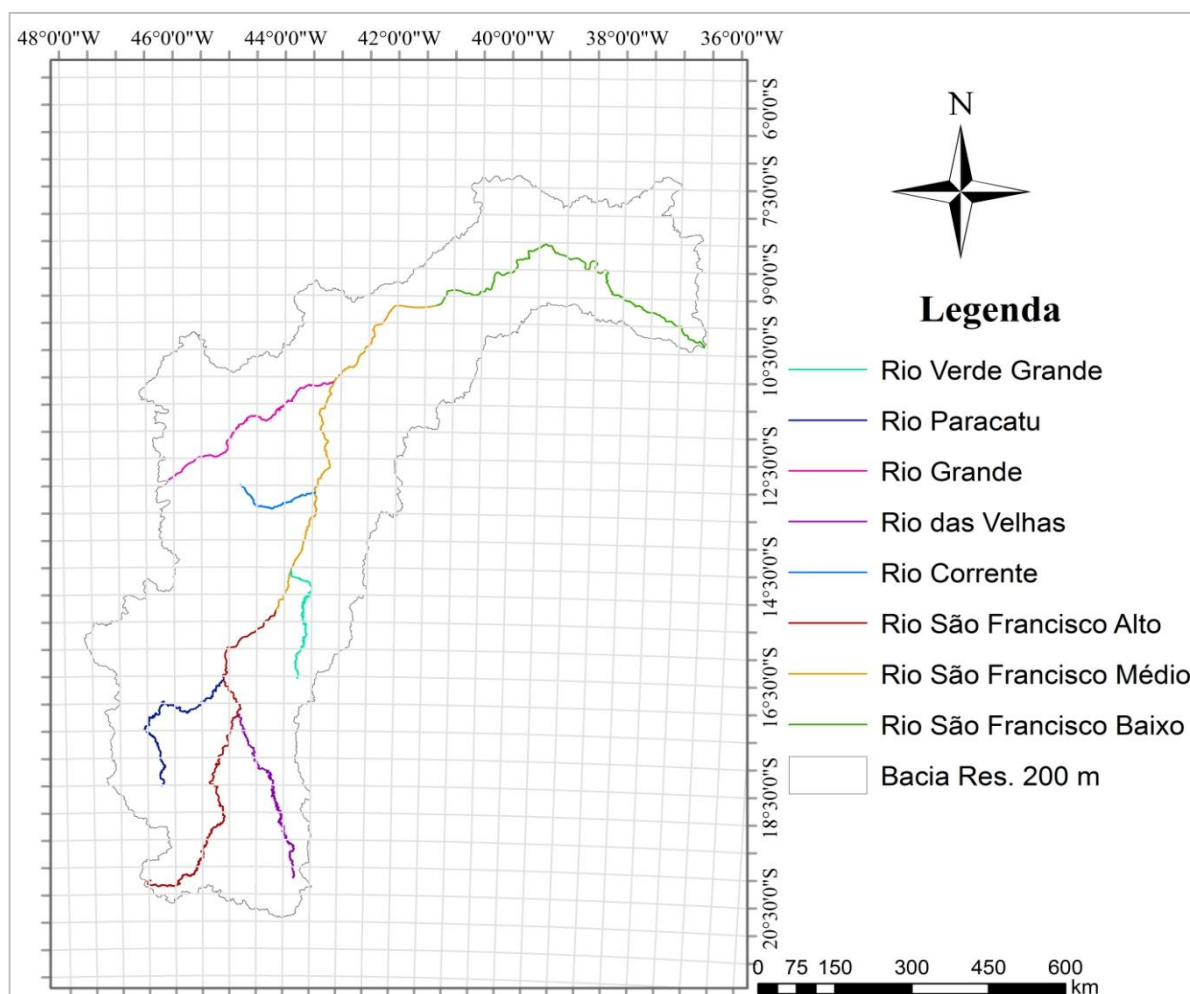


Figura 36. Rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio São Francisco, considerados como base.

A formação de áreas e distância média nos métodos e escalas trabalhadas foram maiores entre os procedimentos de baixa resolução. Sendo a reamostragem o que apresentou maiores erros em relação a rede vetorizada e em relação aos métodos de *upscaling*, superando até o dobro dos valores para esse último procedimento. Isso foi mais evidente para os rios das Velhas, Grande, São Francisco Alto, médio e, principalmente, o trecho do baixo curso do rio São Francisco, onde o procedimento de reamostragem para formação de área foi aproximadamente 14 vezes maior (Figura 37) que os resultados obtidos pelos métodos de *upscaling* e cem vezes maior em distância média (Figura 38).

A discrepância nos resultados de baixa resolução pelo método de reamostragem para o baixo São Francisco foi consequência do grave erro de representação dos traçados da drenagem, que alterou inclusive a desembocadura do rio. Isso ocasionou a formação de grande área (Figura 39) e distância entre o trecho de rio derivado por esse procedimento e o vetorizado.

Esse problema não ocorreu nos métodos de *upscaling* direto (Figura 40) e gradual (Figura 41) formando entre as redes comparadas, áreas menores. Para essas modalidades a maior diferença foi de 32% para o rio Das Velhas e houve empate entre *upscaling* gradual e direto para os rios Verde Grande, Corrente e São Francisco no alto curso. O melhor desempenho, no entanto, foi obtido pela modalidade gradual com 50% dos rios com menores áreas e distância média entre a rede considerada como base (Figuras 37 e 38).

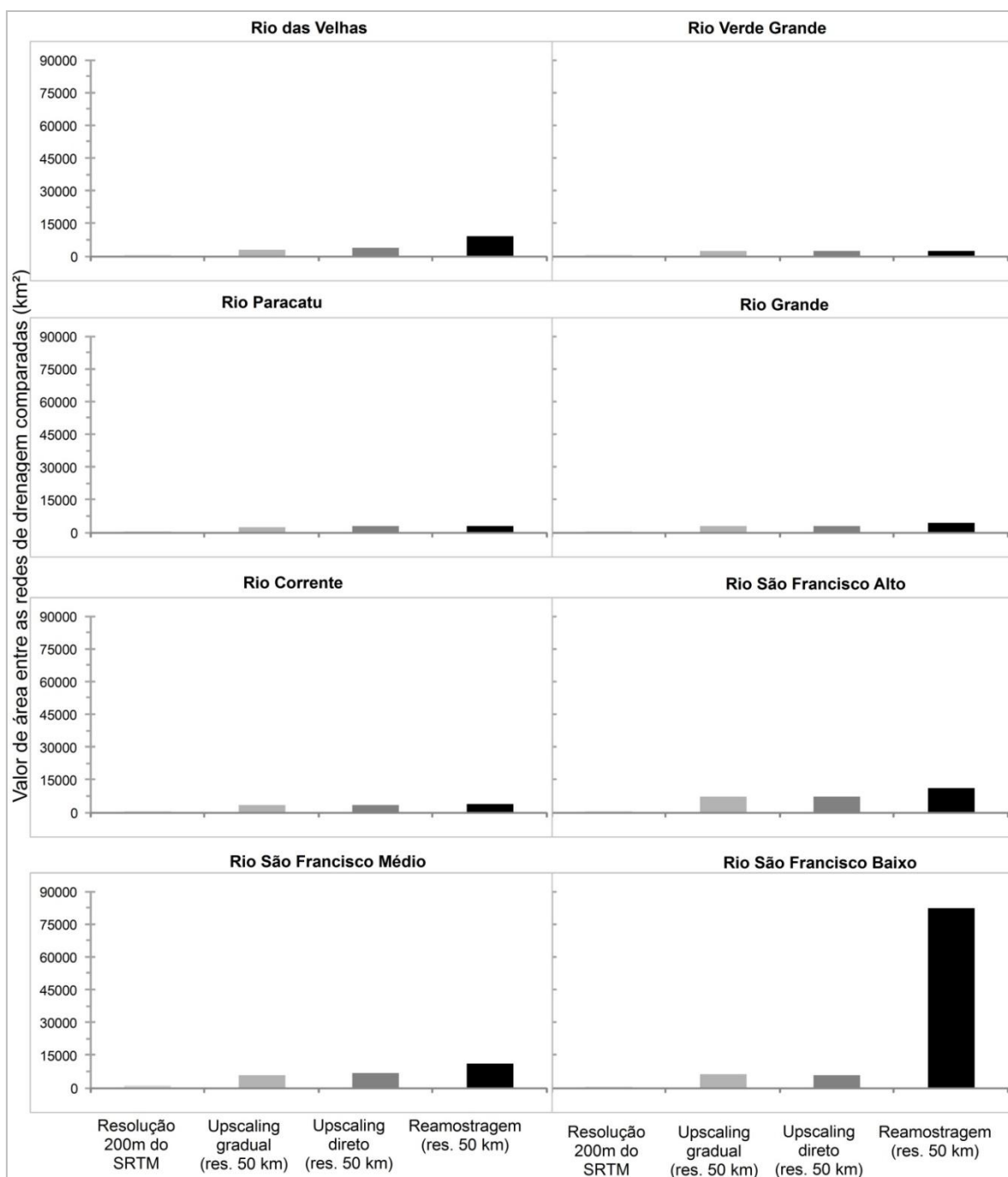


Figura 37. Formação de áreas entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio São Francisco.

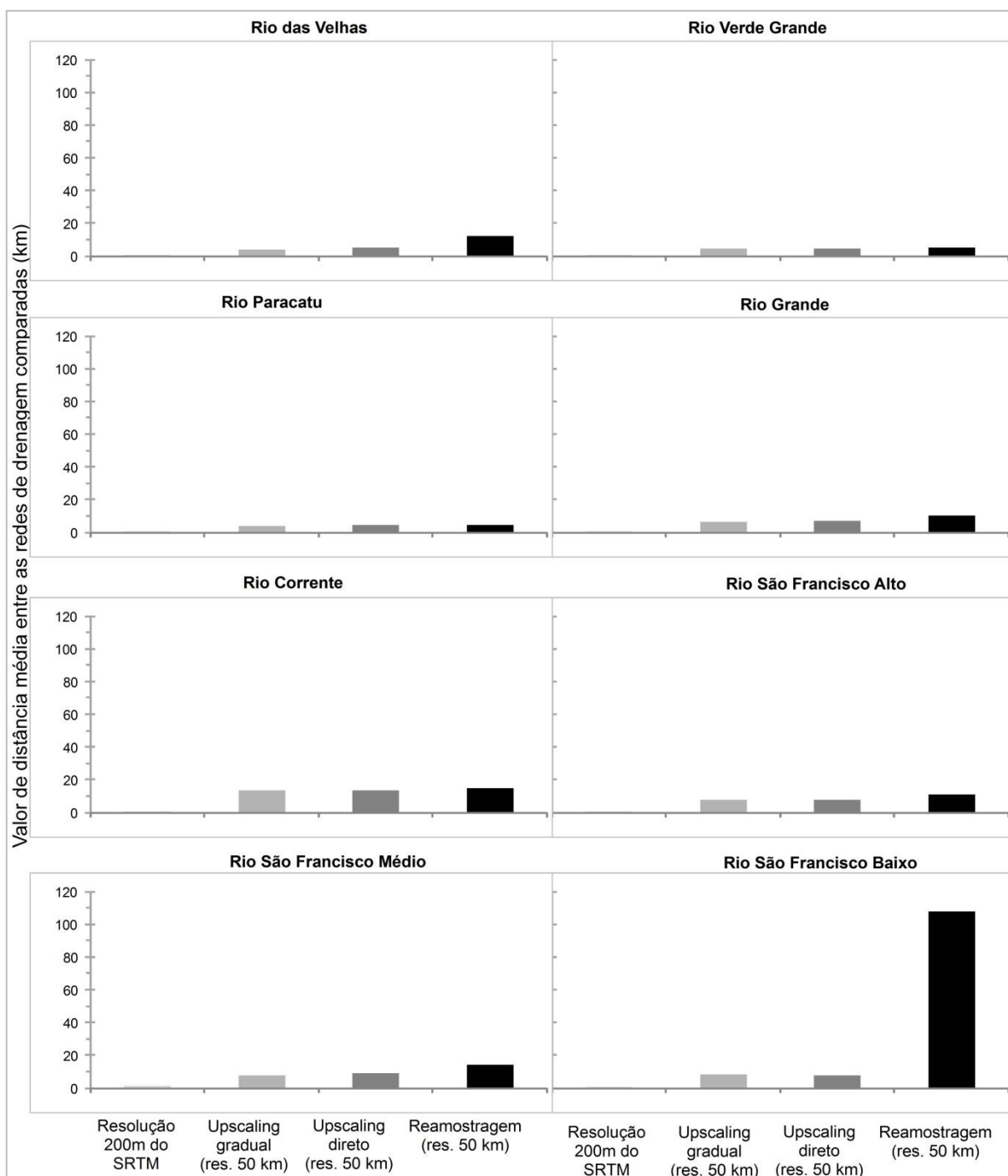


Figura 38. Distância média entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio São Francisco.

Os valores de área e distância média para a resolução 200 m (Figura 42) foram pequenas, apresentando melhor desempenho para todos os rios avaliados da bacia do São Francisco. Esses resultados evidenciam que os procedimentos de *upscaling* e de alta resolução se aproximaram mais dos traçados dos rios considerados como base.

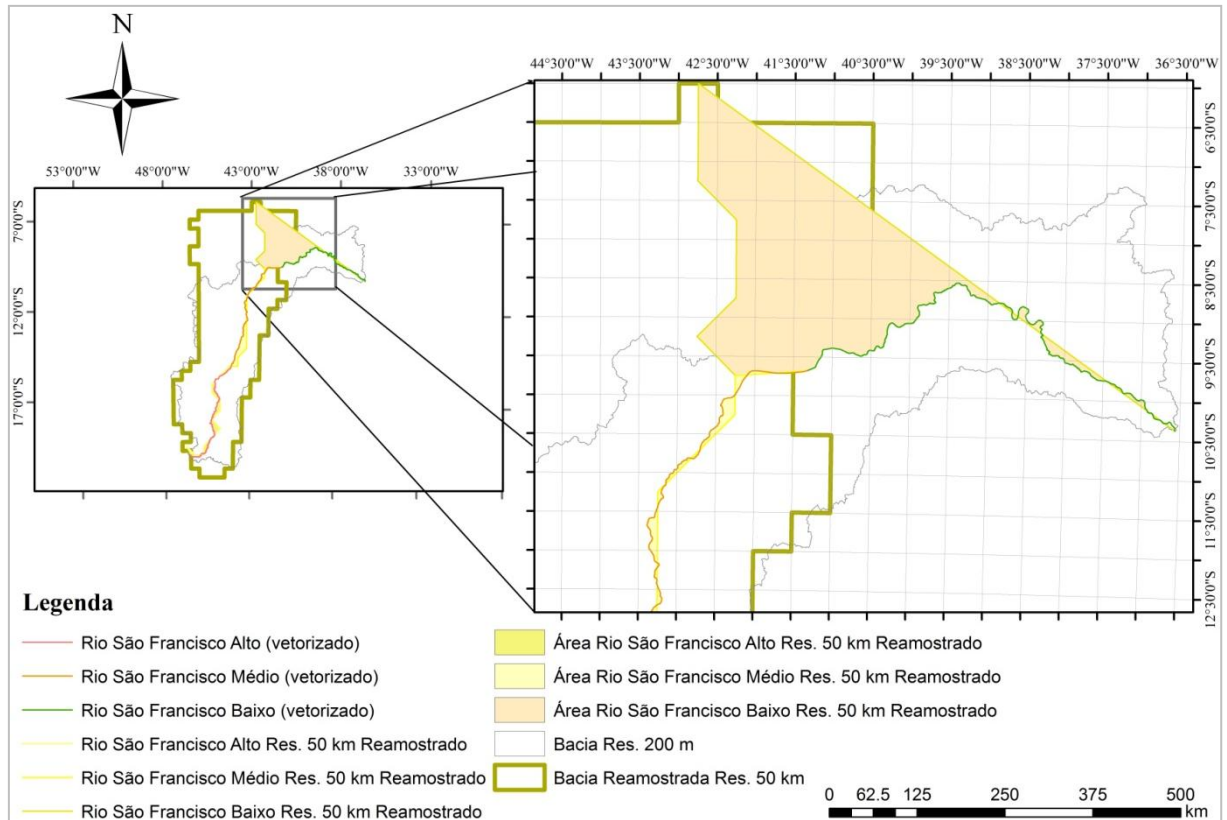


Figura 39. Mapa de área entre o trecho do baixo rio São Francisco, obtido pelo método de reamostragem na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.

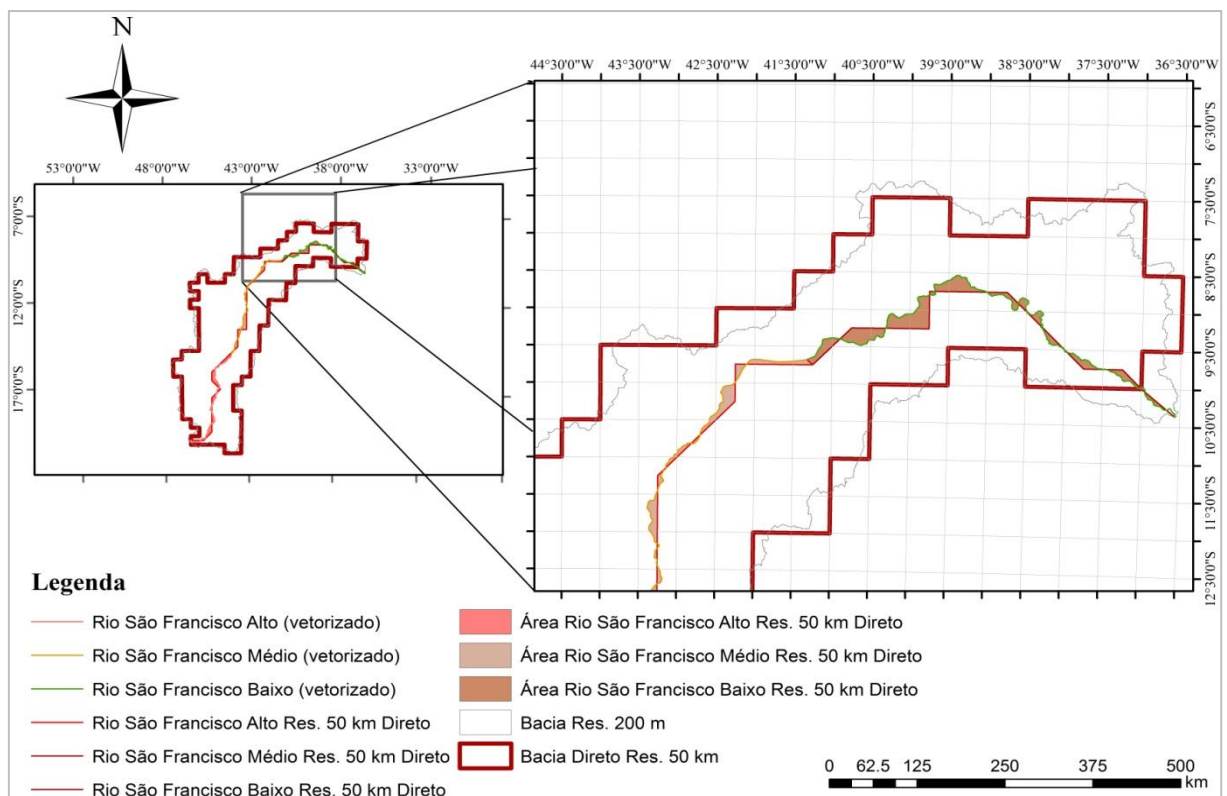


Figura 40. Mapa de área entre o trecho do baixo rio São Francisco, obtido pelo método de upscaling direto na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.

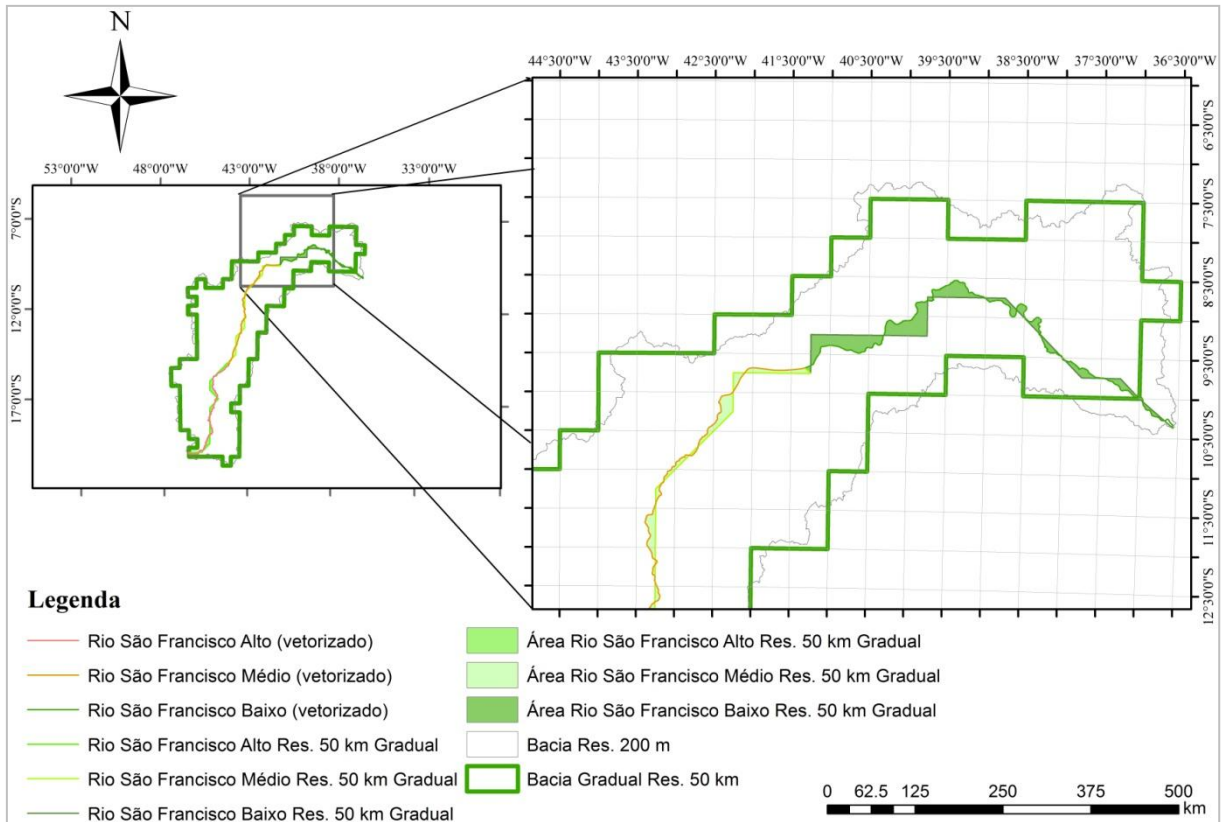


Figura 41. Mapa de área entre o trecho do baixo rio São Francisco, obtido pelo método de *upscaling* gradual na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.

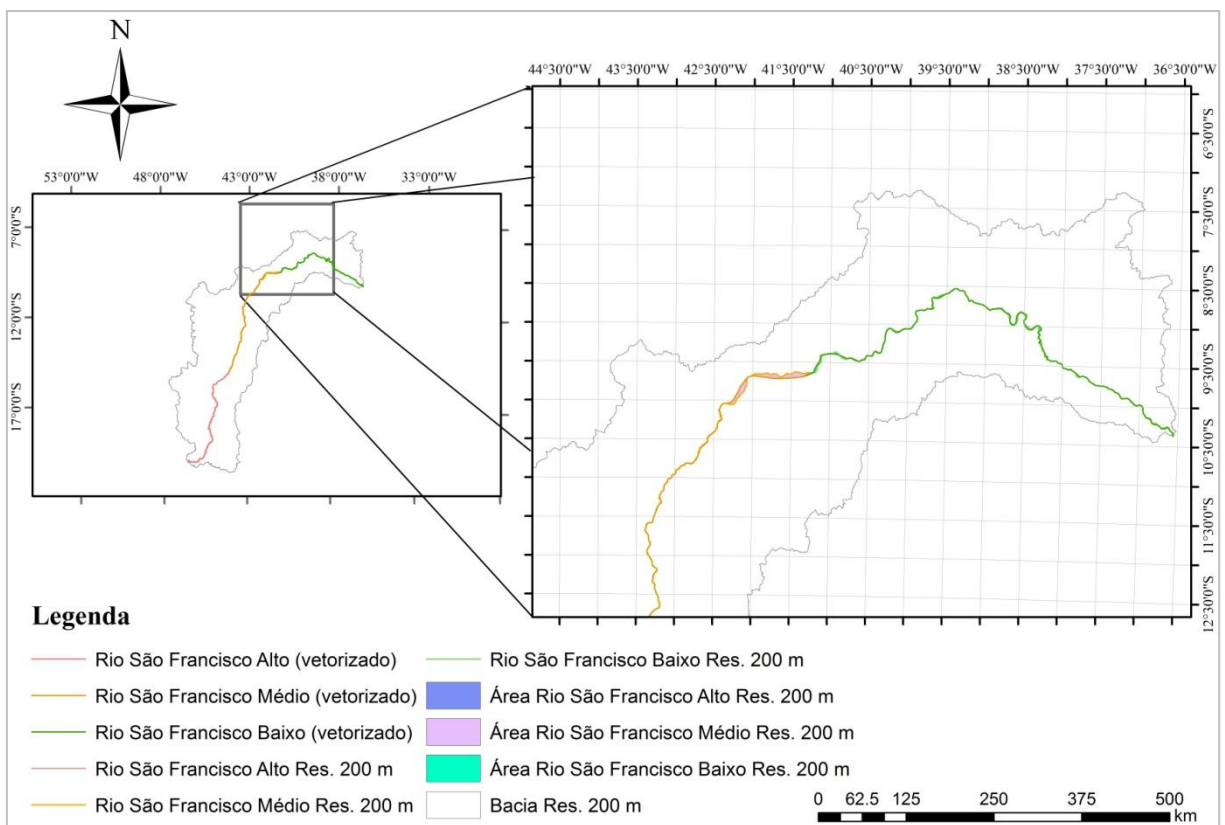


Figura 42. Mapa de área entre o trecho do baixo rio São Francisco, de alta resolução (200 m), e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.

Os rios e trechos de rios analisados na bacia do Tapajós foram oito. Sendo quatro afluentes, desses, o Juruema e o Teles Pires foram divididos em mais dois trechos e o principal curso d' água, dividido em Tapajós alto e baixo (Figura 43).

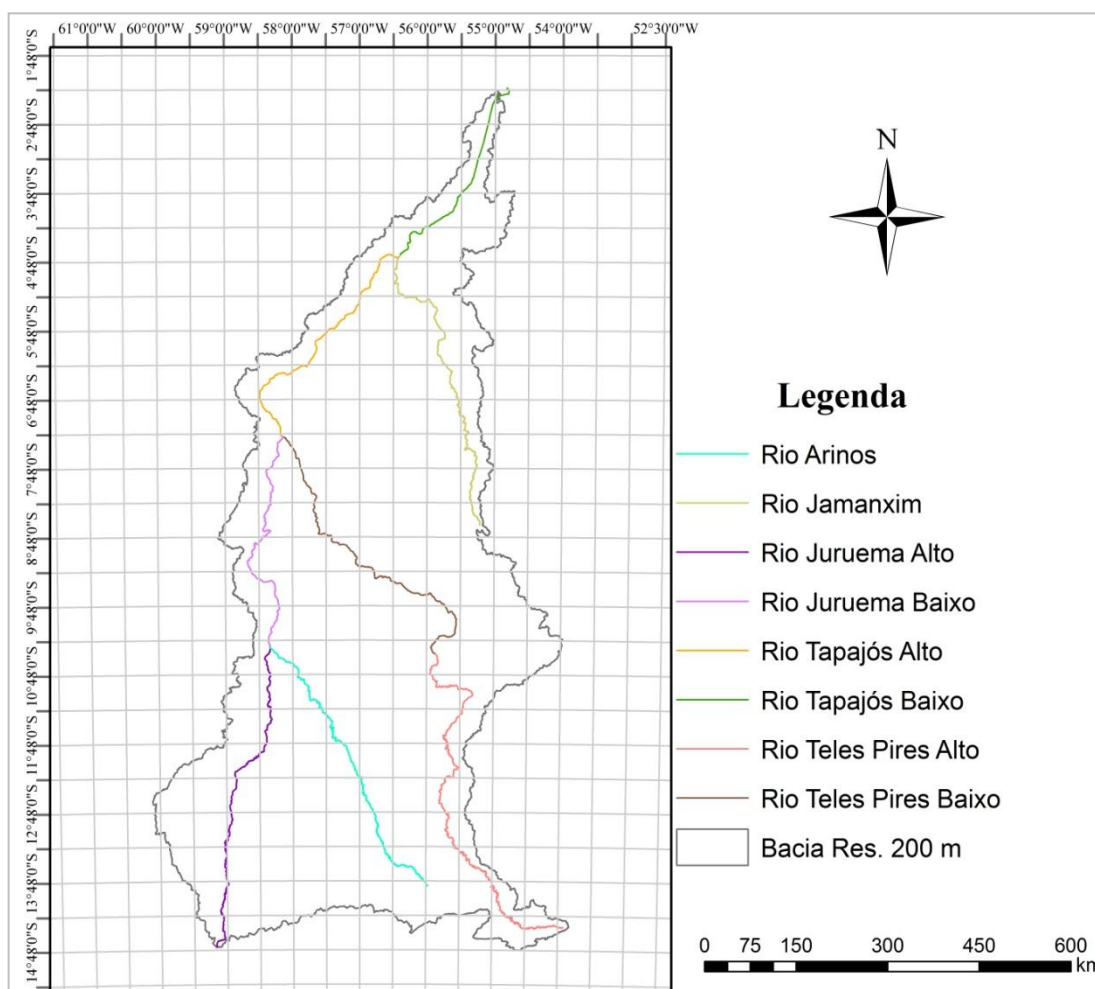


Figura 43. Rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Tapajós, considerados como base.

Assim como na bacia do São Francisco pelo método de reamostragem na resolução 50 km, a bacia do Tapajós apresentou grave erro de representação do traçado da drenagem e no formato da bacia. Esse problema repercutiu na exclusão de vários afluentes a ela pertencentes, conseguindo representar apenas os rios Teles Pires alto e baixo, um pequeno trecho do rio Juruema e o Tapajós de forma incoerente. O cálculo de área (Figura 44) e distância média (Figura 45) para os rios Arinos e Jamanxim não foram representados dentro da bacia reamostrada, no entanto foram contabilizados realizando o cruzamento desses, com a rede vetorizada das imagens LANDSAT. Logo, os resultados referentes aos rios não representados pelo método de reamostragem podem ser considerados mais agravantes, mesmo que tenham valores de área e distância menores do que nos outros métodos.

Para o afluente Juruema não foram representados o alto e o baixo curso do rio no método de reamostragem, sendo apenas apresentado um pequeno trecho dele. Esse erro ocasionou a formação de uma pequena área e distância com a drenagem vetorizada subestimando o real traçado do rio. Já no método de *upscaling* todo o rio foi representado e com isso a área entre as drenagens foi maior (Figura 44) e consequentemente a distância média (Figura 45). No entanto, a melhor representação desse rio foi conduzida em baixa resolução pelos métodos de *upscaling*.

Com esse problema de representação pelo método de reamostragem, o rio Tapajós correspondeu a um traçado completamente diferente da rede considerada como base, devido à mudança do exutório da bacia, isso refletiu sobre o valor de área (Figura 44) e distância média (Figura 45) que excederam os valores do gráfico. Isso não aconteceu para os procedimentos de *upscaling* direto e gradual e de alta resolução.

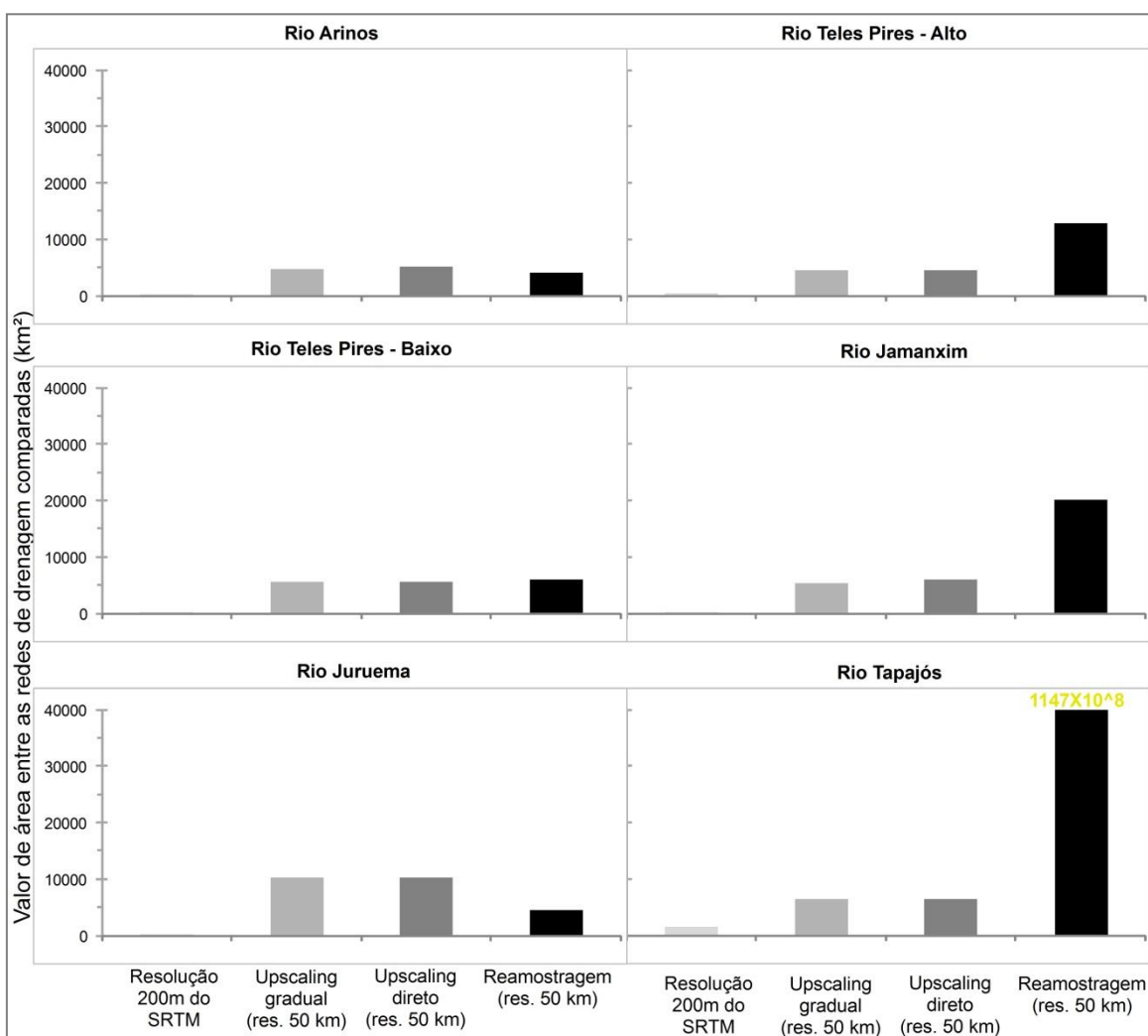


Figura 44. Formação de áreas entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Tapajós.

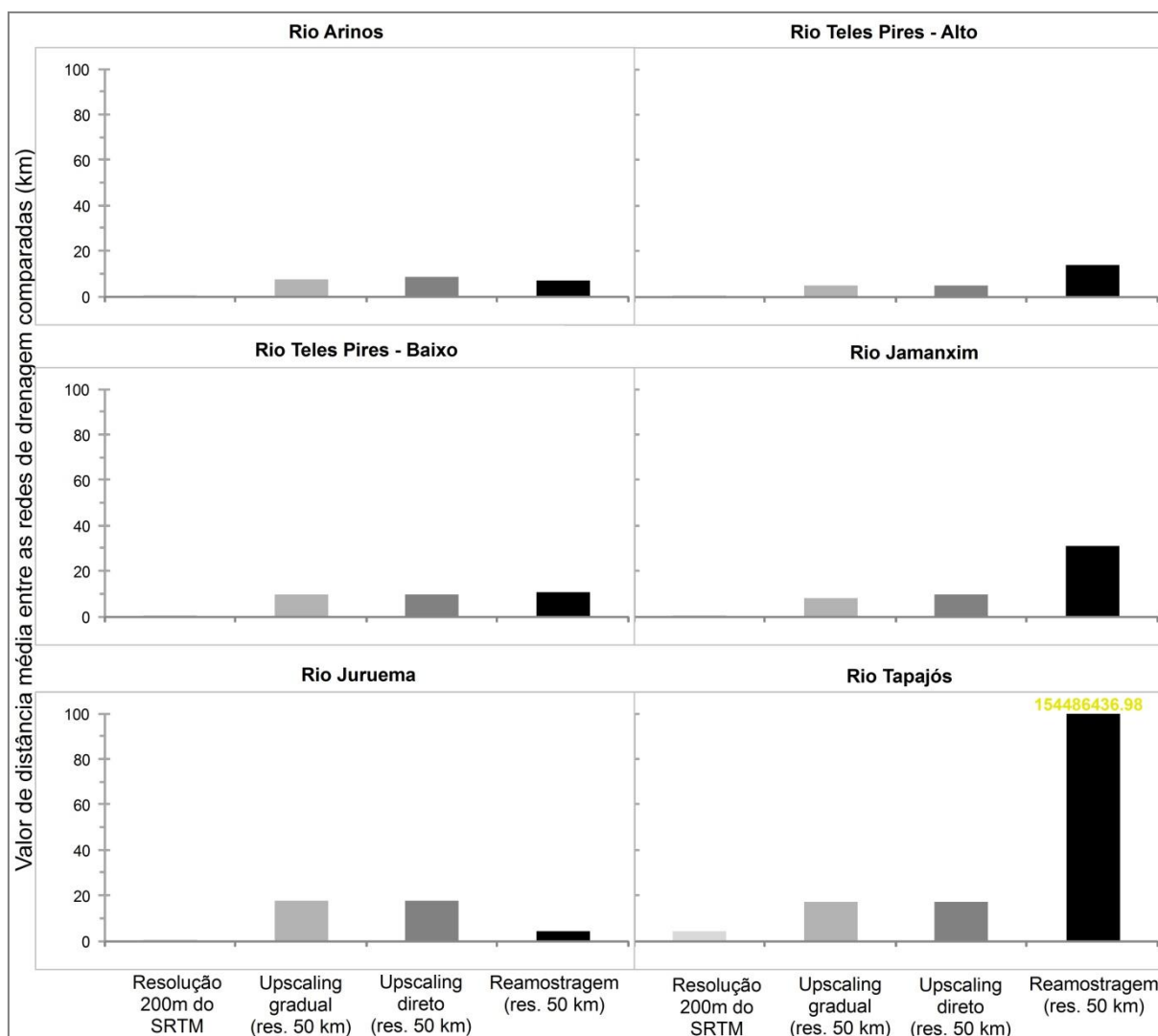


Figura 45. Distância média entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Tapajós.

Das bacias analisadas, a do Tapajós foi a que apresentou o menor percentual em valor de área e distância média entre as modalidades de *upscaling* gradual e direta com diferença máxima de aproximadamente 15,8%. Sendo o *upscaling* gradual o que apresentou melhor desempenho com 66,7% dos rios trabalhados e os outros 33,3% apresentaram igual valor para esses parâmetros, os rios foram o Juruema e Teles Pires no baixo curso (Figuras 44 e 45).

A formação de área entre o rio Tapajós vetorizado e obtido pelos diferentes métodos podem ser visualizados nos mapas a seguir. A formação de área com a reamostragem que apresentou valores discrepantes (Figura 46) comparadas visualmente com os métodos de *upscaling* direto (Figura 47), gradual (Figura 48) e de alta resolução (Figura 49) com mesmo nível de detalhe, pode-se verificar que os três últimos apresentaram resultados mais coerentes com a drenagem de referência.

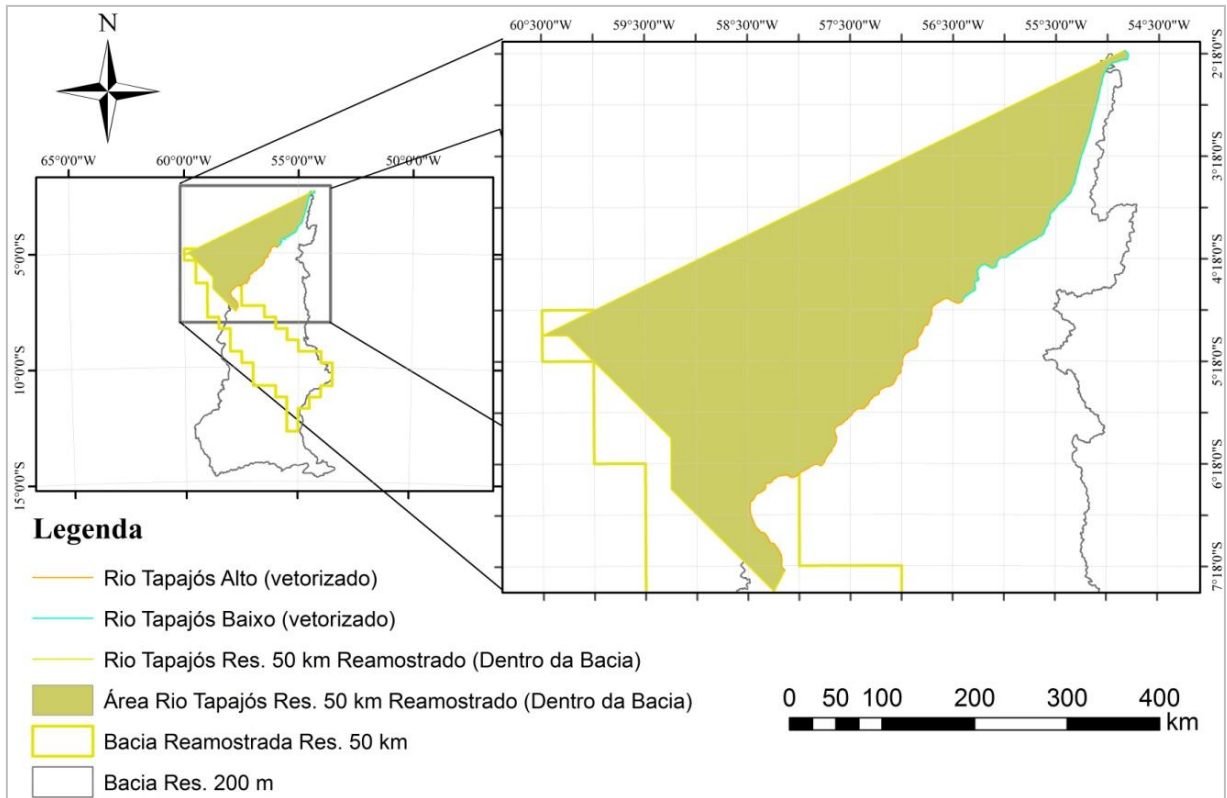


Figura 46. Mapa de área entre o rio Tapajós, obtido pelo método de reamostragem na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.

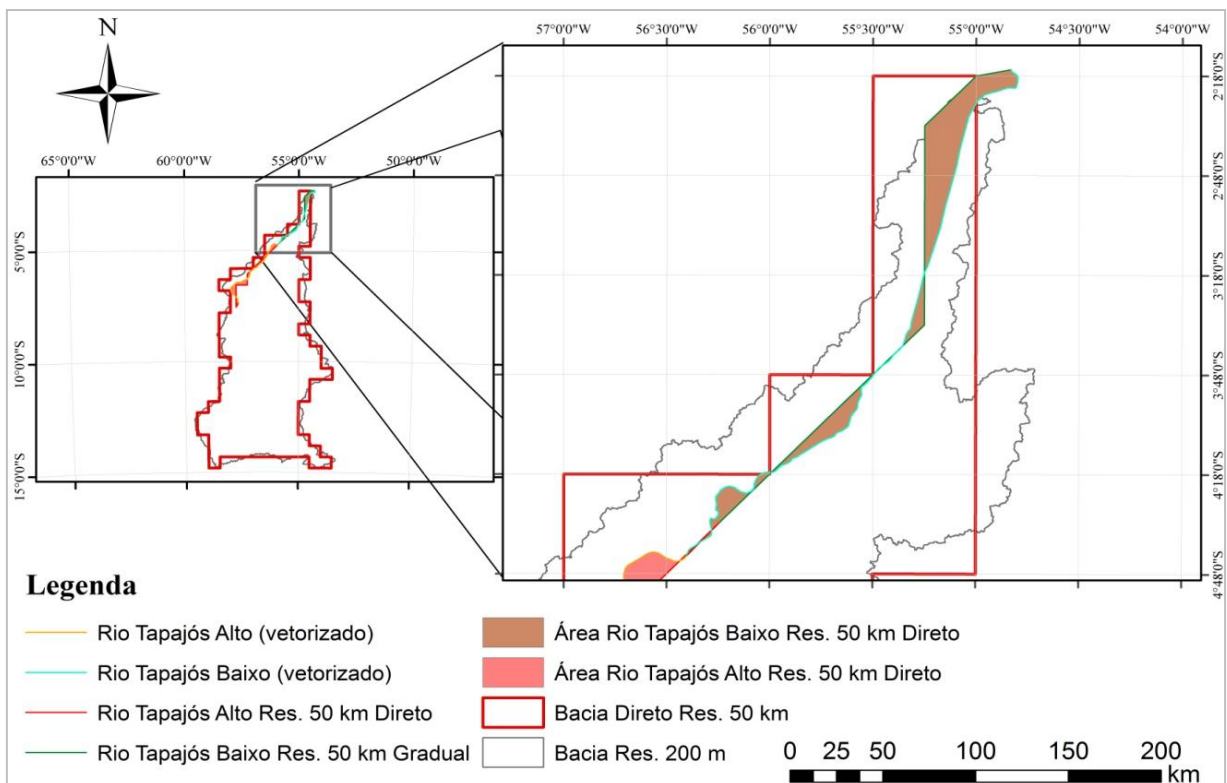


Figura 47. Mapa de área entre o rio Tapajós, obtido pelo método de *upscaling* direto na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.

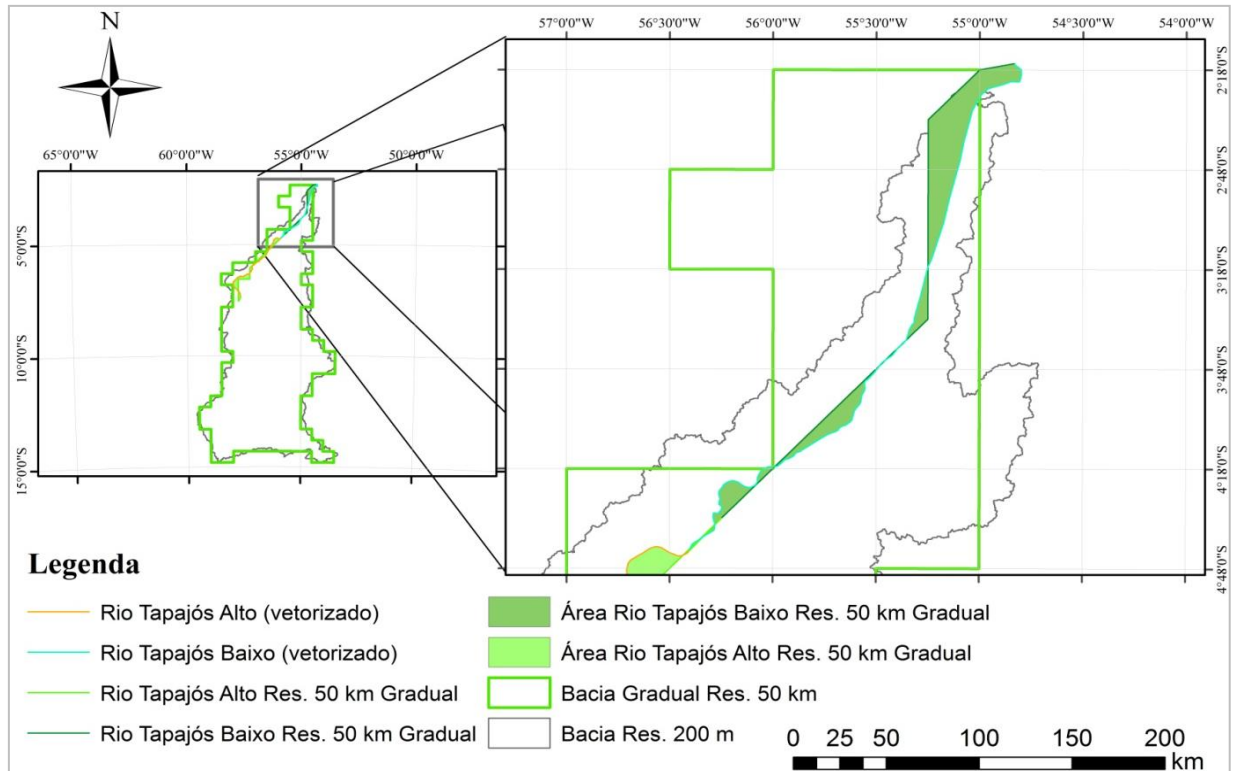


Figura 48. Mapa de área entre o rio Tapajós, obtido pelo método de *upscaling* gradual na resolução 50 km, e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.

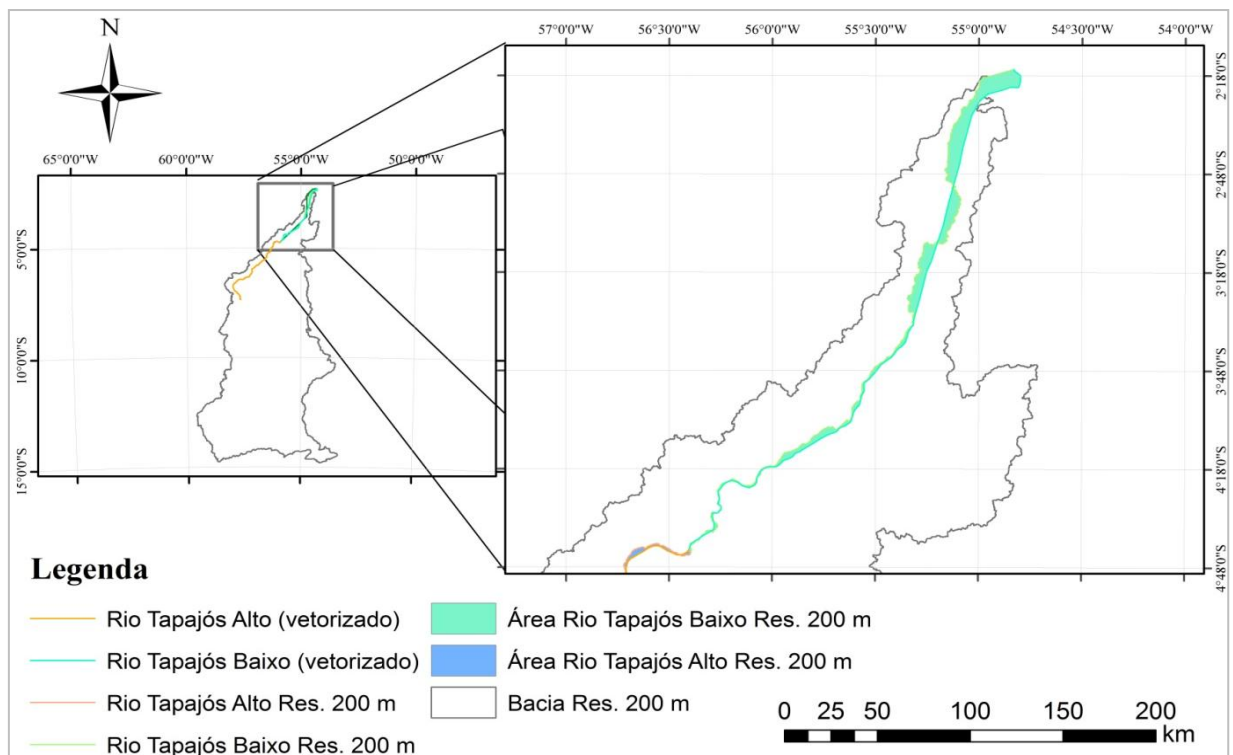


Figura 49. Mapa de área entre o rio Tapajós, de alta resolução (200 m), e o rio vetorizado das imagens LANDSAT.

A bacia do rio Uruguai também foi dividida em oito rios. Sendo cinco afluentes e o rio principal particionado em três trechos o alto, médio e baixo curso (Figura 50).

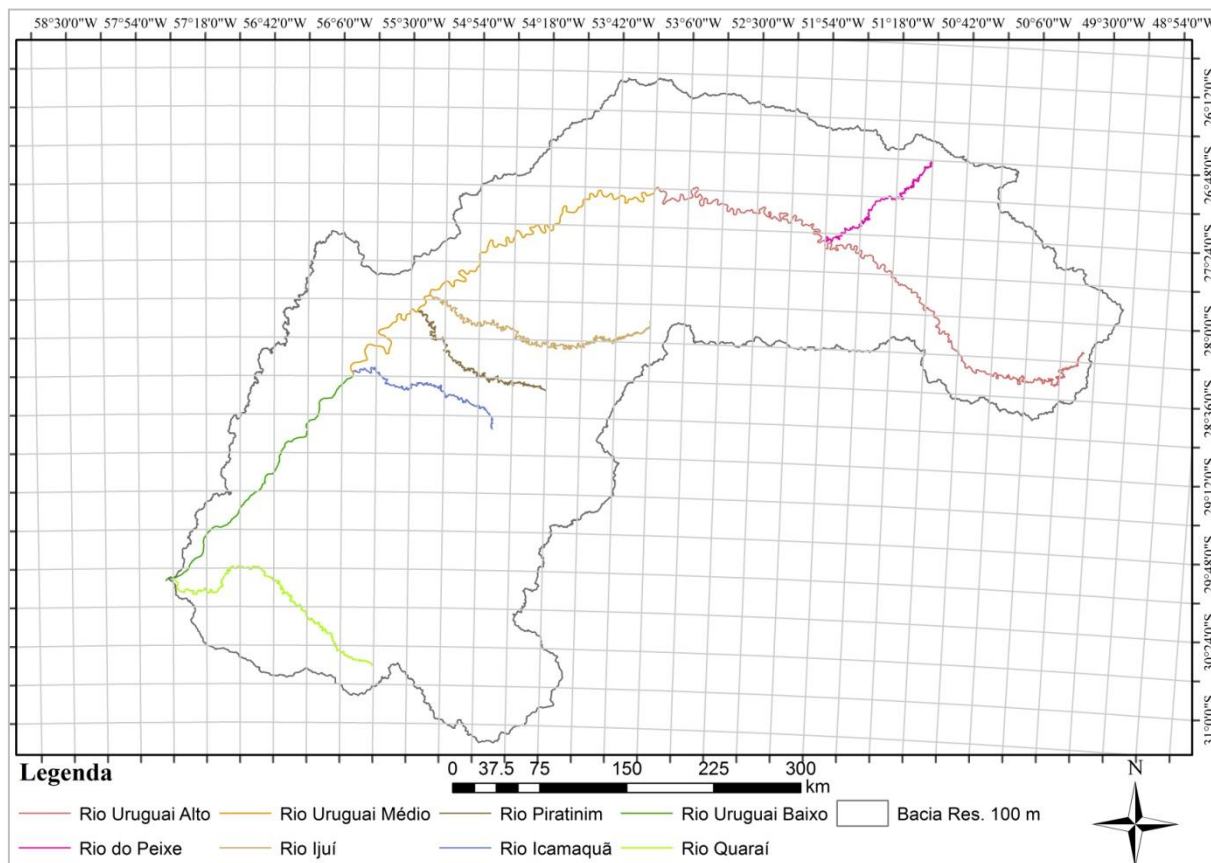


Figura 50. Rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Uruguai, considerados como base.

O método que apresentou piores resultados em termos de formação de área (Figura 51) e distância média (Figura 52) foi o procedimento de reamostragem em seis rios ou trechos de rios, sendo o Uruguai baixo o que apresentou maior valor entre as redes comparadas. Apenas em dois afluentes, rio do Peixe e Icamaquã, houve maior formação de áreas pelo *upscaling* de direções de fluxo na modalidade gradual, quando comparado aos demais métodos, entretanto, essas diferenças não foram grandes.

Comparando apenas o desempenho pelos métodos de *upscaling*, verificou-se que as modalidades direta e gradual tiveram igual percentual em número de rios que apresentaram menor formação de área e distância média, com 33,3% para cada procedimento e igual número de rios que apresentaram mesmo valor para os parâmetros avaliados (33,3%). O maior percentual de diferença entre os métodos foi de 44,1% para o rio Icamaquã que obteve melhor desempenho pela modalidade direta. Essa por sua vez foi a maior diferença

encontrada para os procedimentos de *upscaling* em todas as bacias avaliadas para essas análises.

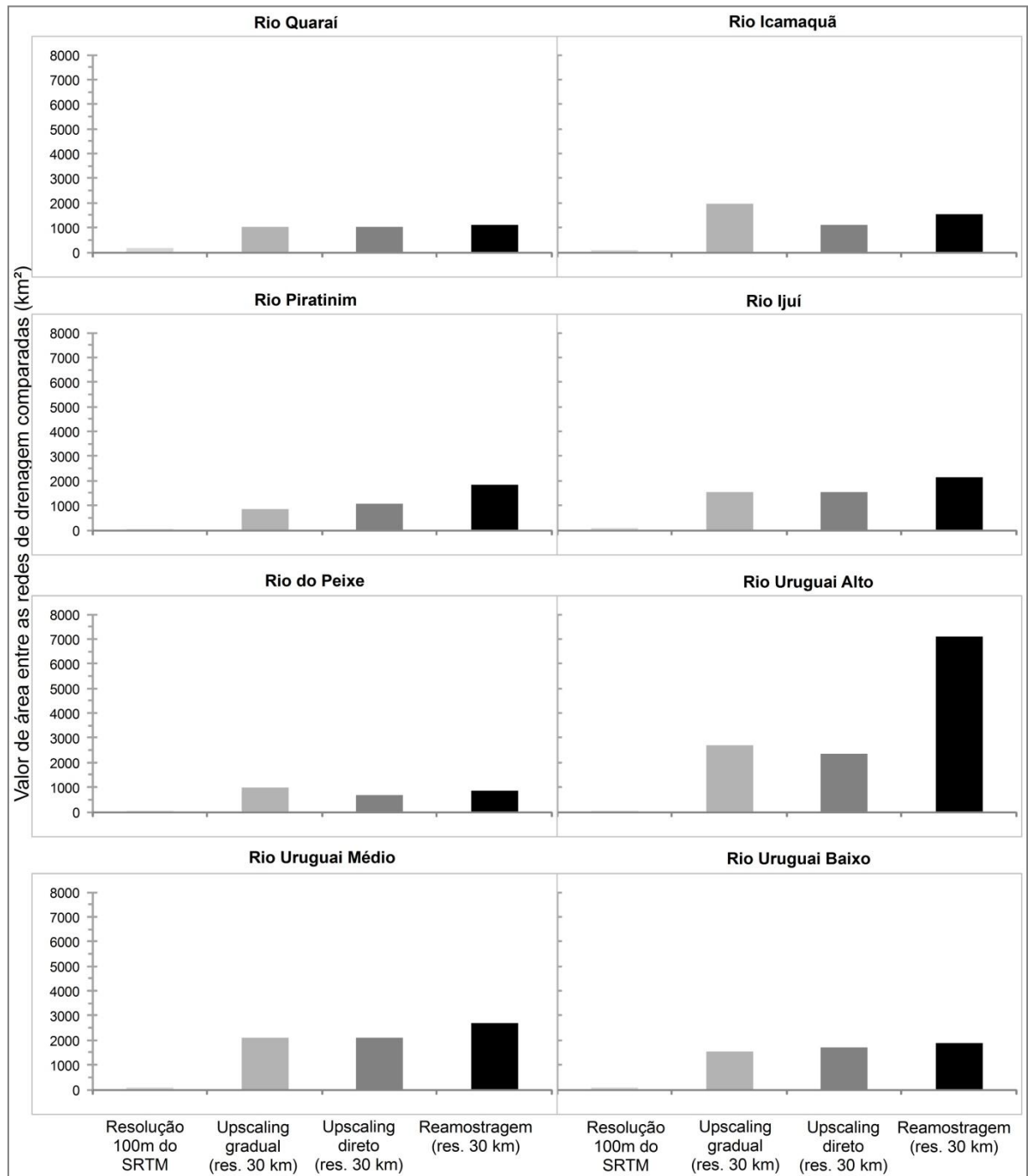


Figura 51. Formação de áreas entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Uruguai.

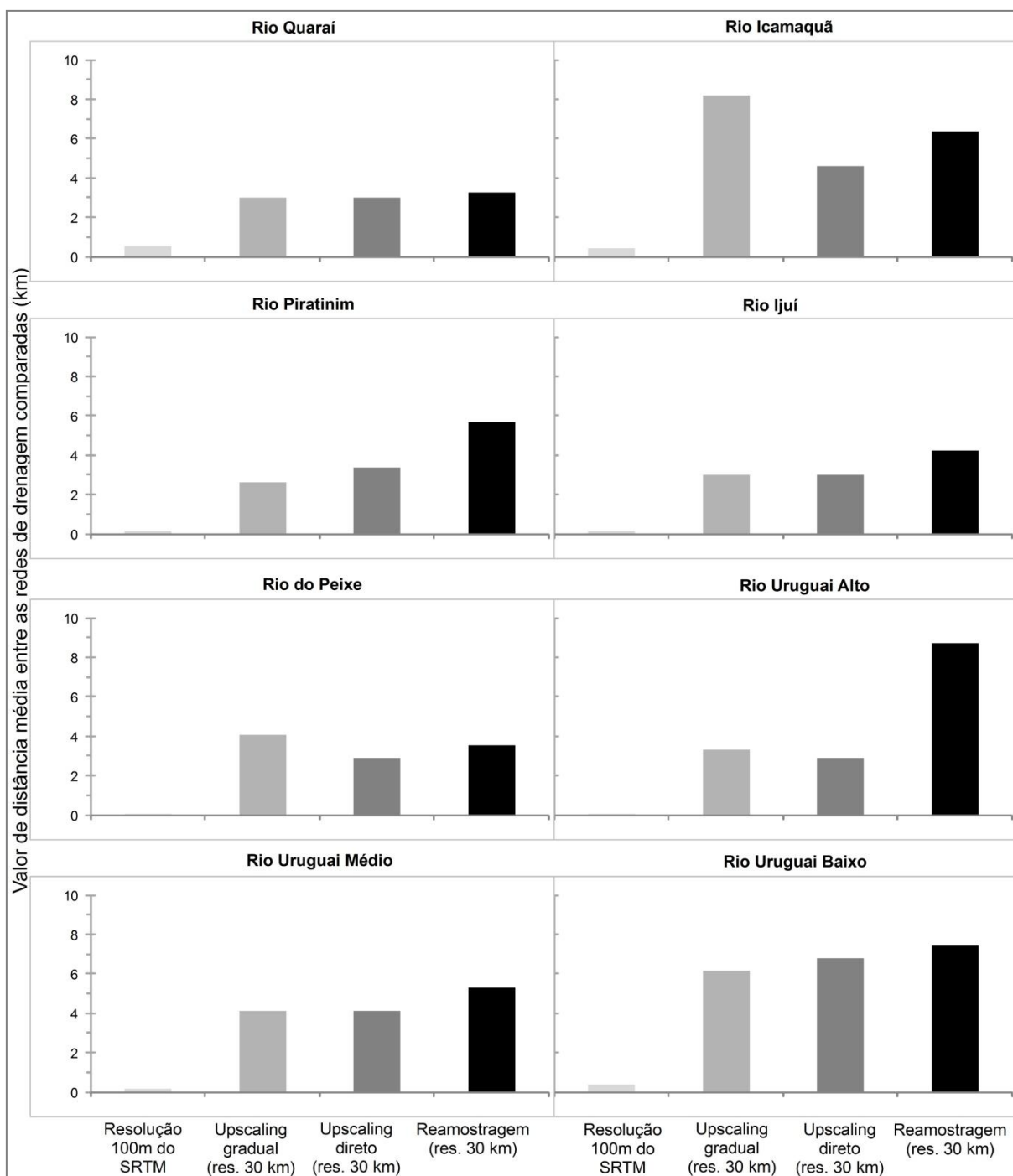


Figura 52. Distância média entre os trechos de rios obtidos em diferentes métodos e escalas dos dados SRTM e os rios vetorizados das imagens LANDSAT para a bacia do rio Uruguai.

Fazendo um panorama do desempenho dos métodos utilizados em todas as bacias nas análises de área e distância média entre os rios considerados como referências, concluiu-se que os resultados de alta resolução, como esperado, se apresentaram mais próximos da rede de referência.

Para os métodos aplicados a baixa resolução o procedimento de reamostragem mostrou os piores resultados com maior formação de área e distância média entre os rios comparados. Os métodos de *upsampling* foram os que apresentaram melhor desempenho. A variação entre as

modalidades gradual e direta para todas as bacias estudadas foram de 15,8% até 44,1%, sendo o *upscaling* gradual melhor em três bacias (Paraíba, São Francisco e Tapajós) de quatro estudadas. Na bacia do Uruguai houve empate entre os procedimentos em número de rios que obtiveram os melhores resultados. O melhor desempenho na obtenção da rede de drenagem pelo método de *upscaling* em relação a reamostragem para a preparação de dados a serem inseridos em modelos hidrológicos de grandes bacias, corroboram com Paz *et al* (2008), Paz *et al* (2006), Shaw *et al.* (2005), Reed (2003), Olivera *et al.* (2002), Wang *et al.* (2000) e O'Donnell *et al.* (1999).

4.2 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS BACIAS

4.2.1 Comparação da delimitação das bacias hidrográficas

Foram analisados quantitativamente as áreas das bacias obtidas pelos métodos de reamostragem e *upscaling* na modalidade direta e gradual em relação à área da bacia de alta resolução.

Para a bacia do rio Paraíba, a baixa resolução espacial trabalhada foi de 10 km. As áreas da bacia determinadas nessa resolução foram comparadas com a área obtida na resolução 100 m proveniente dos dados do SRTM. Observa-se na Figura 53 que as bacias obtidas pelos métodos de *upscaling* apresentaram delimitações muito próximas, diferindo mais do formato adquirido por reamostragem.

Quantificando essas diferenças verificou-se que os erros inseridos em ambos os métodos (reamostragem e *upscaling*) subestimaram as áreas em relação à bacia na resolução 100 m (Figura 54). Verificou-se também que o procedimento de reamostragem perdeu mais informação de área com 1,61% em relação ao *upscaling* direto que subestimou em 0,99% a bacia de alta resolução. No entanto, o *upscaling* gradual reduziu a área da bacia em 1,87% em relação à de resolução 100 m (Tabela 15). Entretanto, avaliando visualmente a delimitação da bacia por reamostragem e pelo *upscaling* gradual, o segundo se aproxima mais da bacia dita como referência, evitando, por exemplo, que rios pertencentes à bacia drenem para fora da mesma.

Tabela 15. Percentual de erro da área da bacia do rio Paraíba em diferentes métodos comparada à bacia de alta resolução.

Método	Área da bacia (km ²)	Diferença (km ²)	Erro em relação à bacia de alta resolução (%)
Resolução de 100 m	20.034,03		
Upscaling Gradual	19.659,43	-374,60	-1,87%
Upscaling Direto	19.834,80	-199,23	-0,99%
Reamostragem	19.711,35	-322,68	-1,61%

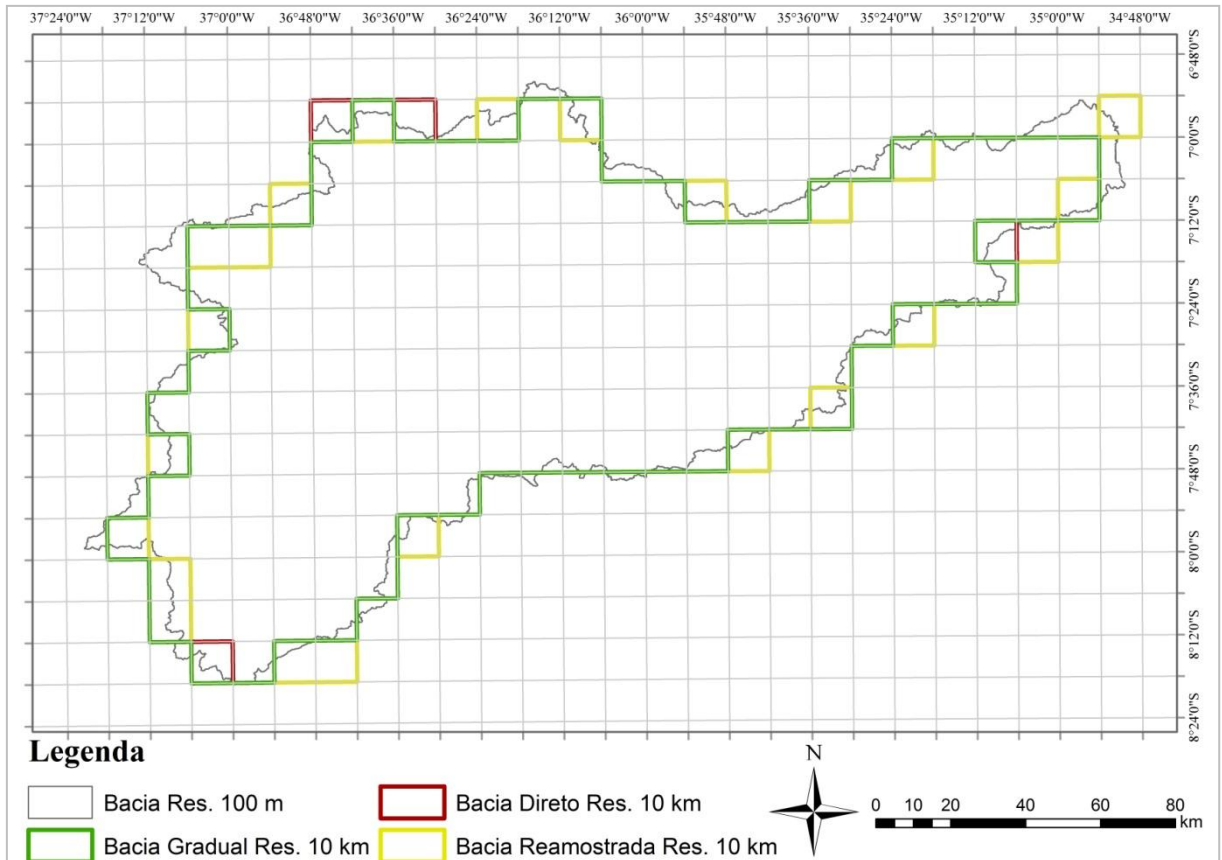


Figura 53. Comparação visual das áreas da bacia do rio Paraíba em diferentes métodos e resoluções.

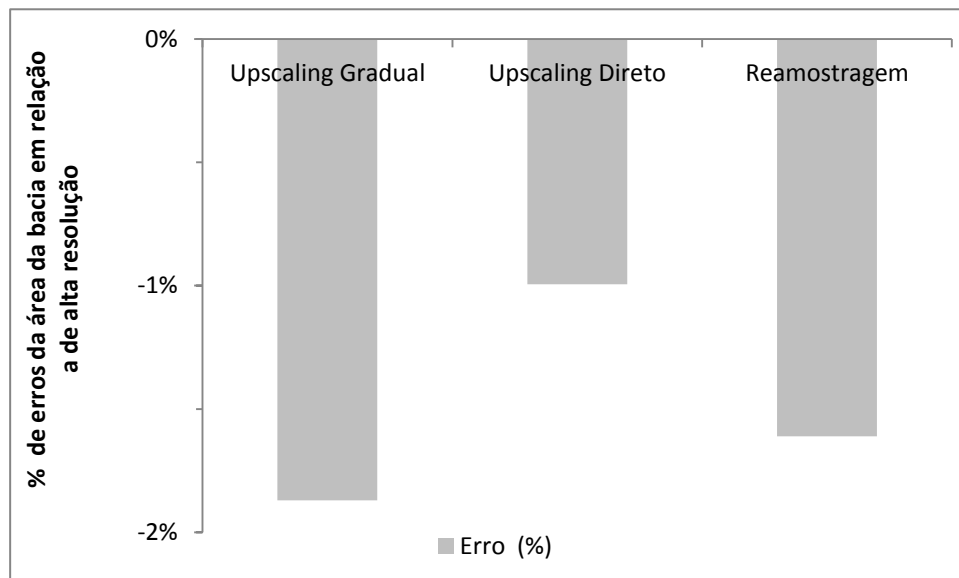


Figura 54. Gráfico do erro percentual da área da bacia do rio Paraíba em diferentes métodos em relação à de alta resolução espacial (100 m).

A bacia do rio do São Francisco obtida nos diferentes métodos pode ser visualizada na Figura 55. Observa-se que a bacia obtida pelo método de reamostragem foi a que se

diferenciou em termos de forma e na determinação do exutório da bacia e em termos de valor área também(Figura 56).

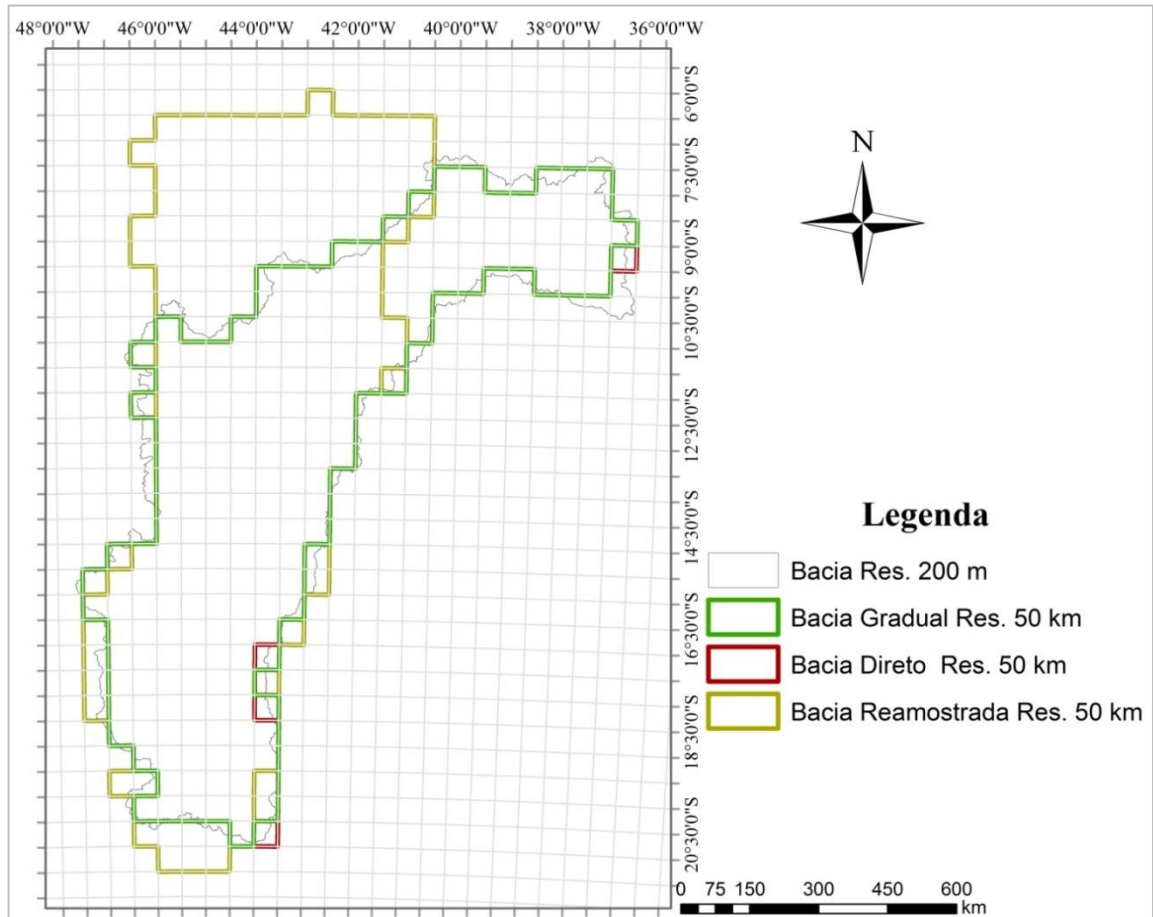


Figura 55. Comparação visual das áreas da bacia do rio São Francisco em diferentes métodos e resoluções.

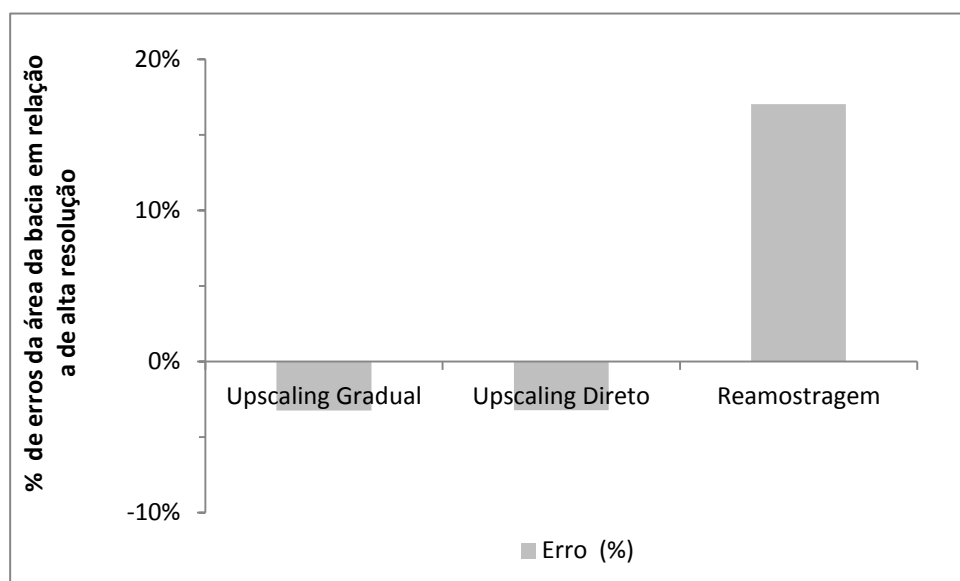


Figura 56. Gráfico de erro percentual da área da bacia do rio São Francisco em diferentes métodos em relação à de alta resolução espacial (200 m).

Os valores presentes na Tabela 16 mostram que a bacia reamostrada possui um erro de aproximadamente 17% para mais, enquanto pelos métodos de *upscaling* essa diferença chegou a 3,24% a menos que a bacia na resolução 200 m. Observa-se que os valores quantitativos foram coerentes com a análise qualitativa, apontando os métodos de *upscaling* na modalidade direta e gradual com melhores desempenho.

Tabela 16. Percentual de erro da área da bacia do rio São Francisco em diferentes métodos comparada à bacia de alta resolução.

Método	Área da Bacia (km²)	Diferença (km²)	Erro em relação à bacia de alta resolução (%)
Resolução de 200 m	641.347,00	-	-
<i>Upscaling</i> Gradual	620.563,00	-20.784,00	-3,24%
<i>Upscaling</i> Direto	620.616,00	-20.731,00	-3,23%
Reamostragem	750.499,00	109.152,00	17,02%

As delimitações da bacia do rio Tapajós obtidas pelos métodos de *upscaling* na resolução 50 km apresentaram-se mais próximas do formato da bacia na resolução 200 m. Isso não aconteceu com a bacia gerada pelo método de reamostragem, também na resolução 50 km, pois o seu formato se desconfigurou completamente da bacia de alta resolução e dos demais métodos de baixa resolução (Figura 57).

As análises quantitativas confirmaram que os métodos de *upscaling* apresentaram melhor desempenho. A modalidade direta foi a que mais se aproximou do valor de área na resolução 200 m, visualmente isso também é notório, principalmente na parte baixa da bacia, por corresponder melhor a de alta resolução. No entanto, as diferenças entre as modalidades direta e gradual foram pequenas (Figura 58).

Os percentuais de erro em relação à bacia de referência podem ser verificados na Tabela 17, onde foi contabilizado que o método de reamostragem apresentou um erro de menos 60,43%, contra aproximadamente 4% do *upscaling* gradual e 0,52% do direto.

Tabela 17. Percentual de erro da área da bacia do rio Tapajós em diferentes métodos comparada à bacia de alta resolução.

Método	Área da Bacia (km²)	Diferença (km²)	Erro em relação à bacia de alta resolução (%)
Resolução de 200 m	477.865,00	-	-
<i>Upscaling</i> Gradual	498.743,00	20.878,00	4,37%
<i>Upscaling</i> Direto	480.370,00	2.505,00	0,52%
Reamostragem	189.113,00	-28.8752,00	-60,43%

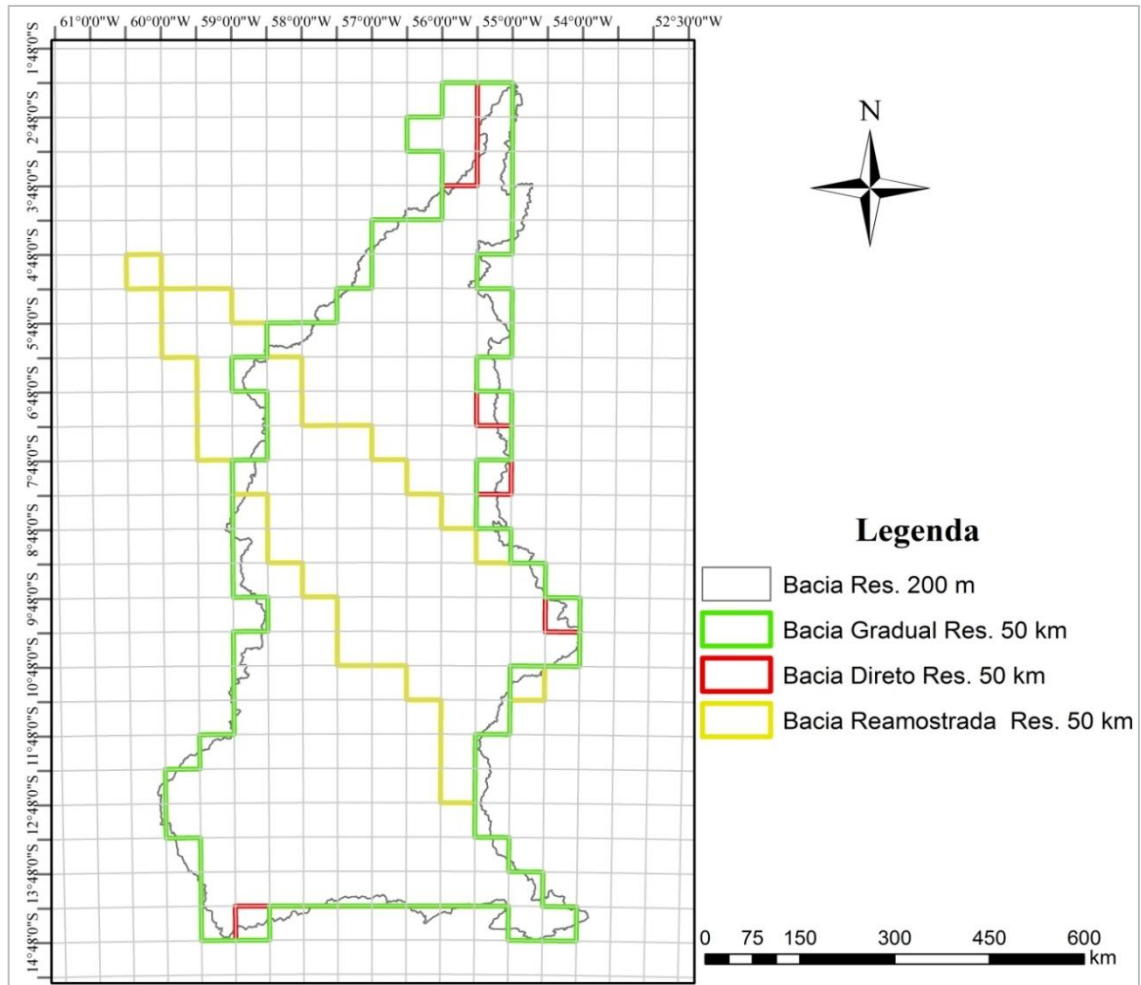


Figura 57. Comparação visual das áreas da bacia do rio Tapajós em diferentes métodos e resoluções.

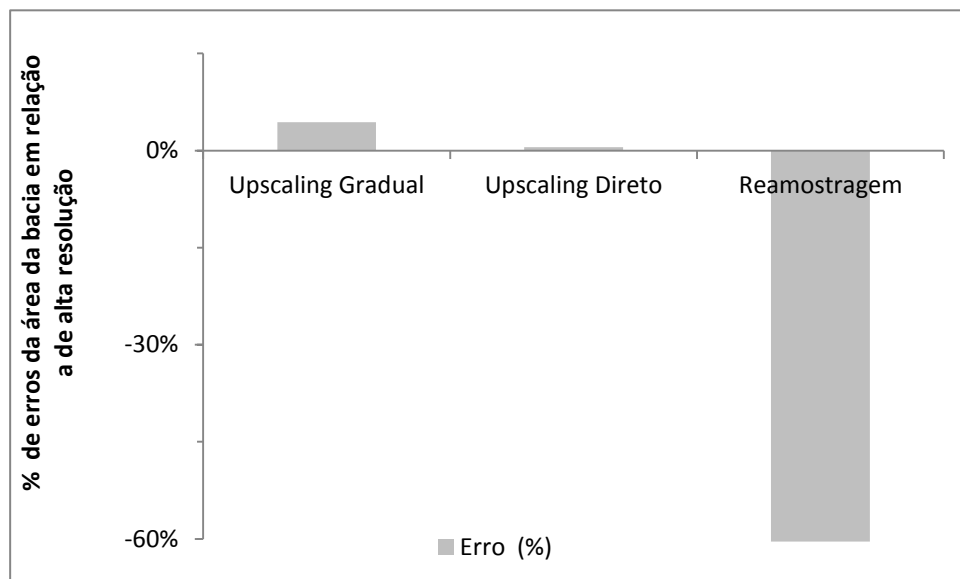


Figura 58. Gráfico do percentual de erro da área da bacia do rio Tapajós em diferentes métodos em relação à de alta resolução espacial (200 m).

A bacia do rio Uruguai foi melhor representada, em baixa resolução, pelos métodos de *upscaling* tanto qualitativamente (Figura 59) quanto quantitativamente, do que por reamostragem (Tabela 18 e Figura 60). Os resultados nas modalidades direta e gradual foram muito semelhantes entre si em ambas avaliações. Vale salientar que a inclusão ou exclusão de uma única célula na delimitação da bacia de baixa resolução espacial (30 km) implica em uma alteração de aproximadamente 900 km² na área da bacia. Os resultados do *upscaling* gradual e direto nessa bacia diferiram apenas na inclusão de uma célula. Os valores de áreas obtidos por *upscaling* superestimaram em aproximadamente 7% a bacia na resolução 100 m contra a subestimativa de 19,12% pelo método de reamostragem (Tabela 18).

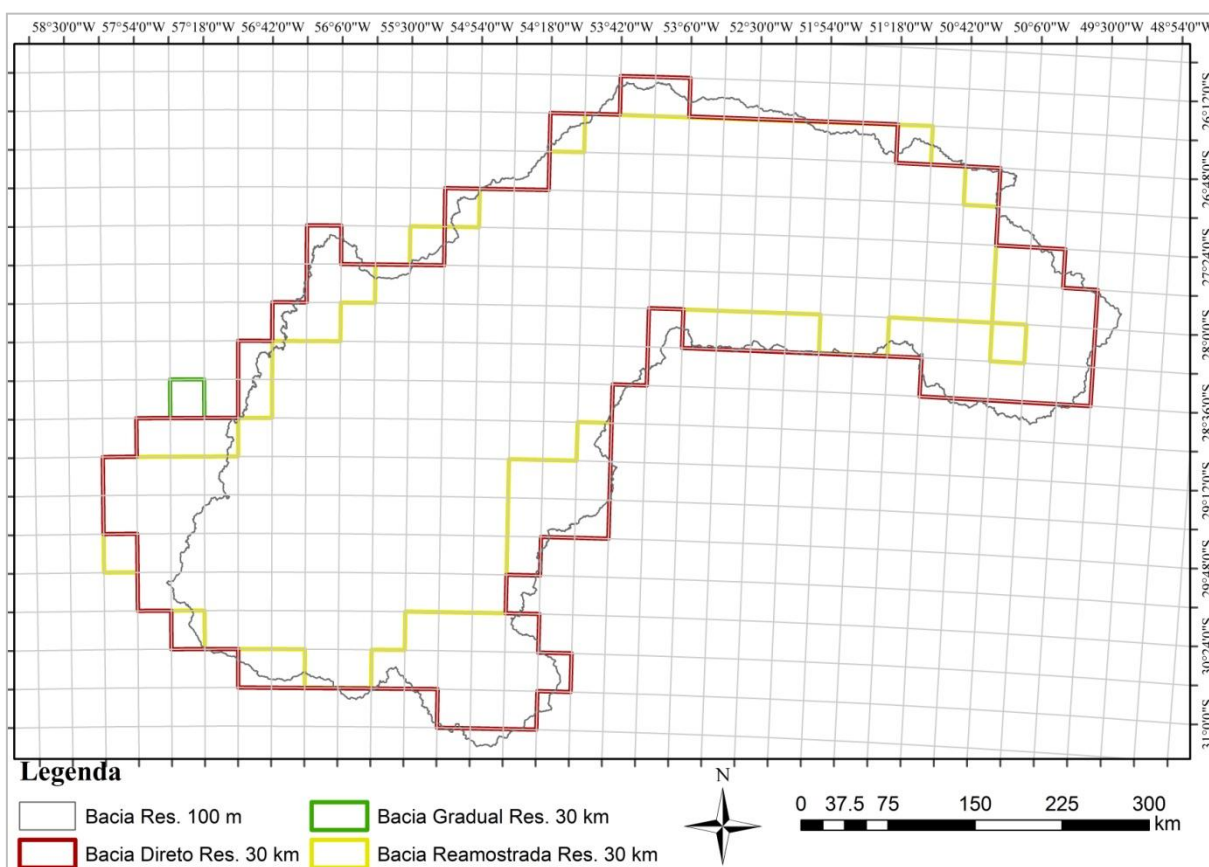


Figura 59. Comparação visual das áreas da bacia do rio Uruguai em diferentes métodos e resoluções.

Tabela 18 . Percentual de erro da área da bacia do rio Uruguai em diferentes métodos comparada à bacia de alta resolução.

Método	Área da Bacia (km ²)	Diferença (km ²)	Erro em relação à bacia de alta resolução (%)
Resolução de 100 m	206.316,41	-	-
<i>Upscaling</i> Gradual (Res. 30 km)	220.733,36	14.416,95	6,99
<i>Upscaling</i> Direto (Res. 30 km)	219.757,69	13.441,28	6,51
Reamostragem (Res. 30 km)	166.866,40	-39.450,01	-19,12

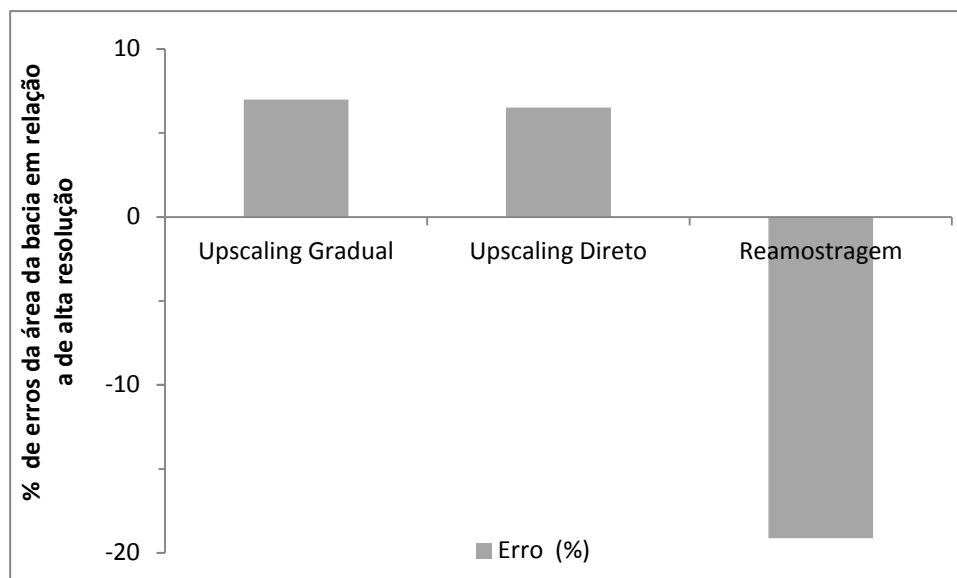


Figura 60. Gráfico do percentual de erro da área da bacia do rio Uruguai em diferentes métodos em relação à de alta resolução espacial (100 m).

Nas quatro áreas de estudo, as áreas das bacias foram melhor representadas pelos métodos de *upscaling* nas modalidades gradual e direta, com desempenhos muito próximos entre si tanto qualitativamente quanto quantitativamente. O procedimento de reamostragem foi o que apresentou mais incoerências nesses dois aspectos, distanciando-se mais das bacias de alta resolução, consideradas como referência.

4.2.2 Comparação dos comprimentos dos rios

A comparação dos comprimentos dos rios extraídos do MDE do SRTM por diferentes métodos e escalas foi realizada com a rede vetorizada das imagens LANDSAT, considerada como base.

Os valores reais de comprimento dos quatro rios analisados pertencentes à bacia do rio Paraíba estão presentes na Tabela 19. Nela pode-se verificar que a resolução 100 m do SRTM apresentou maior proximidade com os comprimentos dos rios vetorizados para os rios Taperoá e Gurinhém, enquanto o método de *upscaling* gradual na resolução 10 km obteve melhor desempenho para os rios Paraíba e Paraibinha (Figura 61). Observou-se que três dos quatro rios obtidos na resolução 100 m do SRTM apresentaram superestimativa nos comprimentos. Apenas o rio Gurinhém foi subestimado nessa resolução.

Quando feita essa análise apenas com a escala de baixa resolução em relação aos rios vetorizados, os métodos de *upscaling* se apresentaram mais coerentes do que o método de

reamostragem, sendo o na modalidade gradual o que apresentou melhor desempenho. Para ambos os casos, na maioria das vezes ocorreu subestimativa dos comprimentos (Figura 61).

Tabela 19. Valores dos comprimentos dos rios em quilômetros para a bacia do rio Paraíba em diferentes métodos comparada a rede vetorizada da imagem LANDSAT.

Rio	Comprimento (km)				
	Vetorizado	Res. 100 m	Upscaling Gradual (Res. 10 km)	Upscaling Direto (Res. 10 km)	Reamostragem (Res. 10 km)
Paraíba	374,00	432,47	318,14	302,46	292,19
Taperoá	144,73	164,39	124,42	124,42	97,60
Paraibinha	47,11	49,62	48,79	37,75	80,25
Gurinhém	76,99	74,53	62,73	58,10	26,73

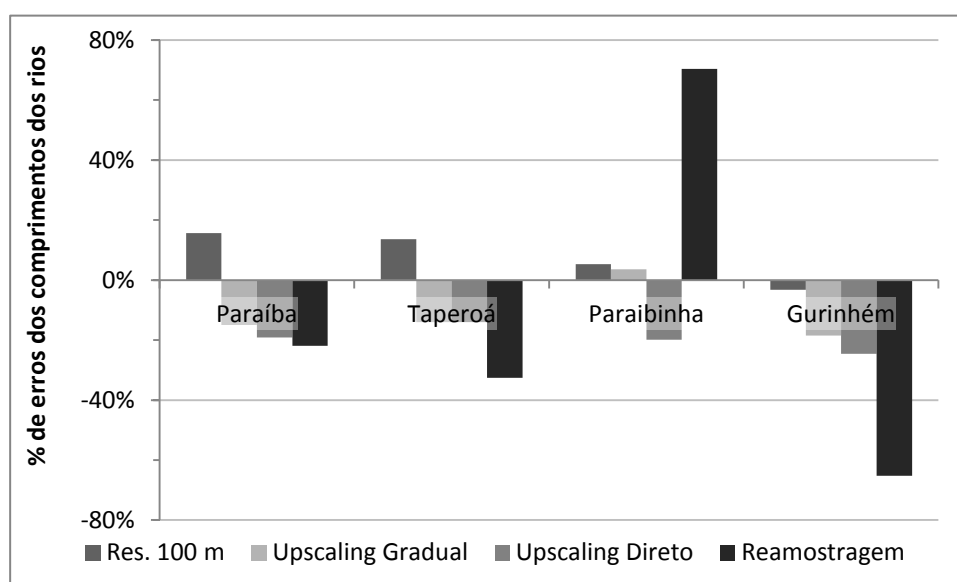


Figura 61. Gráfico do percentual de erro dos comprimentos dos rios da bacia do Paraíba em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.

Os valores considerados como referências dos comprimentos dos rios da bacia do São Francisco estão presentes na Tabela 20, onde é possível observar que cinco dos oito rios na resolução 200 m apresentaram maior proximidade com tais resultados do que os demais métodos.

Na avaliação de desempenho para os dados de baixa resolução, o método que se apresentou com valores mais próximos de comprimento em relação a rede de referência foi o *upsampling* de direções de fluxo na modalidade direta (Figura 62).

O percentual de erros em relação aos rios vetorizados pode ser mais bem visualizado na Figura 62. Verificou-se que quatro dos oito rios pertencentes a bacia do São Francisco apresentaram percentual de comprimentos que mais se distanciaram dos valores da rede vetorizada pelo método de reamostragem, inserido nesses quatro rios está o trecho do baixo

São Francisco que apresentou traçado totalmente incoerente à rede vetorizada. Os outros quatro rios que se mostraram mais distantes da rede de referência, em termos de comprimento, ficaram distribuídos igualmente entre a rede de alta e os métodos de *upsampling*.

Tabela 20. Valores dos comprimentos dos rios em quilômetros para a bacia do rio São Francisco em diferentes métodos comparada a rede vetorizada da imagem LANDSAT.

Comprimento (km)					
Rio	Vetorizado	Res. 200 m	Upscaling Gradual (Res. 50 km)	Upscaling Direto (Res. 50 km)	Reamostragem (Res. 50 km)
Das velhas	759,63	751,50	396,85	428,52	187,82
Paracatu	616,71	536,64	320,80	363,52	241,31
Verde Grande	503,95	391,63	244,10	244,10	188,43
Corrente	247,82	257,22	294,44	294,44	209,64
Grande	415,03	577,96	365,98	398,14	398,27
São Francisco Alto	982,83	1049,26	714,79	714,79	833,37
São Francisco Medio	772,33	1038,24	833,16	865,22	754,42
São Francisco Baixo	764,44	989,17	620,71	588,31	480,03

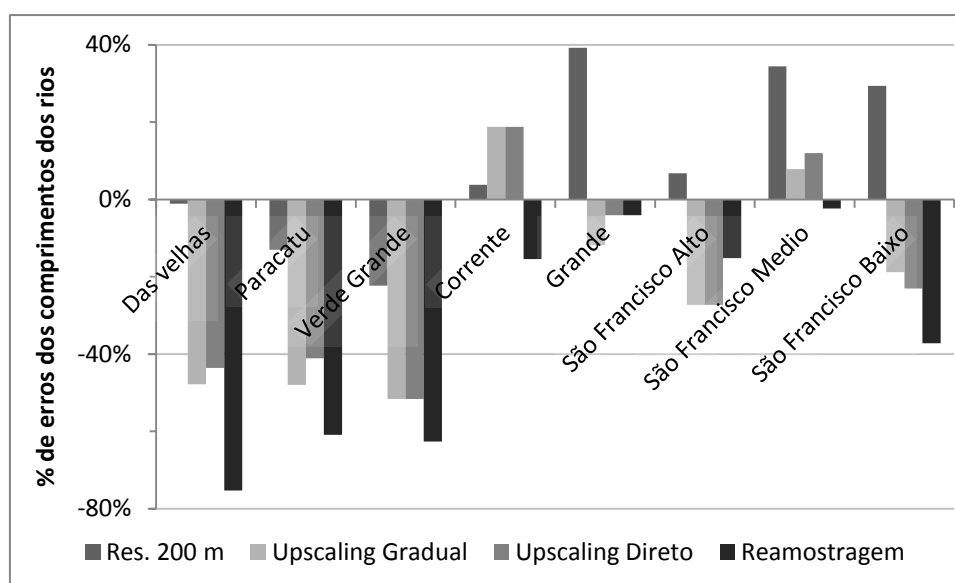


Figura 62. Gráfico do percentual de erro dos comprimentos dos rios da bacia do São Francisco em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.

Para a bacia do rio Tapajós trabalhou-se com cinco rios, sendo que três desses foram divididos em trechos (alto e baixo curso). Foi possível trabalhar dessa forma para a resolução alta e para os métodos de *upsampling* na resolução 50 km. Mas, para o método de reamostragem não foi viável, devido às várias incoerências na representação do traçado da rede de drenagem (Figura 63). Dessa forma, os valores de comprimento dos

rios presente na Tabela 21 pelo método de reamostragem foram obtidos em um único trecho para os rios Juruema e Tapajós.

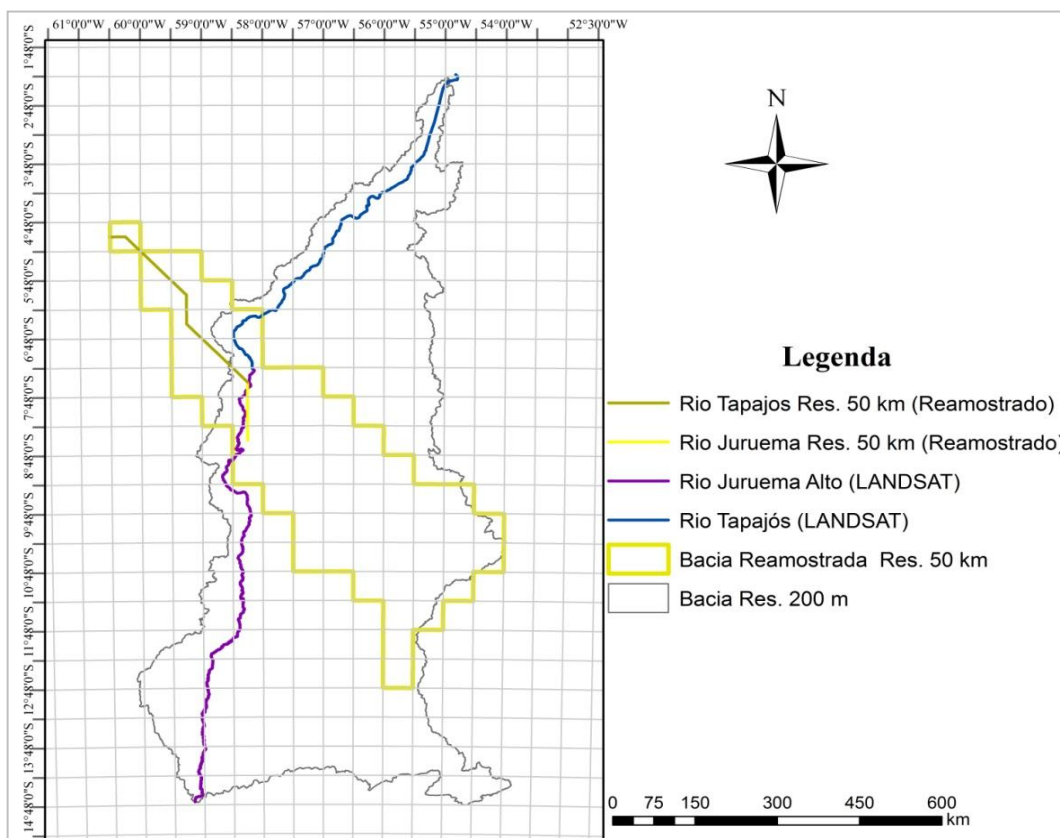


Figura 63. Mapa da distribuição dos rios vetorizados das imagens LANDSAT e da rede extraída das imagens SRTM pelo método de reamostragem.

Tabela 21. Valores dos comprimentos dos rios em quilômetros para a bacia do rio Tapajós em diferentes métodos comparada a rede vetorizada da imagem LANDSAT.

Rio	Vetorizado	Comprimento (km)			Reamostragem (Res. 50 km)
		Res. 200 m	Upscaling Gradual (Res. 50 km)	Upscaling Direto (Res. 50 km)	
Juruena Alto	665,93	665,63	543,65	543,65	133,95
Juruena Baixo	416,74	510,13	401,57	401,57	
Teles Pires Alto	940,40	965,89	642,03	642,03	289,39
Arinos	604,90	670,98	510,22	565,88	398,68
Jamanxim	649,67	703,88	513,18	490,46	457,90
Teles Pires Baixo	552,70	700,64	567,02	567,02	479,06
Tapajós Alto	411,81	550,98	457,76	457,76	369,46
Tapajós Baixo	330,65	442,51	291,51	291,51	

Para o cálculo de percentuais de erros nos comprimentos dos rios Juruema e Tapajós em relação aos rios vetorizados, para melhor comparação dos valores, tais rios foram tratados como um único trecho em todos os métodos e resoluções trabalhados (Figura 64).

A avaliação desses percentuais de erros (Figura 64) indicou que o método de reamostragem apresentou pior desempenho em quatro dos seis rios analisados. Esses erros podem ser ainda maiores se for considerado que o rio Tapajós, por exemplo, apesar de ter apresentado um menor percentual de erro no comprimento por esse método em relação ao obtido na resolução 200 m, não correspondeu ao traçado do rio Tapajós descaracterizando-se completamente da rede de drenagem vetorizada e apresentando graves incoerências na determinação do traçado (Figura 63).

Os resultados que mais se aproximaram dos rios vetorizados foi obtido pelos métodos de *upscaling* e a modalidade que apresentou melhor desempenho foi a direta (Figura 64).

Na Figura 64 foi observada tendência sobre os resultados de comprimentos obtidos na resolução 200 m do MDE, do rio Jamanxim ao rio Tapajós. Os rios foram ordenados de acordo com a área de drenagem inicial, dispostos do menor para o maior. Verificou-se que houve uma superestimativa nos resultados de comprimento para essa resolução à medida que os valores de área de drenagem aumentaram, ou seja, o rio Tapajós apresentou distanciamento dos resultados obtidos da rede de drenagem vetorizada, considerada como base, em relação aos demais rios, isso indica a formação de falsa sinuosidade que acarretaram no aumento dos valores de comprimentos à medida que o rio torna-se mais largo, característica típica dos rios quando atinge a sua foz.

Foi observado, também, tendência sobre os resultados de comprimento pelo método de reamostragem na resolução 50 km, do rio Juruena ao Teles Pires (Figura 64). No entanto, esses se aproximaram da rede de referência à medida que a área de drenagem aumentou. Esse fato pode estar relacionado às incoerências nos traçados da rede de drenagem obtidas por esse método, no qual houve um encurtamento da cabeceira até a foz.

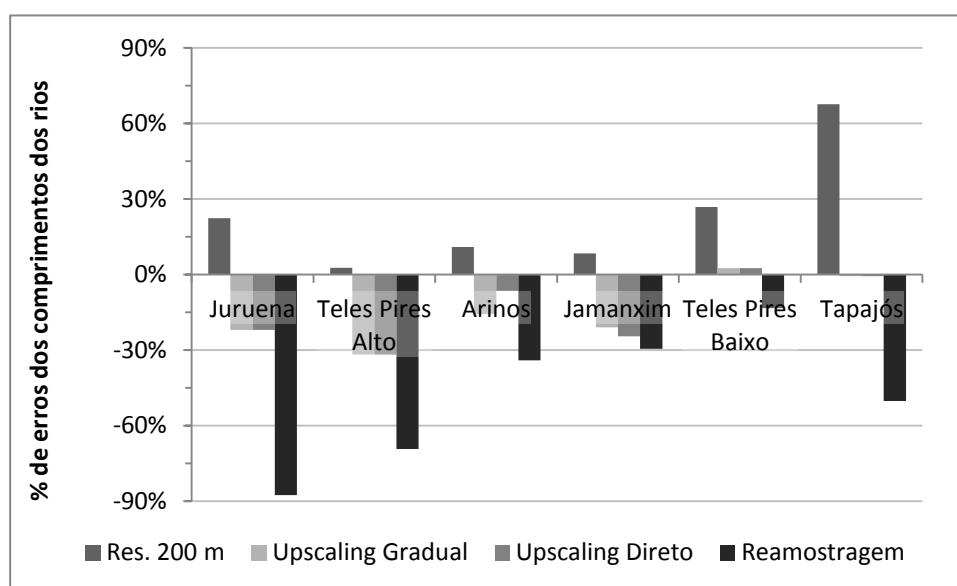


Figura 64. Gráfico do percentual de erro dos comprimentos dos rios da bacia do Tapajós em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.

Os valores dos comprimentos dos rios para a bacia do rio Uruguai em alta resolução e em baixa pelos métodos de *upscaling* nas modalidades direta e gradual e por reamostragem na resolução 30 km comparado aos rios vetorizados estão descritos na Tabela 22.

As diferenças entre os comprimentos por diferentes procedimentos podem ser melhor visualizados na Figura 65, verificando-se os percentuais de erros em relação a rede de drenagem de referência. Observou-se que a drenagem na resolução 100 m foi a que apresentou os menores erros, esse fato pode estar relacionado à obtenção dessas redes a partir do MDE de alta resolução do SRTM, seguido do *upscaling* gradual e direto. E os maiores erros ocorreram no procedimento de reamostragem correspondendo a cinco dos oito rios analisados.

Tabela 22. Valores dos comprimentos dos rios em quilômetros para a bacia do rio Uruguai em diferentes métodos comparada a rede vetorizada da imagem LANDSAT.

Comprimento (km)					
Rio	Vetorizado	Res. 100 m	<i>Upscaling</i> Gradual (Res. 30 km)	<i>Upscaling</i> Direto (Res. 30 km)	Reamostragem (Res. 30 km)
Quaraí	336,62	364,65	249,60	249,60	218,95
Icamaquã	241,30	269,08	194,99	103,05	220,26
Piratinim	322,82	296,32	118,25	136,56	132,66
Ijuí	509,40	504,77	221,85	221,85	221,85
Peixe	240,95	250,05	137,69	119,20	89,48
Uruguai Alto	816,27	891,21	484,93	463,36	386,58
Uruguai Médio	510,99	614,01	474,81	459,80	341,81
Uruguai Baixo	252,55	332,92	291,54	291,54	266,19

A Figura 65 está organizada de acordo com a área de drenagem inicial de cada rio, do menor para o maior. Observa-se que os resultados de comprimento obtidos na resolução 100 m apresentam, dos rios Piratinim ao baixo Uruguai, um aumento no erro percentual do comprimento. Isso indica que os valores de comprimento são superestimados em relação à rede vetorizada, considerada como base, à medida que a área de drenagem aumenta. Esse fato pode estar relacionado com a formação de uma falsa sinuosidade no interior do rio. Isso é ocasionado para o baixo Uruguai, por exemplo, por ser um trecho de rio mais largo e o tamanho do pixel do MDE nessa resolução espacial ser menor que a sua largura, errando-se para mais os comprimentos de rio. No alto Uruguai, trecho do rio estreito, porém bastante sinuoso, predomina o erro de não representar os meandros, devido à largura nessa parte do rio ser menor que o tamanho do pixel do MDE, isso leva ao encurtamento dos traçados, subestimando os comprimentos.

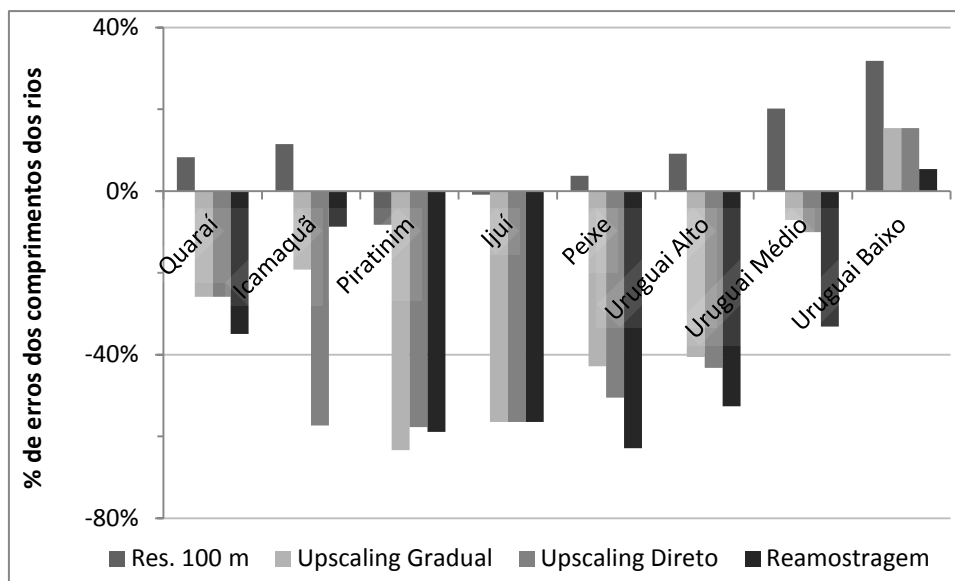


Figura 65. Gráfico do percentual de erro dos comprimentos dos rios da bacia do Uruguai em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.

Essa tendência também pode ser observada para os resultados obtidos em baixa resolução, mais nitidamente do rio do Peixe ao baixo Uruguai para todos os métodos. Esse fator indica que nos rios mais estreitos os comprimentos dos rios são subestimados e nos trechos dos rios mais largos esses são superestimados.

Esses erros provenientes da limitação da resolução espacial do MDE corroboram com Paz *et al.* (2007), Paz e Collischonn (2008) e Rennó e Soares (2001).

Avaliando o desempenho dos métodos e a influência da mudança de escala sobre os valores dos comprimentos dos rios para as quatro bacias estudadas percebe-se que para todas as áreas em estudo os comprimentos obtidos em alta resolução foram os que mais se aproximaram dos rios vetorizados, considerados como referências, exceto para a bacia do rio Paraíba que houve empate com o procedimento de *upsampling* gradual.

Para os resultados de baixa resolução o *upsampling* gradual teve melhor desempenho para a bacia do rio Paraíba e Uruguai que são bacias menores. E o *upsampling* na modalidade direta apresentou desempenho melhor para as bacias do rio São Francisco e Tapajós, essas com maiores áreas de drenagem. O pior desempenho para todas as bacias analisadas se deu pelo procedimento de reamostragem e mesmo quando esse apresentou maior proximidade com os comprimentos dos rios considerados como base, que foi o caso do rio Tapajós, não foi representativo quando contrastado com a análise visual que apontou as graves incoerências no traçado da rede obtida por esses métodos.

4.2.3 Comparação das sinuosidades

Os valores reais de sinuosidade para a bacia do rio Paraíba e seus principais afluentes, em diferentes métodos e resoluções espaciais estão dispostos na Tabela 23.

Tabela 23. Valores da sinuosidade dos rios para a bacia do rio Paraíba em diferentes métodos comparados aos resultados obtidos para a rede vetorizada da imagem LANDSAT.

Sinuosidade (m/m)					
Rio	Vetorizado	Res. 100 m	<i>Upscaling</i> Gradual (Res. 10 km)	<i>Upscaling</i> Direto (Res. 10 km)	Reamostragem (Res. 10 km)
Paraíba	0,55	0,64	0,48	0,49	0,44
Taperoá	0,66	0,76	0,51	0,51	0,44
Paraibinha	0,70	0,70	0,44	0,43	0,40
Gurinhém	0,93	0,89	0,47	0,53	0,40

Os erros percentuais da sinuosidade em relação a rede vetorizada das imagens LANDSAT podem ser melhor visualizado na Figura 66. Os rios na resolução 100 m apresentaram superestimava desse parâmetro, exceto para o rio Gurinhém. A superestimativa dos resultados de sinuosidade pode está relacionada a resolução espacial do MDE, quando a resolução espacial do MDE é inferior à largura do rio, tem-se tendência à superestimativa dos comprimentos e consequentemente dos valores de sinuosidade. Pois, o traçado derivado do MDE tende a apresentar sinuosidade artificial dentro da largura do rio verdadeiro (Paz *et al.*, 2007; Paz e Collischonn, 2008).

Os afluentes do rio Paraíba apresentaram resultados mais próximos da rede considerada como base, na resolução 100 m, exceto o rio principal que obteve maior proximidade de valor de sinuosidade pelo método de *upsampling* na modalidade direta (Figura 66).

Fazendo a análise entre os métodos reamostragem e o de *upsampling* para a resolução 10 km em relação à drenagem vetorizada, o segundo procedimento na modalidade direta obteve resultados mais próximos à rede vetorizada (Figura 66).

Para a bacia do rio Paraíba (Figura 66) é possível observar também a tendência sobre os resultados de sinuosidade, pois à medida que a área de drenagem dos rios diminui esse parâmetro é subestimado. O rio Paraíba possui maior sinuosidade que o rio Taperoá que por sua vez possui maior sinuosidade que os demais rios, isso significa mais dificuldade de representar todos os meandros por meio dos procedimentos fundamentados em MDE, levando-os a não serem bem representados. Ou seja, quanto maior forem os valores de sinuosidade dos rios vetorizados, considerados como base, maiores serão os erros obtidos pelos diferentes métodos e resoluções.

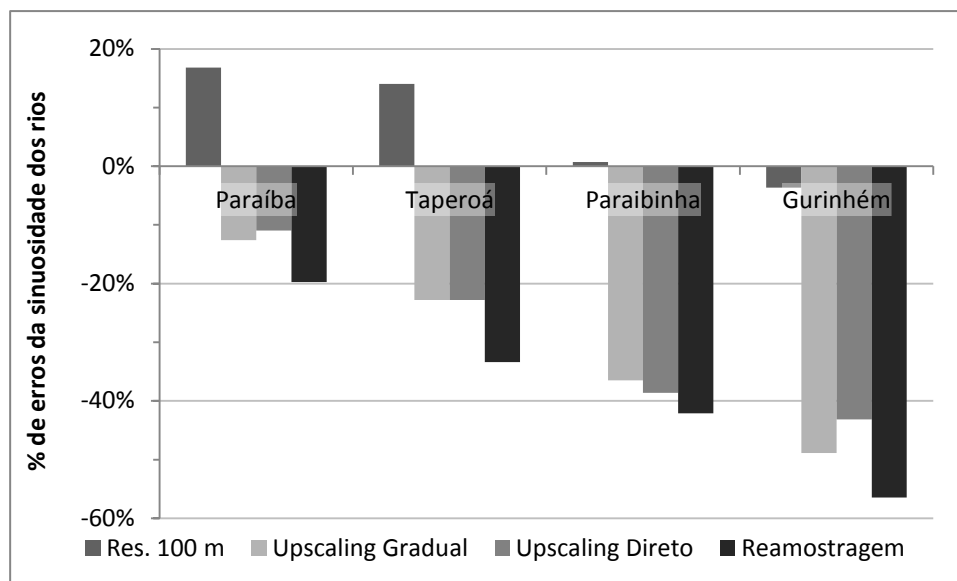


Figura 66. Gráfico do percentual de erro da sinuosidade dos rios da bacia do Paraíba em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.

Independente do método utilizado na resolução 10 km ocorreu em todos os rios da bacia do Paraíba a subestimativa dos resultados de sinuosidade. Esse fato pode ser explicado por ocorrer perda de informação ao se trabalhar com resoluções baixas, com isso, a tendência é que os meandros da rede de drenagem não sejam bem representados.

Na Tabela 24 estão presentes os valores reais de sinuosidade para a bacia do rio São Francisco em diferentes métodos e escalas. Observa-se que os resultados que mais se aproximaram dos rios vetorizados, considerados como referências, foram os rios obtidos do MDE do SRTM de alta resolução. O menor percentual de erro obtido por esse em relação a rede de referência pode ser percebido na Figura 67.

Ao analisar os resultados de sinuosidade de baixa resolução pelo método de reamostragem, verificou-se que quatro de oito rios da bacia se distanciaram dos rios considerados base e os outros quatro rios foi pelo *upsampling* gradual (Figura 67). No entanto, observa-se que pelo método de reamostragem a rede de drenagem obtida muitas vezes apresentou incoerências nos traçados, não conseguindo representar o rio como um todo. Esses erros por sua vez repercutiram sobre os comprimentos e sinuosidades, não correspondendo de fato à drenagem real. Isso significa que as análises das características não devem ser vistas de forma isolada, mas aliadas à análise visual ou outro tipo de análise quantitativa.

Um exemplo disso é o afluente das Velhas que apresentou um maior percentual de erro pelo procedimento de *upsampling* gradual em relação à rede vetorizada, quando equiparado ao valor de sinuosidade pelo método de reamostragem (Figura 67). Entretanto, o traçado desse

rio não foi bem representado por esse último procedimento, apresentando graves incoerências, problema esse que não ocorreu no *upsampling* gradual.

Observou-se também na Figura 67 que os valores de sinuosidade foram menos subestimados, em relação à rede de referência, a medida que a área de drenagem dos rios aumentou, isso ocorreu para todas as resoluções e métodos do rio Grande ao baixo São Francisco, exceto para a reamostragem, desse último, que aumentou. Ou seja, o baixo curso do rio São Francisco possui margens mais largas e é menos sinuoso em relação ao alto curso do mesmo rio que é mais estreito e mais sinuoso. O que reflete sobre os resultados provenientes do MDE é o inverso, isso devido aos meandros não serem bem representados havendo encurtamento da distância da cabeceira a foz do rio.

Tabela 24. Valores da sinuosidade dos rios para a bacia do rio São Francisco em diferentes métodos comparados aos resultados obtidos para a rede vetorizada da imagem LANDSAT.

Sinuosidade (m/m)					
Rio	Vetorizado	Res. 200 m	Upscaling Gradual (Res. 50 km)	Upscaling Direto (Res. 50 km)	Reamostragem (Res. 50 km)
Das velhas	2,18	0,86	0,40	0,45	0,43
Paracatu	2,50	0,80	0,59	0,67	0,44
Verde Grande	2,29	0,85	0,44	0,44	0,43
Corrente	1,69	0,84	0,45	0,45	0,38
Grande	1,63	0,56	0,37	0,40	0,40
São Francisco Alto	1,79	0,65	0,47	0,47	0,54
São Francisco Medio	1,23	0,56	0,42	0,44	0,43
São Francisco Baixo	1,53	0,82	0,63	0,60	0,48

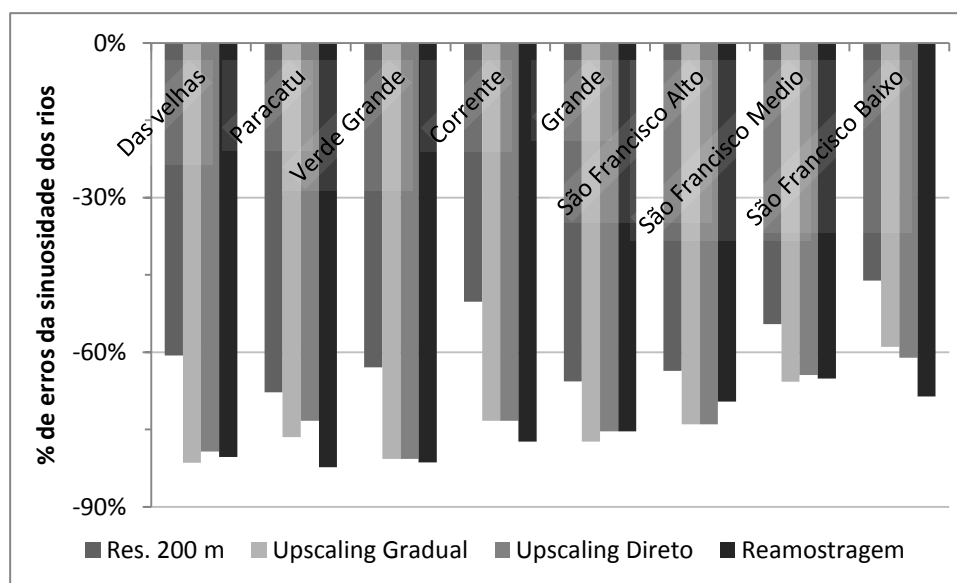


Figura 67. Gráfico do percentual de erro da sinuosidade dos rios da bacia do São Francisco em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.

Os valores considerados reais da sinuosidade para a bacia do rio Tapajós estão presentes na Tabela 25. Para melhor avaliar os valores de sinuosidade obtido para os rios Tapajós e Juruema em diferentes métodos e escala, esses rios não foram divididos em baixo e alto curso no método de reamostragem, devido a má representação dos traçados desses rios por esse procedimento. Por isso, esses rios obtidos na resolução 200 m e pelos *upscaling* na modalidade gradual e direta tiveram os trechos de alto e baixo curso somados para que pudessem ser melhor comparados com o método de reamostragem.

Tabela 25. Valores de sinuosidade dos rios para a bacia do rio Tapajós em diferentes métodos comparados aos resultados obtidos para a rede vetorizada da imagem LANDSAT.

Sinuosidade (m/m)					
Rio	Vetorizado	Res. 200 m	<i>Upscaling</i> Gradual (Res. 50 km)	<i>Upscaling</i> Direto (Res. 50 km)	Reamostragem (Res. 50 km)
Juruena Alto	1,51	0,60	0,45	0,44	0,40
Juruena Baixo	1,36	0,70	0,52	0,52	
Teles Pires Alto	2,13	0,74	0,49	0,49	0,52
Arinos	1,44	0,53	0,42	0,43	0,40
Jamanxim	1,59	0,63	0,51	0,44	0,52
Teles Pires Baixo	1,42	0,59	0,43	0,43	0,39
Tapajós Alto	1,31	0,57	0,41	0,41	0,37
Tapajós Baixo	1,14	0,51	0,38	0,38	

Dessa forma, pode-se analisar que os valores de sinuosidade que mais se aproximaram dos rios de referência foram os obtidos do MDE de alta resolução. Essa proporção foi de quatro rios dos seis analisados para essa bacia, apresentando melhor desempenho do que os outros métodos e resoluções.

Os únicos que não se aproximaram dos valores de sinuosidade dos rios considerados como base, na resolução 200 m, foram os rios Tapajós e Juruena, tendo melhor valor obtido por reamostragem (Figura 68). No entanto, vale salientar que foram exatamente esses rios os que apresentaram pior desempenho na determinação do traçado. Podendo-se concluir que apesar da sinuosidade do rio Tapajós em alta resolução ser maior que o de reamostragem em relação ao rio de referência, o de alta pode ser considerado como o que se aproxima mais da rede considerada como base, por apresentar traçado mais coerente a mesma.

Os resultados de sinuosidade em termos de percentual de erros para baixa resolução apresentaram o pior desempenho pelo método de *upscaling* direto com quatro de seis rios analisados, seguido pelo procedimento de reamostragem que apresentou dois rios de seis analisados. O *upscaling* gradual empatou com o método de reamostragem em número de rios

com maior percentual de erros, por ter apresentado igual percentual de erros com a modalidade direta para os rios Teles Pires (alto curso) e Tapajós (Figura 68). Entretanto, isso pode estar relacionado aos problemas de representação obtidos pelo procedimento de reamostragem, conseguindo dessa forma mascarar os resultados quantitativos para esse parâmetro por esse método.

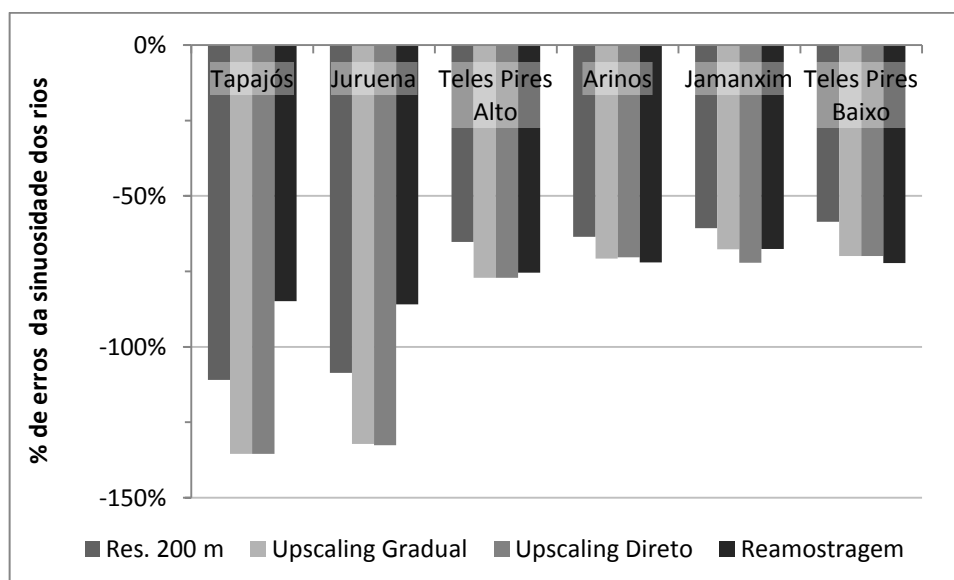


Figura 68. Gráfico do percentual de erro da sinuosidade dos rios da bacia do Tapajós em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.

Os resultados de sinuosidade para a bacia do rio Uruguai estão presentes na Tabela 26. Nela é possível observar que os valores mais próximos da rede vetorizada foram obtidos pelos rios em alta resolução extraídos do MDE do SRTM e que os resultados das redes de drenagem de baixa resolução foram bem próximos entre si.

Tabela 26. Valores da sinuosidade dos rios para a bacia do rio Uruguai em diferentes métodos comparados aos resultados obtidos para a rede vetorizada da imagem LANDSAT.

Sinuosidade (m/m)					
Rio	Vetorizado	Res. 100 m	Upscaling Gradual (Res. 30 km)	Upscaling Direto (Res. 30 km)	Reamostragem (Res. 30 km)
Quaraí	1,74	0,74	0,46	0,46	0,40
Icamaquã	1,85	0,82	0,46	0,43	0,46
Piratinim	2,51	0,84	0,38	0,44	0,44
Ijuí	2,63	1,20	0,53	0,53	0,53
Peixe	2,17	0,78	0,44	0,38	0,35
Uruguai Alto	2,08	0,90	0,47	0,42	0,45
Uruguai Médio	1,68	0,72	0,51	0,46	0,40
Uruguai Baixo	1,10	0,50	0,42	0,42	0,36

Na Figura 69 os valores apresentados na Tabela 26 foram expressos em termos de percentual de erros em relação aos rios de referencia. Verificou-se que o melhor desempenho foi em 100 % obtido pela drenagem na resolução 100 m, por esse se aproximar mais dos rios vetorizados.

Apesar dos resultados de baixa resolução terem sido bem próximos entre si, o método de reamostragem foi o que apresentou maior quantidade de rios com maior percentual de erro em relação aos rios vetorizados, com cinco de oito rios analisados. Os erros para o rio Ijuí foram iguais para todos na resolução 30 km e o método de baixa que apresentou melhor desempenho foi o *upscaling* gradual (Figura 69).

Na Figura 69, também foi observada uma limitação na representação dos meandros dos rios obtidos por meio dos procedimentos do MDE. Isso é mais bem visualizado comparando todos os rios dessa bacia segundo uma tendência, tomando o rio do Peixe e o baixo Uruguai como os extremos: observa-se que o baixo Uruguai apresenta sinuosidade com maior aproximação com a rede de referência. No entanto, o rio do Peixe que encontra-se na parte alta da bacia, sendo assim mais sinuoso que o baixo curso do rio Uruguai, apresentou maior erro na sinuosidade quando equiparado à rede vetorizada, isso indica que quanto maior a sinuosidade do rio maiores serão os erros, devido as limitações decorrentes da resolução espacial do MDE.

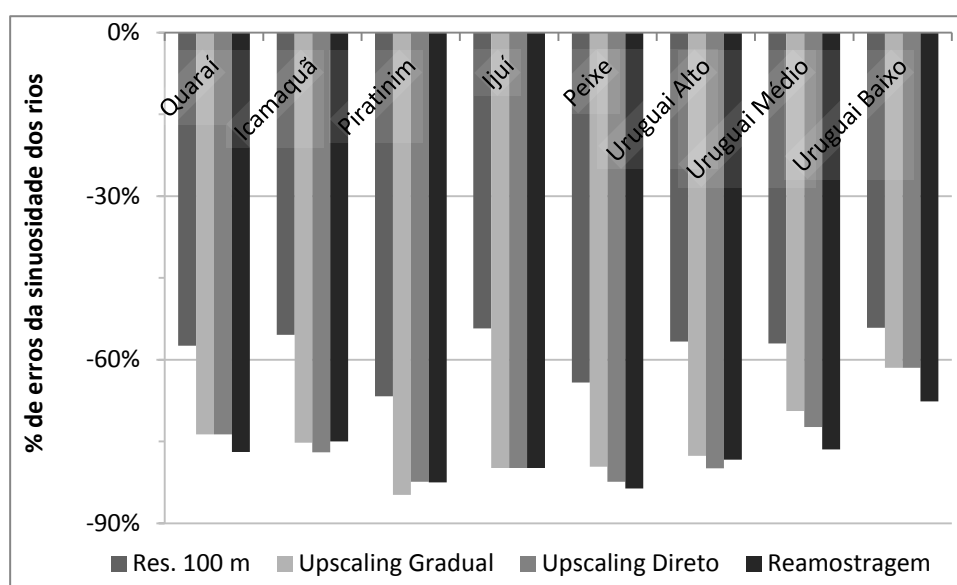


Figura 69. Gráfico do percentual de erro da sinuosidade dos rios da bacia do Uruguai em diferentes métodos em relação aos rios vetorizados das imagens LANDSAT.

Fazendo um panorama dos resultados de sinuosidade para as bacias adotadas, verificou-se que os resultados com maior proximidade com a rede vetorizada foi obtida pelos dados de alta resolução para todas as bacias.

Observou-se que os valores dessa característica física em baixa resolução para as bacias de maior área de drenagem (São Francisco e Tapajós) tiveram influência dos traçados das redes de drenagem obtidos pelo método de reamostragem indicando resultados mais próximos com a rede vetorizada, mas quando contrastados com a análise visual concluiu-se que não eram representativos. Ou seja, devido a esses problemas de incoerência dos traçados os valores de sinuosidade para o procedimento de reamostragem foram mascarados. E para as bacias de menor porte os resultados de baixa resolução foram melhor empregados pelo método de *upscaling* na modalidade direta para a bacia do rio Paraíba e na gradual para a bacia do rio Uruguai.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

As análises qualitativas das redes de drenagem obtidas pelo método de reamostragem, em várias resoluções espaciais, comparadas a de alta resolução extraída do MDE do SRTM, apontaram que todas as bacias estudadas apresentaram incoerências ao determinar os traçados da rede de baixa resolução. Mesmo em mudanças de escalas menores foram identificados erros nos traçados dos rios, considerados graves.

Quando essas mudanças ocorreram para resoluções mais baixas como foram os casos das bacias dos rios São Francisco e Tapajós, além dos erros anteriormente relatados, evidenciaram também, alteração no formato da bacia e na desembocadura do rio principal, com isso, apresentaram-se extremamente incoerentes as redes de referência. Por essas bacias apresentarem maior área e densidade de drenagem e muitas vezes existir a necessidade de se trabalhar com mudança de escalas maiores, os erros encontrados também foram de maior magnitude.

Com isso, ressalta-se que a utilização dos produtos resultantes do método de reamostragem requerem muitos cuidados ao serem aplicados a estudos científicos, devido as muitas incoerências encontradas na determinação da rede de drenagem de baixa resolução espacial.

As redes de baixa resolução apresentaram melhor desempenho na determinação dos traçados da rede de drenagem, em relação a rede de alta resolução, pelos métodos de *upscaling* de direções de fluxo nas modalidades direta e gradual.

A variação entre essa modalidade na determinação da direção de fluxo foi de 6,96% para bacia do Tapajós a 15% para a bacia do Uruguai. Sendo o método de *upscaling* gradual o que apresentou melhor desempenho para as bacias do Paraíba, São Francisco e Uruguai, vale ressaltar que essa última bacia a predominância foi de células com direção de fluxos equivalentes, seguida da modalidade gradual. O *upscaling* de direções de fluxo na modalidade direta foi melhor apenas para a bacia do Tapajós, que também apresentou predominância de células equivalentes para os procedimentos analisados, seguido de melhores resultados pelo *upscaling* direto com 27,3%.

Nas análises de área e distância média, concluiu-se que os resultados provenientes da rede de drenagem de alta resolução, como esperado, se apresentaram mais próximos dos rios vetorizados das imagens LANDSAT, considerados como referências.

Comparando quantitativamente o desempenho entre os métodos de baixa resolução, o procedimento de reamostragem foi o que apresentou os piores resultados com maior formação de área, e consequentemente de distância média entre os rios comparados. Os métodos de *upscaling* foram os que apresentaram melhor desempenho, sendo o *upscaling* gradual melhor em três bacias (Paraíba, São Francisco e Tapajós) de quatro estudadas. Na bacia do Uruguai houve empate entre os dois procedimentos.

Desta forma se pode concluir que o *upscaling* gradual foi o método de derivação da rede de drenagem de baixa resolução que se apresentou mais próximo e coerente com os rios de referência, por ter apresentado menor área e distância média entre as mesmas. E que esse resultado apresentou-se coerente com as análises qualitativas.

As análises quantitativas referentes às características físicas das quatro bacias estudadas consistiram em avaliar os resultados de área, comprimento e sinuosidade.

Os resultados de áreas foram coerentes com a análise qualitativa das bacias. As áreas das bacias foram melhor representadas para as quatro bacias estudadas pelos métodos de *upscaling* nas modalidades gradual e direta, que obtiveram desempenhos muito próximos entre si, tanto qualitativamente quanto quantitativamente, no entanto, a modalidade direta ainda foi a que se aproximou mais percentualmente das bacias de alta resolução. O procedimento de reamostragem foi o que se apresentou mais incoerências nesses dois aspectos, descaracterizando-se das bacias de alta resolução, consideradas como referências, principalmente para o São Francisco e Tapajós para as quais se trabalhou com mudança de escala maior.

A influência dos métodos e da mudança de escala sobre os valores dos comprimentos dos rios para as quatro bacias estudadas indicou que os resultados obtidos em alta resolução foram em sua maioria os que mais se aproximaram dos rios vetorizados, considerados como base.

Para os resultados de comprimento dos rios em baixa resolução concluiu-se que os valores quantitativos em algumas situações não conseguiram representar a real condição do traçado do rio, sendo incoerentes com a análise visual. Esse foi o caso do rio Tapajós, obtido pelo método de reamostragem, que apresentou maior proximidade com os comprimentos dos rios considerados referências, mas não foi representativo quando contrastado com a análise visual que apontou as graves incoerências no traçado desse rio. Mesmo com resultados quantitativos não sendo bem representados, pode-se concluir que o *upscaling* gradual teve melhor desempenho para a bacia do rio Paraíba e Uruguai. E o *upscaling* na modalidade direta apresentou desempenho melhor para as bacias do rio São Francisco e Tapajós. A análise qualitativa foi fundamental para essa conclusão.

Os resultados de sinuosidade para as bacias adotadas, foram melhor obtidos pelos dados de alta resolução para todas as bacias estudadas. Por apresentarem maior aproximação com os rios vetorizados. Para as redes de baixa resolução, esse parâmetro, também não conseguiu expressar quantitativamente o real desempenho dos traçados, principalmente para alguns rios pertencentes as bacias de maior área de drenagem (São Francisco e Tapajós) obtidos pelo método de reamostragem, indicando resultados mais próximos com a rede vetorizada, mas quando contrastados com a análise visual concluiu-se que não eram representativos, conseguindo dessa forma, mascarar os resultados. No entanto, apesar de encontrar alguns rios com essas incoerências, os *upscaling* direto e gradual conseguiram apresentar um maior número de rios com melhor desempenho para as bacia do Paraíba, São Francisco e Uruguai mais próximo da rede de referência.

Tanto os resultados de comprimento quanto os de sinuosidade refletiram as limitações encontradas ao utilizar procedimentos fundamentados em MDE para obtenção dessas características físicas. Ocorrendo superestimativa desses parâmetros nos rios localizados na parte baixa da bacia e subestimativa nos rios presentes no alto curso em relação à rede de drenagem de referência.

Conclui-se que independente das características das bacias a serem estudadas, ao se trabalhar com dados de baixa resolução, o método de reamostragem não é o procedimento mais adequado na obtenção de resultados confiáveis, devido as muitas incoerências graves encontradas nos traçados da rede de drenagem, podendo repercutir sobre aplicações que façam uso desse plano de informação. O método mais adequado para essa finalidade é o *upscaling* de direções de fluxo nas modalidades direta e gradual, sendo essa última a que apresentou melhor desempenho na avaliação dos traçados para as bacias estudadas nessa pesquisa.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados quantitativos obtidos nesse estudo, percebeu-se que algumas vezes a métrica ou estatística gerada não conseguiu expressar a real qualidade da rede de drenagem analisada, mascarando o resultado. Com isso, percebeu-se a necessidade de confrontar esses com análises qualitativas ou a outras quantitativas relacionadas às características físicas da bacia. Dessa forma, para avaliar melhor essas análises, recomendam-se outras formas de análises aliadas as realizadas, que quantifiquem esses resultados da forma mais fiel possível. Como, por exemplo, a intersecção entre as áreas da bacia, para obter o

percentual de área coincidente da bacia analisada com a de referência, identificando o quanto uma se assemelha a outra.

Outra forma de análise quantitativa, referente a avaliação de erros da rede de drenagem gerada em relação a rede vetorizada, de forma que não sejam contabilizados falsos erros, provenientes da vetorização do rio, já que há subjetividade ao definir o traçado do rio na sua calha. Essa subjetividade não caracteriza um erro do método, mas apenas uma simples diferença entre as localizações da rede gerada e a vetorizada (BUARQUE et al, 2009). Com isso, para evitar esse problema e obter uma comparação mais eficiente entre os métodos é recomendada uma operação de análises de proximidade (*Buffer*), com uma largura pré-definida ao redor da linha definida como verdade para contabilizar o quanto a rede analisada se aproximou da rede de referência.

Outra recomendação se refere a geração do MDE do SRTM, esse durante sua missão sofreu interferência da vegetação para determinar a altimetria do terreno. Devido a esse problema, Simard (2011) realizou um estudo voltado para o processamento do MDE removendo-se o efeito da vegetação. Trazendo esse estudo para o tema abordado nessa pesquisa, indaga-se o quanto o efeito vegetação pode repercutir sobre a rede de drenagem extraída do SRTM, já que nas proximidades dos rios deve existir a mata ciliar.

Outra preocupação que pode auxiliar futuros estudos é conseguir relacionar o erro aceitável para o uso da rede de drenagem para diversas aplicações e os impactos desses erros sobre estudos, como instalação de hidrelétricas, escolha de áreas potenciais para aterro sanitário, dentre outras aplicações.

Os parâmetros de CMM e AIM definidos no algoritmo de Paz *et al* (2006) influenciam a rede de drenagem a ser gerada. Os autores sugerem critérios para definir os valores de tais parâmetros, os quais foram utilizados neste trabalho. No entanto, segundo os mesmos autores, os valores do parâmetro AIM e principalmente do parâmetro CMM não foram exaustivamente analisados quanto à influência sobre o processo de *upscaling* de direções de fluxo. Sugere-se testar variações dos valores recomendados e observar a qualidade dos resultados gerados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADES FILHO, C. de O. *et al.* Geomorfometria e geofísica aplicadas à discriminação de unidades sedimentares na Bacia Paraíba, nordeste do Brasil. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, 2835-2842. **Anais ...** CD-ROM.

ANDREOLLI, I. Previsão de vazão em tempo real no rio Uruguai com base na previsão meteorológica. 2003. 182. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre-RS. 2003.

ARAÚJO, L. E de *et al.* Análise climática da bacia do rio Paraíba - Índice de Anomalia de Chuva (IAC). Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal, v.6, n. 3, p. 508-523, set./de z. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação (NBR 13896)**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AUGUSTO, A. A. Z.; VIADANA. M. I. C. de F. A atualização cartográfica da rede de drenagem e a análise morfométrica do relevo. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11 a 18 de setembro de 1998, INPE, 473-485. **Anais ...** CD-ROM.

BUARQUE, D. C. *et al.* Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos. In: II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. 21p. 2008. **Anais ...** CD-ROM.

BUARQUE, D. C. *et al.* Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. RBRH — **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 14 n.2 Abr/Jun 2009, 91-103.

BOTELHO, R. G. M. **Planejamento ambiental em microbacias hidrográficas**. In. GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S da (Orgs). Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1999, pp. 269-300.

CARVALHO, T. M. de; LATRUBESSE, E. M. Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 5, Nº 1 (2004) 85-93.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite e TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006. 196p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre-RS. 2006.

COLLISCHONN, B. *et al.* *Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates*. **Journal of Hydrology**. 360 , 207– 216. 2008

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. vol. 6, no. 1, pp. 95-118.

DAVIES, H. N.; BELL, V. A. *Assesment of methods for extracting low resolution river networks from high resolution digital data*. **Hydrological Sciences Journal**. In: Press.

FAIRFIELD, J., LEYMARIE, P. 1991. *Drainage networks from grid digital elevation models*. **Water Resources Research**, 27(5), 709-717, 1991.

FARR, T. G., *et al.* *The Shuttle Radar Topography Mission*. 2007. **Rev. Geophys.**, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.

FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GONG, J.; XIE, J. *Extraction of drainage networks from large terrain dataset using high throughput computing*. 2009. **Computers & Geosciences** Vol. 35 pp. 337–346.

HOLZ, R.K. *The Surveillant Science: Remote Sensing of the environment*. **John Wiley & Sons**. New York, 1995. Second Edition.

JAXA: ASTER Global Digital Elevation Model. Disponível em: <<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>>. Acesso em 9 de outubro de 2011

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. John R. Jensen; tradução: José Carlos Neves Epiphanyo, *et al.* São José dos Campos - SP: Parêntese, 2009.

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

LARENTIS, D. G. *et al.* *Gis-based procedures for hydropower potential spotting*. **Energy**. 35 (2010) 4237e4243.

LILLESAND, T.M.; KEIFIR, R.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. **John Wiley & Sons**, Inc. New York. 1999.

LINS, Ruceline Paiva. **Limnologia da barragem de Acuã e codeterminantes socioeconômicos do seu entorno**: Uma nova interação do limnólogo com sua unidade de estudo. 2006. 134p. Dissertação (Mestrado em Meio ambiente) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

LINSLEY, R.K. Jr. *et al.* **Hydrology for Engineers**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1975. (McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering).

LONGLEY, P.A. *et al.* *Geographical Information System and Science*. **John Wiley & Sons**: Chichester, 2ª ed., 537 p., 2005.

MARCUZZO, F. F. N. *et al.* Detalhamento hidromorfológico da bacia do rio Paraíba. In: XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa, Brasil, 27 a 30 de novembro de 2012, ABRH. **Anais ...** CD-ROM.

MCNAMARA, J., *et al.* *Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand*. **Forest Ecology and Management**. 224, pp. 147-156. 2006.

MONTGOMERY D. R.; DIETRICH, W. E. 1988. *Where do channels begin?* **Nature**. 336: 232–234.

MOORE, I.D., *et al.* *Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications*. **Hydrol. Process**. 5, 3–30. 1991

MOURA, A. C. M. *et al.* Atualização de mapa de drenagem como subsídio para montagem de SIG para a análise da distribuição da esquistossomose em Minas Gerais. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 8p. 2005. **Anais...** CD-ROM.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto**. Curso de Especialização em Geoprocessamento. UFRJ, IGEO, Dep. Geografia, LAGEOP, Rio de Janeiro, 1999.

O'DONNELL, G.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D.P. *A simple algorithm for generating streamflow networks for grid-based, macroscale hydrological models*. 1999. **Hydrol. Process.** 13, 1269–1275. 1999.

OLIVERA, F.; LEAR, M. S.; FAMIGLIETTI, J. S.; Asante, K. *Extracting low-resolution river networks from high-resolution digital elevation models*. **Water Resources Research**, 38(11), 1231, 2002.

OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. **Geomorfologia de Engenharia**. 1998. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 1998.

PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. Geração de direções de fluxo para modelagem hidrológica de grande escala. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH. João Pessoa (PB). 2006. **Anais ...** CD-ROM.

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

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.. Rede de drenagem para modelagem hidrológica distribuída. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 20p. 2007. **Anais...** CD-ROM.

———. *River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on relatively high-resolution digital elevation model*. **Journal of Hydrology**. 2007.

———. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. **Rev. Geogr. Acadêmica** v.2 n.2 (viii.2008) 84-95. 2008.

PAZ, A.R. **Manual do Usuário: Modelo hidrológico distribuído MGB-IPH**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. v. 2. 2008.

PAZ, A. R. *et al. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models*. **Computers & Geosciences**. 34. 1584–1596. 2008

PLANCHON, O.; DARBOUX, F. 2001 *A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models*. *Catena* 46 pp. 159-176.

REED, S.M. *Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling*. **Water Resources Research** 39(9), 1238. 2003.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Discretização espacial de bacias hidrográficas. In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 8p. 2001. **Anais...** CD-ROM.

ROSSETTI, D. de F. *et al.* Origem tectônica de megaleques no norte da Amazônia com base em multisensores. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, 2835-2842. **Anais ...** CD-ROM.

SÁ, J. de F. de, *et al.* Uma Avaliação de Distintas Metodologias para Extração de Informações Topográficas Utilizando um Modelo Numérico do Terreno e o Algoritmo de um Modelo Hidrológico Distribuído. In: VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, 252-260. 1993. **Anais**.

SANTOS, I. M. ; ZEILHOFER, P. Integração do modelo hidrológico NGFLOW no sistema integrado de monitoramento ambiental da bacia do rio Cuiabá – SIBAC. In: GIS BRASIL – 9º Show de Geotecnologias – 3ª Mostra do Talento Científico. 8p. 2003. **Anais ...** CD-ROM.

SETTI, A. A., *et al.* **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2ª ed. – Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

SHAW, D.; MARTZ, L. W.; PIETRONIRO, A. *Flow routing in large-scale models using vector addition*. **Journal of Hydrology** 307, pp. 38-47. 2005

SILVA, A. D. da; PINHEIRO, E. da S. A problemática dos resíduos sólidos urbanos em Tefé, Amazonas. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 22 (2): 297-312, ago. 2010.

SILVA, B. C. da. Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco. 2005. 280p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre-RS. 2005.

SILVA, L. P da; EWEN, J. Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias Hidrográficas: A Necessidade de Novas Metodologias. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 5 n.4 Out/Dez 2000, 81-92.

SIMARD, M., *et al.* Forest Height With Spaceborne LIDAR. **Journal of Geophysical Research**, VOL. 116, G04021, 2011.

TATSCH, J. D., *et al.* Comparação entre dois procedimentos de *upscaling* de redes de drenagem. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 8p. 2009. **Anais ...** CD-ROM

TIANQI, A. *et al.* Development and application of a new algorithm for automated pit removal for grid DEMs. 2003. **Hydrological Sciences Journal** 48(6), 985- 997.

VALERIANO, M. M. **Modelo Digital de Elevação com Dados SRTM Disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE. 2004.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WANG, M.; HJELMFELT, A.T.; GARBRECHT, J. *DEM aggregation for watershed modeling*. 2000. **J. Am. Water Resour. Assoc.** 36 (3), 579–584.

YAMAZAKI, D., *et al.* Deriving a global river network map and its sub-grid topographic characteristics from a fine-resolution flow direction map. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 13, 2241–2251, 2009.