



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**NATHÁLIA SUEMI SAITO**

**MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO  
CORREGO HORIZONTE, ALEGRE – ESPÍRITO SANTO**

**JERÔNIMO MONTEIRO, ES**  
**FEVEREIRO - 2011**

**NATHÁLIA SUEMI SAITO**

**MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO  
CORREGO HORIZONTE, ALEGRE – ESPÍRITO SANTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maristela de Oliveira Bauer.

JERÔNIMO MONTEIRO, ES

FEVEREIRO - 2011

**MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO  
CORREGO HORIZONTE, ALEGRE – ESPÍRITO SANTO**

**Nathália Suemi Saito**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 23 de Fevereiro de 2011.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. João Batista Esteves Peluzio  
Instituto Federal do Espírito Santo  
(Membro Externo)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maristela de Oliveira Bauer  
Universidade Federal do Espírito Santo  
(Coorientadora)

---

Prof. Dr. Nilton César Fiedler  
Universidade Federal do Espírito Santo  
(Membro Interno)

---

Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos  
Universidade Federal do Espírito Santo  
(Orientador)

Dissertação 0021

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

S158m Saito, Nathalia Suemi, 1985-  
Modelos digitais de elevação na sub-bacia hidrográfica do córrego  
Horizonte, Alegre - Espírito Santo / Nathalia Suemi Saito. – 2011.  
120 f. : il.

Orientador: Alexandre Rosa dos Santos.  
Co-orientadora: Maristela de Oliveira Bauer.  
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal  
do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Sensoriamento remoto. 2. Relevo. 3. Interpolação. 4. Modelagem. 5.  
Sistemas de informação geográfica. 6. Horizonte, Córrego, Sub-bacia  
(Alegre, ES). I. Santos, Alexandre Rosa dos. II. Bauer, Maristela de Oliveira.  
III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV.  
Título.

CDU: 630

---

A Deus pela iluminação, ao meu  
esposo pelo amor e companheirismo e  
a toda família pelo apoio e  
compreensão.

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, todo poderoso, pela iluminação, benção e sabedoria nesses anos de luta. Por não ter me deixado desistir da batalha e por me dar forças a cada dia.

Ao Ulysses Rodrigues Vianna, meu esposo, por todo carinho, dedicação, amor e apoio para que eu continuasse lutando. Somos um só corpo e uma só alma agora e sempre.

Aos meus pais, Edson Shitoshi Saito e Regina Polese, e aos meus irmãos, Natanael Kenji Saito e Tiemi Saito, por cada sorriso e pela compreensão da minha opção de seguir nos estudos mesmo estando tão longe de seus braços. Mal sabem eles que essa distância me fortalece ainda mais para lutar por um futuro melhor e poder garantir um dia momentos de alegria sem fim para nossa família.

Ao professor Alexandre Rosa dos Santos, ilustre pessoa, professor e orientador. Muito obrigada pelos ensinamentos, pela amizade, pelos bons e difíceis momentos, pois aprendi a dar ainda mais valor nos detalhes da vida e, que após um dia difícil sempre virá nossa recompensa.

Às agradáveis companhias de Samira Murelli de Souza, Telma Machado de Oliveira Peluzio, Franciane Lousada Rubini de Oliveira Louzada, Rafaella De Angeli Curto, Valéria H. Klippel, Lilian Alvarez Junger e todas as amigas queridas que deram apoio quando eu mais precisei. Ao Luciano R. Pimenta, João Paulo, Valéria H. Klippel e Ulysses R. Vianna que me auxiliaram no trabalho de campo.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Centro de Ciências Agrárias (CCAUFES), ao programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais pela oportunidade, à banca examinadora pela atenção e apoio e, a todos os funcionários do CCAUFES.

Aos professores, mais que amigos quase pais, que acompanharam de perto cada vitória e que contribuíram de alguma forma com suas palavras de sabedoria, meu muito obrigada. Espero um dia ser companheira de serviço de todos vocês.

Obrigada a todos!

## BIOGRAFIA

NATHÁLIA SUEMI SAITO, filha de Edson Shitoshi Saito e Regina Polese, nasceu em Mogi das Cruzes, São Paulo, no dia 20 de abril de 1985.

Em 2004, ingressou na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Alegre - ES, graduando-se como Engenheira Florestal em fevereiro de 2009.

Em 2008, ingressou na Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Alegre (FAFIA), Alegre-ES, graduando-se Licenciatura Plena em Ciências Biológicas em dezembro de 2009.

No ano de 2009 realizou a Pós-Graduação *Latu Sensu* na Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Alegre (FAFIA) no curso de Educação, Governança e Direito Ambiental.

Sua vida profissional deu início ainda na faculdade com os estágios, monitorias e tutorias. Em 2008, iniciou no magistério do Ensino Fundamental e Médio de escolas particulares até 2009.

Em março de 2009, iniciou o Curso de Mestrado em Ciências Florestais, na Universidade Federal do Espírito Santo, CCA-UFES, submetendo-se à defesa da dissertação em fevereiro de 2011.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVO</b> .....	2
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
3.1. USO DA GEOTECNOLOGIA NA ANÁLISE AMBIENTAL .....	3
3.2. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE) .....	4
<b>3.2.1. Modelagem dos Modelos Digitais de Elevação</b> .....	5
<b>3.2.2. Dados de aquisição para elaboração do Modelos Digitais de Elevação</b> .....	7
3.2.2.1. Grades de representação dos dados .....	9
<b>3.2.3. Geração do MDE</b> .....	12
3.2.3.1. Introdução aos interpoladores .....	12
3.2.3.2. Tipos de interpoladores para geração dos MDE .....	13
<b>3.2.4. Validação dos modelos e controle de qualidade dos modelos</b> .....	19
3.3. CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DE INTERESSE HIDROLÓGICO .....	21
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	33
4.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	33
<b>4.1.1. Caracterização da Vegetação, Relevo, Clima e Solo</b> .....	34
4.2. AMOSTRAGEM .....	35
<b>4.2.1. Tamanho da Amostra</b> .....	39
4.3. PRÉ-PROCESSAMENTO .....	39
4.4. GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO.....	43
4.5. PÓS-PROCESSAMENTO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO.....	44
4.6. VALIDAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO.....	47
<b>4.6.1 Controle de qualidade dos modelos</b> .....	48
4.6.1.1. Análise da exatidão .....	53
4.6.1.2. Análise da precisão .....	54
4.6.1.3. Análise de tendência .....	55
4.7. OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS BÁSICAS DA BACIA .....	56
<b>5. RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	57
5.1. AMOSTRAGEM .....	57
5.2. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO .....	59
5.3. GERAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO.....	62
5.4. PÓS-PROCESSAMENTO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO .....	68
5.5. AVALIAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO .....	74
<b>5.5.1. Controle de qualidade dos modelos</b> .....	81
5.5.1.1. Base de dados do IBGE .....	81
5.5.1.2. Base de dados do SRTM .....	87
5.5.1.3. Análise de Exatidão, Precisão e Tendência dos MDE.....	91



5.6. CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO HORIZONTE.....	96
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>118</b>

## RESUMO

SAITO, Nathalia Suemi. **Modelos digitais de elevação na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – Espírito Santo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos. Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maristela de Oliveira Bauer.

Esta pesquisa objetivou utilizar a geotecnologia para a obtenção de informações da superfície terrestre, por meio de diferentes interpoladores e base de dados para a geração do Modelo Digital de Elevação, na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre - ES. Foram utilizadas as curvas de nível do IBGE e a imagem do SRTM como dados altimétricos. Testaram-se os interpoladores Inverso do quadrado da distância, Krigagem 1 e 2, *Spline* 1, 2 e B, TIN 1 e 2, *Topo to Raster* 1 e *Topo to Raster* 2. Coletaram-se em campo pontos de referência. Além disso, pontos subtraídos das curvas de nível foram utilizados como pontos de teste. Após a geração dos modelos aplicaram-se as técnicas de *stream burning* e avaliaram-se os modelos por meio de análise de discrepâncias entre as altitudes dos modelos e dos pontos de referências, avaliaram-se, também, as coincidências das hidrografias e a performance dos modelos por meio de índices estatísticos. Após a aplicação das técnicas de pós-processamento verificou-se que os métodos TIN 1 e 2 e *Topo to Raster* 1 e 2 apresentaram os menores números de depressões espúrias, sendo que todos os modelos foram semelhantes na coincidência com a hidrografia mapeada. Sem a técnica houve um grande número de inconsistências. O interpolador *Topo to Raster* 2 foi superior em todos os índices calculados e em todas as análises realizadas. Observou-se que é essencial a aplicação das técnicas de *stream burning* para melhoria da coincidência espacial das hidrografias (numérica e mapeada), já que os modelos gerados sem as técnicas de pós-processamento são inadequados para análises hidrológicas, porém as análises com os MDE gerados com os dados SRTM indicaram melhores resultados para extração de valores altimétricos. Constatou-se pelas diversas análises que o MDEHC (IBGE) pelo *Topo to Raster* 2 é o indicado para a geração de MDE na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES.

**Palavras-Chave:** Sensoriamento Remoto, Interpolação, Modelagem, Sistemas de Informação Geográfica, Horizonte, Córrego, Sub-bacia (Alegre, ES).

## ABSTRACT

SAITO, Nathália Suemi. **Digital elevation models in the sub-basin of the stream Horizonte, Alegre – Espírito Santo**. 2011. Dissertation (Master's degree on Forest Science) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES. Adviser: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos. Co-adviser: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maristela de Oliveira Bauer.

This research aimed to use the Geotechnology to obtain informations from the surface through different interpolators and database to create digital elevation model, in the sub-basin of the stream Horizonte, Alegre - ES. Were used the contour of the IBGE and the image of SRTM as altimetry data. Tested the interpolators Inverse distance weight, Kriging 1 and 2, *Spline* 1, 2, and B, TIN 1 and 2, *Topo to Raster* 1 and *Topo to Raster* 2. Were collected references points in the field. Moreover, points subtracted from the contour lines were used as test points. After the generation of models were applied the techniques of *stream burnning* and evaluated the models by analysis of discrepancies between the altitude of the models and points of references, were evaluated, too, the coincidences of hydrography and models' performance through indexes statistics. After applying the techniques of post-processing it was found that methods TIN 1 and 2 and *Topo to Raster* 1 and 2 had the lowest numbers of spurious depressions, and all models were similar in coincidence with mapped hydrography. Without technique there were a number of inconsistencies. The interpolator *Topo to Raster* 2 was superior in all indices calculated and in all the analysis. It was noted that it is essential to apply techniques of *stream burnning* to improve the spatial coincidence the basin (numerical and mapped), since the models generated without the post-processing techniques are inadequate for hydrological analysis, but analysis with the models generated with the SRTM data indicated better results for extracting values altimetry. Evidenced by the many reviews that models with *Stream Burnning* techniques with IBGE database and *Topo to Raster* 2 interpolator was the most suitable for the generation of Digital Elevations Models in the sub-basin of the stream Horizonte, Alegre - ES.

**Keywords:** Remote Sensing, Interpolation, Modelling, Geographic Information Systems, Horizon, Stream, Sub-basin (Alegre, ES).

## 1. INTRODUÇÃO

A água destaca-se entre os recursos naturais por ser indispensável a todo tipo de vida no planeta, bem como para a maioria dos meios de produção. Porém, o ser humano ao utilizar a água, independente da finalidade, ocasiona a deterioração da sua qualidade limitando, geralmente, o seu potencial de uso (SANTOS; SAITO; PELUZIO, 2010).

Além disso, o crescimento das cidades nas últimas décadas tem aumentado significativamente a pressão das atividades antrópicas sobre os recursos naturais, como por exemplo, a poluição dos corpos d'água causada pela introdução de matéria e/ou energia (NAGALLI; NEMES, 2009; SANTOS; SAITO; PELUZIO, 2010).

Dessa forma, a bacia hidrográfica, além de auxiliar as atividades de planejamento, passou a ser considerada como a principal unidade de análise para os estudos hidrológicos e ambientais, os quais são beneficiados com uma organização topológica (CHAVES, 2002). E, para isso, conta com o auxílio das ferramentas da geotecnologia na luta contra a crescente degradação ambiental uma vez que facilita o processo de análise, manipulação de informações em grandes áreas e, apresenta-se como ferramenta para extração, tratamento, análise e modelagem de dados e informações espaciais, dentre os quais se destaca o relevo.

O relevo de uma bacia hidrográfica tem grande influência sobre os fatores meteorológicos e hidrológicos, pois atua como importante agente regulador da distribuição do fluxo de água e energia dentro das bacias hidrográficas (MARTZ; GARBRECHT, 2000), sendo sua representação, em meio digital, feita por meio dos Modelos Digitais de Elevação (MDE).

O MDE gerado deve ser fiel na representação do relevo e deve assegurar a convergência do escoamento superficial para e ao longo da drenagem mapeada, garantindo assim a sua consistência hidrológica (CHAVES, 2002).

A rigorosa caracterização do relevo permite padronizar a extração e a estruturação topológica para armazenamento e disseminação de informações morfométricas que irão subsidiar o planejamento e a gestão de recursos

hídricos, estudos hidrológicos de superfície e quaisquer estudos que façam uso da forma e do relevo das bacias hidrográficas, evitando-se a replicação onerosa de recursos e procedimentos viabilizando, por fim, a criação de uma base de dados unificada (RIBEIRO et al., 2002).

A derivação automática de dados topográficos da bacia pelo MDE é mais rápida, menos subjetiva e provê mais informações que as técnicas manuais e tradicionais aplicadas a mapas topográficos (TRIBE, 1992; RIBEIRO, 2002). Porém, um dos principais empecilhos ao uso dos MDE é a discordância entre o traçado da hidrografia mapeada e o trajeto de escoamento superficial derivado numericamente.

Adicionalmente, encontram-se, com freqüência, depressões espúrias ao longo da drenagem numérica, que impedem o escoamento contínuo até o ponto de deságüe da bacia analisada (HUTCHINSON, 1996). Tais fatos inviabilizam a correta delimitação da área de contribuição à montante do ponto de interesse, comprometendo todas as demais etapas do estudo (CHAVES, 2002).

Assim, a eficiência da extração de informações e de outras, medida em termos de precisão e de exatidão, está diretamente relacionada com a qualidade do MDE e do algoritmo de triangulação/interpolação utilizado em seu cálculo que muitas vezes são utilizados de forma indiscriminada e sem uma avaliação crítica.

Nesse sentido, a seleção da técnica de interpolação é fundamental para a geração do modelo de representação espacial.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo com essa pesquisa foi utilizar o potencial da geotecnologia para a obtenção de informações sobre a superfície terrestre, por meio de diferentes técnicas de interpolação e base de dados para a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE), na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – Espírito Santo.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

O relevo é o principal fator determinante nos processos de transporte de materiais, pois influencia o fluxo d'água, o transporte de sedimentos e poluentes, a natureza e a distribuição de habitats de plantas e animais, além de ser uma expressão dos processos geológicos e do intemperismo (SCHIETTI et al., 2007). Neste contexto, a quantificação morfológica da superfície terrestre é essencial ao conhecimento dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na paisagem, além de fator fundamental na modelagem ambiental.

Um exemplo da necessidade de se conhecer as características topográficas é quando se deseja trabalhar com modelos que tratam da distribuição espacial da água na bacia hidrográfica. Esses modelos requerem dados como: limites da bacia e sub-bacias, declividade do terreno, comprimento do rio principal, forma da bacia, orientação das vertentes e características dos canais de drenagem (MOORE et al., 1993). Esses atributos topográficos podem ser computados a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizando-se várias técnicas pertencentes à geotecnologia.

#### 3.1. USO DA GEOTECNOLOGIA NA ANÁLISE AMBIENTAL

As geotecnologias englobam diversas técnicas como o sensoriamento remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). O termo SIG é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos por meio de técnicas empregadas na integração e análise de dados provenientes das mais diversas fontes, como imagens fornecidas por satélites terrestres, mapas, cartas climatológicas, censos, dentre outros (ASPIAZÚ; BRITES 1989).

Um SIG armazena a geometria e os atributos dos dados que estão georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica; são auxiliados por computador para adquirir, armazenar, analisar e exibir tais dados. Hoje, muitos *softwares* estão disponíveis para ajudar nesta atividade (EASTMAN, 1995).

Essa integração de informações para o planejamento territorial em sub-bacias com o SIG tem sido experimentada sob variadas formas. Dados

estruturados em imagens *raster* ligados a precipitação pluvial, solos, relevo e propriedades da vegetação, são sobrepostos para executar, de forma espacializada, análises do potencial e das fragilidades do terreno (VALERIANO, 2003a).

A operação de modelos analíticos com planos de informação sobrepostos em SIG é feita com operações entre os chamados Modelos Digitais de Elevação (MDE) (VALERIANO, 2003b). Os dados topográficos são fonte de muitas variáveis importantes e frequentemente solicitadas nas análises ambientais aplicadas a sub-bacias. Historicamente, estudos envolvendo dados topográficos são aplicados na caracterização de unidades de paisagem com base em variáveis morfológicas, estreitamente ligadas a feições geométricas da superfície sob análise (DOORNKAMP; KING, 1971; MEIJERINK, 1988; VALERIANO, 2003a).

Dessa forma, a crescente disponibilidade de bases topográficas digitais, aliada ao uso de SIG, tem impulsionado o desenvolvimento de métodos automáticos de extração de variáveis topográficas, para posterior tratamento e integração em ambiente computacional (VALERIANO, 2003b).

### 3.2. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

As características físicas de uma bacia hidrográfica eram, até meados da década de 1980, obtidas por meio de processo demorado e trabalhoso, em que o especialista examinava as curvas de nível e a rede de drenagem em bases cartográficas e, manualmente, interpretava e delimitava os seus limites.

O desenvolvimento de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e de técnicas mais precisas de extração de drenagem numérica e delimitação de bacias hidrográficas propiciou o uso dos sistemas de informações geográficas para obtenção automática das características físicas das bacias de drenagem (FURTADO, 1998; BAENA, 2002; CHAVES, 2002). As vantagens da automação em relação aos procedimentos manuais são a maior eficiência e confiabilidade dos processos, a reprodutibilidade dos resultados e a possibilidade de armazenamento e compartilhamento dos dados digitais (MOREIRA, 2006).

O MDE é uma representação digital de uma seção da superfície, dada por uma matriz de pixels com coordenadas planimétricas (x,y) e um valor de intensidade do pixel, correspondente à elevação (z) (LUIZ; SANTOS; BRENNER, 2007).

Valeriano (2008) conceitua MDE da seguinte forma: “são arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem com valor de elevação em cada pixel”. Os registros altimétricos devem ser valores de altitude de relevo, idealmente para que o MDE seja uma representação da topografia.

### **3.2.1. Modelagem dos Modelos Digitais de Elevação**

O processo de modelagem de um MDE pode ser definido em cinco fases: a amostragem dos dados digitais altimétricos e da rede de drenagem; o pré-processamento dos dados; a geração do MDE com o uso de um interpolador; o pós-processamento do MDE gerado; e a validação do MDE gerado ou a sua aplicabilidade (CHAVES, 2002; BAENA, 2002; MOREIRA, 2006; PIRES et al., 2005).

A amostragem compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno de interesse. Geralmente essas amostras estão representadas por curvas de isovalores e pontos tridimensionais.

O pré-processamento consiste em preparar os dados de entrada para que todos os dados digitais estejam consistidos e com qualidade e estrutura mínimas aceitáveis.

A modelagem envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste com o objetivo de se obter uma representação contínua do fenômeno a partir das amostras. Essas estruturas são definidas de forma a possibilitar uma manipulação conveniente e eficiente dos modelos pelos algoritmos de análise contidos no SIG. Os modelos mais utilizados são os modelos de grade regular retangular e os modelos de grade irregular triangular.

O pós-processamento visa eliminar imperfeições geradas na etapa anterior como as chamadas depressões espúrias e, busca-se também nesta



etapa, garantir a coincidência espacial da drenagem numérica do modelo com a drenagem vetorial digital, compiladas das bases cartográficas.

Já a validação do modelo gerado pode ser realizada por simples reconhecimento visual, por validações cruzadas baseadas em relações de vizinhança, por superposição de curvas de nível ou por comparação estatística com pontos de controle (PIRES et al., 2005).

Antes de gerar um MDE deve-se saber o que se deseja, ou seja, em que será aplicado, pois as aplicações dos MDE podem ser qualitativas ou quantitativas (NAMIKAWA et al., 2003). Dentre as principais áreas de aplicação pode-se destacar:

- Criação de mapas topográficos;
- Projetos de engenharia tais como estradas, barragens, etc.;
- Análise de visibilidade a partir de pontos predefinidos;
- Computação de mapas de declividade e exposição;
- Definição automática de drenagens e bacias;
- Visualização em projeção planar com imagens de satélite;
- Orto-retificação de imagens de sensoriamento remoto;
- Correção radiométrica de imagens de sensoriamento remoto e;
- Geração de mapas de aptidão;

Cada etapa citada para a modelagem de um MDE é decisiva para a qualidade do modelo gerado, sendo também interdependentes, ou seja, uma pode influenciar diretamente na outra. Entretanto, existe uma ordem lógica de estruturação para construção de um MDE, devendo-se inicialmente saber a razão da geração do MDE, para que será utilizado, ou seja, o seu objetivo e a sua aplicação. A partir dessa definição já se pode ter noção da área de trabalho, do tipo de terreno que se quer modelar, da disponibilidade de dados de entrada (amostragem) e do tipo de grade e método de interpolação (modelagem) que venha a ter maior eficiência para o modelo gerado (FERNANDES; MENEZES, 2005).

### 3.2.2 Dados de aquisição para elaboração dos Modelos Digitais de Elevação

De acordo com Namikawa et al., (2003), os dados necessários para a elaboração de um MDE podem estar em diferentes formatos representados pela Figura 1.

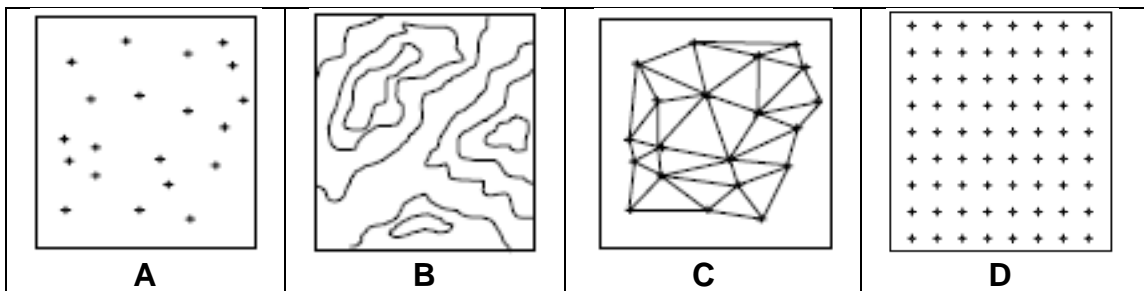


Figura 1 – Representação dos dados de aquisição para elaboração do MDE. A) Pontos 3D; B) Isolinhas; C) Grade irregular triangular e, D) Grade regular retangular.

**A) Pontos 3D:** são pontos com dados da posição espacial no plano XY e mais o valor do fenômeno estudado. O valor do fenômeno é representado no eixo Z. Esta representação é muito utilizada para levantamentos em campo pontuais e também para definir pontos de máximos e de mínimos em cartas topográficas.

**B) Isolinhas:** são linhas formadas por um conjunto ordenado de pontos bidimensionais definidos no plano XY. Cada isolinha contém, além dos pontos que define sua geometria, um valor relacionado ao fenômeno estudado. Esta representação é muito utilizada para se representar curvas de nível (relevo), isotermas (temperatura), isóbaras (pressão), etc...

**C) Grade irregular triangular:** é uma estrutura poliédrica cujos elementos básicos são triângulos. Os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto de amostras do modelo.

**D) Grade regular retangular:** é uma estrutura matricial que contém pontos 3D regularmente espaçados no plano XY. Os atributos importantes de uma grade regular são: número de linhas e colunas; resolução horizontal e vertical e: retângulo envolvente.

**E) Imagem:** é formada pela mesma estrutura da grade regular. A diferença básica entre a imagem e a grade regular é o valor associado a cada ponto da estrutura. No caso de imagem atribui-se um valor limitado que depende da resolução espectral usada para representar a imagem.

Também poderão ser gerados MDE a partir de dados do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que iniciou em fevereiro de 2000, resultante da cooperação entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DOD) e das agências espaciais da Alemanha e da Itália (VALERIANO, 2004).

A missão foi projetada para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre por meio de interferometria (VALERIANO, 2004 e 2005). Seus dados, disponibilizados por meio da NASA, podem ser adquiridos por diversas instituições ligadas à área de processamento de imagens orbitais de sensoriamento remoto, dentre elas, a EMBRAPA monitoramento por satélites. Esta instituição gerou a partir dos dados SRTM o projeto relevo do Brasil, um portal interativo em que o usuário obtém informações concernentes ao relevo de qualquer região, de qualquer Estado da Federação (MIRANDA, 2005).

Nesse mesmo portal, a EMBRAPA disponibiliza gratuitamente os dados originais do SRTM, na escala 1:250.000, previamente georreferenciados, em formato GeoTIFF e na projeção cartográfica WGS 84, que podem ser importados para bancos de dados em SIG, assumindo a estrutura de um MDE.

O SRTM adquiriu grande importância por possuir uma estereoscopia *along-track*, ou seja, tem a capacidade de produzir duas imagens de uma mesma área ao mesmo tempo evitando diferenças radiométricas (STEINMAYER, 2003). Dado a isso, mais de 90% das terras emersas do planeta já foram imageadas, algumas mais de uma vez (SOUZA FILHO, 2003), sendo que na América do Sul suas imagens possuem resolução espacial de 90 metros.

### 3.2.2.1. Grades de representação dos dados

#### A) Grade regular retangular (*Raster*)

O modelo de grade regular também chamado de grade retangular é uma representação matricial onde cada elemento da matriz está associado a um valor numérico. Este modelo digital aproxima superfícies por meio de um poliedro de faces retangulares (Figura 2). Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos mostrados, caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas localizações XY que definem a grade desejada (OLIVEIRA; IMAI, 2010).

O espaçamento da grade, ou seja, a resolução em X ou Y, deve ser idealmente menor ou igual a menor distância entre duas amostras com cotas diferentes. Nesta distribuição, os dados são estruturados em forma matricial, onde uma posição qualquer da matriz implica em uma posição correspondente na malha, e armazena-se apenas o valor da cota Z do ponto (OLIVEIRA; IMAI, 2010).

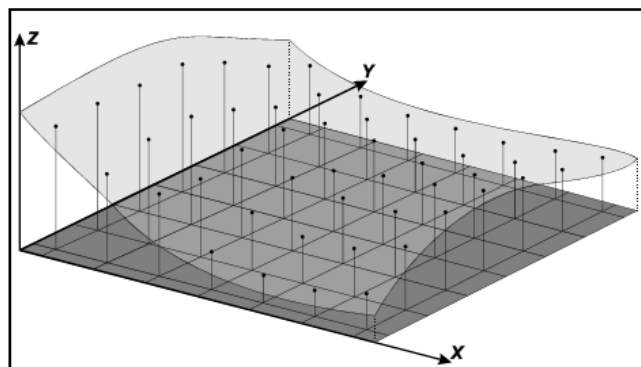


Figura 2 – Superfície e grade regular correspondente. Fonte: Namikawa, (2003).

#### B) Grade Irregular triangular (TIN)

O modelo de malha triangular também chamado de grade irregular, grade triangular ou TIN (*Triangular Irregular Network*) é o conjunto de poliedros cujas faces são triângulos (Figura 3). Os vértices do triângulo são geralmente os pontos amostrados da superfície, excluindo-se, portanto, os pontos fornecidos por interpolação (CHAVES, 2002).

Esta modelagem, considerando as arestas dos triângulos, se torna a forma mais comum de representar pontos irregularmente espaçados, pois triângulos oferecem uma maneira relativamente fácil de incorporar as linhas notáveis ou *breaklines* ou ainda linhas de quebra, ou seja, permite que as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração da grade triangular, possibilitando assim, modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas da superfície (OLIVEIRA; IMAI, 2010).

Uma das triangulações mais utilizadas é a triangulação de Delaunay que utiliza o critério de maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Assim, a malha final deve conter triângulos o mais próximos possível de equiláteros, evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos. Uma forma equivalente de implementação da triangulação de Delaunay consiste em utilizar o critério do circuncírculo (FELGUEIRAS, 2001).

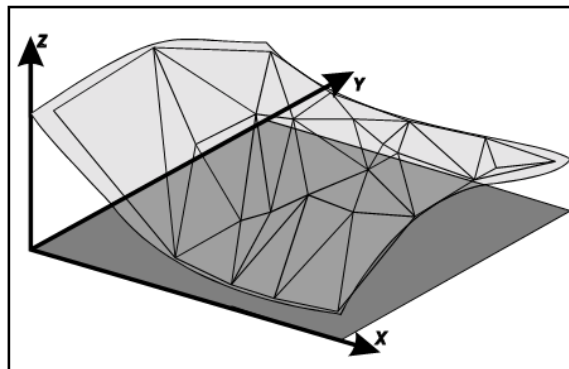


Figura 3 – Superfície e malha triangular correspondente. Fonte: Namikawa, 2003).

Esse critério, esquematizado na Figura 4 infere que uma triangulação é de Delaunay se: o círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contém, no seu interior, nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão (FELGUEIRAS, 2001).

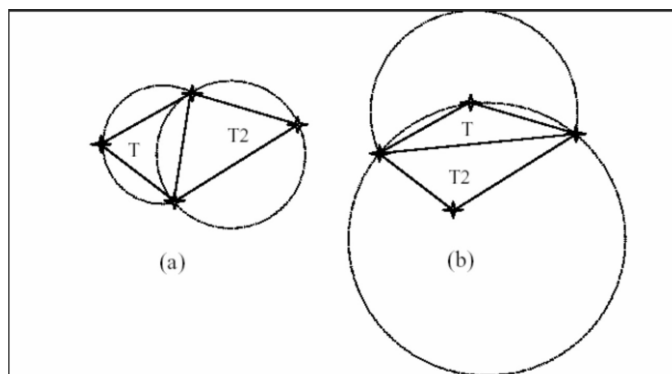


Figura 4 - Critério do circuncírculo para geração da triangulação de Delaunay: (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay. Fonte: Felgueiras, (2001).

A bibliografia mostra alguns trabalhos que testam diferentes modelos de grade para a confecção de MDE, entre eles pode-se citar Kumler (1994), que assume a grade regular retangular (GRID) como melhor modelo, e Mark (1975), Moore et al., (1993), Namikawa (1994) e Berg et al., (2000), que defendem a utilização de TIN.

Os MDE que utilizam grades regulares são bastante populares em face de sua ampla utilização em SIG e a facilidade de geração e manipulação dos dados, por utilizar uma matriz como estrutura de armazenamento. Esse tipo de grade é bastante adequado quando utilizada para a representação de superfícies suaves e de variação contínua. Quando a superfície de análise possui descontinuidades ou grandes variações essas grades apresentam deficiências, o que não ocorre com a utilização de grades irregulares triangulares (NAMIKAWA, 1994).

As descontinuidades são representadas por linhas, conhecidas como linhas de quebra (drenagem, divisores, falhas...) que auxiliam na caracterização de uma superfície. Essa característica das grades regulares não significa que todos os métodos que se utilizam desse tipo de grade fiquem presos a essa limitação, um exemplo disso é o módulo *Topo to Raster* do aplicativo computacional ArcGIS que possui a opção de utilizar a drenagem e outros corpos d'água como elementos de descontinuidade e suavização, aumentando sensivelmente a precisão dos modelos gerados.

Quanto aos métodos de interpolação, a eficiência de cada um está relacionada à sua qualidade de representação. Assim como toda interpolação

traduz uma incerteza no ponto estimado, é importante, portanto, saber qual interpolador induz ao menor erro. Nesse sentido, a seleção da técnica de interpolação é fundamental para a geração do modelo. Segundo Burrough; Mcdonnell (1998), quando os dados são abundantes, a maioria dos métodos de interpolação produz resultados semelhantes, entretanto, no caso de dados esparsos tais métodos podem apresentar limitações na representação da variabilidade espacial porque desconsideram a anisotropia, ou seja, a descontinuidade do fenômeno que se quer observar.

De maneira geral, os métodos de modelagem existentes nos SIG são utilizados de maneira indiscriminada, sem uma avaliação crítica, devendo-se, portanto, realizar melhores estudos para a correta utilização desses métodos.

### **3.2.3. Geração do MDE**

#### **3.2.3.1. Introdução aos interpoladores**

A interpolação espacial pode ser definida também como o procedimento para se estimar valores de propriedades de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos (BURROUGH, 1986; CASTRO, 2008).

Vários trabalhos têm utilizado métodos de interpolação espacial para estimativas de variáveis ou parâmetros geograficamente distribuídos utilizando-se de interpoladores presentes nos SIG (ASSAD, 2001; CARVALHO, 2003; BARBOSA, 2006), no entanto, muitos não têm se atentado para a necessidade de definir qual o melhor método de interpolação, não existindo até o momento, evidências que um método qualquer seja o melhor para diversas condições.

Os interpoladores são distinguidos em globais ou locais, exatos ou suavizantes, e determinísticos ou estocásticos.

A interpolação global é aquela quando são considerados todos os pontos da área amostrada, permitindo interpolar o valor da função em qualquer ponto dentro do domínio dos dados originais. Em geral o conjunto de amostras pode ser muito grande e não homogêneo tornando a interpolação global pouco apropriada em relação ao tempo de processamento computacional e precisão do modelo. Assim utilizam-se os interpoladores locais onde há funções

definidas para porções determinadas do mapa, portanto a alteração de um valor afeta localmente os pontos próximos ao mesmo (NAMIKAWA, 2003).

Os interpoladores exatos se certeza dos valores dos pontos no qual a interpolação está baseada. Eles sempre honram os dados, de maneira que após o processo de interpolação não há presença de resíduos, ou seja, a predição sobre os locais amostrados será igual ao próprio valor amostrado (OLIVEIRA; IMAI, 2010). Interpoladores suavizantes (smoothing), ao contrário, são utilizados quando há incerteza sobre os valores dos pontos amostrados, geralmente provenientes de locais que sofrem variações ou flutuações rápidas. Produzem suavização das curvas da superfície gerada, fazendo com que possíveis erros presentes nos dados tendam a ser minimizados.

Os interpoladores estocásticos, por sua vez, fazem uso da teoria da probabilidade, e incorporam critérios estatísticos na determinação do peso atribuído aos pontos amostrais para o cálculo das interpolações.

Os interpoladores determinísticos já não fazem uso da probabilidade. Para calcular a medida de uma grandeza no espaço, eles geram uma combinação linear dos valores amostrados baseando-se apenas na geometria da distribuição espacial dos dados amostrados (SOARES, 2000).

Há poucas referências a estudos comparativos entre metodologias de interpolação espacial. Porém, Mello et al., (2003) e Aguilar et al., (2001), colocam que autores já fizeram abordagens gerais dos métodos de interpolação em diversas áreas de pesquisa como ciência do solo, ecologia, meteorologia, hidrologia, engenharia florestal.

### 3.2.3.2. Tipos de interpoladores para geração dos MDE

Os interpoladores existentes para o cálculo do MDE são muitos, porém alguns são mais utilizados devido a sua facilidade de compreensão, utilização e/ou pela existência da automação por aplicativos computacionais especializados. Entre os mais comuns pode-se citar:



## A) Inverso do Quadrado da Distância (IQD ou IDW):

Este foi seguramente, o primeiro método analítico para estimativa de valores de variáveis de interesse em pontos não amostrados.

Pode ser classificado tanto como um interpolador exato como suavizante. Faz com que os pesos dos dados sejam avaliados durante o processo de interpolação, tal que a influência de cada ponto é inversamente proporcional á distância do nó da malha (PODOBNIKAR, 2010). O modelo baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores. Dessa forma atribui maior peso para as observações mais próximas do que para as mais distantes.

Uma característica negativa deste método é a geração de efeito mira, ou 'bull's eye' em Inglês, ao redor dos pontos observados. Este é um método rápido e requer pouco custo computacional. Pode ser obtido pelas equações 01 e 02 a seguir:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (\text{Sem parâmetro de suavização}) \quad (01)$$

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{(h_{ij} + \delta)^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(h_{ij} + \delta)^\beta}} \quad (\text{Com parâmetro de suavização}) \quad (02)$$

Onde:

- Z: Medida da interpolação;
- $z_i$ : Vizinho do ponto a ser interpolado;
- $h_{ij}$ : Medida de distância;
- $\beta$ : Fator de ponderação;
- $\delta$ : Parâmetro de suavização.

## **B) krigagem, krigeagem ou Kriging:**

Este não é um simples método de interpolação estocástico, pois utiliza geoestatística para efetuar a interpolação, o que em muitos casos é uma grande vantagem sobre outros métodos. A krigagem define o grau de dependência ou correlação espacial entre as amostras por meio do semivariograma (CRESSIE, 1991) que é definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre pares de uma variável no espaço. Uma vez modelado o semivariograma, é possível verificar o nível de anisotropia dos dados, e então definir os melhores pesos para as amostras.

Ladim (2003), afirma que a Krigagem é entendida como um estimador que se baseia numa série de técnicas de análise de regressão, sejam essas lineares ou não. Este método procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio levando em consideração a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço.

A Krigagem pode ser um interpolador tanto exato como suavizador. Este método tenta expressar tendências sugeridas pelos dados, como por exemplo, pontos de elevada altitude ao longo de uma cadeia montanhosa podem ser conectados, ao invés de gerar “efeito mira” (MAZZINI; SCHETTINI, 2009).

Segundo Rossi, Dungan e Beck (1994), existem três características que diferem o método de Krigagem para os demais métodos de interpolação, sendo elas: a) pode fornecer uma estimativa maior ou menor que o valor das amostras, sendo as técnicas tradicionais restritas às faixas de variações das amostras; b) usa a distância e a geometria entre as amostras, enquanto os outros métodos usam distâncias euclidianas na avaliação das amostras e; c) leva em conta a minimização da variância do erro esperado, por meio de um modelo empírico da continuidade espacial existente ou do grau de dependência espacial com a distância ou direção, expresso pelo semivariograma.

A semi-variância é a medida do grau de dependência espacial entre duas amostras. A magnitude da semivariância entre dois pontos depende da distância entre eles, implicando em semi-variâncias menores para distâncias menores e semi-variâncias maiores para distâncias maiores. A partir de uma certa distância a semi-variância não mais aumentará com a distância e se

estabilizará num valor igual à *variância média*, dando a esta região o nome de silo (*sill*).

A distância entre o início do semi-variograma e o começo do silo recebe o nome de *range*. Ao extrapolar a curva do semi-variograma para a distância zero, pode-se chegar a um valor não-nulo de semivariância. Este valor recebe o nome de Efeito *nugget* (*Nugget Effect*).

No Método de Krigagem normalmente são usados quatro tipos de variogramas. Neles, são usadas as seguintes variáveis:  $v$ : variância;  $C_0$ : nugget;  $a$ : silo;  $C_0 + c$ : variância assintótica;  $h$ : distância de separação.

O modelo linear não apresenta silo e é muito simples. Sua curva pode ser representada pela seguinte equação:

$$v = C_0 + c * h \quad (03)$$

O modelo esférico é a mais utilizada e possui silo. Sua forma é definida pela equação 04:

$$V = \begin{cases} C_0 + C \left[ 1,5 \left( \frac{h}{a} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{se } h < a \\ C_0 + C, & \text{se } h > a \end{cases} \quad (04)$$

No modelo exponencial a curva do variograma respeita a seguinte equação:

$$v = C_0 + C \left( 1 - e^{-\frac{h}{b}} \right) \quad (05)$$

A forma gaussiana é dada por:

$$V = \begin{cases} C_0 + C \left( 1 - e^{-\frac{h}{b}} \right), & \text{se } h < a \\ C_0 + C & \text{se } h > a \end{cases} \quad (06)$$

### C) Curvatura Mínima ou *Spline*:

O nome deriva de uma ferramenta flexível de desenho técnico, e é um método de interpolação muito aceito e utilizado atualmente. Distinto de outros métodos de interpolações polinomiais, o *Spline* não utiliza apenas um polinômio de grande ordem para interpolação de todo o conjunto de dados, mas sim divide a série de dados em subconjuntos e utiliza polinômios de pequenas ordens para cada subconjunto. A soma ou junção deles é que forma a interpolação sobre todo o domínio (MAZZINI; SCHETTINI, 2009). Muito utilizado em geociências, este método gera curvas mais suaves ao mesmo tempo tentando honrar ao máximo os dados. Entretanto, não é um interpolador exato. Outras vantagens do *Spline* são a boa convergência, aproximações precisas das derivações e boa estabilidade na presença de erros de aproximação (EMERY; THOMPSON, 1997).

Para utilizar esse método calcula-se um valor inicial de  $Z_i$  para cada nó das células a partir dos pontos próximos. Então são efetuados cálculos de derivação repetidamente até que seja alcançada uma diferença (convergência ou tolerância) entre os valores amostrados e os estimados, ou até que um número máximo de interações seja alcançado.

Com esses procedimentos, artefatos indesejáveis são gerados especialmente no interior das células onde o valor inicial de  $Z$  é calculado utilizando a média global dos valores amostrados. Isso ocorre quando não há valores amostrados dentro ou próximos da célula cujo nó deve ser estimado. Além disso, o número insuficiente de interações também poderá gerar tais artefatos.

Obtêm-se as estimativas pelo interpolados *Spline* com a seguinte equação:

$$\nabla^4 Z_E = 0 \quad (07)$$

Com a existência da seguinte condição:

$$\nabla^2 Z_E = 0 \quad (08)$$

Em que,

$\nabla$ : Equação diferencial;

$Z_E$ : Valor estimado para o nó da célula.

O algoritmo calcula a quarta derivada:

$$\frac{\delta^4}{\delta_x} Z_E + \frac{\delta^4}{\delta_y} Z_E = 0 \quad (09)$$

#### D) Triangulação de Delaunay:

Descrito por Felgueiras e Goodchild (1995). Esse método sempre preserva as características topográficas, e utiliza dados de fundamental importância na busca de um maior refinamento do MDE, que são as linhas de máximo (divisores) e linhas de mínimo (hidrografia). Funciona melhor quando os dados estão distribuídos de forma regular ao longo do domínio (MAZZINI; SCHETTINI, 2009). Na Figura 5 pode observar a representação esquemática do modelo.

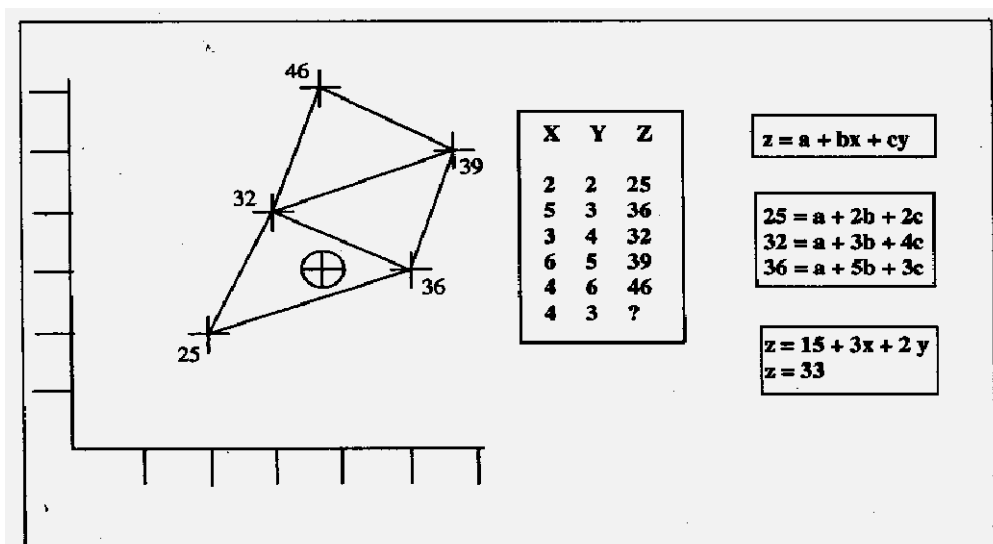


Figura 5 – Triangulação de Delaunay.

## E) Topo to *Raster*:

Esse método de interpolação foi especificamente projetado para criar MDE hidrológicamente consistentes (MDEHC). É uma implementação de um interpolador desenvolvido por Hutchinson (1989) em seu programa ANUDEM (Australian National University), criado para obter uma melhor representação da característica anisotrópica (ou direcional) do relevo. Na sua atualização (HUTCHINSON, 1996), o algoritmo do conceito “localmente adaptado” (*locally adaptive*) modela o terreno iterativamente com resoluções consecutivas crescentes, até chegar na sua resolução final. O *Topo to Raster* permite imposição das linhas de drenagem que garante a integridade do declive do terreno na direção do escoamento superficial. Por meio da definição de tolerâncias horizontais e verticais podem ser removidos pixels que interrompem o fluxo ao longo da rede de drenagem digitalizada ou que são identificadas como depressões fechadas. Esse programa estima uma *grid* (grade) regular de uma superfície plana discretizada por meio de um grande número de dados de elevação irregularmente espaçados, dados de linhas de contorno e dados de linha de fluxo. Essas características permitem que mesmo utilizando uma grade regular retangular, o TopoGrid/Topo to *Raster* possui a opção de utilizar a drenagem e outros corpos d’água, suavizando e aumentando sensivelmente a precisão dos modelos gerados.

Esse método usa uma técnica de interpolação de diferença finita, aperfeiçoada para ter a eficácia de um método de interpolação global, como o inverso do quadrado da distância (IQD), sem perder a continuidade da superfície dos métodos de interpolação globais, como *Spline* e Krigagem (ESRI, 2010).

Segundo Hutchinson (2008) cada valor de elevação  $z_i$  na posição  $x_i$  e  $y_i$  é assumido como sendo dada por:

$$z_i = f(x_i, y_i) + \varepsilon_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (10)$$

Em que:

$f$ : Função bivariada suave do local horizontal representado como uma grade de diferenças finitas;

$n$ : Número de pontos de dados;

$\varepsilon$ : Erro de termo de média zero com desvio padrão  $w_i$ .

Considerando que cada ponto de dados é localizada de forma aleatória dentro da célula da grade correspondente, o desvio-padrão do erro de discretização é dada por:

$$w_i = hs / \sqrt{12} \quad (11)$$

Em que:

$h$ : Espaçamento da grade dados;

$s$ : Inclinação da célula da grade associado ao  $i$ -ésimo ponto de dados.

A função  $f$  é então estimada através da resolução da aproximação da diferença finita de grade regular para a função  $f$  bivariada que minimiza:

$$\sum_{i=1}^n [(z_i - f(x_i, y_i) / w_i)]^2 + \lambda J(f) \quad (12)$$

Em que,

$J(f)$ : Medida da rugosidade da função  $f$  em termos de primeira e segunda derivada;

$\lambda$ : Normalmente escolhido de modo que a soma ponderada dos quadrados dos resíduos na equação 12 é igual a  $n$ .

A execução do algoritmo de drenagem prossegue simultaneamente com o algoritmo de interpolação. Logo após a primeira interpolação mais grosseira, a grade é inspecionada periodicamente para as depressões espúrias e seus pontos de acompanhamento.

### 3.2.4. Validação e controle de qualidade dos modelos

A análise da precisão do MDE gerado a partir de diferentes algoritmos de interpolação, segundo Cuartero et al., (2001) citados por Pires et al., (2005), pode ser realizada por simples reconhecimento visual, por validações cruzadas baseadas em relações de vizinhança, por superposição de curvas de nível ou por comparação estatística com pontos de controle.

De acordo com Santos et al., (2008), essa comparação estatística com pontos de controle refere-se à análise estatística das discrepâncias entre as altitudes de referência, ou seja, dos pontos coletados em campo, e as obtidas no modelo analisado. Essas análises estatísticas incluem o cálculo da variância ( $\hat{\sigma}^2$ ), do desvio padrão ( $\hat{\sigma}$ ), podendo ainda ser calculado o total escalar residual (TER), a média escalar dos erros (MEE) e o índice residual normalizado (IRN).

Diversos trabalhos utilizam diferentes índices estatísticos, dificultando a comparação entre performances obtidas. Entre os índices estatísticos mais utilizados para avaliação de performance de modelos estão: o coeficiente de correlação calculado ( $r$ ), o índice de concordância ( $d$ ), o índice de confiança calculado ( $c$ ), o coeficiente de eficiência ( $E$ ), o erro médio absoluto (EMA), o erro quadrático médio (EMQ), a raiz do erro quadrático médio (REMQ) e o erro médio percentual (EMP) (CECÍLIO, 2005; 2009).

Além disso, a eficiência da extração das informações hidrológicas, medida em termos de precisão e de exatidão, está diretamente relacionada com a qualidade do modelo digital de elevação e do algoritmo de interpolação utilizado. O MDE deve representar o relevo de forma fidedigna e assegurar a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada, garantindo, assim, a sua consistência hidrológica (BAENA, 2002; MOREIRA, 2006).

### 3.3. CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DE INTERESSE HIDROLÓGICO

As características fisiográficas ou físicas do relevo, da rede de drenagem e das bacias hidrográficas têm sido desde a metade do século XX, a partir dos trabalhos de Horton (1945), Strahler (1957; 1958), largamente



utilizadas em estudos geomorfológicos e de hidrologia superficial (CHAVES, 2002).

As características fisiográficas ou morfométricas de uma bacia hidrográfica são todos aqueles dados de sua superfície que podem ser extraídos de forma direta ou indireta (por meio de índices) de mapas e produtos do sensoriamento remoto (CHAVES, 2002; TUCCI, 2001). Logo, produtos de baixa qualidade irão gerar análises inapropriadas e não condizentes com a realidade. Daí a importância de se gerar modelos que representem a superfície o mais próximos da realidade.

Para entender o funcionamento de uma bacia hidrográfica, torna-se necessário expressar quantitativamente importantes parâmetros fisiográficos (área, fator de forma, coeficiente de compactidade, altitude média, densidade de drenagem, número de canais, direção e comprimento do escoamento superficial, comprimento da bacia, comprimento dos canais, padrão de drenagem, orientação, sinuosidade do curso d'água, dentre outros). Cabe ressaltar, pois, que nenhum destes parâmetros fisiográficos deve ser entendido como capaz de simplificar a complexidade dinâmica da bacia hidrográfica, a qual, inclusive, tem magnitude temporal.

Assim, as características fisiográficas de interesse no estudo das bacias hidrográficas encontram-se detalhadas a seguir:

#### **A) Área de Drenagem (A):**

A área de drenagem de uma bacia hidrográfica é a área plana, em projeção horizontal, sendo o limite superior de uma bacia hidrográfica o divisor de água (divisor topográfico) e a delimitação inferior a saída da bacia (confluência). A área de uma bacia é o elemento básico para cálculo das outras características fisiográficas. Assim, após determinado o perímetro da bacia, a área pode ser calculada por meio de técnicas como o uso de aplicativos computacionais especializados (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A área de uma bacia normalmente é representada pela letra "A", que é expressa em km<sup>2</sup> ou ha. Este parâmetro é considerado fundamental para definir a potencialidade hídrica da bacia hidrográfica, por que seu valor

multiplicado pela lâmina da chuva precipitada define o volume de água recebido pela bacia (TUCCI, 2000).

## **B) Definição da Forma da Bacia:**

A forma superficial de uma bacia hidrográfica reveste-se de importância devido a sua interrelação com a variável tempo de concentração. Esta variável é definida como o tempo que leva a água dos limites da bacia para chegar à saída da mesma.

Cabe destacar que existem vários índices utilizados para determinar a forma das bacias. Dentre eles, o coeficiente de compacidade que se relaciona com um círculo e o fator de forma com um retângulo. “Esses índices são importantes no estudo comparativo das bacias e permitem, em alguns casos, tirar algumas conclusões sobre as vazões” (GARCEZ; ALVAREZ, 1998).

### **B.1) Coeficiente de Compacidade ou Índice de Compacidade (Kc):**

A relação do perímetro de uma bacia hidrográfica e a circunferência do círculo de área igual a da respectiva bacia constitui o Índice de Compacidade. Este coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da bacia, independente de seu tamanho, quanto mais irregular for a bacia, maior será o coeficiente de compacidade. Um coeficiente mínimo igual a unidade corresponderia a uma bacia circular (MOSCA, 2003). Assim, uma bacia circular que apresentar valor de coeficiente de compacidade mais próximo da unidade, terá maior tendência para ocorrência de enchentes (GARCEZ; ALVAREZ, 1998).

Esse índice pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$Kc = 0,2821 * P/A^{0,5} \tag{13}$$

Onde:

Kc: Índice de Compacidade;

P: Perímetro da Bacia;

A: Área da Bacia.

## B.2) Fator de Forma ou Índice de Conformação (Kf):

É o índice que reflete a relação entre a área de uma bacia hidrográfica e o quadrado de seu comprimento axial, medido ao longo do curso de água, da desembocadura ou seção de referência à cabeceira mais distante, no divisor de águas (HORTON, 1932). No Fator de Forma, quanto maior o seu valor, maior a potencialidade de ocorrência de picos de enchentes elevados (GARCEZ; ALVAREZ, 1998). Uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita à enchentes que outra de mesmo tamanho, porém, com maior fator de forma (Figura 6). Isso se deve ao fato de que numa bacia estreita e longa, com fator de forma baixo, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda sua extensão; e também, a contribuição dos tributários atinge o curso d'água principal em vários pontos ao longo do mesmo, afastando-se, portanto, da condição ideal da bacia circular, na qual a concentração de todo o deflúvio da bacia se dá num só ponto.

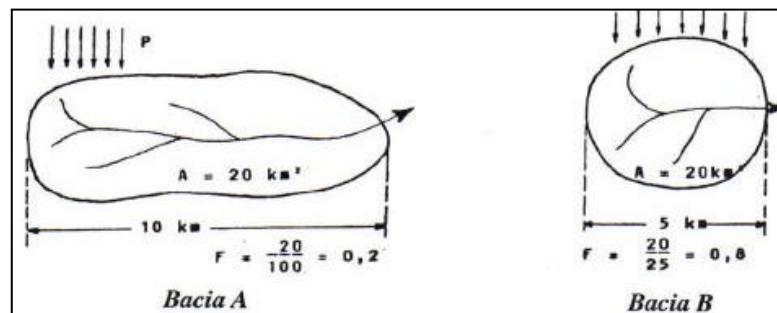


Figura 6 - Ilustração da determinação do fator de forma para duas bacias de mesma área. Fonte: Lima, (1976).

Para obter esse índice faz-se uso da seguinte equação:

$$Kf = A/E^2 \quad (14)$$

Em que,

Kf: Fator de Forma;

A: Área da bacia;

E: Maior Eixo da Bacia.

### C) Sistema de Drenagem da Bacia:

O sistema de drenagem de uma bacia é constituído pelo rio principal e seus tributários. O estudo das ramificações e do desenvolvimento do sistema é importante, pois indica a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica.

#### C.1) Ordem dos Cursos de Água:

A ordem dos rios é uma classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação de uma bacia hidrográfica. Representa-se por meio de um mapa bem detalhado, no qual são incluídos todos os canais, quer sejam perenes, intermitentes ou efêmeros.

No método de ordenamento de Sthraler (1957), os canais primários (nascentes) são designados de 1ª ordem. A junção de dois canais primários forma um de 2ª ordem, e assim sucessivamente. A junção de um canal de uma dada ordem a um canal de ordem superior não altera a ordem deste. A ordem do canal à saída da bacia é também a ordem da bacia, como demonstrado na Figura 7.

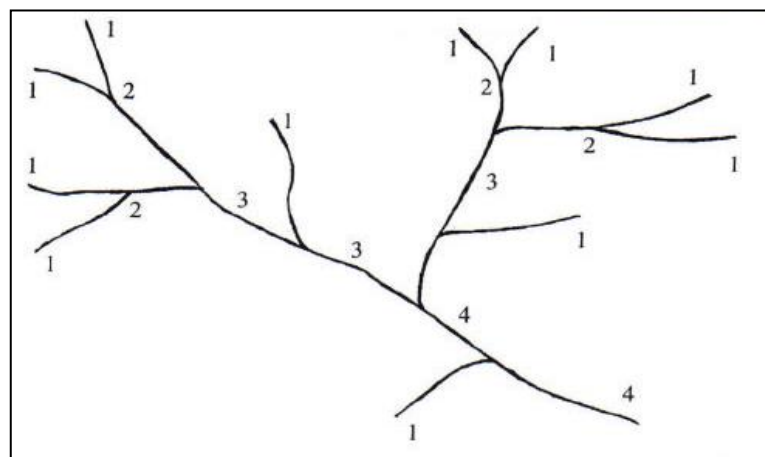


Figura 7 - Ilustração do método de ordenação dos canais de Sthraler (1957).

### C.2) Orientação da bacia:

De acordo com Resck (1992), as direções dos cursos d'água de uma rede definem a orientação de drenagem da bacia. Um padrão de drenagem pode apresentar uma ou mais direções, ou não apresentar nenhuma. A orientação da bacia define a direção geral para qual a declividade está exposta. Assim, uma bacia de orientação sul drena para Sul.

O fator orientação afeta as perdas por evapotranspiração, devido a sua influência sobre a quantidade de radiação solar recebida pela bacia. Esta pode, sem dúvida, afetar as relações entre a precipitação e o deflúvio.

### C.3) Densidade de Drenagem (DD):

A densidade de drenagem correlaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da bacia hidrográfica (HORTON, 1932). O cálculo da densidade de drenagem é importante na análise das bacias hidrográficas porque apresenta relação inversa com o comprimento dos rios. À medida que aumenta o valor numérico da densidade há diminuição quase proporcional do tamanho dos componentes fluviais das bacias de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A DD pode ser obtida pela equação a seguir:

$$DD \text{ (Km/Km}^2\text{)} = L/A \quad (15)$$

Em que,

DD: Densidade de Drenagem;

L: Comprimento da Rede de Drenagem;

A: Área da Bacia.

De acordo com Garcez e Alvarez (1998), se existir um número bastante grande de cursos de água numa bacia, relativamente à sua área, o deflúvio atinge rapidamente os rios, e, assim sendo, haverá provavelmente picos de enchentes altos e deflúvios de estiagem baixos.

A densidade de drenagem depende do clima e das características físicas da bacia hidrográfica. O clima atua tanto diretamente, por meio do regime e da vazão dos cursos d'água, como indiretamente, com influência sobre a vegetação.

Villela e Mattos (1975) classificam as bacias, quanto à densidade de drenagem, de 0,5 km/km<sup>2</sup> para bacias com baixa densidade de drenagem, a 3,5 km/km<sup>2</sup> para bacias com densidade de drenagem muito alta.

#### C.4) Padrão de Drenagem:

Dentro da bacia, a forma da rede de drenagem também apresenta variações (CRISTOFOLETTI, 1974). Em geral, predomina na natureza a forma dendrítica, a qual deriva da interação clima-geologia em regiões de litologia homogênea.

Num certo sentido, considerando-se a fase terrestre do ciclo da água, pode-se dizer que a água procura evadir-se da terra para o mar. Assim fazendo, torna-se organizada em sistemas de drenagem, os quais refletem principalmente a estrutura geológica local. A descrição qualitativa dos diferentes sistemas de drenagem pode ser observada de acordo com os esquemas da Figura 8. Estes chamados padrões de drenagem podem ser observados pelo exame de mapas topográficos de diferentes províncias geológicas (LIMA, 1994).

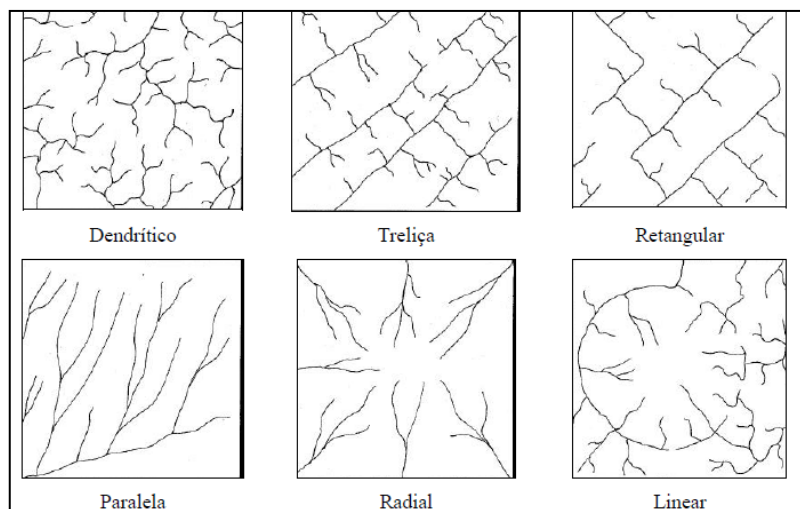


Figura 8 – Classificação dos padrões de drenagem segundo Christofoletti (1974).

### C.5) Extensão do Escoamento Superficial:

Representa a distância percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e o canal permanente, correspondendo a uma das variáveis independentes mais importantes, que afeta tanto o desenvolvimento hidrológico como o fisiográfico das bacias de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1980). Seu cálculo é obtido pela seguinte equação:

$$\text{Eps (Km)} = 1/(2*DD) \quad (16)$$

Em que,

Eps: Extensão do Percurso Superficial;

DD: Densidade de Drenagem.

### D) Amplitude Altimétrica (H):

Segundo Strahler (1952), é a diferença entre o ponto mais baixo da bacia (foz) e o ponto de maior altitude sendo o resultado dado em metros, sendo importante fator relacionado com a temperatura e a precipitação.

### E) Declividade Média (S):

A declividade de uma bacia hidrográfica tem relação importante com vários processos hidrológicos, tais como a infiltração, o escoamento superficial, a umidade do solo, etc. É, além disto, um dos fatores principais que regulam o tempo de duração do escoamento superficial e de concentração da precipitação nos leitos dos cursos d'água.

A diferença entre a elevação máxima e a elevação mínima define a chamada "amplitude altimétrica" da bacia. Dividindo-se a amplitude altimétrica pelo comprimento da bacia obtém-se uma medida do gradiente ou da declividade geral da bacia, que guarda relação com o processo erosivo.

Apesar de a declividade influir na relação entre a precipitação e o deflúvio, principalmente devido ao aumento da velocidade de escoamento superficial, o que reduz, em consequência, a possibilidade de infiltração da

água no solo, não se deve desprezar a influência secundária da direção geral da declividade, ou seja, da orientação da bacia.

Na literatura são observadas classes de declividade, tais como os sugeridos por Ross (1996) e De Biasi (1992). Os ajustes desses intervalos a uma dada região dependerão das características de seu relevo e da escala de trabalho (ZUQUETTE, 1987). Os valores sugeridos pela EMBRAPA (1979) seguem os seguintes intervalos: 0 – 3% (relevo plano); 3 – 8% (relevo suave ondulado); 8 – 20% (relevo ondulado); 20 – 45% (fortemente ondulado); e > 45% (relevo montanhoso).

## **F) cálculo da direção de escoamento e cálculo do fluxo acumulado**

A direção do escoamento superficial é calculada pelo método D8 (determinístico de oito células vizinhas), que considera apenas uma das oito direções possíveis de escoamento para cada uma das células do modelo digital de elevação – Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste. Cada opção está associada a uma codificação numérica específica em um novo arquivo *raster* digital de mesma resolução espacial (Chaves, 2002), como pode-se observar na Figura 9.

Por esse método, a escolha do único caminho possível de deslocamento da água em cada uma das células do MDE é dada pela direção do maior declive.

Com esse arquivo de direção de escoamento estabelece-se, na ausência de depressões naturais ou espúrias, a conectividade entre cada uma das células, de forma a permitir, em conjunto com o arquivo de fluxo acumulado, a extração da drenagem numérica. A Figura 10 mostra a extração da drenagem a partir de um MDE *raster* hipotético.

Para determinação da drenagem numérica utiliza-se um limiar referente a área acumulada máxima da hidrografia. Esse limiar irá influenciar o grau de densidade da drenagem numérica. O valor recomendado é de 1% da área acumulada máxima. Contudo, qualquer outro valor de limiar pode ser selecionado. Um valor menor de limiar irá resultar em uma rede de drenagem mais densa. (FAN et al., 2010).



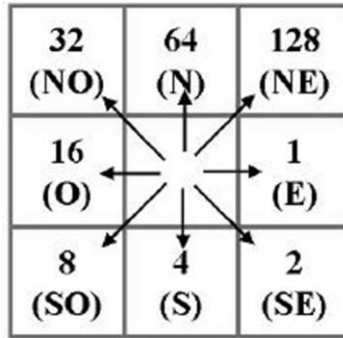


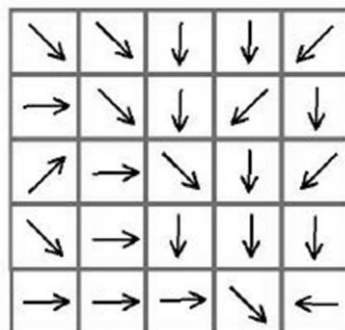
Figura 9 – Possíveis direções de escoamento, codificadas em um sistema de base 2, para cada uma das células do MDE. Fonte: Chaves (2002).

67	56	49	46	50
53	44	37	38	48
58	55	22	31	24
61	47	21	16	19
53	34	12	11	12

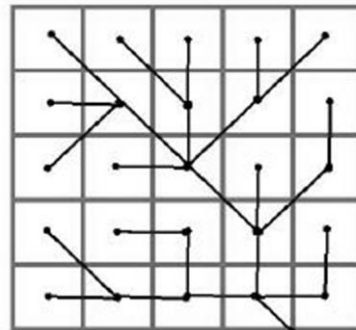
MDE raster

2	2	4	4	8
1	2	4	8	4
128	1	2	4	8
2	1	4	4	4
1	1	1	2	16

Codificação das direções de escoamento



Direção do escoamento



Drenagem numérica com limiar 0

Figura 10 – Processo de extração da drenagem numérica. Fonte: Chaves (2002).

O fluxo acumulado, expresso em termos de número de células do MDE, é uma medida da área de drenagem de cada ponto da superfície do MDE. O valor do fluxo acumulado torna-se maior ao longo de cada célula do caminho do escoamento preferencial, conforme ilustrado na Figura 11.

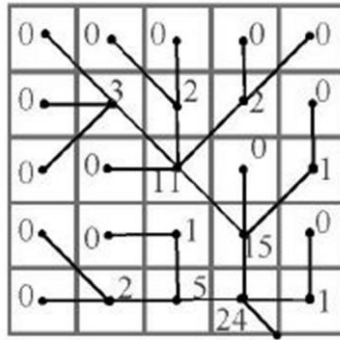


Figura 11 – Arquivo *raster* de fluxo acumulado. Fonte: Chaves (2002).

Quando se deseja extrair a rede de drenagem de grandes áreas com canais bem definidos, o uso de um algoritmo de uma única direção parece ser mais apropriado (MARTZ; GARBRECHT, 1992; CHAVES, 2002). Ainda segundo esses autores, a maior dificuldade do uso das técnicas que se baseiam no método D8 para o mapeamento da rede de drenagem e a delimitação de bacias hidrográficas é a existência de depressões nos modelos digitais de elevação (MDE). Para solucionar essa questão é usual a identificação e, ou, remoção dessas depressões e áreas planas dos MDEs antes de dar continuidade às etapas seguintes de processamento. A ausência desse procedimento pode alterar significativamente a direção do escoamento superficial (GisHidro, 2000).

Depressões são células cercadas por células com maiores valores de elevação. Sua presença em um MDE produz a descontinuidade do escoamento superficial descendente para uma célula vizinha (Figura 12). A maioria delas é considerada espúria, decorrentes do próprio processo de geração do MDE (amostragem e interpolação) e da truncagem dos valores interpolados para números inteiros na saída do modelo. Em geral, quanto maior a resolução do MDE maior é a possibilidade de ocorrência de depressões espúrias e áreas planas.

Essas depressões espúrias devem ser removidas dos MDE por procedimentos e comandos computacionais que irão realizar a identificação e preenchimento das mesmas.

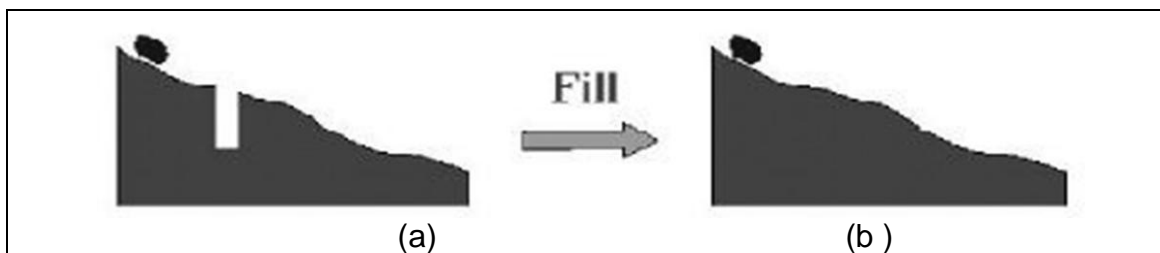


Figura 12 – Vista transversal de: a) uma depressão espúria de um MDE e b) depressão espúria preenchida. Fonte: GisHidro (2000).

No Quadro 1 pode-se observar os parâmetros fisiográficos de interesse para os estudos hidrológicos, seus métodos de obtenção (fórmulas) e a unidades de medida.

Quadro 1 – Parâmetros fisiográficos de interesse em estudos hidrológicos. Fonte: adaptado de Wang e Yin (1997), citado por Chaves (2002).

Tipo	Variável	Símbolo	Unidade
Parâmetros de elevação	Elevação da bacia; mínima, máxima e média	$E_{\min.}, E_{\max.}, e E_{\text{mean}}$	(metro)
	Amplitude do relevo da bacia	$H = (E_{\max.} - E_{\min.})$	(metro)
Parâmetros da rede de drenagem	Comprimento total da drenagem	L	
	Comprimento da drenagem principal e da bacia hidrográfica	$L_d; P$	
	Somatório do comprimento da drenagem de primeira ordem	$F_1$	
	Ordenamento	-	-
Parâmetros de declividade ou gradiente	Declividade da bacia: média ou máxima	$S_{\text{mean}} e S_{\text{max.}}$	(%)
	Gradiente do canal = Drenagem de primeira ordem: média e máximo	$G_{\text{MEAN}_1} e G_{\text{max}_1}$	(%)
	Gradiente do canal – drenagem de outras ordens: média e máximo	$G_{\text{MEAN}_{>1}} e G_{\text{max}_{>1}}$	(%)
	Declividade média fora dos canais	$SO_{\text{mean}}$	(%)
Forma da bacia hidrográfica	Coefficiente de compacidade	$K_c = 0,28 * P/A^{0,5}$	-
	Fator de forma	$K_f = A/L^2$	-
Outros	Área de drenagem	A	(m <sup>2</sup> )
	Densidade de drenagem	$D = L/A$	(m/m <sup>2</sup> )
	Razão de relevo	$R_h = H/L_m$	-
	Índice de rugosidade	$R_n = D * H$	-

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, afluente do rio Itapemirim, distrito de Rive, município de Alegre, Estado do Espírito Santo (Figura 13), entre as coordenadas de Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) 41°24'55" e 41°31'50" de longitude Oeste e 20° 44'39 e 20°54'30" de latitude Sul, DATUM – SIRGAS 2000, Fuso 24K.

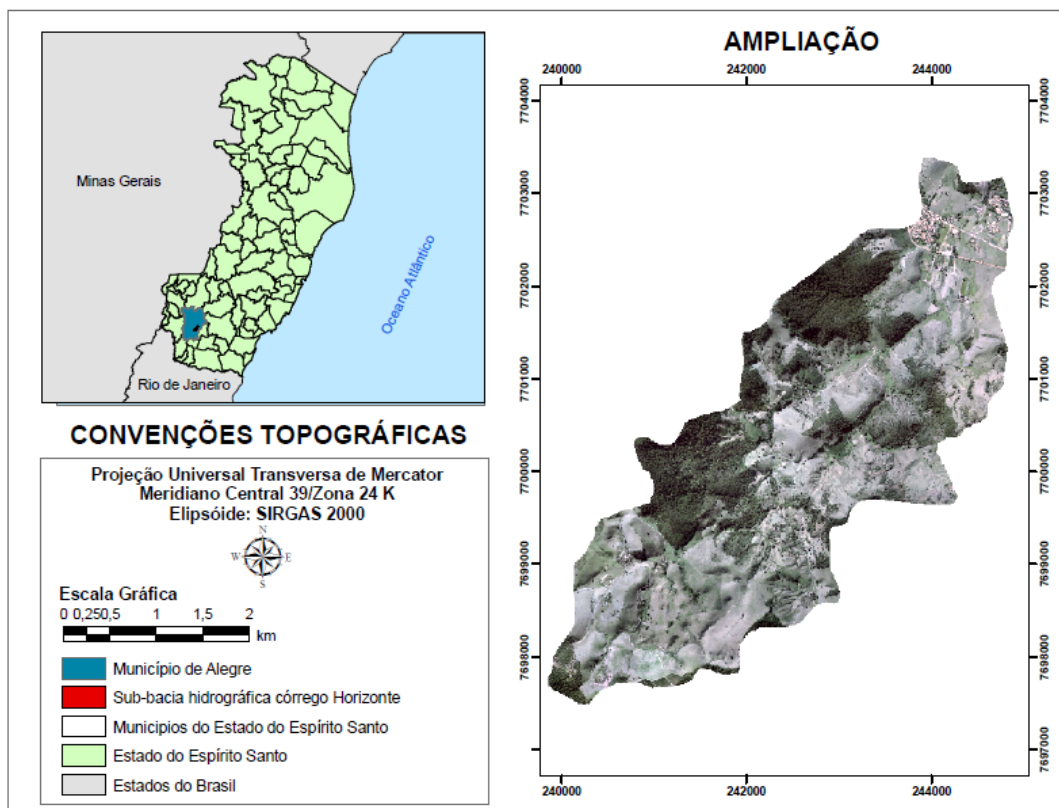


Figura 13 – Localização da área de pesquisa.

A sub-bacia do córrego Horizonte em sua maior porção envolve propriedades rurais, parte da fazenda do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes) - *Campus* de Alegre, parte da zona urbana do distrito de Rive, pertencente ao município de Alegre-ES; possuindo área total de 13,17 km<sup>2</sup>, equivalente a 1316,61 hectares e 20 km de perímetro.

#### 4.1.1. Caracterização da Vegetação, Relevo, Clima e Solo

Segundo o IBGE (2010), a região localiza-se na área de domínio do Bioma de Mata Atlântica, apresentando alguns fragmentos representativos; em especial os situados na área do Ifes - *Campus de Alegre*, bem como outros localizados nas cabeceiras dos morros. De forma geral, apresenta predomínio de pastagens, agricultura de subsistência e café. Possuindo uma malha viária de acessos a zona rural de estradas não pavimentadas e pela rodovia BR 482, que liga Itapemirim, ES a Conselheiro Lafaiete, MG.

A altitude varia entre 120 e 680 m, tendo por base as curvas de nível de 20 x 20 m das cartas do IBGE (Figura 14).

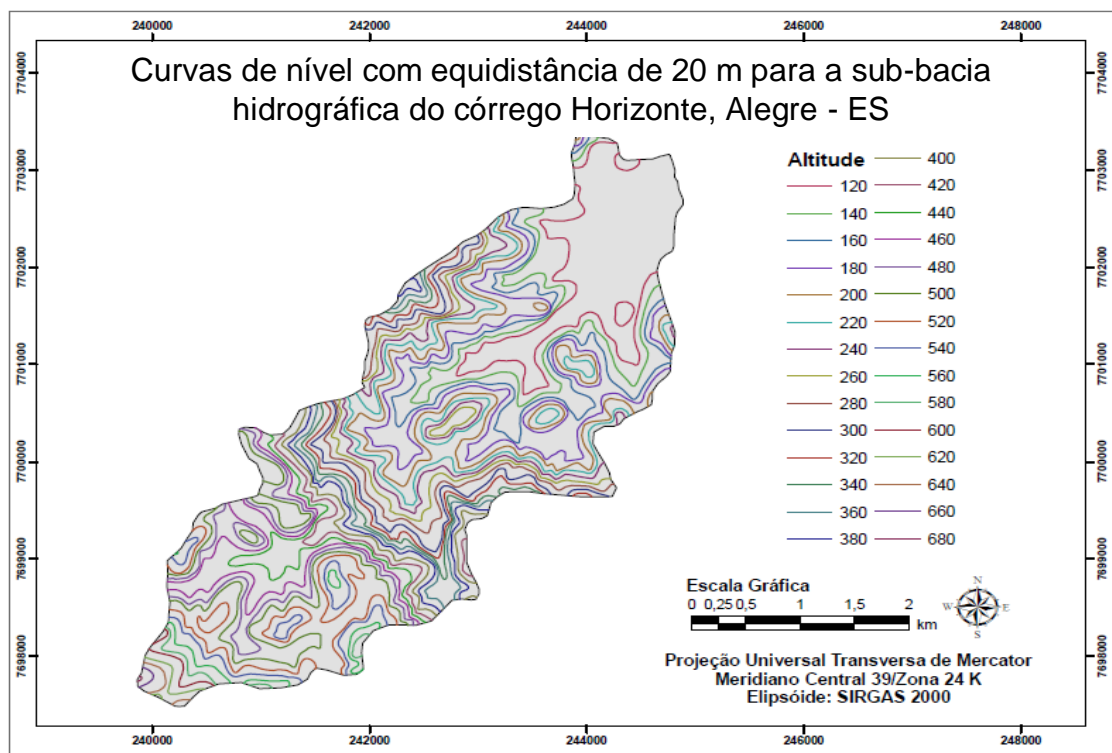


Figura 14 – Variação da altitude na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre-ES.

O relevo da área de estudo é representativo da região, especialmente dos que se encontram na microrregião de planejamento do Caparaó, Território do Caparaó, abrangendo 11 municípios Espírito Santenses, com um relevo bastante movimentado, a área é constituída por uma paisagem fortemente ondulada e montanhosa. A hidrografia é constituída por uma rede de drenagem

densa e diversificada, formando rios encaixados e algumas cachoeiras. O clima da região enquadra-se no tipo Cwa (inverno seco e verão chuvoso), de acordo com a classificação de Köppen (MENDONÇA, 2007).

A temperatura média anual gira em torno de 24°C. A pluviosidade média anual encontra-se em 1.200 mm, podendo dependendo da localização atingir até 1.600 mm (INMET, 2010). A região apresenta grandes áreas desmatadas, como resultado histórico da ocupação antrópica, agravando os problemas das cheias, diminuindo os tempos de concentração e aumentando os picos das enchentes.

Segundo um mapeamento realizado por Barbosa et al., (1992), na área do atual Ifes - *Campus* de Alegre, a área de estudo apresenta uma gama de diferentes solos observada em função da variabilidade do relevo, com predominância de Latossolos, permitindo uma melhor utilização de algumas áreas para a instalação de práticas agrícolas.

A metodologia utilizada para a geração e validação do MDE foi concebida para ser executada em cinco etapas, conforme descritas por Baena (2002), Chaves (2002) e Pires et al., (2005): amostragem, pré-processamento, geração, pós-processamento e avaliação dos modelos.

## 4.2. AMOSTRAGEM

Para o tratamento dos dados, criação dos MDE e geração de informações fisiográficas de bacias hidrográficas de interesse multidisciplinar utilizaram-se os seguintes aplicativos computacionais: DATA GEOSIS 2005 Junior, SIGMAPLOT 11, MAPGEO 2010, SPRING 5.1.2, IDRISI Andes e ArcGIS/ArcInfo 9.3.

Para o desenvolvimento dos estudos e geração dos MDE foram necessários dados da hidrografia e altimetria da sub-bacia do córrego Horizonte, tendo a hidrografia sido obtida a partir de digitalização da imagem de satélite GEOEYE-1 (0,5 m de resolução espacial) ortorretificada, nos intervalos espectrais do visível (0,45 - 0,69  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho próximo (0,78 - 0,92  $\mu\text{m}$ ), adquirida em novembro de 2009. Para facilitar a digitalização e fotointerpretação da imagem trabalhou-se com as bandas espectrais utilizando-

se da composição RGB e Infravermelho para obter composições colorida normal e falsa-cor.

Os dados de altimetria foram adquiridos de bases cartográficas planialtimétricas em formato digital nas escalas de 1:50.000, com curvas de nível com equidistância vertical de 20 m, das cartas do IBGE e de imagens da missão SRTM<sub>1</sub>, folha SF-24-V-A, sendo constituídos por um *grid* de células com resolução horizontal de 90 m, tendo sido desenvolvido em escala mundial pelo United States Geological Survey (USGS).

Apesar de os dados de altimetria obtidos do Projeto SRTM representarem o relevo da região, esses dados consistem em dados brutos, apresentando falhas advindas do processo de obtenção. Pelo fato de essas falhas comprometerem a obtenção de informações fisiográficas da bacia e a necessidade de se trabalhar com maior resolução, foi necessário reinterpoliar os dados altimétricos. Para tanto, na etapa seguinte, o *grid* de altimetria foi exportado para o formato *shape* (pontos).

Após o processamento dos MDE foi possível realizar uma comparação entre os diversos interpoladores testados e seu comportamento quanto ao relevo da bacia hidrográfica, correlacionando os modelos com dados coletados em campo levantados de forma aleatória na parte inferior (próximo a foz) da sub-bacia em estudo. Parte desses dados foi cedida pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Espírito Santo – *Campus* de Alegre totalizando 446 pontos.

Os dados de campo foram coletados com Estação Total, GPS de navegação (sem correção diferencial) e máquina fotográfica com seus respectivos acessórios (prisma, estaca, trena, etc.).

As coletas de campo foram realizadas seguindo as recomendações da NBR 13.133/1994. Esta operação realizada com Estação Total tomou como referência as coordenadas e Datum do marco geodésico SAT 93726 (ANEXO), que integra a Rede Geodésica do Espírito Santo (RGES/IBGE, 2005) no sistema SIRGAS 2000, uma vez que para dar início aos levantamentos de campo é necessário ter uma base conhecida ou um ponto e uma direção (AZ) para determinação das coordenadas X, Y e Z iniciais.

Conhecida as coordenadas do marco foram feitos os levantamentos com a Estação Total utilizando os procedimentos de levantamentos topográficos por irradiação com mudança de estação.

Dentre os dados medidos em campo, tem-se: as distâncias horizontais, inclinadas e verticais, os ângulos horizontais e verticais que podem ser zenital ( $z'$ ) ou inclinação ( $a$ ), altura do instrumento em cada estação e leituras na mira (Retículos Superiores - RS, Médios - RM e Inferiores - RI).

A sequência e as equações para o levantamento por irradiação é apresentado nas equações 17 e 18 (ERBA et. al., 2005; WOLF e CHILANI, 2006), onde a distância horizontal (DH) foi encontrada de acordo com o ângulo vertical pelas seguintes equações:

$$DH = 100 \times (RS - RI) \times (\text{sen } z')^2 \quad (17)$$

ou,

$$DH = 100 \times (RS - RI) \times (\text{cos } a)^2 \quad (18)$$

Onde:

DH: Distância horizontal (m);

RS: Retículo superior;

RI: Retículo inferior;

$z'$ : Ângulo zenital;

$a$ : Ângulo de inclinação.

Após o cálculo da DH, seguiu-se para o cálculo das coordenadas dos pontos de interesse ( $X$ ;  $Y$ ). Para tanto, considerou-se como conhecida a coordenada onde a estação total esteve estacionada ( $X_0$ ;  $Y_0$ ). Logo as coordenadas de qualquer ponto foram dadas pelas equações 19 e 20:

$$X = X_0 + DH \times \text{sen } Az \quad (19)$$

$$Y = Y_0 + DH \times \text{cos } Az \quad (20)$$

A altitude ou cota ( $Z$ ) foi calculada através da diferença de nível (DN) entre o ponto onde se encontra estacionado o equipamento e o ponto visado, dada pela equação 21:



$$DN = DI \times \cos(z') - RM - AI \quad (21)$$

Onde:

DN: Diferença de Nível

DI: Distância Inclinada

$z'$ : Ângulo Vertical de Zenital

RM: Retículo Médio

AI: Altura do Instrumento

Assim, depois do cálculo da DN obteve-se a cota ou a altitude do ponto desejado por meio da soma da cota ou altitude onde se encontra o equipamento e da diferença de nível encontrada entre os dois pontos analisados.

Os procedimentos metodológicos anteriores podem ser visualizados pelo fluxograma apresentado na Figura 15.

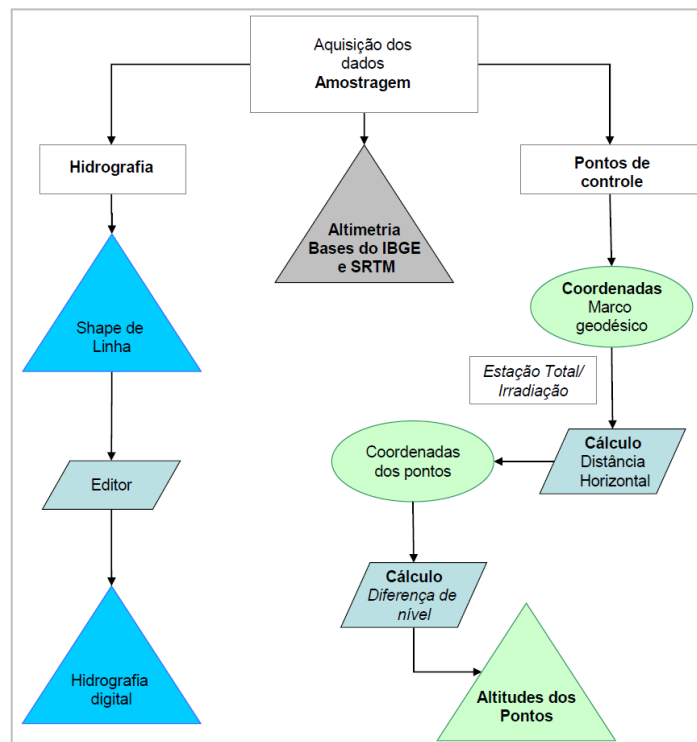


Figura 15 – Amostragem dos dados digitais para elaboração dos Modelos Digitais de Elevação na sub-bacia hidrográfica do Horizonte, Alegre – ES.

#### 4.2.1. Tamanho da Amostra

O tamanho da amostra, segundo Santos et al., (2008), é importante para a adequada análise estatística de exatidão, de precisão e de tendência e, depende da variação na variável aleatória e do grau de acurácia desejado.

O cálculo do tamanho da amostra ( $n$ ) foi realizado através da equação 22 (Zanardi, 2006):

$$n = \frac{(Z \sigma)^2 N}{\epsilon^2 (N-1) + (Z \sigma)^2} \quad (22)$$

Onde:

Z: Intervalo de confiança,

$\sigma$ : Desvio padrão,

N: Tamanho da população,

$\epsilon$ : Erro amostral.

Os valores do intervalo de confiança e do erro amostral são atribuídos em função da precisão da estimativa, da finalidade da pesquisa, do custo econômico e do tempo disponível. Sendo assim, foi utilizado 95% como intervalo de confiança e um erro amostral máximo de 6 metros de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) definido pelo Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984 (Brasil, 1984).

#### 4.3. PRÉ-PROCESSAMENTO

Os dados digitais foram avaliados quanto à sua consistência (área de cobertura, coordenadas, sistema de projeção, conectividade das feições de linhas, coerência dos valores de elevação), e editados, quando necessário. Posteriormente, realizou-se a preparação dos planos de informação por meio da transformação das projeções cartográficas e Datums originais das imagens e das bases para a projeção cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM) e o Datum Horizontal SIRGAS 2000, procurando cumprir o Decreto N° 5334/2005 e Resolução N° 1/2005 do IBGE que estabelecem o SIRGAS 2000

como o novo Sistema de Referência Geocêntrico para o Brasil; e, recorte desses planos de informação de modo a contemplar apenas a área de interesse.

A etapa seguinte consistiu na preparação individual dos dados digitais de altimetria e hidrografia para serem utilizados pelos diversos interpoladores.

A representação espacial da rede hidrográfica foi simplificada e orientada na direção de escoamento. Posteriormente, desenvolveram-se procedimentos para permitir a validação visual dos resultados, de modo a assegurar a convergência de todos os arcos para a seção de deságüe.

Em relação à altimetria, como alguns interpoladores não aceitam outro tipo de informação que não pontos, as isolinhas, então, foram transformadas em pontos de vértice, totalizando 4.500 pontos de altitude.

A fim de realizar uma avaliação do comportamento dos diferentes interpoladores, apenas com os dados de entrada, realizou-se uma amostragem dos pontos obtidos por meio das curvas de nível. Essa amostragem, seguindo as especificações da NBR 13.133/1994, contou com 1% desses pontos, ou seja, 45 pontos (chamados de pontos de teste) os quais foram subtraídos antes de realizar a interpolação com os pontos restantes (chamados de pontos de treino).

Essas divisões foram realizadas por meio da ferramenta de análise geoestatística do *software* ArcGis/ArcInfo 9.3 com o intuito de criar um modelo com os dados de treino e por meio de validação descobrir o quanto bom a predição está para os dados conhecidos que compõem os dados de teste.

Posteriormente, na etapa de validação foi realizada a comparação entre os modelos gerados (com os dados de treino) e os dados coletados em campo (dados reais).

No caso da validação com os pontos de teste, estes atuaram como valores reais (de referência) sabendo-se, então, o comportamento do modelo na predição dos valores correspondentes aos pontos de teste, uma vez que foram conhecidas as localizações X, Y e as variáveis Z (altitude).

O interpolador *Topo to Raster* requer, para a utilização de toda a sua potencialidade, a geração de arquivos individuais contendo os limites da área de trabalho, os pontos de identificação dos sumidouros naturais da drenagem, a hidrografia digital conectada, simplificada e orientada no sentido do

escoamento superficial (já realizado nesta etapa), o contorno dos lagos e os dados de altimetria em curvas de nível e pontos cotados (HUTCHINSON, 1989; CHAVES, 2002; PIRES et al., 2005; MOREIRA, 2006).

Dessa forma, os procedimentos adotados nessa etapa visaram à preparação dos arquivos digitais da hidrografia e da altimetria, que na estrutura do *software* ArcGis/ArcInfo 9.3 são denominados *coverages*. Para isso, foram realizadas operações manuais e automáticas, sendo estas últimas executadas com a utilização de rotinas implementadas no módulo *Spatial Analyst* do ArcGis.

Para finalizar esta etapa, os pontos cotados, as isolinhas e a rede hidrográfica foram visualmente analisadas de forma integrada, com o auxílio da imagem de satélite da bacia hidrográfica, de forma a verificar a existência de erros grosseiros da representação da drenagem ou a incoerência de valores altimétricos.

Para os dados SRTM foi necessário converter a imagem *raster* para o formato *shape* de pontos para realização das interpolações pelos diferentes métodos utilizados no estudo. Somente após as interpolações foram realizados os cortes do modelo para a área de trabalho.

As etapas do pré-processamento podem ser visualizadas no fluxograma descrito pela Figura 16.

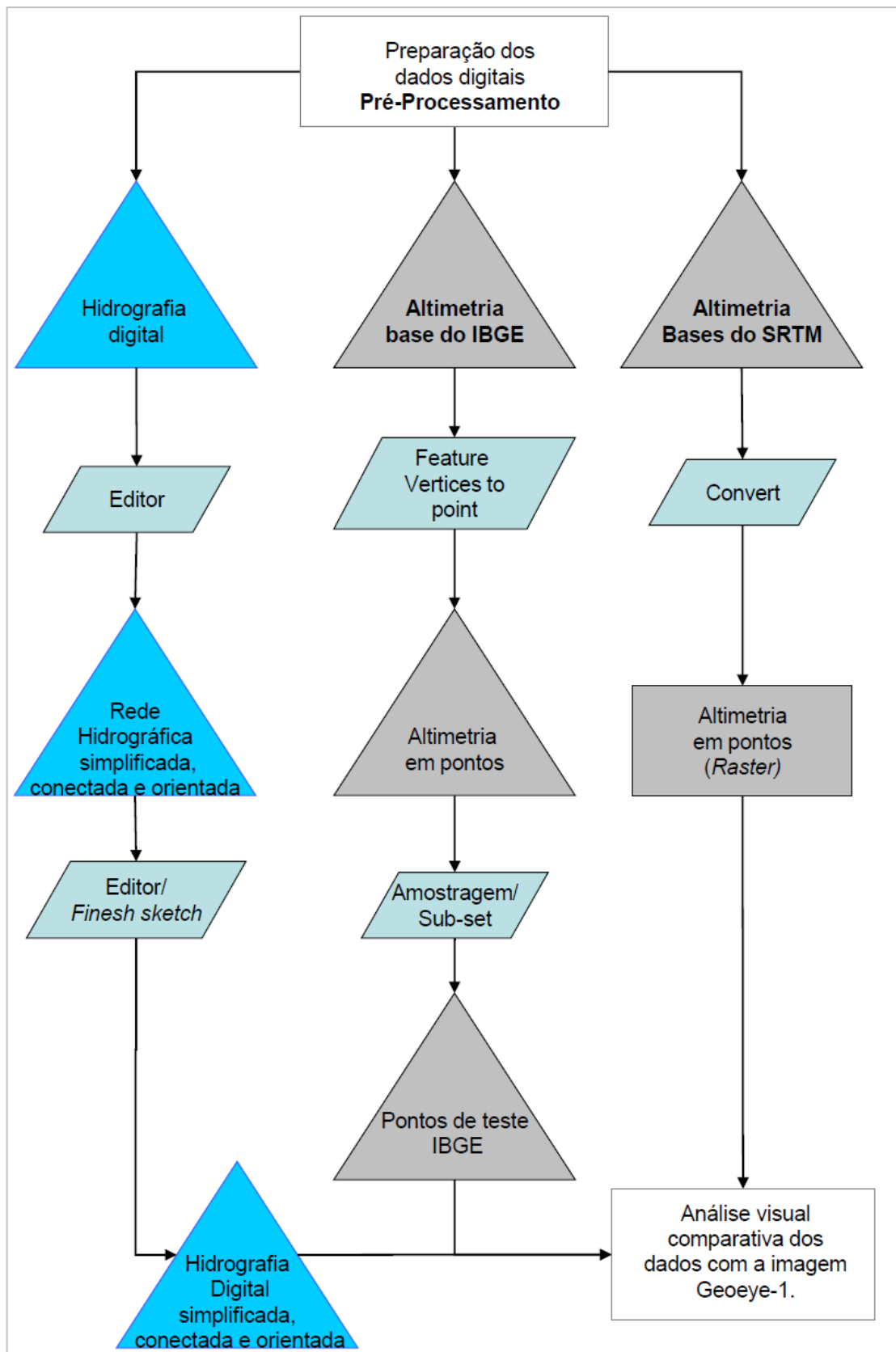


Figura 16 – Etapa de pré-processamento dos dados digitais para elaboração dos Modelos Digitais de Elevação na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES.

#### 4.4. GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

Uma vez verificadas as consistências dos dados da hidrografia e altimetria, procedeu-se à espacialização da altimetria na área em torno da bacia utilizando os interpoladores Inverso do Quadrado da Distância (IQD ou IDW, em inglês para *Inverse distance weighting*), Krigagem ordinária esférica e Krigagem ordinária exponencial, *Spline* Tensionado, Regularizado e com barreira, TIN com e sem barreira e *Topo to Raster* com todos os parâmetros e apenas com os pontos amostrais usados pelos métodos anteriores e o limite da área (Tabela 1), os quais se encontram disponíveis no ArcGis.

Para definir o melhor método para a geração do MDE na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte foram utilizados interpoladores baseados em grades regulares retangulares e irregulares triangulares.

Tabela 1 – Métodos adotados e as respectivas variáveis usadas para interpolação

<b>Interpolador</b>	<b>Método</b>	<b>Base de dados</b>
IDW 1	sem barreira	Pontos altimétricos
Krigagem 1	esférica	Pontos altimétricos
Krigagem 2	exponencial	Pontos altimétricos
<i>Spline</i> 1	tensionado	Pontos altimétricos
<i>Spline</i> 2	regularizado	Pontos altimétricos
<i>Spline</i> B	com barreira	Pontos altimétricos e a hidrografia.
TIN 1	padrão	Curvas de nível
TIN 2	com barreira	Curvas de nível, limite da área e a hidrografia.
<i>Topo to Raster</i> 1	condicionado	Pontos altimétricos e limite da área.
<i>Topo to Raster</i> 2	padrão	Curvas de nível, pontos altimétricos, hidrografia orientada na direção do escoamento e limite da área.

Para que fosse possível a realização da comparação entre os métodos descritos na Tabela 1, utilizou-se o método CONDICIONADO (*Topo to Raster* 1) apenas com as amostras de pontos de altitude usados nos demais métodos e o limite que define a bacia hidrográfica como variáveis para interpolação.

Os dados das imagens SRTM, transformados, foram interpolados com todos os métodos descritos na Tabela 1, com uma resolução espacial de 10 m. Após as interpolações os MDE gerados por meio dos dados SRTM foram recortados para a área da bacia.

Para todos os modelos gerados, entre os principais parâmetros técnicos utilizados a resolução é um dos que garante a qualidade do modelo (GARBRECHT; MARTZ, 2000), sendo, então, considerada para a sua definição a exatidão cartográfica de 0,2 mm. Assim, para determinar a menor dimensão no terreno representada no mapa, ou seja, a resolução espacial das células do MDE, multiplicou-se a exatidão cartográfica pelo fator de escala (1:50.000), que correspondeu a 10 m (MOREIRA, 2006; NASCIMENTO et al., 2006).

Em seguida, operações de pós-processamento foram realizadas com a finalidade de identificar e eliminar a ocorrência de imperfeições (depressões espúrias) nos MDE.

#### 4.5. PÓS-PROCESSAMENTO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

A etapa de pós-processamento visou identificar e eliminar as depressões espúrias remanescentes nos MDE gerados na etapa anterior, garantindo a consistência do escoamento superficial para e ao longo da drenagem numérica.

Sobre os dados SRTM, aplicou-se somente a remoção das depressões espúrias que surgiram após o processo de reinterpolação dos pontos, pois por serem dados brutos, gratuitos e de fácil obtenção são amplamente utilizados. Assim, o intuito foi avaliar a sua qualidade quando comparado com MDE gerados com curvas de nível e corrigidos com técnicas de refinamento e aprofundamento da hidrografia.

Com os demais modelos buscou-se garantir a coincidência espacial da drenagem numérica do modelo com a drenagem vetorial digital (mapeada). Para isso, foram utilizados diversos comandos implementados no *software* ArcGis/ArcInfo 9.3.

A primeira fase dessa etapa consistiu no refinamento do MDE para remoção das depressões espúrias que surgiram após o processo de geração dos mesmos. Em seguida aplicou-se a técnica de *stream burning*, de forma a

garantir a coincidência espacial da drenagem numérica com a drenagem vetorial. Para isso, a drenagem mapeada foi transformada para o formato *raster*, com resolução de 10 m. Posteriormente, promoveu-se um rebaixamento constante de 1.000 m nos valores da altimetria das células que compõem a hidrografia *rasterizada* e a sua incorporação ao MDE, por meio da substituição dos valores originais. Os comandos do módulo *Spatial Analyst* do ArcGis, utilizados para execução dessa etapa, podem ser encontrados em Ribeiro (2003).

A segunda etapa consistiu na eliminação das depressões espúrias que não foram removidas durante a geração do MDE e daquelas introduzidas durante o processo de imposição da drenagem mapeada. Para isso, utilizou-se o comando *FILL* e, em seguida, restauraram-se os valores originais da altimetria ao longo da drenagem aprofundada.

A aplicação isolada da técnica de *stream burning* e as técnicas realizadas na segunda fase do pós-processamento não garantem a caracterização de um talvegue ao longo da hidrografia, ocorrendo em determinados trechos inconsistências, pelo fato de a hidrografia poder estar situada ao longo de encostas. Em geral, tal fato ocorre nos casos em que a drenagem vetorial diverge consideravelmente da drenagem numérica. Isso faz com que a direção de escoamento das células adjacentes ao traçado da hidrografia seja divergente do fluxo natural, o que manteria a inconsistência hidrológica do MDE (CHAVES, 2002).

Para solução desse tipo de problema, utilizou-se, em uma terceira etapa do pós-processamento, a técnica de refinamento de superfície apresentada por Chaves (2002) e Ribeiro (2003), a qual consiste na criação de um talvegue linear entre a margem e a hidrografia. Esse procedimento, ilustrado na Figura 17 garante, na maioria dos casos, a consistência hidrológica do escoamento superficial para a calha do MDE, agora chamado de Modelo Digital Hidrológicamente Consistente (MDEHC).



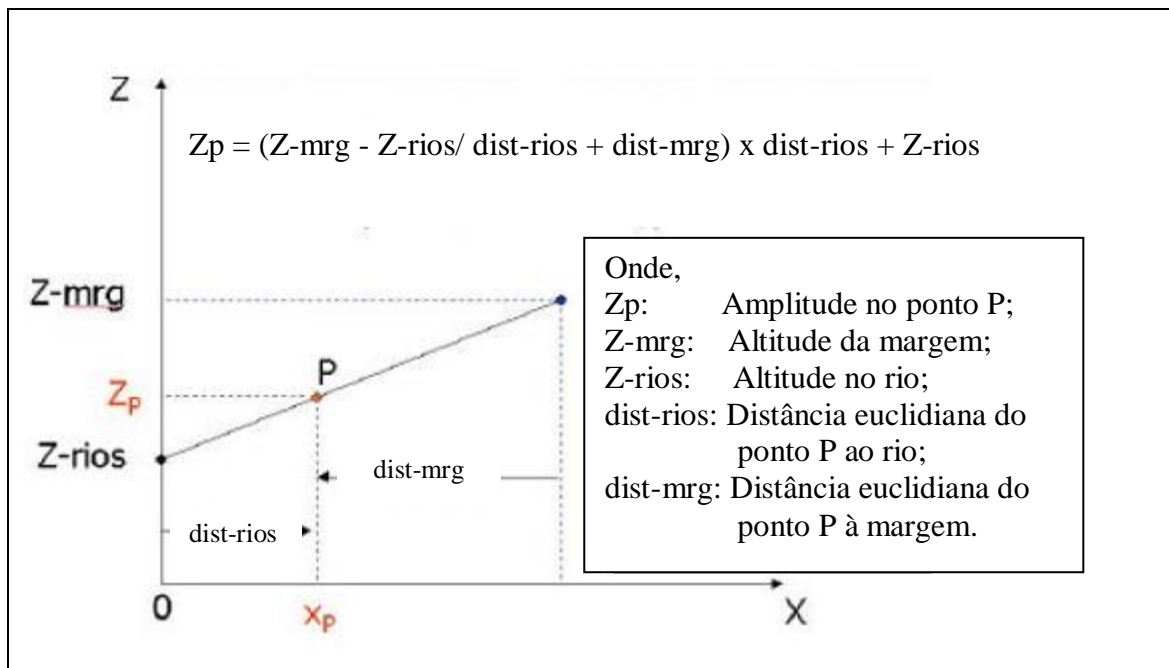


Figura 17 – Processo matemático de criação do TALVEGUE. Fonte: Chaves (2002).

Esses últimos procedimentos introduziram novas depressões espúrias ao longo da drenagem *rasterizada* as quais foram removidas por meio da repetição dos procedimentos de pós-processamento.

Após a eliminação dessas imperfeições, foram obtidas a direção do escoamento superficial e a hidrografia numérica dos MDEHC gerados pelos diferentes métodos de interpolação (Tabela 1). A realização da comparação com a hidrografia mapeada procedeu-se na etapa seguinte de avaliação dos modelos gerados. Na Figura 18, os procedimentos operacionais descritos nessa etapa estão simplificados.

Foram geradas, também, as hidrografias numéricas sobre os MDE do IBGE e do SRTM que passaram apenas pela remoção de depressões espúrias que surgiram após a geração dos modelos, ou seja, sem a aplicação das técnicas de stream burnnig. Isso foi realizado com o intuito de se observar o comportamento dos interpoladores sem forçar um caminho de drenagem.

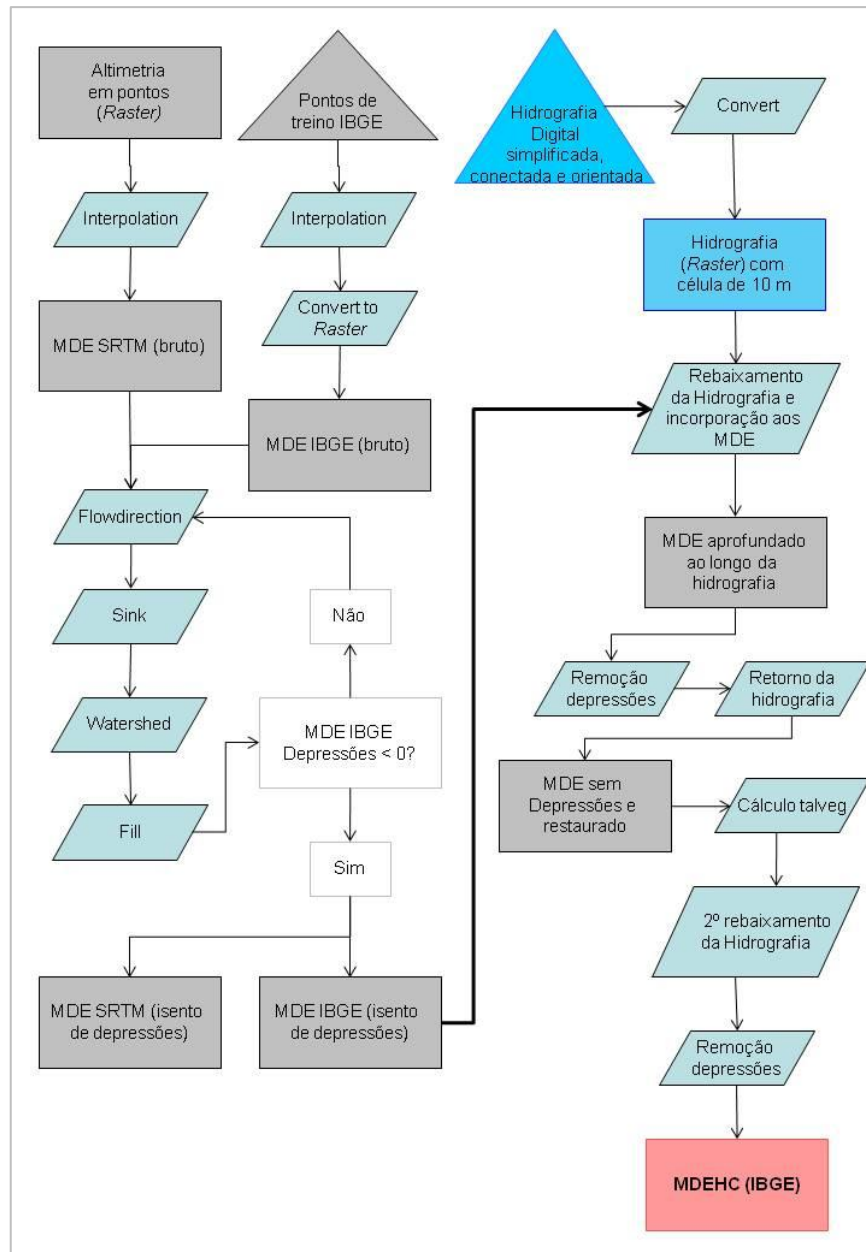


Figura 18 – Esquema metodológico dos procedimentos operacionais.

#### 4.6. VALIDAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

A forma adotada para verificar a exatidão do MDE na descrição do escoamento superficial foi por meio da análise de cruzamento, comparando a hidrografia numérica derivada do MDE com a hidrografia mapeada. A hidrografia numérica foi gerada a partir do fluxo acumulado e um limiar de 1% desse fluxo máximo, segundo metodologia descrita por Fan et al., 2010. A seguir, com a hidrografia mapeada já transformada, em etapas anteriores, no

formato *raster*, efetuou-se uma comparação entre ela e a numérica, para identificar a sobreposição das células.

#### 4.6.1. Controle de qualidade dos modelos

Após o cálculo dos MDE e MDEHC por meio dos diferentes interpoladores foi realizado o controle de qualidade baseado na análise estatística das discrepâncias entre as altitudes de referência ( $x_i^f$ ), e as obtidas no modelo analisado ( $x_i^m$ ) (SANTOS et al., 2008). Essas análises foram aplicadas sobre os modelos gerados com a base de dados do IBGE e do projeto SRTM.

Para as altitudes de referência foram utilizados 100 pontos coletados em campo (quantidade definida pela equação 22) e 45 pontos (pontos de teste) retirados da conversão das curvas de nível de linhas para pontos (quantidade definida pela NBR 13.333/1994).

Com as informações das altitudes estimadas e observadas nos modelos gerados com as diferentes bases de dados construíram-se diagramas de dispersão associados a uma curva de tendência ajustada aos dados e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Essas discrepâncias serviram para o cálculo do Total Escalar Residual (TER), da Média Escalar dos Erros (MEE), da variância e do desvio padrão das discrepâncias e do Índice Residual Normalizado (IRN).

O controle de qualidade foi feito, ainda, por meio de análises estatísticas de exatidão, precisão e tendência do modelo, usando, como referência, as discrepâncias entre as altitudes de referência ( $x_i^f$ ) e as do modelo ( $x_i^m$ ).

Para a obtenção dessa discrepância utilizou-se a equação 23 dada por:

$$\Delta x_i = x_i^f - x_i^m \quad (23)$$

Em que:

$\Delta x_i$ : Discrepâncias entre as altitudes de referência e as obtidas no modelo analisado;

$x_i^f$ : Altitudes de referência;

$x_i^m$ : Altitudes do modelo analisado.

Onde as amostras com  $i=1,2,3...n$  pontos de controle são selecionadas aleatoriamente na área de estudo.

Assim, para os  $n$  pontos de controle calculam-se o TER, a MEE, a variância e o desvio padrão das discrepâncias, respectivamente, pelas equações 24, 25, 26 e 27:

$$TER = \sum_{i=1}^N |\Delta x_i| \quad (24)$$

Em que:

*TER*: Total Escalar Residual;

$\Delta x_i$ : Discrepâncias entre as altitudes de referência e as obtidas no modelo analisado;

*N*: n número de pontos de controle.

$$MEE = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|}{N} \quad (25)$$

Em que:

*MME*: Média Escalar dos Erros;

$\Delta x_i$ : Discrepâncias entre as altitudes de referência e as obtidas no modelo analisado;

*N*: n número de pontos de controle.

$$S^2 = \frac{1}{(N-1)} \times \sum \left( \Delta x_i - \frac{\Delta x_i}{N} \right)^2 \quad (26)$$

Em que:

$S^2$ : Variância;

$\Delta x_i$ : Discrepâncias entre as altitudes de referência e as obtidas no modelo analisado;

*N*: n número de pontos de controle.

$$s = \sqrt{S^2} \quad (27)$$

Em que:

s: Desvio padrão;

S<sup>2</sup>: Variância.

Silva (1999), afirma que para selecionar o melhor método deve-se calcular o Índice Residual Normalizado (IRN) por meio da equação 28, definido pela razão entre a MEE e a média dos valores reais do conjunto de amostras analisadas. Esse autor afirma ainda que o menor IRN calculado indica o melhor método de interpolação para o conjunto dos dados em questão.

$$IRN = \frac{MEE}{X_{reais}} \quad (28)$$

Em que:

IRN: Índice Residual Normalizado;

MME: Média Escalar dos Erros;

X<sub>reais</sub>: Média dos valores reais do conjunto de amostras.

Como diversos trabalhos utilizam diferentes índices estatísticos, dificultando a comparação entre performances obtidas optou-se por calcular alguns dos índices estatísticos atualmente mais utilizados para avaliação de desempenho de modelos além dos citados acima.

Camargo e Sentelhas (1997) propõem que ao correlacionar os valores estimados e observados experimentalmente sejam considerados o coeficiente de correlação (r); o índice de concordância (d), proposto por Willmott (1981) e o índice de confiança (c).

Segundo Camargo e Sentelhas (1997), a precisão do modelo é dada pelo coeficiente de correlação (r) e a exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente essa aproximação é dada pelo índice de concordância (d), calculado pela equação 29. Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^J (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (29)$$

Em que,

$J$ : Número de observações;

$O$ : Valor observado experimentalmente;

$E$ : Valor estimado pelo modelo; e

$\bar{O}$ : Média dos valores observados experimentalmente.

O índice de confiança ( $c$ ) permite analisar conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados obtidos, sendo o produto do coeficiente de correlação ( $r$ ) pelo índice de concordância ( $d$ ). Na Tabela 2 são apresentados os critérios de avaliação do desempenho de modelos quanto ao seu índice de confiança.

Tabela 2 - Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança (CAMARGO; SENTELHAS, 1997)

Valor de $c$	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

O coeficiente de eficiência ( $E$ ) vem sendo utilizado para a avaliação de modelos hidrológicos (WILCOX et al., 1990; RISSE; NEARING; ZHANG, 1995; YU, 1999).

Nash e Sutcliffe (1970) definiram este índice, que varia de  $-\infty$  a 1, com os maiores valores indicando melhor performance, por intermédio da equação 30.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^J (O_i - \bar{O})^2} \quad (30)$$

Todavia, para Legates e McCabe Jr. (1999) o uso dos quadrados das diferenças no cálculo de d e E faz com que estes índices acabem por apresentar valores relativamente altos, mesmo quando as performances dos modelos sejam ruins. Assim, os autores propõem que se use os índices coeficiente de eficiência ajustado (E'), calculados pelas equações 31.

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J |O_i - E_i|}{\sum_{i=1}^J |O_i - \bar{O}|} \quad (31)$$

Além disso, Legates e McCabe Jr. (1999) indicam que, como informação adicional, deva-se incluir o erro médio absoluto (EMA) e a raiz do erro médio quadrado (REMQ), equações 32 e 33, respectivamente, em conjunto com gráficos que apresentem os pontos observados e estimados e os coeficiente de ajuste de uma função linear (a e b) entre estes.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^J |O_i - E_i|}{J} \quad (32)$$

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{J}} \quad (33)$$

Finalmente, Chong, Green e Ahuja (1982) utiliza o erro médio percentual (EMP), expresso pela equação 34:

$$EMP = \frac{\sum_{i=1}^J \frac{|O_i - E_i|}{O_i}}{J} \times 100 \quad (34)$$

De acordo com Santos et al., (2008), deve ser feito, a partir das discrepâncias obtidas, as análises estatísticas de acurácia, precisão e tendência, adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (Brasil, 1984).

A classificação de documentos cartográficos segue as normas ditadas pelo Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984, que define o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (Brasil, 1984). O PEC é um indicador estatístico por dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de

documentos cartográficos. O decreto apresenta as normas que estabelecem a forma de classificar um documento cartográfico segundo sua forma geométrica.

Segundo o decreto, noventa por cento dos pontos isolados de altitude obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testadas no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido. As cartas são classificadas nas classes A, B ou C. O PEC altimétrico (acurácia) das classes A, B e C correspondem, respectivamente, a 1/2, 3/5 e 3/4 da equidistância entre as curvas de nível. Os erros padrões (precisão) das classes A, B e C correspondem, respectivamente, a 1/3, 2/5 e 1/2 da equidistância entre as curvas de nível (SANTOS et al., 2008).

Para as bases de dados utilizadas para área da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte os valores de acurácia e precisão determinados pelo PEC estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Representação dos valores máximos admissíveis para acurácia e precisão

<b>Base de dados</b>	<b>Classe</b>	<b>Acurácia</b>	<b>Precisão</b>
Curvas de nível (equidistância de 20m)	A	10m	6,66m
	B	12m	8m
	C	15m	10m

#### 4.6.1.1. Análise da exatidão

A análise de exatidão consistiu em verificar, a partir de amostras de discrepâncias (equação 23, página 51), se o valor da média populacional estimada é estatisticamente menor do que o valor limite admissível em acurácia, de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (BRASIL, 1984) para cada modelo.

Posteriormente, de acordo com Santos et al., (2008), aplicou-se o teste de hipótese com nível de confiança de 100 (1- $\alpha$ )% para a validação da exatidão, confrontando:

$$H_0 : \mu = X, \text{ contra}$$

$$H_1 : \mu < X \tag{35}$$



Em que:

$\mu$ : a média populacional;

$X$ : o erro máximo admissível em acurácia.

Para o cálculo da estatística foi utilizado a equação 36:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (36)$$

Em que:

$\mu_0$ : é a média populacional esperada.

Como a hipótese alternativa é  $H_1$  unilateral ( $\mu < X$ ), rejeita-se  $H_0$  se  $t < -t_\alpha$ , onde:

-  $t_\alpha$  é o ponto 100 $\alpha$ % inferior a distribuição  $t$  de *student*, com  $n-1$  graus de liberdade. A rejeição da hipótese nula indica que o modelo testado possui exatidão melhor do que o valor adotado para  $X$ .

#### 4.6.1.2. Análise da precisão

A análise de precisão, que é a coerência interna dos elementos do MDE, consistiu em verificar, para cada modelo, a partir de amostras de discrepâncias (equação 23, página 51), se o valor do desvio padrão populacional estimado é estatisticamente menor do que o valor limite admissível em precisão, de acordo com o PEC.

Posteriormente aplicou-se o teste de hipótese com nível de confiança de 100(1-  $\alpha$ )% para a validação da precisão, confrontando:

$H_0: \sigma^2 = \chi^2$ , contra

$H_1: \sigma^2 < \chi^2$  (37)

Em que,

$X$ : Erro máximo admissível (desvio padrão) em precisão.

O cálculo da estatística  $\chi^2$  é dado pela equação 38:

$$\chi^2 \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2}} \quad (38)$$

Em que:

$\sigma_0^2$ : Variância populacional esperada.

Como a hipótese alternativa  $H_1$  é unilateral ( $\sigma^2 < \chi^2$ ), rejeita-se  $H_0$  se  $\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha}$ .

#### 4.6.1.3. Análise de tendência

A análise de tendência consistiu em verificar se a média das discrepâncias (equação 23, página 51) é estatisticamente nula, ou seja, se a amostra está livre de tendência.

A análise consistiu na aplicação de um teste de hipótese com nível de confiança de  $100(1-\alpha)\%$  para a verificação da tendência (MONTGOMERY; RUNGER, 2003), confrontando:

$H_0: \bar{x} = 0$ , contra (39)

$H_1: \bar{x} \neq 0$

Em que,

$\bar{x}$ : Média amostral.

O cálculo da estatística  $t$  é dado por:

$$t = \frac{\bar{x}}{s} \sqrt{n} \quad (40)$$

Como a hipótese alternativa  $H_1$  é bilateral ( $\bar{x} \neq 0$ ), aceita-se  $H_0$  se:

$$-t_{\alpha/2} \leq t \leq +t_{\alpha/2} \quad (41)$$

Onde,  $t_{\alpha/2}$  e  $-t_{\alpha/2}$  são os pontos  $100_{\alpha/2}\%$  superior e inferior da distribuição  $t$  de *student*. A aceitação da hipótese nula indica que o modelo testado está livre de tendência. A existência de tendência em alguma direção significa a ocorrência de problemas na modelagem, cujas causas podem ser as mais variadas. Conhecido o valor da tendência, seu efeito pode ser minimizado, pela subtração do valor a cada coordenada do modelo (NOGUEIRA JR, 2003; GALO; CAMARGO, 1994; SANTOS et al., 2008).

#### 4.7. OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS BÁSICAS DA BACIA

Após a aplicação do controle de qualidade sobre os modelos de geração de MDE e MDEHC foi selecionado aquele com melhor resultado e então, produziu-se mapas temáticos para a extração das características fisiográficas da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES.

O primeiro passo foi realizar a delimitação, cálculo do perímetro (P) e da área (A) da bacia de forma automatizada pelo aplicativo computacional ArcGIS 9.3 para prosseguir com os estudos.

Para a área de estudo foram calculados o fator de forma (kf), o índice de compacidade (kc), ordem da bacia e dos cursos d'água, densidade de drenagem (dd), padrão de drenagem, extensão do percurso superficial (eps), amplitude altimétrica (h), declividade média (s), cálculo da direção de escoamento e cálculo do fluxo acumulado como descrito no tópico 3.5 na página 23.

## 5. RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1. AMOSTRAGEM

No processo de amostragem foi obtido todo o banco de dados necessário para a geração dos Modelos Digitais de Elevação (MDE). Compõem esse banco de dados: as curvas de nível com distância vertical de 20 m extraídas das cartas do IBGE (Figura 14); a imagem SRTM referente à área de trabalho (Figura 19); a hidrografia mapeada e os pontos de referência (coletados em campo e os pontos de teste).

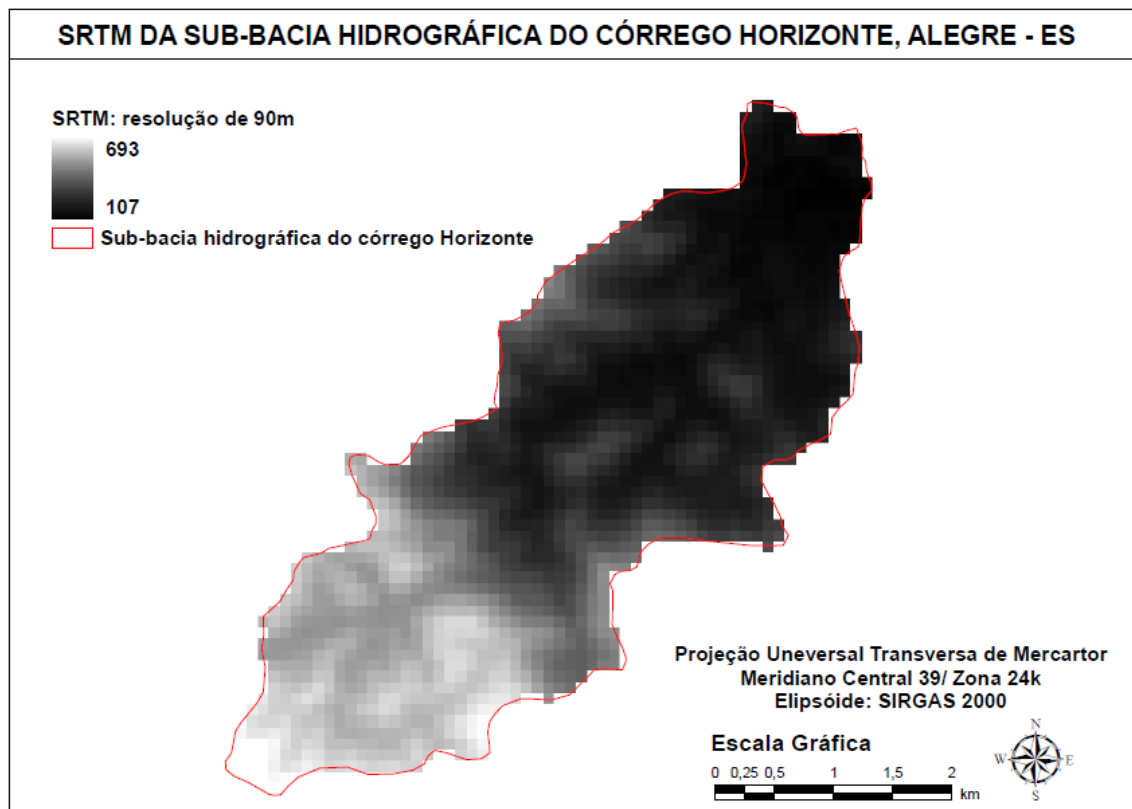


Figura 19 - Imagem SRTM, recortada para a sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, da folha SF-24-V-A.

Na Figura 20 observa-se a composição RGB e Infravermelho (composições colorida normal e falsa-cor) facilitando o processo de fotointerpretação da sub-bacia do córrego Horizonte, Alegre, ES.

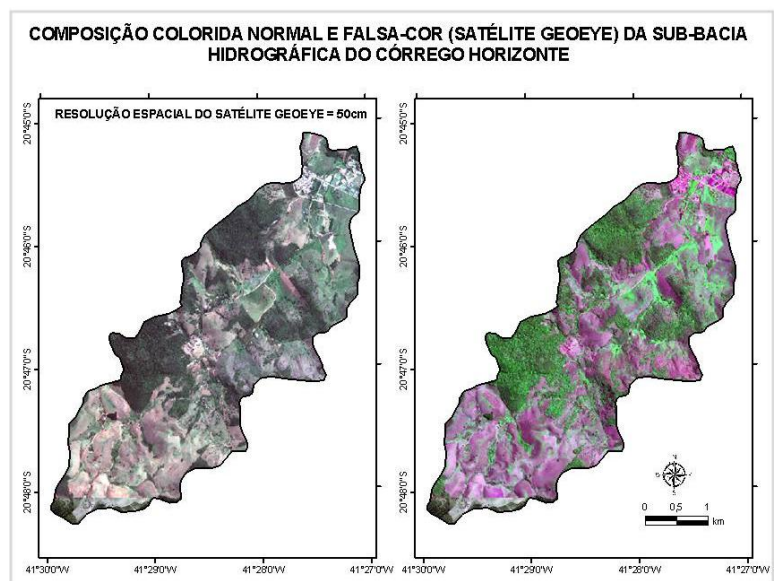


Figura 20 - Composição colorida normal e falsa-cor para o cenário 2 da sub-bacia do córrego Horizonte, Alegre, ES.

A interação da radiação eletromagnética (REM) com a água produziu efeitos em função da composição RGB e em falsa cor. A composição em falsa cor, com a adição do componente infravermelho facilitou a fotointerpretação, pois as hidrografias absorvem a REM, se apresentando numa coloração escurecida. Ao final gerou-se um *shape* de linha compondo a hidrografia mapeada da área em estudo (Figura 21).



Figura 21 – Hidrografia mapeada da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES.

Apesar da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte ser considerada pequena, o acesso ao seu interior é dificultado devido às variações acentuadas do relevo. Assim, as coletas dos pontos em campo foram realizadas na parte inferior da sub-bacia correspondendo a região próxima a foz (Figura 22).

Os pontos de referência coletados em campo totalizaram 446 pontos, porém, apenas uma amostra, definida pela equação 22, foi utilizada a fim de evitar uma superamostragem. Já que os dados de altitude cedidos pelo Ifes para a realização desta pesquisa encontravam-se muito próximos uns dos outros ocorrendo casos de mais de um ponto dentro de uma mesma célula do MDE (10 m).

No cálculo de  $n$  (número de amostras), adotou-se um valor de 95% para o intervalo de confiança e um erro de 6 m. Neste caso o valor de  $n$  encontrado foi de 100 pontos (Figura 22), estatisticamente suficientes para as análises entre os modelos gerados.

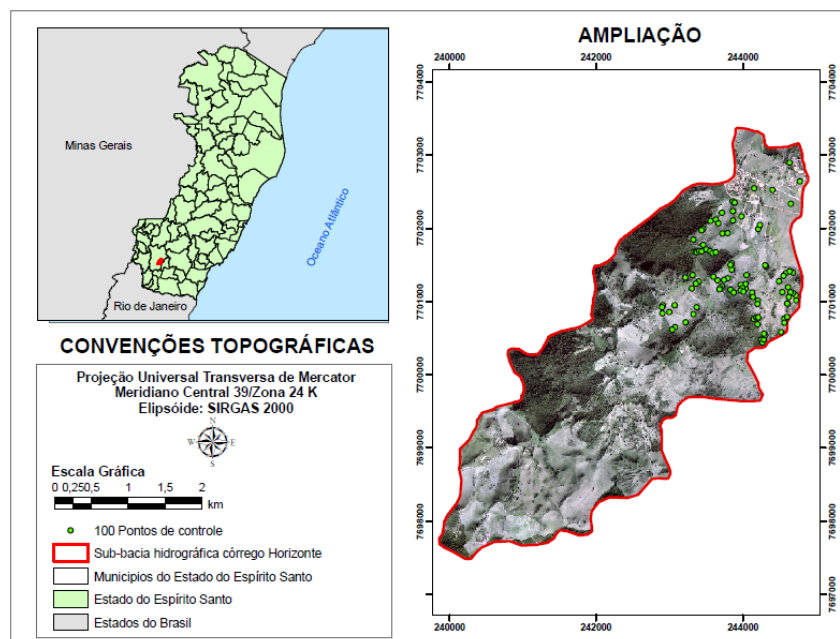


Figura 22 – Pontos de controle coletados em campo com Estação Total.

## 5.2. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

A preparação dos dados digitais de elevação e de drenagem consistiu na etapa mais trabalhosa da metodologia proposta para geração dos modelos digitais de elevação (MDE). Esse fato não difere da maioria dos trabalhos na

área de geotecnologia, onde a elaboração e a consistência da base de dados consomem a maior parte das horas previstas para a execução dos trabalhos.

A representação espacial da rede hidrográfica, nesta etapa, foi simplificada e orientada na direção de escoamento. Porém, observa-se, na Figura 23, que a rede de drenagem original mapeada apresenta, em alguns trechos, rios bifurcados e a inversão do sentido de escoamento. Esta é decorrente da forma aleatória empregada no processo de digitalização dos arcos que compõem a drenagem.

Com as correções dessas inconsistências dos arcos da hidrografia, após validação visual, assegurou-se uma conformação simplificada da rede hidrográfica e a convergência de todos os arcos para a seção de deságüe. Essas correções são imprescindíveis uma vez que influenciam na qualidade do MDE gerado, principalmente naqueles que utilizam a hidrografia como parâmetro de barreira.

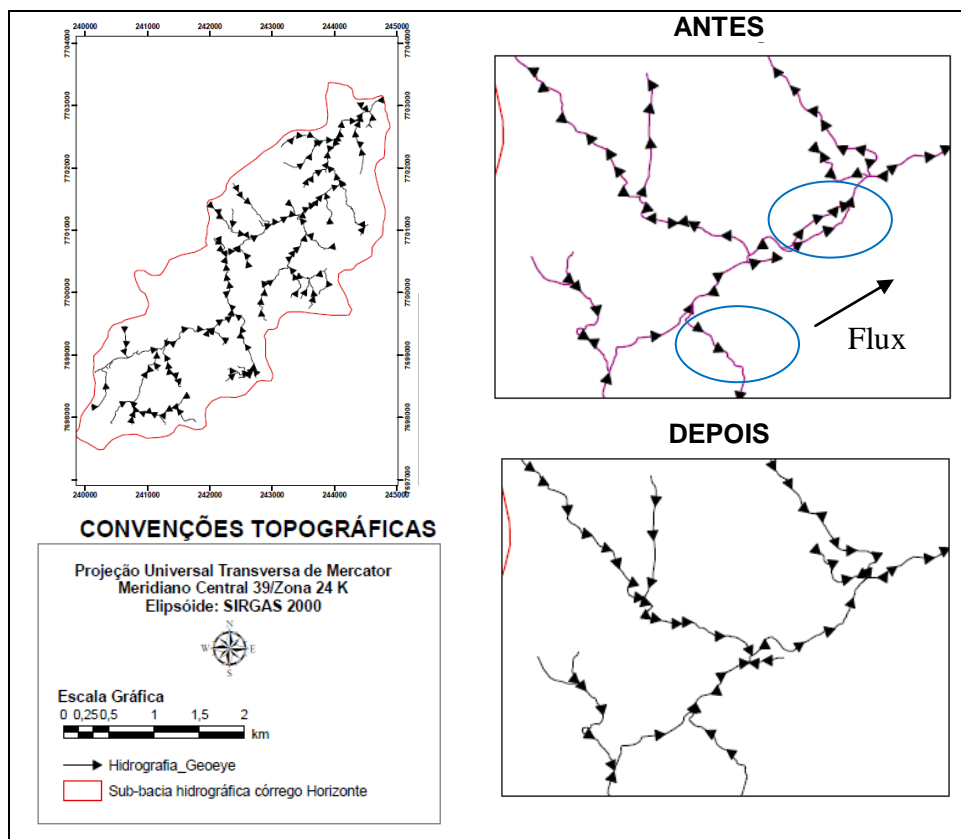


Figura 23 - Comparação entre as hidrografias antes e após validação visual e edição para assegurar a convergência de todos os arcos para a seção de deságüe. Em azul realce para as inconsistências (direção do escoamento e bifurcação da hidrografia).

Os 45 pontos de teste selecionados aleatoriamente dos pontos de vértices transformados das curvas de nível podem ser visualizados na Figura 24.

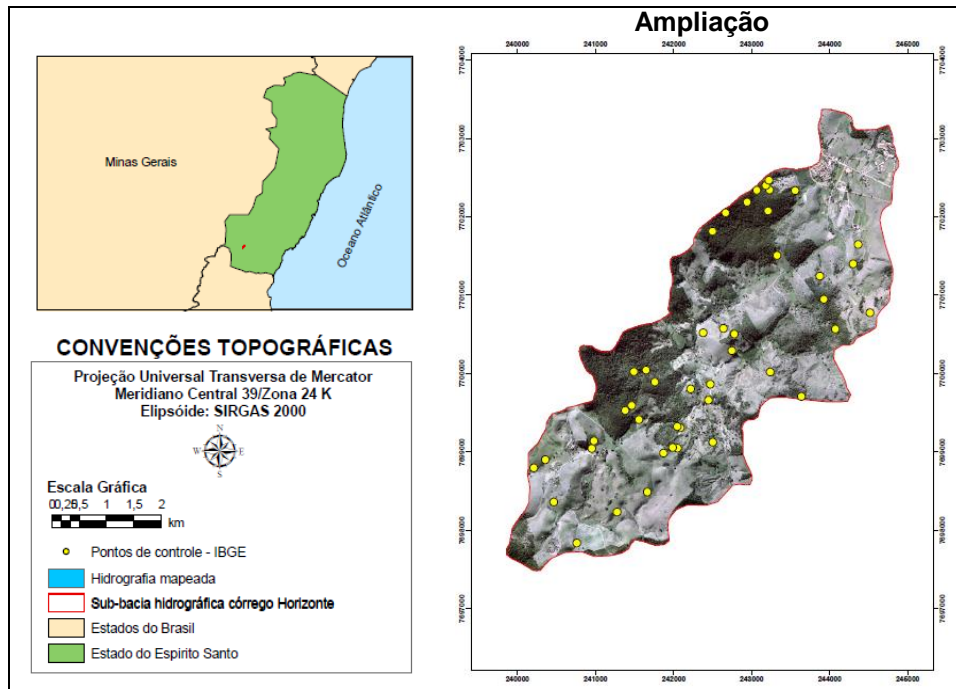


Figura 24 – Distribuição dos pontos de teste retirados das curvas de nível de eqüidistância de 20m (IBGE) da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES.

Os pontos de teste não participaram como dados de entrada na geração dos MDE. Estes foram utilizados para atuarem como valores reais (de referência) no momento de realizar a validação dos modelos, podendo então saber o comportamento do interpolador na predição dos valores correspondentes aos pontos de teste.

A preparação do arquivo digital do projeto SRTM referente à folha SF-24-V-A, com resolução espacial de 90 m, converteu a imagem original do formato *raster* para pontos em formato *shape* (Figura 25).

Apesar do MDE do SRTM estar disponível para 80% do planeta e sua resolução para América do Sul ser de 3", cerca de 90m, pode não representar fielmente a realidade topográfica, especialmente em áreas florestadas (KELLNDORFER et al. 2004), já que o sistema operou em comprimentos de onda relativamente curtos (banda C, 5,6 cm e banda X, 3,1 cm), que não



penetram a vegetação, gerando um MDE representativo à superfície da vegetação (PINHEIRO, 2006).

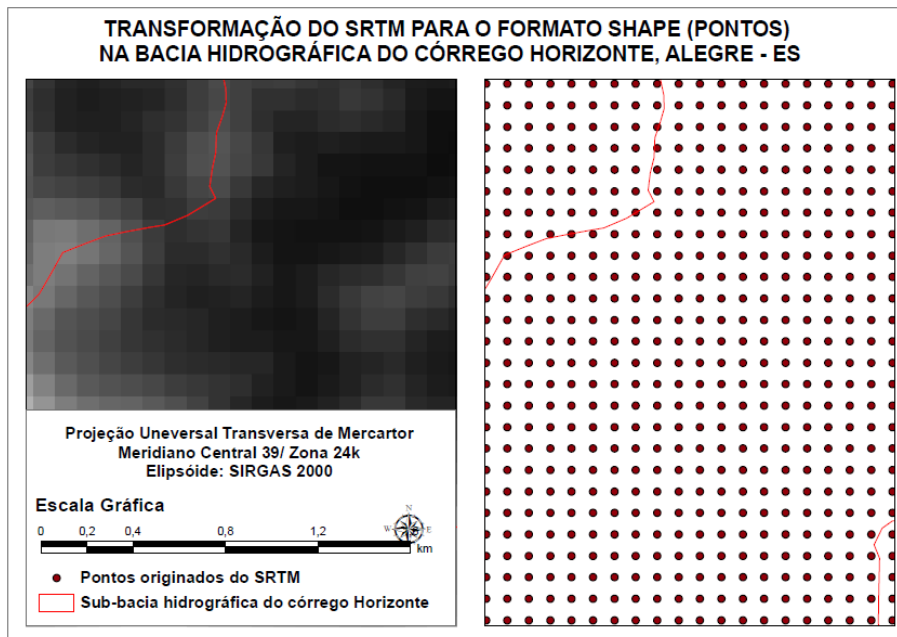


Figura 25 – Demonstração da imagem original do SRTM (*raster*) e após transformação em pontos (*shape*), com resolução espacial de 90 metros.

Pelo fato dessas falhas comprometerem a obtenção de informações fisiográficas da sub-bacia e, pela necessidade de se trabalhar com maior resolução, os pontos do SRTM foram, então, reinterpolados para tentar alcançar as características de interesse. O tratamento de imagens produzidas pelo radar conforme o uso desejado foi explicitado por Valeriano (2004). Alguns autores, como Calçavara et al., (2009), encontraram melhores resultados na análise ambiental com imagens SRTM tratadas antes de gerar o MDE desejado.

### 5.3. GERAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Após a geração dos MDE pode-se observar, na Tabela 4, que todos os modelos que utilizaram a base de dados do IBGE estimaram de forma semelhante as altitudes máximas, valores estes próximos à cota máxima das curvas de nível e com suavização dos topos. Porém o mesmo não ocorre com

as altitudes mínimas. Estas variaram desde 56,37m para o interpolador *Spline* 2 até 120 m para os interpoladores IDW 1, TIN 1 e TIN 2, sendo que a menor cota das curvas de nível é de 120 m, ou seja, os interpoladores, com exceção do IDW 1, TIN 1 e TIN 2 subestimaram as altitudes mínimas.

Esse resultado pode ser explicado pela escassez de informação na parte de cotas baixas da sub-bacia, uma vez que essa região assume feição plana na topografia.

Tabela 4 – Estatística dos interpoladores após a geração dos Modelos Digitais de Elevação, sem aplicação de técnicas de pós-processamento a partir dos dados do IBGE

<b>Interpolador</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
IDW1	120,0000	679,9180	297,3628	153,9501
Krigagem1	109,5872	681,4270	296,4771	154,7148
Krigagem2	109,6675	681,4288	296,4809	154,7105
<i>Spline</i> 1	93,1655	682,2164	296,0046	155,2066
<i>Spline</i> 2	56,3746	682,1157	295,5156	155,7067
<i>Spline</i> B	104,6571	681,5263	295,6575	155,1543
TIN1	120,0000	680,0000	296,8187	154,4554
TIN2	120,0000	680,0000	296,5638	154,3609
<i>Topo to Raster</i> 1	109,6515	681,9061	296,3834	155,4399
<i>Topo to Raster</i> 2	110,4974	681,5800	295,9548	155,3210

Os resultados de cada processo de interpolação e suas bases de dados podem ser observados nas Figuras 26 e 27. Observou-se que as classes de altitude do modelo *Topo to Raster* 2 apresentaram-se mais afuniladas em suas extremidades, implicando em uma maior cobertura e detalhamento do relevo.

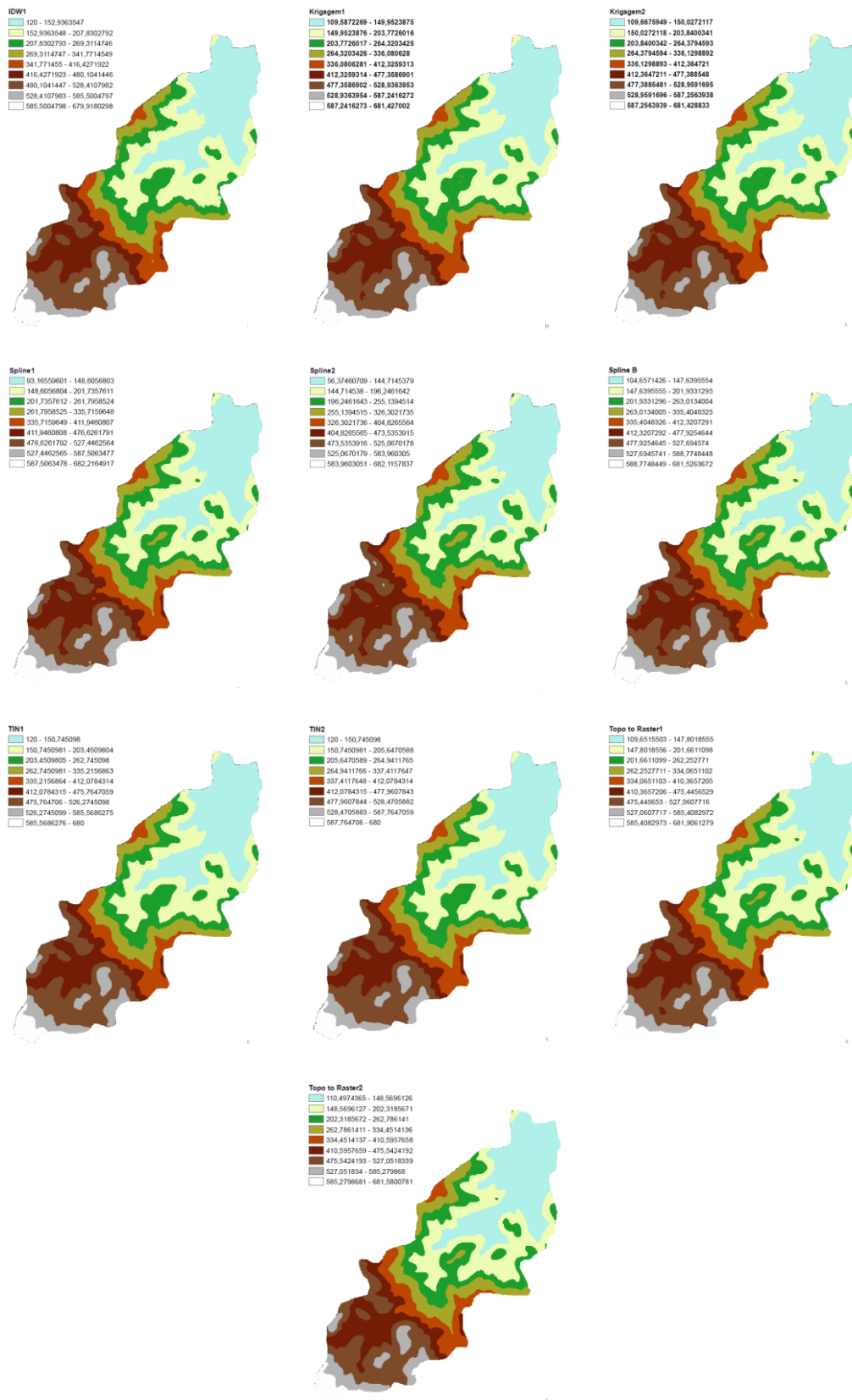


Figura 26 – Modelo digital de Elevação sem aplicação das técnicas de pós-processamento gerados a partir dos dados de altitude do IBGE.

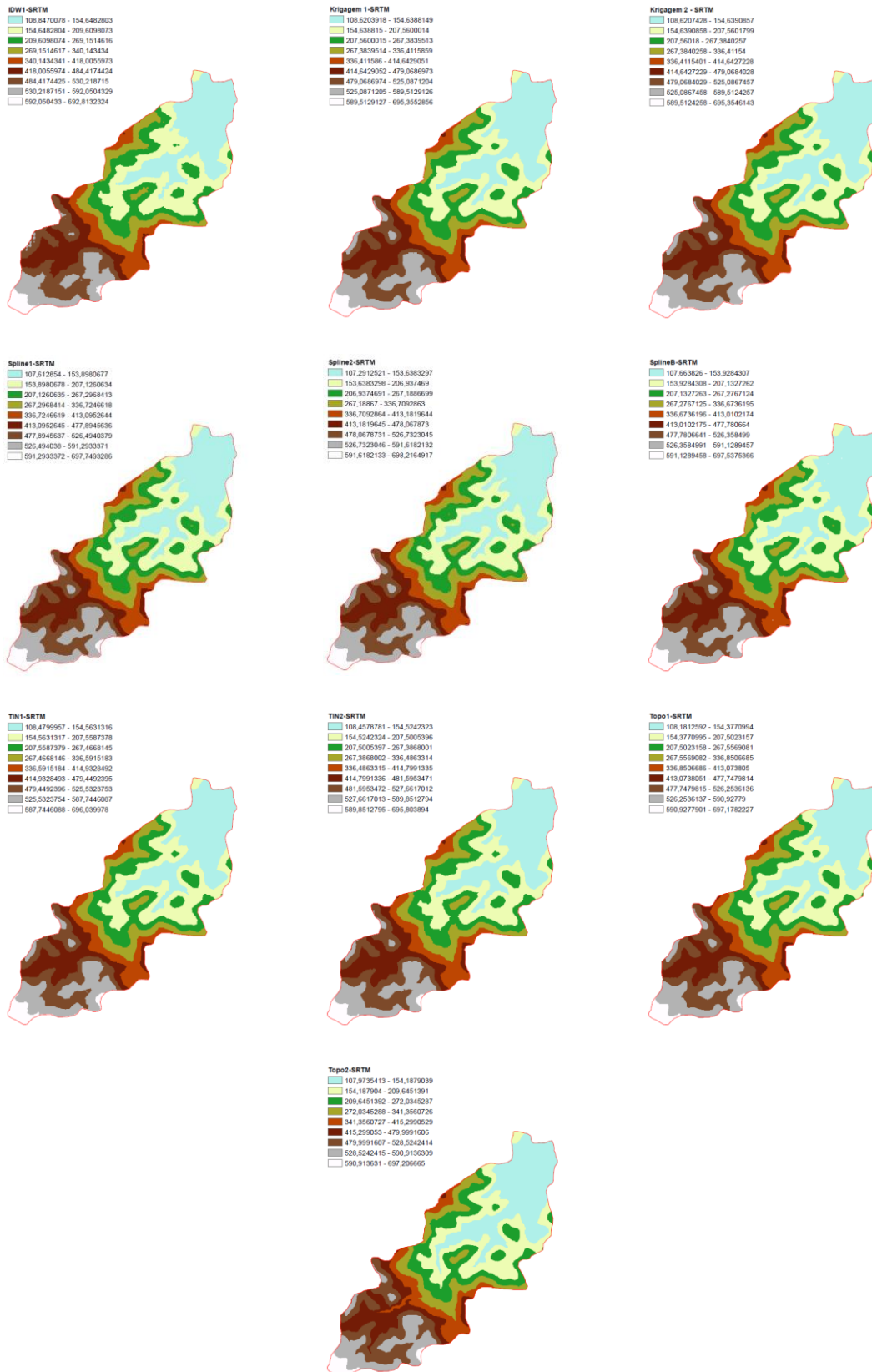


Figura 27 – Modelo digital de Elevação sem aplicação das técnicas de *Stream Burnning* gerados a partir dos dados de altitude do SRTM.

Os MDE gerados a partir da reinterpolação dos pontos do projeto SRTM possuem seus valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão das altitudes representados na Tabela 5.

As estimativas realizadas com os dados SRTM não variaram muito nos valores de máximos e mínimos.

Percebeu-se que as altitudes mínimas obtidas pelo SRTM foram menores do que o valor da cota mínima fornecida pelo IBGE. Isso pode ser explicado pelo sistema de obtenção das informações do relevo, uma vez que este foi criado para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre por meio de interferometria, ou seja, os pontos de entrada para geração dos modelos cobrem toda a superfície da área em estudo (resolução espacial de 90 m). Logo, mesmo nas áreas mais planas as menores altitudes são captadas por esse sistema.

O mesmo ocorre com os valores de máximo, sobressaindo sobre os valores fornecidos pelas curvas de nível, que por sua vez não representam os topos dos morros e montanhas. Assim percebe-se que os MDE gerados pelo SRTM alcançaram valores maiores para as suas regiões mais altas.

Tabela 5 – Estatística dos interpoladores após a geração dos Modelos Digitais de Elevação, sem aplicação de técnicas de pós-processamento a partir dos dados SRTM

<b>Interpolador</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
IDW1	108,8470	692,8132	304,3318	155,1498
Krigagem1	108,6203	695,3552	303,9860	155,8775
Krigagem2	108,6207	695,3546	304,1750	155,9563
<i>Spline1</i>	107,6128	697,7493	304,1473	156,2678
<i>Spline2</i>	107,2912	698,2164	304,1274	156,3248
<i>SplineB</i>	107,6638	697,5375	304,6186	156,3220
TIN1	108,4799	696,0399	304,0612	155,9029
TIN2	108,4578	695,8038	304,1436	155,5315
<i>Topo to Raster1</i>	108,1812	697,1782	304,6297	156,3044
<i>Topo to Raster 2</i>	107,9735	697,2066	303,5101	156,2864

Comparando os resultados iniciais obtidos pela interpolação dos dados do IBGE e SRTM pode-se observar diferenças quanto às altitudes mínimas e máximas. Por conseguinte, as médias também sofreram variação para os

diferentes dados de entrada. Entretanto, o desvio padrão manteve-se semelhante em todos os modelos, ou seja, os dados mantiveram uma distribuição semelhante.

Os MDE gerados nesta etapa possuem diversas depressões espúrias (Figura 28) as quais foram removidas na etapa de pós-processamento. Essas depressões por serem regiões com altitude inferior a dos seus vizinhos atuam como sumidouros impedindo o fluxo normal da água dentro da sub-bacia, gerando informações errôneas quanto à rede de drenagem. Essas informações de baixa qualidade irão gerar análises ambientais incorretas.

Quanto maior o número de depressões maior a dificuldade do interpolador em realizar os procedimentos necessários para se gerar um MDE consistente. Por isso, devem-se fazer as remoções de tais imperfeições no relevo dos MDE utilizando técnicas de preenchimento das falhas e aprofundamento da hidrografia mapeada para gerar modelos com consistência hidrológica.

O número de depressões geradas por cada modelo encontra-se na Tabela 6.

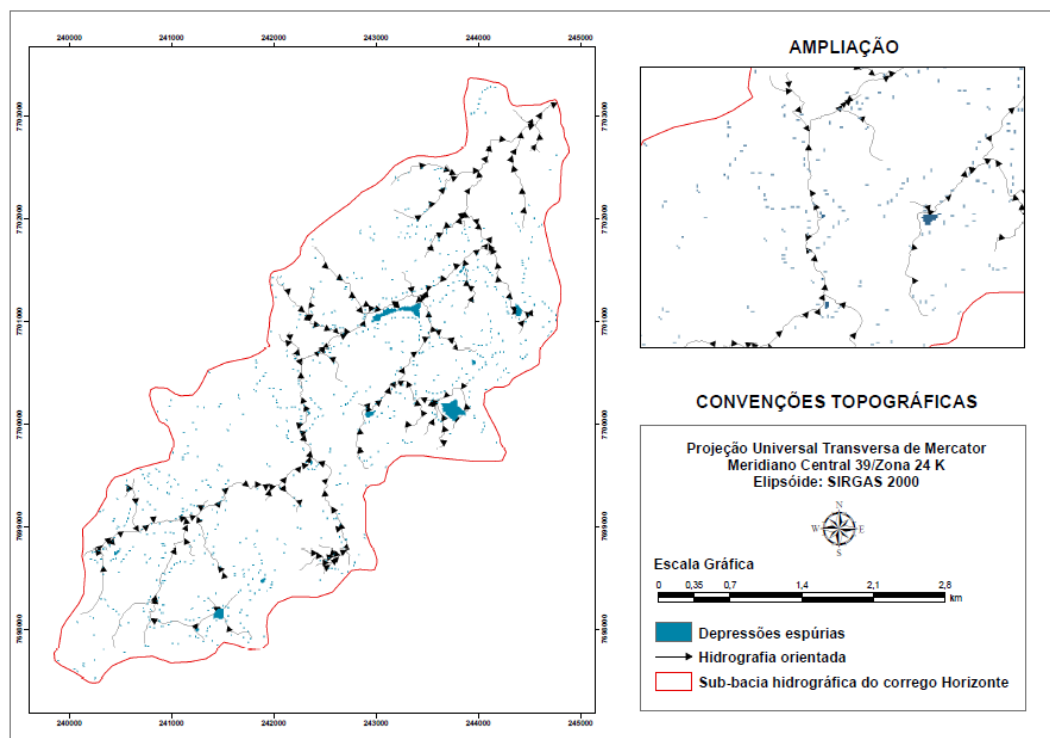


Figura 28 – Representação das depressões espúrias que surgem nos Modelos Digitais de Elevação.

#### 5.4. PÓS-PROCESSAMENTO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Após a geração dos MDE (IBGE e SRTM) observou-se o surgimento de depressões espúrias as quais foram removidas pela aplicação de técnicas iniciais de refinamento dos MDE, onde constatou-se que os métodos de interpolação exigiram números diferentes de interações para eliminar essas depressões (Tabelas 6 e 7).

Para os MDE (IBGE) (Tabela 6), os métodos IDW1, Krigagem 1 e 2 e *Spline 2* apresentaram os maiores números de depressões, respectivamente, 801, 323, 324 e 101. Entretanto, os métodos TIN 1 e 2 e *Topo to Raster 1 e 2* apresentaram os menores números de imperfeições, respectivamente, 1, 1, 19 e 22.

Tabela 6 - Número de interações necessárias para eliminação das depressões espúrias geradas pelos diferentes métodos de interpolação para base de dados do IBGE

Interpolador	Interações	Nº de depressões espúrias/ células com depressões
		IBGE
IDW 1	4	801/ 2322
Krigagem 1	4	323/ 696
Krigagem 2	4	324/ 696
<i>Spline 1</i>	4	97/ 193
<i>Spline 2</i>	3	101/ 202
<i>Spline B</i>	3	80/ 159
TIN 1	1	1/ 2
TIN 2	1	1/ 2
<i>Topo to Raster 1</i>	2	19/ 38
<i>Topo to Raster 2</i>	1	22/ 43

Para os MDE (SRTM) (Tabela 7), os modelos que apresentaram menor número de imperfeições foram o *Topo to Raster 1 e 2* com 41 e 31 depressões espúrias, respectivamente.

Percebe-se que os modelos *Spline B*, TIN 1, TIN 2, *Topo to Raster 1 e Topo to Raster 2* gerados pelo SRTM apresentaram maior número de depressões do que os mesmos modelos gerados pelo IBGE. Porém, o número de interações necessárias para eliminar tais depressões manteve-se estável.

Tabela 7 - Número de interações necessárias para eliminação das depressões espúrias geradas pelos diferentes métodos de interpolação para base de dados do SRTM

Interpolador	Interações	Nº de depressões espúrias/ células com depressões
		SRTM
IDW 1	4	467/ 934
Krigagem 1	4	102/ 203
Krigagem 2	4	102/ 203
<i>Spline</i> 1	4	62/ 124
<i>Spline</i> 2	3	59/ 118
<i>Spline</i> B	3	99/ 199
TIN 1	1	43/ 256
TIN 2	1	67/ 126
<i>Topo to Raster</i> 1	2	41/ 82
<i>Topo to Raster</i> 2	1	31/ 62

Segundo Pires et al., (2005) o maior número de depressões espúrias denota a dificuldade que os algoritmos de interpolação encontram para confeccionar modelos com consistência hidrológica. Esses mesmo autores também encontraram resultados semelhantes ao analisarem o número de interações exigidas por diferentes métodos de interpolação.

Na Figura 29 pode-se observar a transformação da hidrografia mapeada para o formato *raster*, com resolução de 10 m (1 célula).

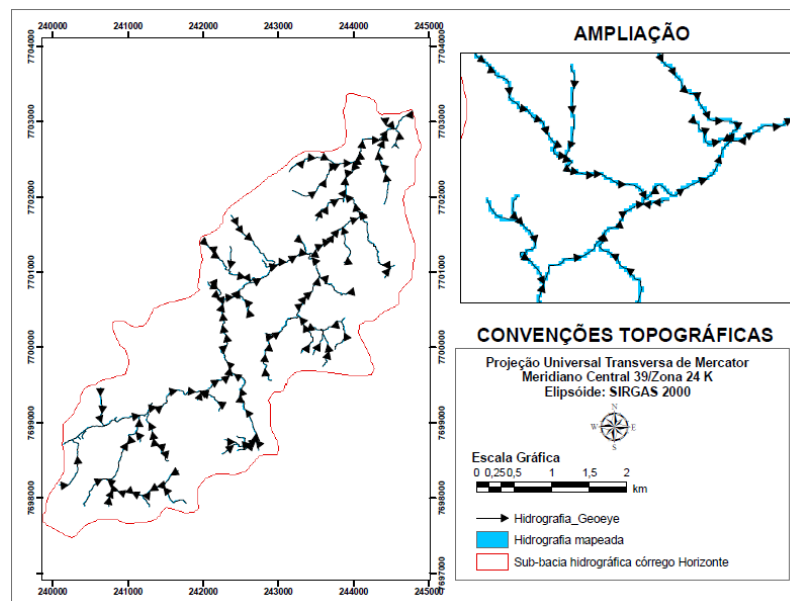


Figura 29 - Transformação do formato de representação da drenagem vetorial, em preto (hidrografia orientada), para raster, em azul (10 m).



Durante as etapas do pós-processamento, valores de altimetria referente à hidrografia mapeada são obtidos por operações matemáticas para os modelos gerados pelo IBGE. Para exemplificação dessa operação utilizou-se o MDE gerado pelo TIN 2 (IBGE) por ter apresentado o menor número de depressões espúrias na primeira etapa do pós-processamento como demonstrado na Figura 30.

Após obter os valores altimétricos da hidrografia, esta foi aprofundada em 1.000 m e incorporada aos MDE (IBGE) por meio da substituição dos valores originais. Esta operação ocasionou o surgimento de novas depressões espúrias além daquelas que não foram removidas durante o processo de geração dos MDE.

Na Figura 31 observa-se as depressões espúrias existentes ao longo da drenagem rasterizada e que foram removidas pelo módulo FILL do ArcGIS/ArcInfo 9.3.

Utilizou-se o modelo gerado pelo IDW1 por ter apresentado o maior número de depressões facilitando a representação e visualização das depressões.

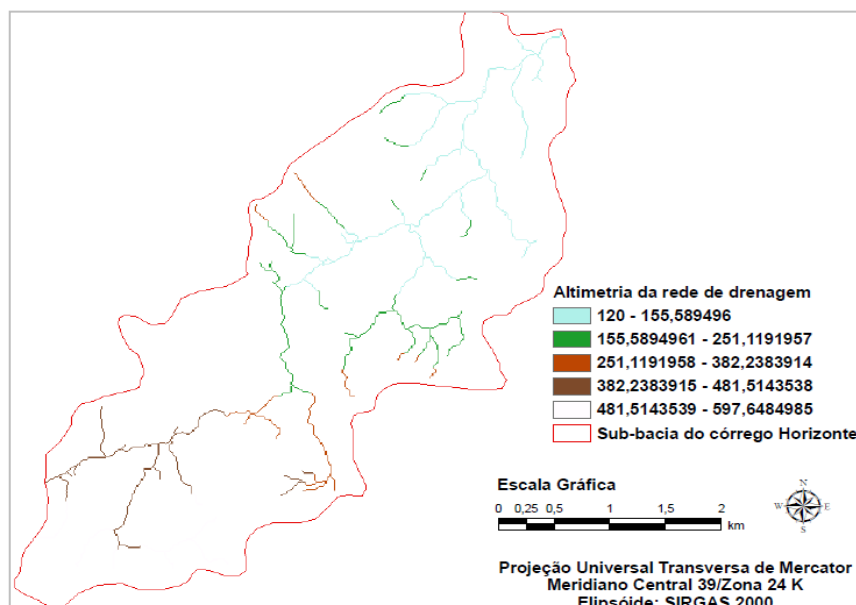


Figura 30 - Altimetria da rede de drenagem matricial antes de seu aprofundamento no Modelo Digital de Elevação.

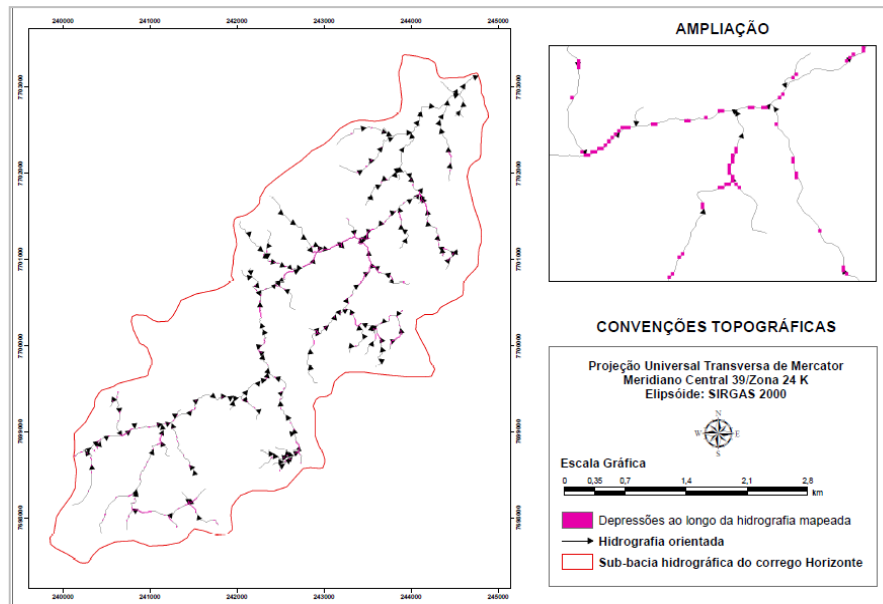


Figura 31 – Depressões espúrias ao longo da hidrografia após o aprofundamento da hidrografia nos valores da altimetria e incorporação ao MDE.

O MDE produzido no final das duas primeiras etapas de pós-processamento, não garante, em todos os casos, a convergência do escoamento superficial das células adjacentes ao traçado do rio para a calha do modelo. Para solucionar esse problema executou-se, na terceira etapa, a construção de um TALVEGUE na região que se estende ao longo da drenagem do MDE.

A Figura 32 apresenta a representação esquemática do TALVEGUE.

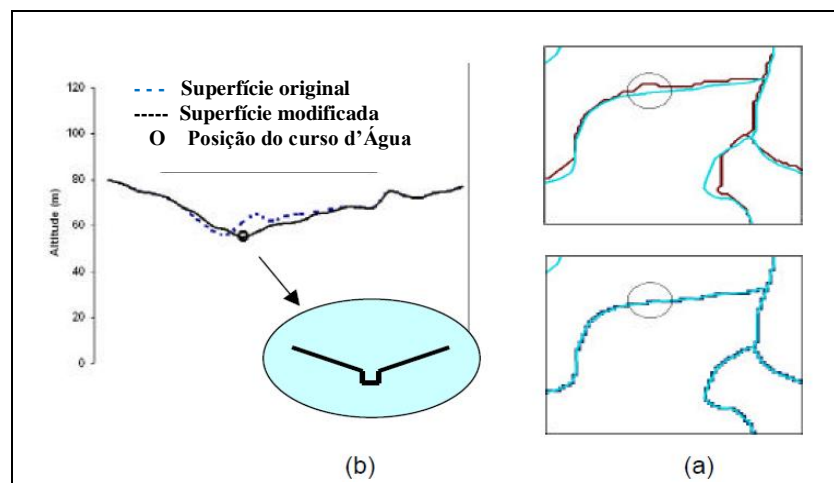


Figura 32 – Representação esquemática do TALVEGUE (b), posterior ao processo de *stream burning* (a). Fonte: Chaves (2002).

Na Tabela 8 encontram-se os resultados dos valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão alcançados pelos modelos (IBGE) após as técnicas de *Stream Burning*.

Todos os modelos apresentaram o valor mínimo muito abaixo da menor cota das curvas de nível (120 m). Comparando estes resultados aos encontrados antes das técnicas de *Stream Burning* (Tabela 4) percebe-se que houve um aprofundamento das regiões de baixa altitude, já que nenhum valor de mínimo aproximou-se da cota original do IBGE. Houve uma maior caracterização dos vales da área em estudo.

Além disso, os valores de mínimo também foram menores aos encontrados com os dados de SRTM (Tabela 5). Já os valores de máximos mantiveram-se estáveis aos dados das curvas de nível (aproximadamente 680 m). Apesar dessas discrepâncias, em todas as análises realizadas os valores de desvio padrão foram semelhantes, mais uma vez demonstrando que os dados mantiveram uma distribuição semelhante.

Tabela 8 – Estatística dos interpoladores após a aplicação de técnicas de pós-processamento a partir dos dados do IBGE

<b>Interpolador</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
IDW1	83,834	679,918	291,3801	154,9371
Krigagem1	77,088	681,427	289,2524	156,9274
Krigagem2	77,228	681,428	289,3188	156,8749
<i>Spline1</i>	74,533	682,216	288,0084	157,1219
<i>Spline2</i>	56,374	682,115	287,2505	157,5885
<i>SplineB</i>	71,593	681,526	288,3033	157,1214
TIN1	80,566	680,000	289,9693	156,4414
TIN2	81,249	680,000	289,2886	156,1378
<i>Topo to Raster1</i>	79,678	681,906	288,7048	156,9523
<i>Topo to Raster 2</i>	98,590	681,580	292,5275	155,6422

Os MDEHC gerados possuem melhor caracterização das feições da área em estudo como observado nas Figuras 33.

Com a última etapa do pós-processamento obtiveram-se os grids de direção do escoamento e da hidrografia numérica para os diferentes métodos de interpolação com a base de dados do IBGE (APÊNDICE).

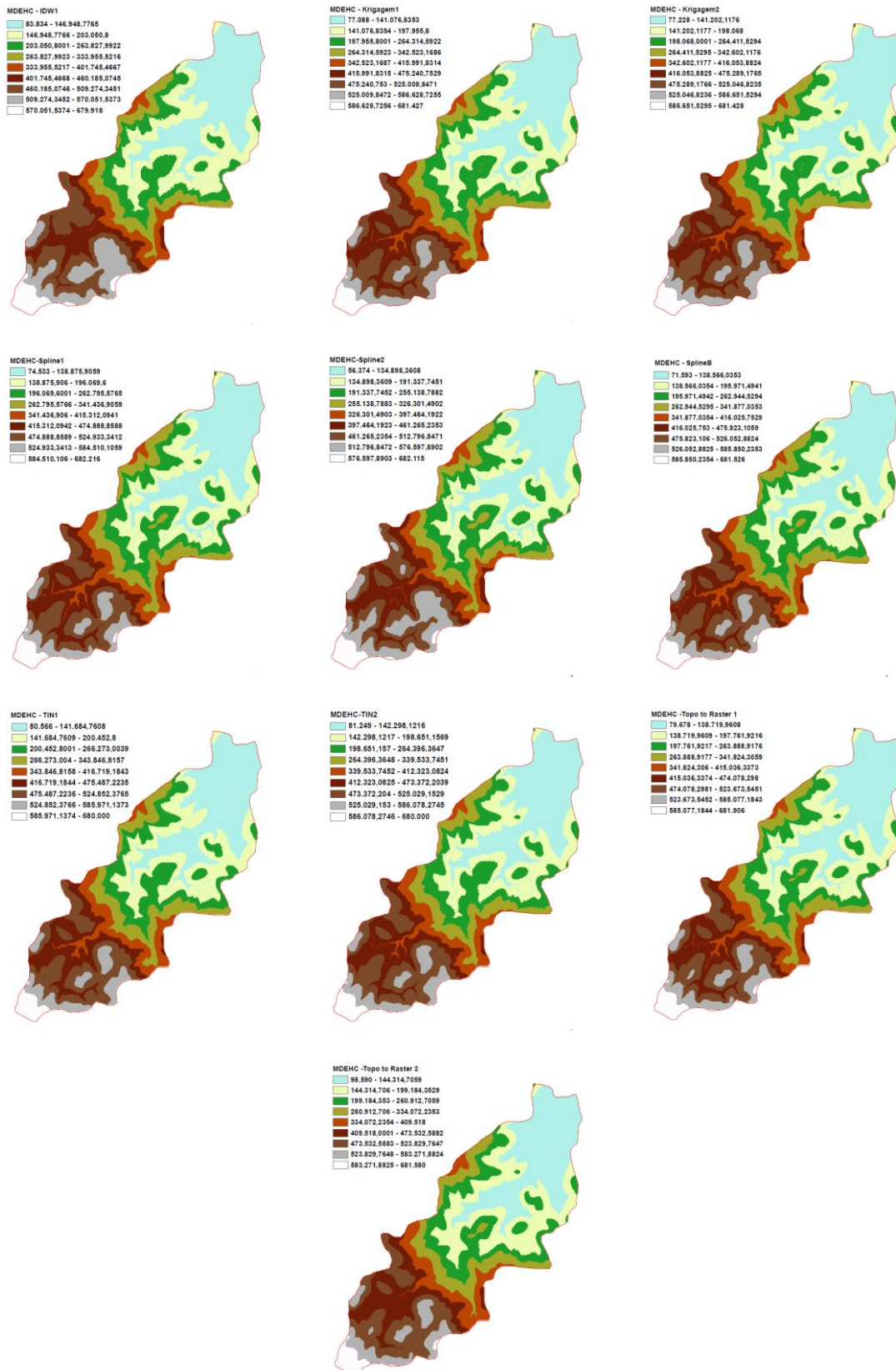


Figura 33 – Modelo digital de Elevação, com os interpoladores após aplicação das técnicas de pós-processamento, gerados a partir dos dados de altitude do IBGE.

A etapa de pós-processamento da imagem matricial de direção de escoamento do MDEHC garante que a água superficial dentro da margem, criada ao longo da hidrografia e confinada na região do TALVEGUE, irá escoar para a drenagem numérica e que todas as suas células, por sua vez, irão convergir para as seções de deságüe.

Segundo Chaves (2002), os resultados apresentados, até então, mostram que a aplicação da técnica de *Stream Burning* assegura a convergência do escoamento superficial apenas até a drenagem numérica do modelo. Esta consistência hidrológica parcial é obtida à custa de uma descaracterização dos valores altimétricos da rede de drenagem e da área interna ao TALVEGUE. Este fato é irrelevante em regiões onde a largura do rio é superior à largura do TALVEGUE.

## 5.5. AVALIAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Nas Figuras 34 observam-se as drenagens vetoriais extraídas automaticamente dos MDEHC por meio da aplicação de um limiar de 1% do fluxo máximo gerado pelos *grids* da direção de escoamento e, a comparação matemática (análise de cruzamento) entre a hidrografia mapeada e as hidrografias numéricas.

Para todos os interpoladores os MDEHC criaram percursos alternativos à hidrografia mapeada. Resultados esses também encontrados por Pires et al., (2005) e Chaves (2002).

Todos os métodos de interpolação apresentaram semelhança na coincidência com a hidrografia mapeada após a aplicação da técnica de *Stream Burning* (Tabela 9). Esta, por realizar o aprofundamento da hidrografia mapeada sobre o relevo, força a hidrografia numérica a seguir o mesmo caminho, não havendo diferença nessa avaliação entre os interpoladores.

Segundo Pires et al., (2005), a maior coincidência entre a hidrografia numérica e a mapeada demonstra a eficiência do algoritmo de interpolação e sua consistência hidrológica.



Figura 34 – Coincidência (verde) entre a hidrografia mapeada (azul) e a hidrografia numérica (preto) dos MDEHC gerados (IBGE) com a técnica de *Stream Burning*.

Tabela 9 - Resultado dos cruzamentos entre a hidrografia numérica dos MDE (IBGE) e a hidrografia mapeada com a aplicação da técnica de *Stream Burning*

Interpolador	Nº de células da hidrografia	H.numérica x H. mapeada <sup>1</sup>	
		Nº de células coincidentes	% de células coincidentes
IDW 1	2209	1904	66,34
Krigagem 1	2189	1913	66,66
Krigagem 2	2189	1923	67,00
<i>Spline</i> 1	2164	1932	67,32
<i>Spline</i> 2	2185	1941	67,63
<i>Spline</i> B	2219	1946	67,80
TIN 1	2214	1943	67,70
TIN 2	2171	1924	67,04
<i>Topo to Raster</i> 1	2185	1916	66,76
<i>Topo to Raster</i> 2	2164	1946	67,80

<sup>1</sup>Hidrografia mapeada é constituída por uma malha de 2870 células

Normalmente, a técnica de *Stream Burning* é aplicada somente sobre os modelos gerados pelo ANUDEM ou seus equivalentes (TOPOGRID e *Topo to Raster*) (HUTCHINSON, 1989), já que esta classe de interpoladores foi especialmente desenvolvida para se beneficiar dos dados de hidrografia, melhorando consideravelmente os resultados da interpolação nas regiões das calhas dos rios. Porém, não há restrições quanto a aplicação dessa técnica sobre outros interpoladores.

Assim, testou-se o desempenho de todos os interpoladores na criação de drenagens numéricas antes da aplicação das técnicas de refinamento do relevo com aprofundamento da hidrografia. Para isso, geraram-se novas hidrografias numéricas sobre os MDE (IBGE e SRTM) que passaram apenas pela remoção de depressões espúrias que surgiram após a geração dos modelos, ou seja, sem as técnicas de stream burning.

Pode-se observar na Tabela 10 e 11 que o interpolador *Topo to Raster* 2 apresentou uma maior coincidência entre as hidrografias: 22,79% e 21,08% para os dados do IBGE e SRTM, respectivamente. Confirmando que esse interpolador se beneficia dos dados da hidrografia antes mesmo da aplicação de técnicas de correção (HUTCHINSON, 1989).

Tabela 10 - Resultado dos cruzamentos entre a hidrografia numérica dos MDE (IBGE) e a hidrografia mapeada sem a aplicação da técnica de *Stream Burning*

Interpolador	Nº de células da hidrografia	H.numérica x H. mapeada <sup>1</sup>	
		Nº de células coincidentes	% de células coincidentes
IDW 1	2185	122	4,25
Krigagem 1	2195	144	5,02
Krigagem 2	2191	144	5,02
<i>Spline</i> 1	2031	127	4,43
<i>Spline</i> 2	2161	134	4,67
<i>Spline</i> B	2031	127	4,43
TIN 1	2108	115	4,01
TIN 2	2044	177	6,17
<i>Topo to Raster</i> 1	1876	121	4,22
<i>Topo to Raster</i> 2	2046	654	22,79

<sup>1</sup>Hidrografia mapeada é constituída por uma malha de 2870 células.

Tabela 11 - Resultado dos cruzamentos entre a hidrografia numérica dos MDE (SRTM) e a hidrografia mapeada sem a aplicação da técnica de *Stream Burning*

Interpolador	Nº de células da hidrografia	H.numérica x H. mapeada <sup>1</sup>	
		Nº de células coincidentes	% de células coincidentes
IDW 1	2089	137	4,77
Krigagem 1	1953	113	3,94
Krigagem 2	1954	87	3,03
<i>Spline</i> 1	1963	105	3,66
<i>Spline</i> 2	1987	127	4,43
<i>Spline</i> B	2530	307	10,70
TIN 1	1944	104	3,62
TIN 2	1996	140	4,88
<i>Topo to Raster</i> 1	1932	113	3,94
<i>Topo to Raster</i> 2	1964	605	21,08

<sup>1</sup>Hidrografia mapeada é constituída por uma malha de 2870 células.

Entretanto, os resultados estão muito aquém dos almejados durante uma análise hidrológica, pois apresentam um grande número de inconsistências como observado nas Figuras 35 e 36.



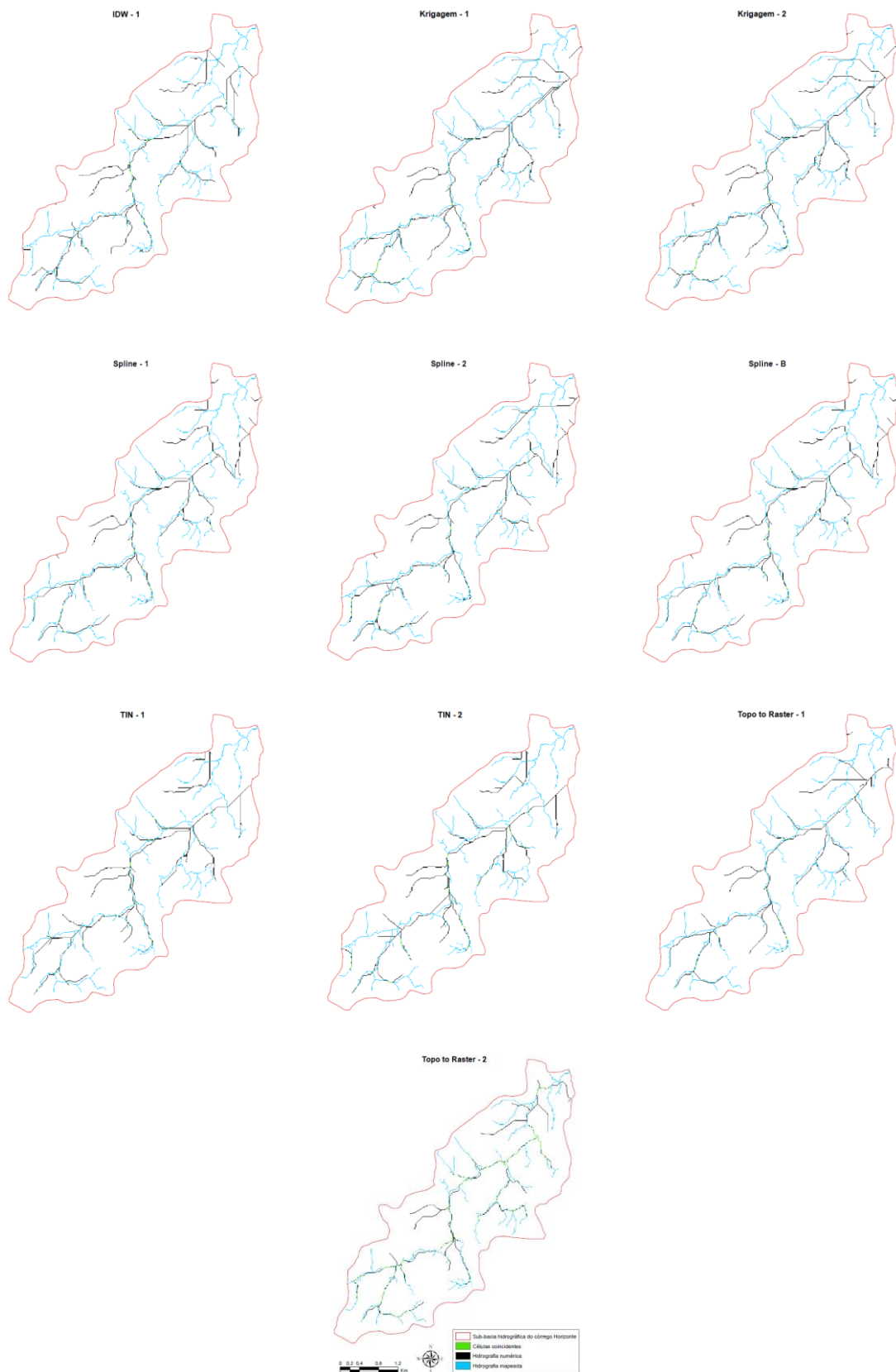


Figura 35 – Coincidência (verde) da hidrografia mapeada (azul) com a hidrografia numérica (preto) dos MDE gerados (IBGE) sem a aplicação da técnica de *Stream Burning*.



Figura 36 – Coincidência (verde) da hidrografia mapeada (azul) com a hidrografia numérica (preto) dos MDE gerados (SRTM) sem a aplicação da técnica de *Stream Burning*.

A utilização isolada do interpolador *Topo to Raster* para grandes áreas de planície com baixa densidade de pontos de altimetria também não garante a fidelidade de representação da hidrografia mapeada. Deve-se, portanto, tomar precauções quando se deseja obter informações hidrológicas de MDE gerados sem a correta aplicação das técnicas aqui citadas de pós-processamento.

Cherem, Magalhães e Faria (2009) afirmam que a utilização da rede de drenagem gerada a partir de dados SRTM tendem a reduzir a sinuosidade dos canais fluviais de pequena e média ordem.

Percebe-se que as drenagens originadas sem aplicação de técnicas de *Stream Burning* apresentam um maior número de inconsistências e não representatividade com a realidade, neste caso, com a hidrografia mapeada.

Com a utilização da técnica de *Stream Burning* (IBGE) a drenagem extraída apresentou maior consistência espacial, sendo que os segmentos onde ocorrem divergências espaciais foram restritos a determinados locais e podem ser decorrentes do processamento dos fundos de vale inicialmente identificados na geração do modelo. Além disto, nem todos esses segmentos são provenientes de erros de interpolação, pois podem tratar-se de tributários não-cartografados na escala de mapeamento.

Analisando as Tabelas de coincidências entre as hidrografias numéricas e a mapeada para os MDE (IBGE e SRTM) e MDEHC percebeu-se que com a aplicação da técnica de *Stream Burning* os interpoladores aproximaram-se em desempenho na estimação da drenagem numérica.

Chaves (2002), Pires et al., (2005), Moreira (2006) e Nogueira e Amaral (2009) encontraram resultados que indicaram o interpolador *Topo to Raster* como o mais adequado na definição de redes de drenagem e canais de fluxo. Porém, neste trabalho para a sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte não foi possível definir o interpolador com melhor estimativa apenas por meio das análises das hidrografias numéricas geradas para os MDEHC.

Assim, o controle de qualidade dos modelos por meio das análises das discrepâncias entre as altitudes de referência (coletadas em campo e pontos de teste) foram fundamentais para a definição do melhor algoritmo de interpolação.

## 5.5.1 Controle de qualidade dos modelos

### 5.5.1.1 Base de dados do IBGE

Foram obtidas as discrepâncias entre as altitudes de referência e as do modelo obtidas em amostra com os 100 pontos e 45 pontos de controle, obtidos em coleta de campo e da subtração de 1% pontos da curva de nível (pontos de teste), respectivamente localizados na área em estudo.

Vale lembrar que todos os pontos coletados em campo foram levantados aleatoriamente na região inferior (próximo a foz) da sub-bacia e, assim como estes os pontos de teste das curvas de nível, não foram utilizados na geração dos MDEHC.

A partir do momento em que os valores estimados e observados foram obtidos realizou-se, como observado nas Figuras 37 e 38 os diagramas de dispersão entre as altitudes interpoladas e as de referência associados a curva de tendência ajustada aos dados.

Percebe-se que as estimativas realizadas ajustaram-se linearmente aos valores de referência, significando que os modelos utilizados estão coerentes com a variabilidade espacial da topografia da área amostrada.

Utilizando os dados de campo o interpolador *Topo to Raster 2* apresentou o maior grau de ajuste verificado por meio do coeficiente de determinação  $R^2 = 0,8671$ , calculado pelo ajuste linear para essa base de dados; o menor  $R^2$  encontrado pertence ao interpolador  $IDW1 = 0,8183$ . Porém, todos os métodos foram significativos ( $P < 0,0001$ ) ao nível de 95% de significância.

Utilizando os pontos subtraídos das curvas de nível (1%, ou seja, 45 pontos) (Figura 21) percebe-se que todos os métodos alcançaram  $R^2$  superior a 0,9 e  $P < 0,0001$ . Mesmo assim, é possível identificar um ajuste mais adequado ao interpolador *Topo to Raster 2* por ter apresentado um  $R^2 = 0,9990$  calculado pelo ajuste linear.

Independente dos pontos de referência utilizados o *Topo to Raster 2* foi superior utilizando o diagrama de dispersão e o  $R^2$ .

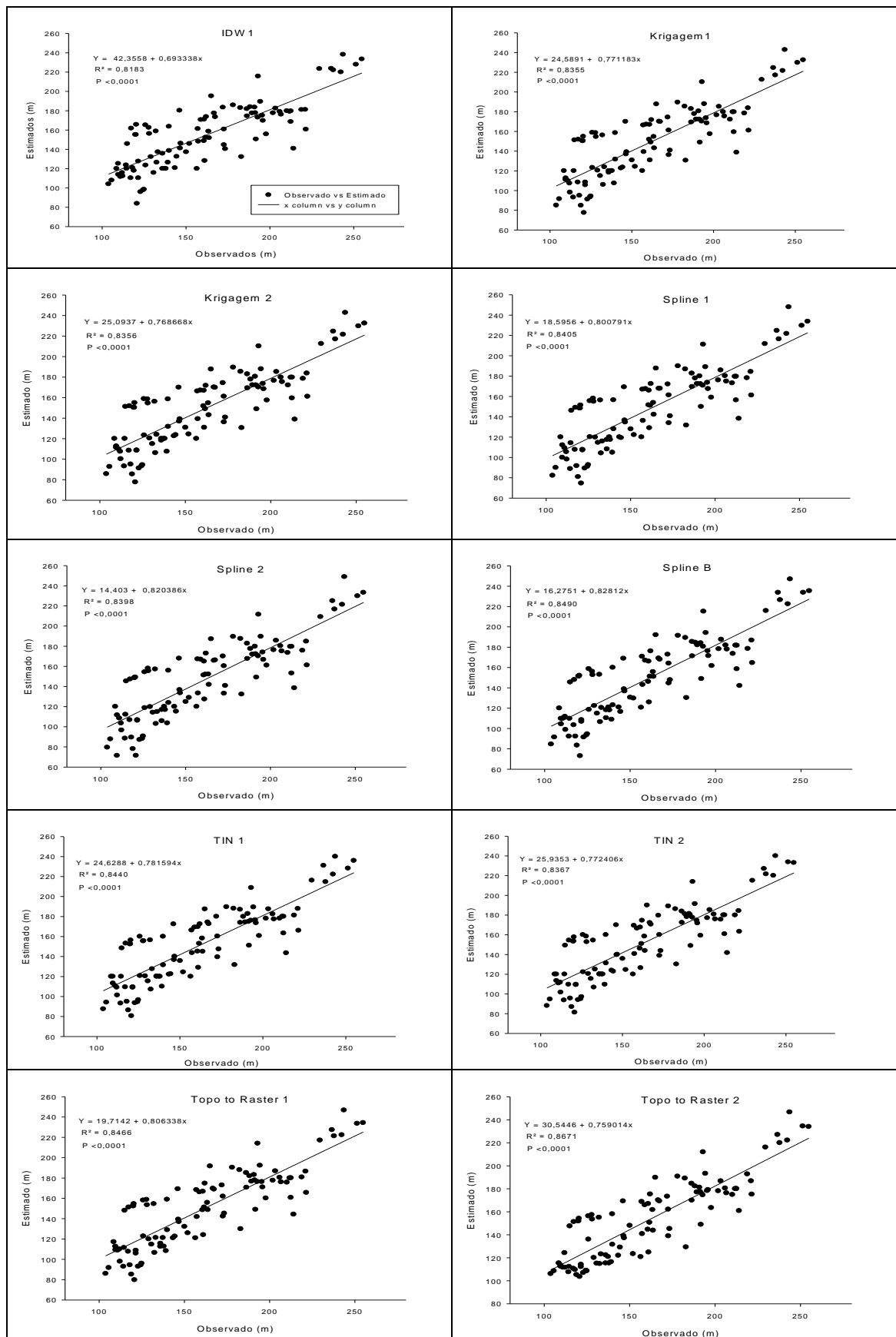


Figura 37 – Diagrama de dispersão entre as altitudes interpoladas e as de referência coletadas em campo para os dados IBGE.

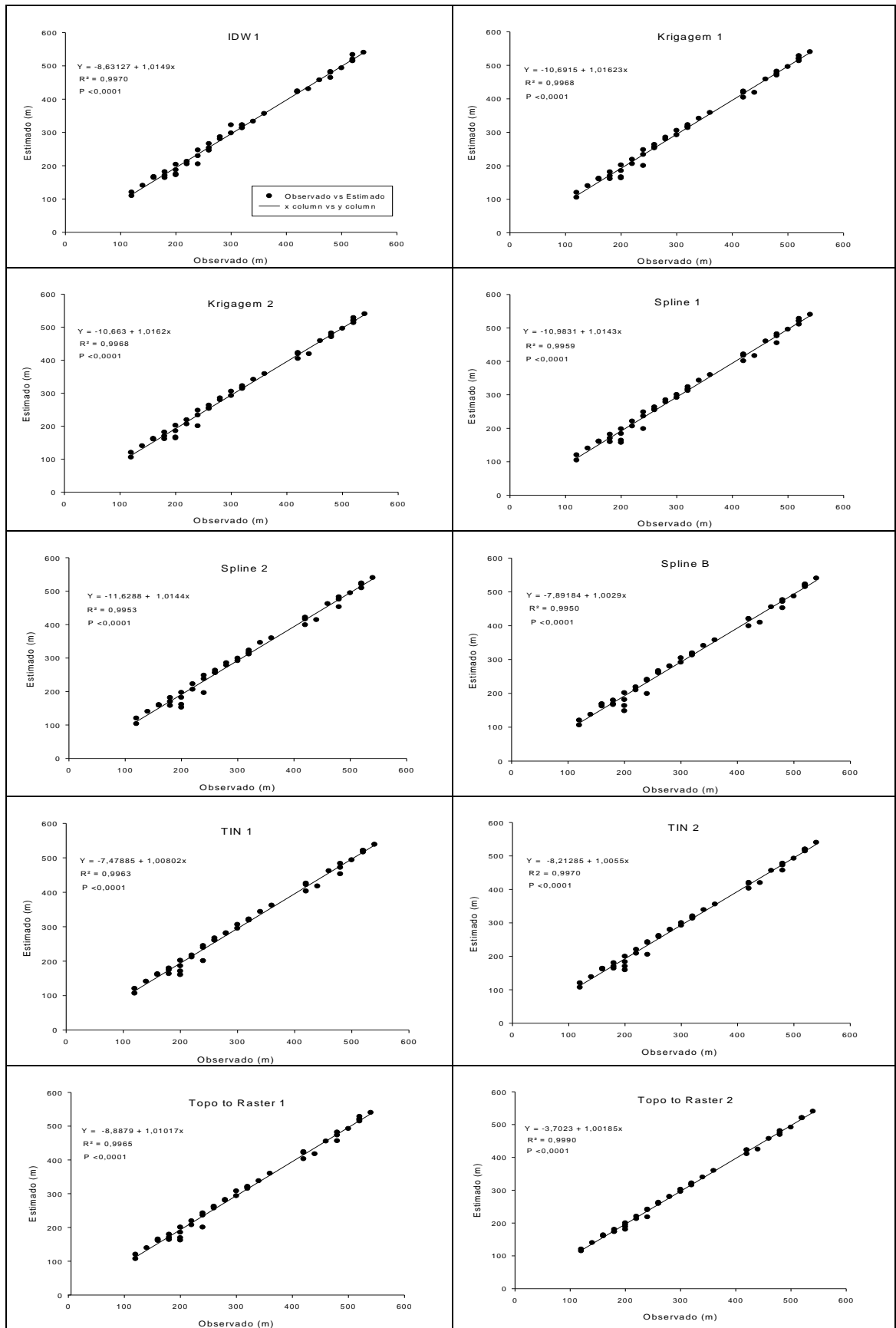


Figura 38 – Diagrama de dispersão entre as altitudes interpoladas e as de referência subtraídas das curvas de nível (pontos de teste).

Avaliando o  $R^2$  dos modelos gerados pelas curvas de nível do IBGE e os pontos subtraídos das mesmas é possível avaliar o quanto bom está a predição realizada pelos interpoladores. Isto é possível, pois os valores dos pontos de teste pertenciam ao banco de dados agora analisado.

Logo, ao fazer a subtração desses pontos antes do processo de interpolação quanto mais próximo o modelo chegar ao valor subtraído melhor será o seu comportamento de predição, conseqüentemente maior será seu  $R^2$ . Neste estudo o interpolador mais adequado para predição de dados altimétricos foi o *Topo to Raster 2* com  $R^2 = 0,9990$ .

Já as análises realizadas com os dados de campo demonstram haver uma maior discrepância entre estes e os dados de entrada dos modelos (curvas de nível), uma vez que seus  $R^2$  encontrados foram menores do que 0,9.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) avalia justamente a relação existente entre os dados em análise. Pelos diagramas de dispersão (Figuras 34 e 35) pode-se constatar que a relação entre os dados de campo com os modelos foi menor do que com os 45 pontos subtraídos das próprias curvas de nível.

Para melhorar a avaliação da performance dos modelos foram utilizadas as discrepâncias encontradas para o cálculo de outros índices estatísticos descritos nas Tabelas 12 e 13.

Observando-se a Tabela 12, o interpolador *Topo to Raster 2* apresentou-se superior em todos os índices calculados. Destacando-se com o menor IRN e com o maior valor de TER e d: 0,110, 1771,438m e 0,973, respectivamente para os pontos de campo.

Comparando o valor de TER do *Topo to Raster 2* com os demais interpoladores, percebe-se que o modelo variou menos sobre os valores reais.

O coeficiente de correlação calculado foi semelhante ao indicado pelo ajuste linear no diagrama de dispersão, de 0,86.

Todos os métodos de interpolação apresentaram-se com desempenho “Muito Bom”.

Tabela 12 – Índices estatísticos calculados para análise do desempenho dos interpoladores utilizados na geração dos MDEHC (IBGE) com os pontos de controle coletados em campo

<b>Estatística\Modelos</b>	<b>ldw1</b>	<b>krq1</b>	<b>krq2</b>	<b>Spline1</b>	<b>Spline2</b>	<b>SplineB</b>	<b>Tin1</b>	<b>Tin2</b>	<b>Topo1</b>	<b>Topo2</b>
TER	1869,190	2118,110	2108,910	2184,040	2270,000	2019,220	2020,810	2040,860	2041,360	1771,430
MEE	18,692	21,181	21,089	21,840	22,700	20,192	20,208	20,409	20,414	17,714
VARIANCIA	521,559	487,487	486,397	482,080	493,745	464,972	463,724	484,080	463,577	390,936
DESVPAD	22,838	22,079	22,054	21,956	22,220	21,563	21,534	22,002	21,531	19,772
IRN	0,116	0,131	0,130	0,135	0,140	0,125	0,125	0,126	0,126	0,110
Coef. correlação calculado (r)	0,818	0,836	0,836	0,841	0,840	0,849	0,844	0,837	0,847	0,867
Índ. de concordância (d)	0,965	0,965	0,965	0,964	0,963	0,967	0,968	0,966	0,967	0,973
Índ. de confiança calculado (c)	0,790	0,806	0,806	0,810	0,808	0,821	0,817	0,808	0,819	0,844
Análise desempenho (c)	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
Coef. de eficiência ajustado(E')	0,660	0,614	0,616	0,602	0,587	0,632	0,632	0,628	0,628	0,677
Erro absoluto médio (EMA)	18,692	21,181	21,089	21,840	22,700	20,192	20,208	20,409	20,414	17,714
Erro quadrático médio (EMQ)	568,801	636,844	633,344	662,870	703,345	593,130	573,483	597,505	593,688	458,121
Raiz do erro quadr. Médio (REMQ)	23,850	25,236	25,166	25,746	26,521	24,354	23,948	24,444	24,366	21,404
Erro médio percentual (EMP)	11,626	13,448	13,372	13,937	14,612	13,003	12,915	12,994	13,064	11,062

n = 45 pontos



Tabela 13 – Índices estatísticos calculados para análise do desempenho dos interpoladores utilizados na geração dos MDEHC (IBGE) com os pontos de controle subtraídos das curvas de nível (pontos de teste)

<b>Estatística\Modelos</b>	<b>ldw1</b>	<b>kr1</b>	<b>kr2</b>	<b>Spline1</b>	<b>Spline2</b>	<b>SplineB</b>	<b>Tin1</b>	<b>Tin2</b>	<b>Topo1</b>	<b>Topo2</b>
TER	353,6188	337,4527	336,3542	368,1990	399,3326	386,0749	313,5158	316,2927	332,3990	176,3429
MEE	7,8582	7,4989	7,4745	8,1822	8,8741	8,5794	6,9670	7,0287	7,3866	3,9187
VARIANCIA	109,0654	117,1121	116,3675	145,2668	168,6022	168,9995	126,8545	104,4377	120,8935	33,9409
DESVPAD	10,4434	10,8218	10,7874	12,0527	12,9847	13,0000	11,2630	10,2195	10,9952	5,8259
IRN	0,0253	0,0241	0,0240	0,0263	0,0285	0,0276	0,0224	0,0226	0,0237	0,0126
Coef. Correlação calculado (r)	0,9970	0,9968	0,9968	0,9959	0,9953	0,9950	0,9963	0,9970	0,9965	0,9990
Índice de concordância (d)	0,9989	0,9987	0,9987	0,9984	0,9981	0,9981	0,9987	0,9987	0,9987	0,9996
Índice de confiança calculado (c)	0,9959	0,9955	0,9955	0,9943	0,9934	0,9932	0,9950	0,9957	0,9952	0,9986
Análise desempenho (c)	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Coeficiente de eficiência ajustado(E')	0,9390	0,9418	0,9420	0,9365	0,9311	0,9334	0,9459	0,9455	0,9427	0,9696
Erro absoluto médio (EMA)	7,8582	7,4989	7,4745	8,1822	8,8741	8,5794	6,9670	7,0287	7,3866	3,9187
Erro quadrático médio (EMQ)	122,5914	146,3495	145,3375	184,5806	215,7008	213,7489	148,8793	144,3798	150,9664	42,9554
Raiz do erro quadr. Médio (REMQ)	11,0721	12,0975	12,0556	13,5860	14,6868	14,6202	12,2016	12,0158	12,2868	6,5540
Erro médio percentual (EMP)	3,2176	3,1052	3,0958	3,3197	3,5929	3,4940	2,8018	2,8687	2,9698	1,5195

n = 45 pontos

Para os 45 pontos de teste houve um destaque expressivo, para o interpolador *Topo to Raster 2*, em todos os índices quando comparados aos dados coletados em campo para o mesmo interpolador. Confirmando os resultados apresentados pelos diagramas acima (Figuras 37 e 38), os quais indicam o interpolador *Topo to Raster 2* como o mais adequado para a predição de valores de altitude na área em estudo.

O valor do MEE, o IRN e o REMQ foram de 17,714 m e 3,9187 m, 0,110 e 0,0126, e 21,404 m e 6,5540 m para os dados de campo e os pontos de teste, respectivamente.

Além disso, os pontos de teste apresentaram desempenho “Ótimo”, de acordo o critério definido por Camargo e Sentelhas (1997), ou seja, superior à análise com os pontos de campo.

O resultados menos satisfatórios foram encontrados para o interpolador *Spline 2* para os dois tipos de pontos de controle. Dos seus 14 índices calculados apenas 4 (variância, desvio padrão, coeficiente de correlação calculado e o índice de confiança calculado) tiveram resultados com menor performance com o interpolador IDW1 para os dados de campo; e apenas as análises de variância e o desvio padrão foram inferiores em desempenho com o interpolador *Spline B* para os 45 pontos de teste.

Esse resultado também foi encontrado por Pires et al., (2005) quando compararam o comportamento entre os interpoladores IDW e *Spline* com o TOPOGRID (e suas variações) constatando menor desempenho para o *Spline*.

As diferenças entre os resultados encontrados sugerem que as curvas de nível podem estar representando o relevo com alguma deficiência. Para ter certeza da consistência dos dados gerados e analisados foram avaliados, também, os mesmos pontos de controle de campo com os modelos provenientes dos dados de SRTM, uma vez que estes são gerados por radares que fazem a varredura de toda a superfície.

#### 5.5.1.2. Base de dados do SRTM

Foram executados, sobre a base de dados do SRTM, os mesmos procedimentos de análise dos MDE gerados pelos diferentes interpoladores.

O grau de ajuste dos modelos foi verificado por meio do coeficiente de determinação  $R^2$ , mostrando o quanto o modelo de regressão explica a variabilidade total da variável em estudo.

No diagrama de dispersão entre as altitudes dos modelos e as observadas em campo (Figura 39) observa-se que todos os modelos apresentaram  $R^2$  superior a 0,9, todos os métodos foram significativos ( $P < 0,0001$ ) ao nível de 95% de significância, sendo que o *Topo to Raster 2*, novamente, se sobressaiu com um  $R^2$  de 0,9265.

Esse resultado, apesar de suave, é superior ao apresentado pelo mesmo interpolador sobre a base de dados do IBGE quando comparado aos mesmos dados coletados em campo, onde se obteve um  $R^2$  de 0,8671.

Na Tabela 14 encontram-se as estatísticas calculadas para a base de dados SRTM para os diferentes tipos de interpolador. Observa-se que para todos os índices o interpolador *Topo to Raster 2* apresentou resultados mais satisfatórios, igualando-se no IRN e E' com o *Spline B*, o qual também utilizou parâmetros de barreira no momento da geração do MDE.

O IDW1 foi o método com o menor rendimento em todos os seus índices estatísticos para a área amostrada.

Comparando os resultados das análises somente do *Topo to Raster 2* do IBGE e do SRTM com os dados coletados em campo, observa-se que o segundo foi ligeiramente superior em todos os índices analisados (Tabela 15), ou seja, apresentou os menores valores para TER, MEE, variância, desvio padrão, IRN, EMA, EMQ, REMQ e EMP e, maiores valores para o r, d, c e E'.

Esse resultado confirma a indicação de diversos autores na utilização dos dados SRTM para obtenção de valores altimétricos do relevo. Preservando as informações originais da área em estudo (MANTELLI et al., 2009; SCHIETTI et al., 2007).

Nas áreas onde não se dispõe de cartas planialtimétricas em escala compatível com as exigências da análise ambiental para o planejamento municipal e/ou regional, este estudo assim como Duarte et al., (2007) recomenda o uso do SRTM interpolado, por ser mais fiel à realidade de campo.

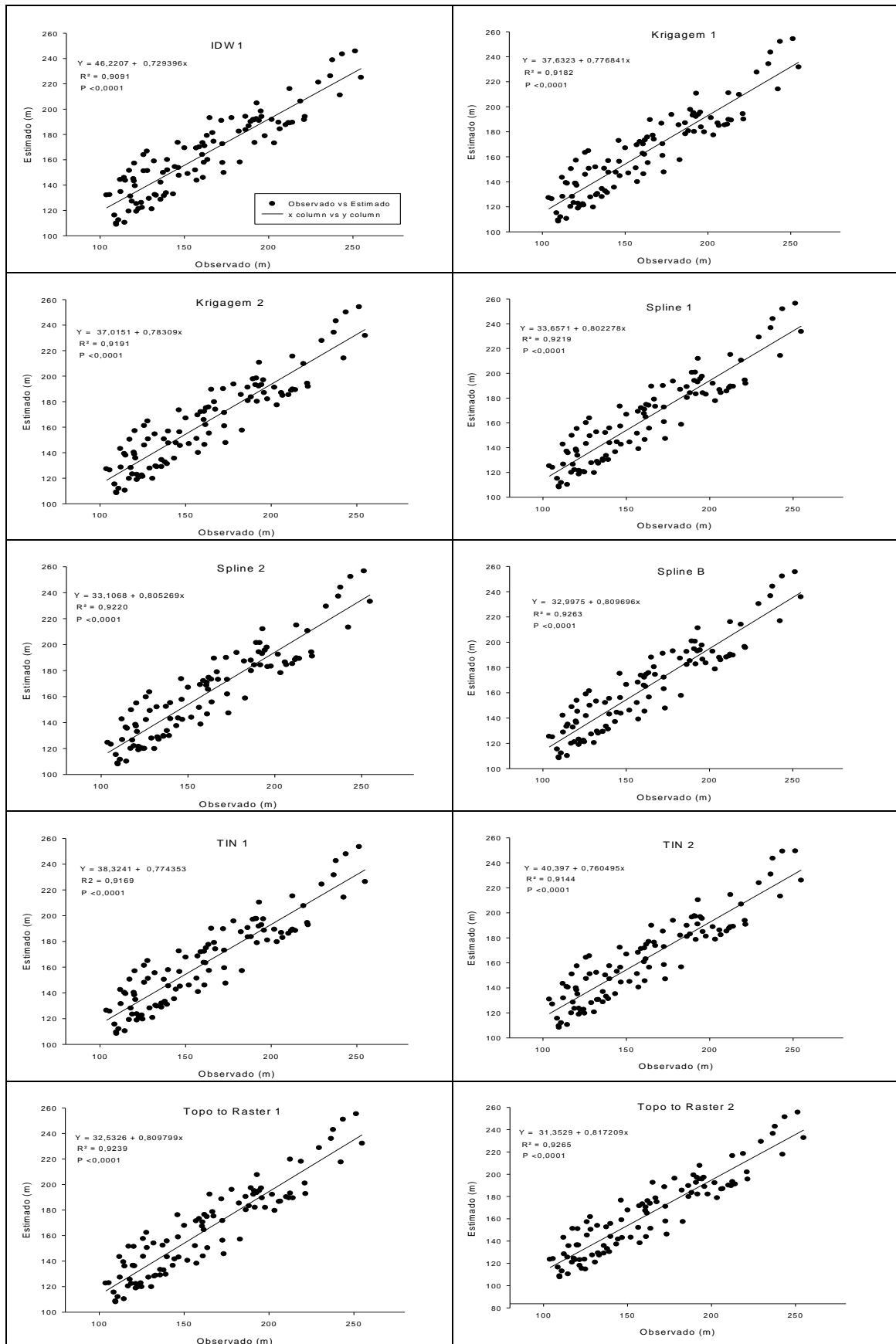


Figura 39 – Diagrama de dispersão entre as altitudes interpoladas e as de referência coletadas em campo para os dados SRTM.

Tabela 14 – Índices estatísticos calculados para análise do desempenho dos interpoladores utilizados na geração dos MDE (SRTM) com os pontos de controle coletados em campo

Estatística\Modelos	SRTM 100									
	ldw1	krig1	krig2	Spline1	Spline2	SplineB	Tin1	Tin2	Topo1	Topo2
TER	1324,049	1248,658	1253,899	1232,018	1232,168	1209,793	1273,352	1288,294	1219,923	1209,294
MEE	13,2405	12,4866	12,5390	12,3202	12,3217	12,0979	12,7335	12,8829	12,1992	12,0929
VARIANCIA	291,2943	255,1523	251,6108	240,5921	239,7548	227,8336	259,0268	268,8930	233,9777	226,1116
DESVPAD	17,0673	15,9735	15,8622	15,5110	15,4840	15,0942	16,0943	16,3980	15,2963	15,0370
IRN	0,0819	0,0772	0,0775	0,0762	0,0762	0,0748	0,0787	0,0797	0,0754	0,0748
Coef. Correlação calculado (r)	0,9091	0,9182	0,9191	0,9219	0,9220	0,9263	0,9169	0,9144	0,9239	0,9265
Índice de concordância (d)	0,9795	0,9828	0,9829	0,9839	0,9840	0,9845	0,9824	0,9817	0,9843	0,9849
Índice de confiança calculado (c)	0,8905	0,9025	0,9034	0,9070	0,9072	0,9119	0,9008	0,8977	0,9094	0,9125
Análise desempenho (c)	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Coeficiente de eficiência ajustado (E')	0,7589	0,7727	0,7717	0,7757	0,7757	0,7798	0,7682	0,7655	0,7779	0,7798
Erro absoluto médio (EMA)	13,2405	12,4866	12,5390	12,3202	12,3217	12,0979	12,7335	12,8829	12,1992	12,0929
Erro quadrático médio (EMQ)	294,4039	254,9702	252,8302	241,0023	239,9544	230,4766	259,7808	268,9599	234,7711	227,0507
Raiz do erro quadr. Médio (REMQ)	17,1582	15,9678	15,9006	15,5242	15,4905	15,1815	16,1177	16,4000	15,3222	15,0682
TER	8,8100	8,1906	8,2335	8,0422	8,0256	7,9538	8,3405	8,4472	8,0202	7,9564

Tabela 15 – Índices estatísticos para o interpolador *Topo to Raster* na geração de MDE utilizando a base de dados do IBGE e SRTM, comparados com os dados de campo

Estatística \ Modelo	<i>Topo to Raster 2</i>	
	IBGE	SRTM
TER	1771,438	1209,2942
MEE	17,714	12,0929
VARIANCIA	390,936	226,1116
DESVPAD	19,772	15,0370
IRN	0,110	0,0748
Coef. Correlação calculado (r)	0,867	0,9265
Índice de concordância (d)	0,973	0,9849
Índice de confiança calculado (c)	0,844	0,9125
Análise desempenho (c)	Muito Bom	Ótimo
Coef. de eficiência ajustado(E')	0,677	0,7798
Erro absoluto médio (EMA)	17,714	12,0929
Erro quadrático médio (EMQ)	458,121	227,0507
Raiz do erro quadr. Médio (REMQ)	21,404	15,0682
Erro médio percentual (EMP)	11,062	7,9564

De acordo com Camargo e Sentelhas (1997), todos os métodos de interpolação e base de dados apresentaram como o método mais exato e preciso o *Topo to Raster 2*, por meio da avaliação do coeficiente de correlação (r) e índice de concordância (c). Onde seus valores alcançam resultados próximo de 1, ou seja, melhor performance (correlação perfeita).

Entretanto, como demonstrados anteriormente com as análises das hidrografias numéricas geradas pelo SRTM, esse banco de dados para a área em estudo não assumiu condição ideal para representação de características hidrológicas. Porém, para obtenção de valores altimétricos os resultados mais satisfatórios foram os MDE gerados pela reinterpolação dos dados SRTM por meio do *Topo to Raster 2* (Tabela 15).

Para melhorar as análises entre os dados do MDEHC (IBGE) foram aplicados análises de Exatidão, Precisão e Tendência para averiguar a confiabilidade dos dados altimétricos desses modelos.

### 5.5.1.3. Análise de Exatidão, Precisão e Tendência dos MDE

Indicado por Santos et al., (2008), aplicou-se as análises estatísticas de exatidão (acurácia), precisão e tendência, adotando como padrão as Instruções

Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (BRASIL, 1984). Na Tabela 16 constam os parâmetros utilizados listados na seguinte sequência: número de dados da amostra (n), grau de Liberdade (G.L), intervalo de Confiança (I.C.), teste *t* de *student* tabelado ( $t_{\alpha}$ ), erro máximo admissível em acurácia (X), erro máximo admissível em precisão ( $\sigma$ ) e teste Qui-quadrado tabelado ( $X^2_{1-\alpha}$ ) para os dados de campo e os pontos de teste.

Tabela 16 – Parâmetros estatísticos para análise de exatidão, precisão e tendência

Parâmetros estatísticos	Resultados
N	100
	45
G.L.	99
	44
I.C.	90%
$T_{\alpha}$	1,29
	1,301
$X(\text{PEC}) = \mu_0$	A (10 m)
	B (12 m)
	C (15 m)
$\sigma = \text{EM admissível}$	A (6,66 m)
	B (8 m)
	C (10 m)
$X^2_{1-\alpha}$	82,358
	33,37

Os parâmetros calculados e apresentados na Tabela 17 estão listados na seguinte sequência: média das discrepâncias; desvio padrão das discrepâncias; média populacional estimada ( $\mu$ ); teste *t* de *student* calculado ( $t_c$ ); classe de exatidão A (10 m), B (12 m) e C (15 m); teste Qui-quadrado calculado ( $X^2_c$ ); classe de precisão A (6,66 m), B (8 m), C (10 m) e teste *t* calculado para análise de tendência ( $t_c$ ).

Na análise dos MDEHC (IBGE) comparados com os dados coletados em campo (Tabela 17), o valor do teste *t* calculado foi menor do que o teste *t* tabelado apenas para os interpoladores IDW1 e *Topo to Raster 2* para um erro máximo admissível em acurácia de 12 m correspondendo ao PEC classe B (3/5 da equidistância entre as curvas de nível). Portanto, foi rejeitada a hipótese nula e aceita a hipótese experimental significando que a média populacional foi

estatisticamente menor ou igual ao erro máximo admissível em acurácia (classe B), ao nível de confiança de 90% para a área amostrada.

Para os demais interpoladores, as médias populacionais foram estatisticamente maiores do que o máximo admissível em acurácia não pertencendo a nenhuma classe de exatidão.

Por essa análise, os demais interpoladores são inviabilizados para fornecimento de dados de altitude próximos à realidade.



Tabela 17 – Parâmetros estatísticos de exatidão, precisão e tendência para os MDEHC (IBGE) comparados com os dados de campo

<b>Estatística \ Modelos</b>	<b>ldw1</b>	<b>krq1</b>	<b>krq2</b>	<b>Spline1</b>	<b>Spline2</b>	<b>SplineB</b>	<b>Tin1</b>	<b>Tin2</b>	<b>Topo1</b>	<b>Topo2</b>
Média	7,243	12,419	12,321	13,624	14,647	11,524	10,696	10,875	11,608	8,432
Desvio Padrão	22,838	22,079	22,054	21,956	22,220	21,563	21,534	22,002	21,531	19,772
<b>EXATIDÃO</b>										
$\mu$	10,1888	15,2672	15,1662	16,4563	17,5135	14,3059	13,4735	13,7133	14,3855	10,1888
tc	-2,0830	-1,1689	-1,2146	-0,6267	-0,1588	-0,2206	-0,6057	-0,5113	-0,1820	-1,8047
Classe de Exatidão	B	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	B
<b>PRECISÃO</b>										
X <sup>2</sup> c	34,1189	32,9856	32,9487	32,8022	33,1967	32,2149	32,1716	32,8702	32,1665	29,539
Classe de precisão	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
<b>TENDÊNCIA</b>										
tc	3,1714	5,6247	5,5867	6,2050	6,5917	5,3444	4,9667	4,9428	5,3913	4,2644

Com relação à análise de precisão, o valor de  $X^2$  calculado ( $X^2_c$ ) foi menor do que o valor de  $X^2$  Tabelado ( $X^2_{1-\alpha}$ ). Dessa forma, foi rejeitada a hipótese nula e aceita a hipótese experimental significando que o desvio padrão populacional para a área amostrada foi estatisticamente menor ou igual ao erro máximo admissível em precisão, ao nível de confiança de 90%. Todos os interpoladores assumiram classe A (1/3 da equidistância entre as curvas de nível) de precisão de acordo com o PEC.

Os valores do teste  $t$  de *student* calculado para análise de tendência não estão dentro dos limites aceitáveis para aceitar a hipótese nula, ou seja, todos os modelos gerados possuem tendência em seus dados.

Quando os modelos possuem tendência, seu efeito pode ser minimizado, pela subtração do valor de tendência conhecido a cada coordenada do modelo (NOGUEIRA Jr, 2003; GALO; CAMARGO, 1994).

Essas análises não foram aplicadas sobre os modelos gerados pelo SRTM uma vez que o PEC refere-se às equidistâncias entre curvas de nível, ou seja, aplica-se sobre interpolação de curvas de nível e sua validação com pontos coletados em campo. Para os pontos de teste também não foram aplicadas as referidas análises uma vez que esses pontos não foram obtidos em campo e sim das próprias curvas de nível (IBGE).

Mais uma vez, as análises para a região amostrada com os dados de campo indicaram o Interpolador *Topo to Raster 2* como o mais exato e preciso, apesar de sua exatidão ter sido classificada como Classe B.

Isso demonstra que, quando há a necessidade de utilizar as curvas de nível como base de dados deve-se utilizar o interpolador *Topo to Raster 2* a fim de se alcançar resultados mais próximos da realidade.

Entretanto, as fontes de erro apresentadas fazem com que, na prática, não exista um MDE que represente fielmente uma superfície topográfica.

Assim como Santos et al., (2008), o que se busca não é um MDE isento de erros, e sim , que minimize os erros sistemáticos envolvidos no processo de geração do modelo.

Os resultados obtidos nesse estudo estão de acordo com encontrados no trabalhos realizados por Pires et al., (2005), Barragán, (2002) e Álvares et al., (2001) objetivando avaliar a qualidade de diferentes métodos de interpolação, classificando o *Topo to Raster 2* como o método de interpolação

mais apropriado para obtenção de modelos digitais de elevação. Esses autores afirmam ainda que esse método de interpolação proporciona uma superior exatidão hidrológica.

Já que foi constatado pelas diversas análises que o MDEHC (IBGE) pelo *Topo to Raster 2* possui bons resultados tanto na definição da rede de drenagem quanto na comparação com dados de campo, foi extraído desse modelo as características fisiográficas da área de estudo.

Fortalecendo os resultados anteriores, vale lembrar que os resultados do MDE (SRTM) pelo *Topo to Raster 2* foi excelente para extrair dados altimétricos muito próximos à realidade, porém não foram bons para a extração da drenagem. Por isso, não foram obtidos, nesse estudo, as características fisiográficas com essa base de dados e esse interpolador.

Cherem, Magalhães e Faria (2009) confirmam esse resultado e afirmam que a utilização da rede de drenagem gerada a partir de dados SRTM, deve ser feita com parcimônia, pois não representa a melhor fonte de dados para realizar análises quantitativas da paisagem. Esses dados tendem a reduzir a sinuosidade dos canais fluviais de pequena e média ordem e, devido a problemas do próprio MDE original, compor redes de drenagens com arranjo espacial que se diferencia marcadamente do observado nas cartas topográficas.

## 5.6. CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO HIRIZONTE

A Tabela 18 contém os valores obtidos para a caracterização fisiográfica da sub-bacia hidrográfica estudada.

A sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte pode ser classificada como uma unidade pequena, pois sua área de drenagem e perímetro foi de 13,17 km<sup>2</sup> e 20 km, respectivamente, e desse modo, com boas possibilidades de controle dos fatores hidrológicos que ali interferem.

Tabela 18 - Características da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES

<b>Características Fisiográficas</b>	<b>Valores</b>
Área (A)	13,17 km <sup>2</sup>
Perímetro (P)	20 km
Fator de Forma (Kf)	0,24
Índice de Compacidade (Kc)	1,55
Ordem da Sub-bacia e dos cursos d'água	3
Comprimento total dos canais	21,64 km
Densidade de Drenagem (DD)	1,64 km/km <sup>2</sup>
Padrão de Drenagem	Dendrítico
Extensão do Percurso Superficial (Eps)	0,30 km
Altitude máxima	681,58 m
Altitude média	291,39 m
Altitude mínima	98,59 m
Amplitude Altimétrica (H)	582,99 m
Declividade mínima	0,0%
Declividade Média (S)	31,37%
Declividade máxima	214,99%

A forma da sub-bacia é determinada por índices que relacionam com formas geométricas conhecidas, como o fator de forma (Kf) e coeficiente de compacidade (Kc). A forma superficial de uma sub-bacia hidrográfica é importante na determinação do tempo de concentração, ou seja, o tempo necessário para que toda a sub-bacia contribua para a sua saída após uma precipitação. Quanto maior o tempo de concentração, menor será a vazão máxima de enchente, se mantidas constantes as outras características (VILLELA; MATTOS, 1975; TONELLO, 2005).

Através dos parâmetros fisiográficos a sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte apresentou alto valor de coeficiente de compacidade (1,55) demonstrando que a sub-bacia é pouco sujeita a enchentes, já que a mesma apresenta forma alongada. Tal afirmação é confirmada pelo baixo valor do fator de forma em ambos os métodos (0,24). Com isso, pode-se concluir que o tempo de concentração da sub-bacia é grande.

A densidade de drenagem obtida foi de 1,64 km/km<sup>2</sup>. Verifica-se que de acordo com Villela e Mattos (1975) este índice pode variar de 0,5 km/km<sup>2</sup> para bacias com drenagem pobre a 3,5 km/km<sup>2</sup> ou mais para bacias

excepcionalmente bem drenadas, indicando, portanto, que a sub-bacia em estudo apresenta média capacidade de drenagem.

O cálculo da densidade de drenagem é importante, pois segundo Christofolletti (1980), a finalidade da densidade hidrográfica é de comparar a frequência ou a quantidade de cursos de água existentes em uma área de tamanho padrão.

O ordenamento dos canais pode ser visualizado na Figura 40. O sistema de drenagem, de acordo com a hierarquia de Sthraler (1957), apresenta grau de ramificação de terceira ordem. Observa-se que o movimento do rio principal se dá da direção Sudoeste para Nordeste da sub-bacia.

Ordem inferior ou igual a quatro é comum em pequenas bacias hidrográficas e reflete os efeitos diretos do uso da terra, considera-se que, quanto mais ramificada a rede, mais eficiente será o sistema de drenagem.

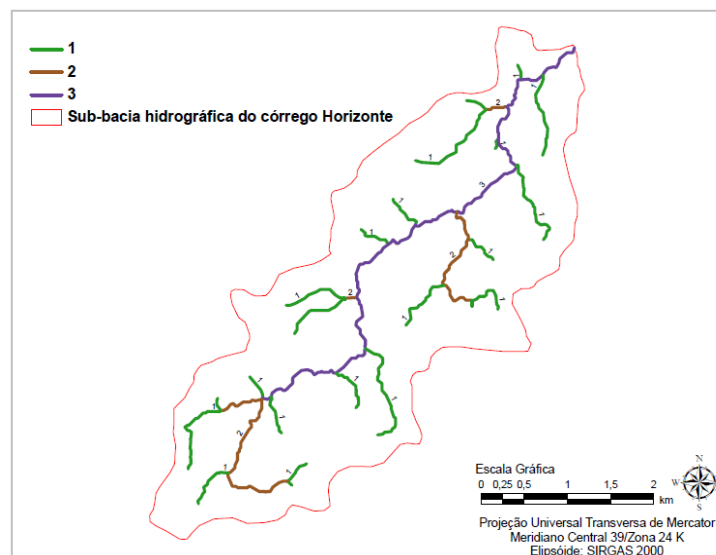


Figura 40 - Ordenamento dos cursos d'água, segundo Sthraler (1957), para a sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES.

O padrão formado pelos cursos d'água da sub-bacia caracteriza-se como do tipo dendrítico. Esse padrão ocorre em terras altas, nas quais o regolito e a rocha mãe oferecem uma resistência relativamente uniforme à erosão (SOARES, 2000).

A Figura 41 apresenta a variação altimétrica, para toda a sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte. Observa-se que a altitude varia de 98,58 a 681,58 metros. As quatro primeiras classe, que variam de 98,58 m a 271,66 m

compreendem cerca de 54,58% (101,75 km<sup>2</sup>) da área total da sub-bacia. Percebe-se uma rápida aproximação entre as classes na região média da sub-bacia, indicando um acentuado crescimento das altitudes em curto espaço. Isso pode ser verificado pelo mapa de declividade (Figura 42).

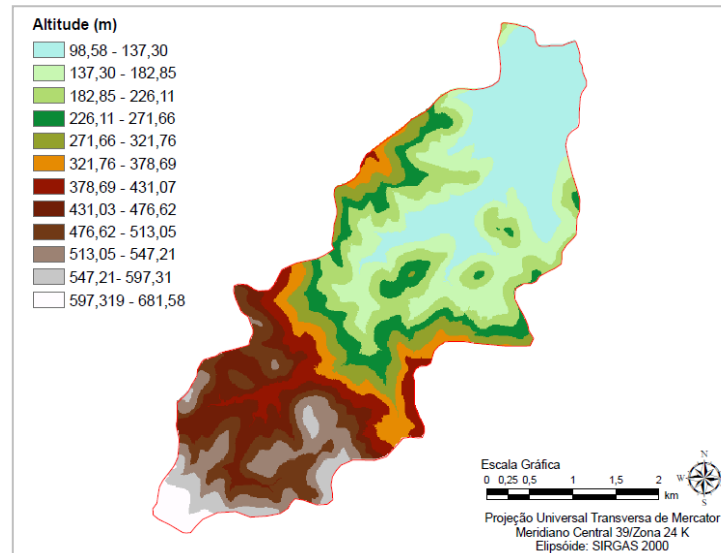


Figura 41 - Variação altimétrica determinada pelo MDEHC – *Topo to Raster 2* (IBGE), para a sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES.

Para Castro e Lopes (2001), em altitudes elevadas, a temperatura é baixa e apenas uma pequena quantidade de energia é utilizada para evaporar a água. Em altitudes baixas, quase toda a energia absorvida é usada para evaporar a água.

A declividade média de uma bacia hidrográfica influencia na distribuição da água entre o escoamento superficial e subterrâneo, dentre outros processos. A ausência de cobertura vegetal, a classe de solo, a intensidade de chuvas, dentre outros, associada à maior declividade, conduzirá à maior velocidade de escoamento, menor quantidade de água armazenada no solo e resultará em enchentes mais pronunciadas, sujeitando a bacia à degradação.

Assim, a magnitude dos picos de enchentes ou a menor oportunidade de infiltração e suscetibilidade à erosão dos solos dependem da rapidez com que ocorre o escoamento superficial, que está fortemente relacionado com o relevo e com o manejo e uso do solo.

As características de declividade do terreno podem ser observadas na Figura 42, sendo que a área em estudo apresenta declividade média de 31,37%, ou seja, possui um relevo fortemente ondulado (EMBRAPA, 1979).

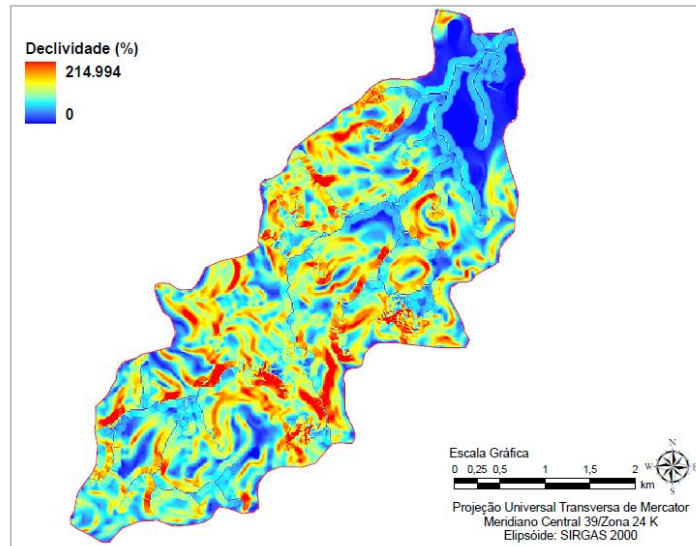


Figura 42 - Mapa de declividade da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES, obtido por meio do MDEHC - *Topo to Raster 2* (IBGE).

A declividade, dentre outros fatores, é relevante no planejamento, tanto para o cumprimento da legislação quanto para garantir a eficiência das intervenções do homem no meio (ROMANOVSKI, 2001).

No estudo da delimitação das áreas de preservação permanentes é importantíssimo a correta indicação de declividade, uma vez que áreas acima de 45° ou 100% de inclinação estão protegidas por lei. Então, um MDE obtido inadequadamente poderá indicar valores incorretos e conseqüentemente, erros na aplicação da lei.

Para ter uma idéia da importância de se extrair as características de uma bacia utilizando o MDE mais ajustado à realidade aplicou-se somente o cálculo de declividade sobre o modelo menos apropriado (*Spline 2*), encontrado nesse estudo, para a geração de MDE sobre a base de dados do IBGE. Constatou-se que a declividade média alcançada foi de 44,22% (Figura 43), ou seja, superior ao encontrado anteriormente. Parece bom, ao se pensar na questão da conservação dos recursos naturais, uma vez que a legislação poderia ser aplicada mais rigorosamente, por possuir um maior número de áreas com declividade superior ao encontrado pelo modelo anterior podendo

ser visualizado por meio do perfil topográfico para esses dois modelos (Figura 44). Entretanto, vale lembrar que essa é uma medida que não condiz com a realidade. Portanto, seu uso deve ser evitado.

Observa-se também que houve variação na declividade máxima, sendo menor com o interpolador *Spline 2*.

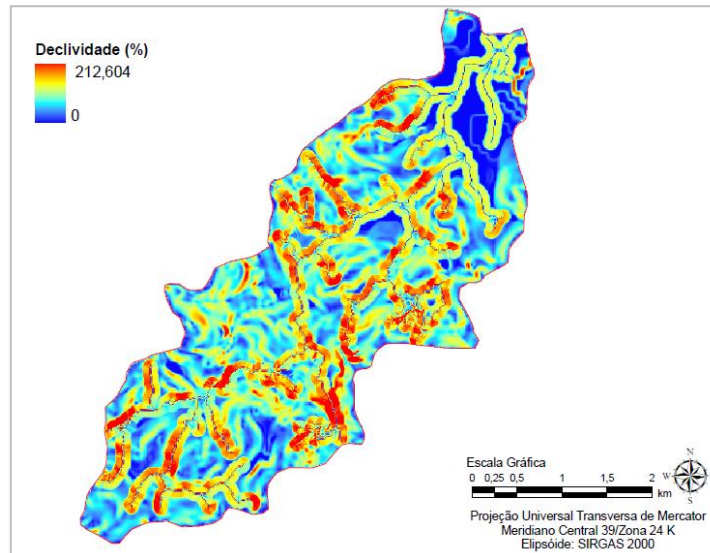


Figura 43 - Mapa de declividade da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES, obtido por meio do MDEHC - *Spline 2* (IBGE).

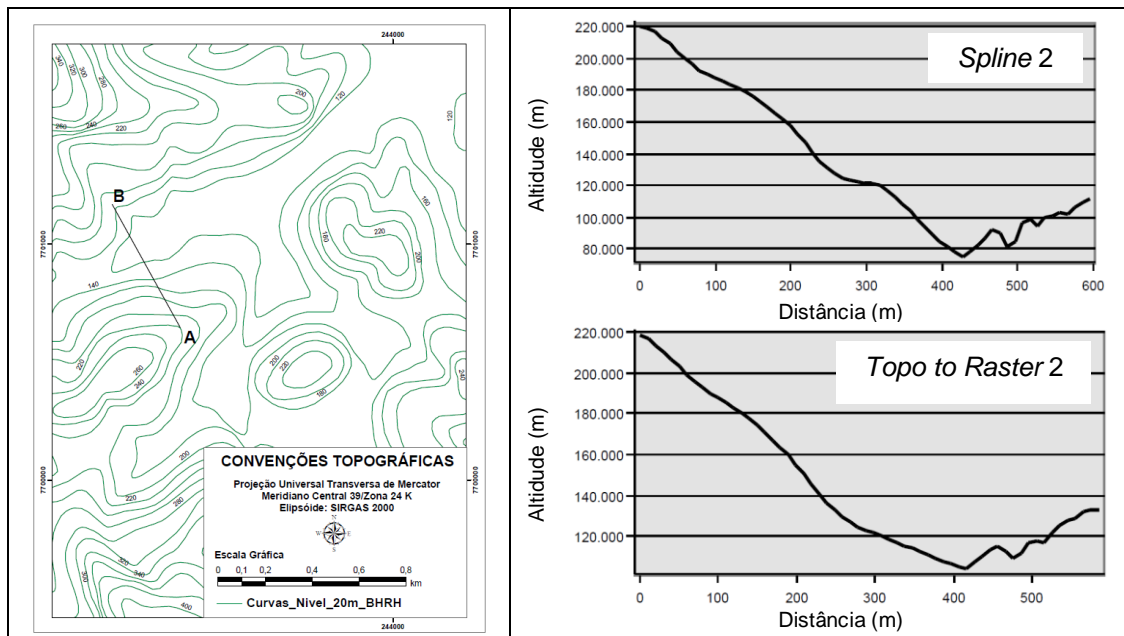


Figura 44 – Perfil topográfico entre os pontos A e B obtido por meio do MDEHC *Spline 2* e *Topo to Raster 2*.



Retornando às análises fisiográficas da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, nota-se que a direção de escoamento é outro fator muito importante, visto que cada célula assume um valor para o qual o escoamento superficial seguirá, considerando apenas uma das oito direções possíveis de escoamento – Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste.

Com esse arquivo de direção de escoamento estabelece-se, na ausência de depressões naturais ou espúrias, a conectividade entre cada uma das células, de forma a permitir, em conjunto com o arquivo de fluxo acumulado, a extração da drenagem numérica.

As características da direção de escoamento para o interpolador *Topo to Raster 2* podem ser observadas pela Figura 45.

A direção de escoamento distribui-se bem para todas as direções com exceção das direções 4 e 8, Sul e Sudoeste, respectivamente (Tabela 19).

Tabela 19 – Distribuição das direções de escoamento na superfície da área da sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES

<b>Direção de escoamento</b>	<b>% da área</b>
1 (E)	15,83
2 (SE)	11,80
4 (S)	8,30
8 (SO)	6,44
16 (O)	10,69
32 (NO)	13,34
64 (N)	16,45
128 (NE)	17,15

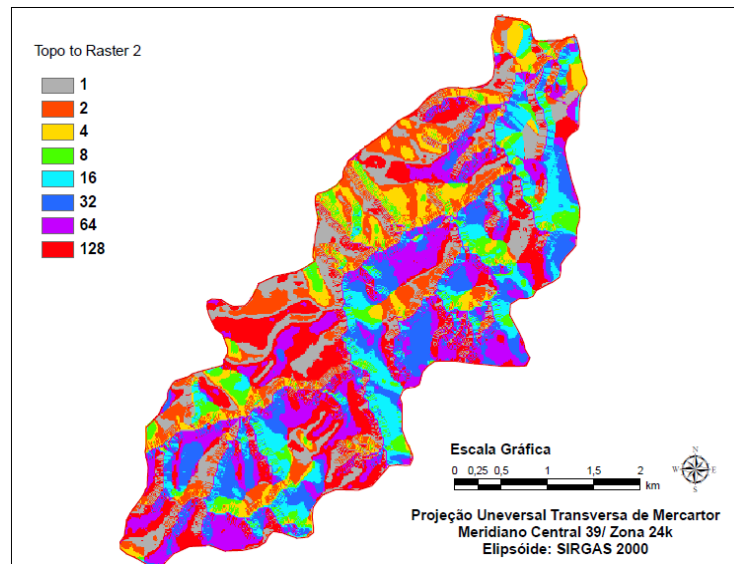


Figura 45 – Direção de escoamento para a sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES, obtido por meio do MDEHC - *Topo to Raster 2* (IBGE).

O fluxo acumulado obtido para a área em estudo por ser observado pela Figura 46.

Para determinação da drenagem numérica utilizou-se um limiar referente a área acumulada máxima da hidrografia. Esse limiar influencia o grau de densidade da drenagem numérica. O valor recomendado por Fan et al., (2010) é de 1% da área acumulada máxima, ou seja, foi utilizado um limiar de 1281 células para obtenção da hidrografia numérica (Figura 47). Contudo, qualquer outro valor de limiar poderia ser selecionado. Um valor menor de limiar iria resultar em uma rede de drenagem mais densa.

O valor do fluxo acumulado torna-se maior ao longo de cada célula do caminho do escoamento preferencial mostrando a direção do escoamento preferencial de Sudoeste (SO) para Nordeste (NE). Esse resultado explica a porcentagem de células da análise de direção de escoamento, com os menores valores de direção para SO e maiores para NE.

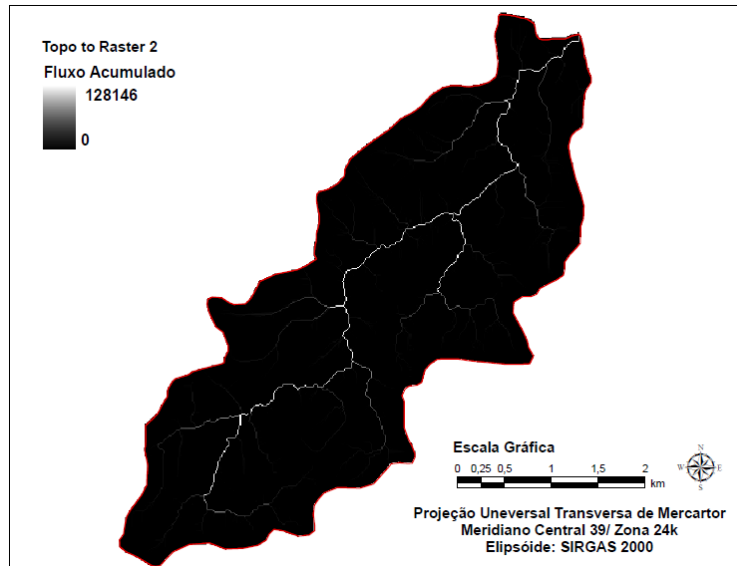


Figura 46 – Fluxo acumulado para a sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre – ES obtido por meio do MDEHC - *Topo to Raster 2* (IBGE).

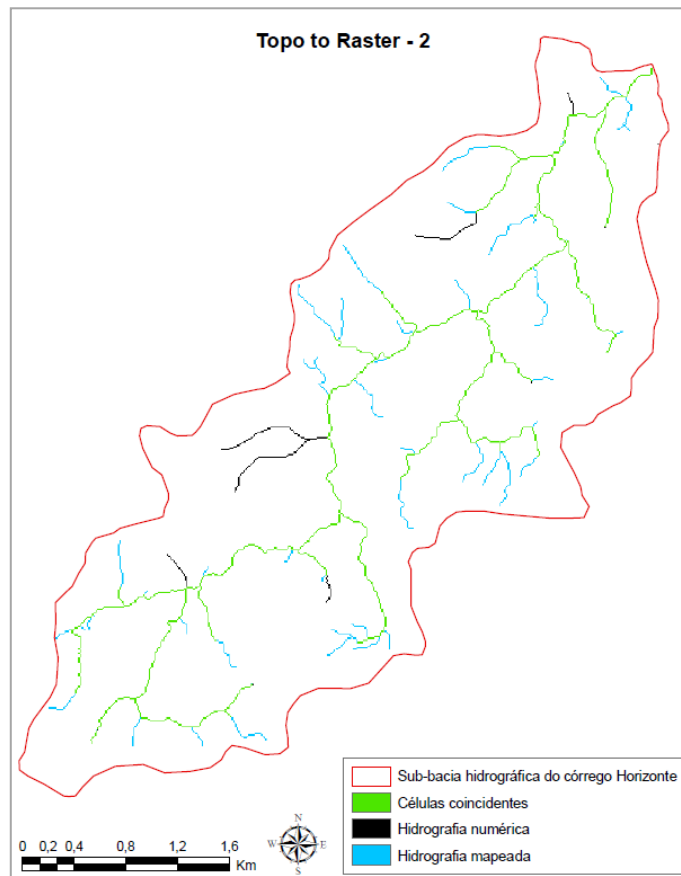


Figura 47 – Hidrografia numérica (preto), obtida com um limiar de 1% do valor máximo de fluxo acumulado, e sua comparação (verde) com a hidrografia mapeada (azul).

## 6. CONCLUSÕES

Nas condições em que os estudos foram conduzidos, a análise dos resultados permitiu concluir que o maior número de depressões espúrias está associado ao pior desempenho dos modelos, tornando-se essencial a aplicação das técnicas de *stream burning* para melhoria da coincidência espacial das hidrografias (numérica e mapeada), já que os modelos gerados sem as técnicas de pós-processamento são inadequados para análises hidrológicas, porém as análises com os MDE gerados com os dados SRTM indicaram melhores resultados para extração de valores altimétricos.

Além disso, as análises com os dados de campo amostrados na região inferior da área de estudo indicou o interpolador *Topo to Raster 2* como o mais exato e preciso. Entretanto, as análises utilizando pontos de teste extraídos da base de dados iniciais apresentaram resultados superiores aos dados coletados em campo, sendo que os interpoladores menos indicados para geração de MDEHC (IBGE) e MDE (SRTM) foram o *Spline 2* e *IDW 1*.

Constatou-se pelas diversas análises que o interpolador *Topo to Raster 2* é o indicado para a geração de MDEHC na sub-bacia hidrográfica do córrego Horizonte, Alegre, Espírito Santo.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, M. A. et al. Evaluación de diferentes técnicas de interpolación espacial para la generación de modelos digitales de elevación del terreno agrícola. **Mapping Interactivo**, n. 74, p. 72-92, 2001.

ÁLVARES, M. T. et al. **Monitorização Batimétrica em Albufeiras**. Lisboa:Tagus Park, 2001.

ASPIAZÚ, C.; BRITES, R. S. SIGs. **Sistemas de informações geográficas: conceituação e importância**. Viçosa: UFV/SIF. 1989.

ASSAD, E. D. et al. Zoneamento agroclimático para a cultura de café (*Coffea arabica* L.) no estado de Goiás e sudoeste do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 510-518, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BAENA, L. G. N. **Regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, a montante de Volta Redonda, a partir de modelo digital de elevação hidrológicamente consistente**. 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós Graduação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

BARBOSA, R. O. et al. Avaliação da aptidão agrícola dos solos da fazenda caixa d'água da escola Agrotécnica Federal de Alegre(EAFA) Distrito de Rive-município de Alegre-ES. **Plântula**: boletim informativo, v. 5, n. 1, 1992.

BARBOSA, J. P. M. Utilização de método de interpolação para análise e espacialização de dados climáticos: o sig como ferramenta. **Caminhos de geografia**, v. 9, n. 17, p. 85-96, 2006.

BARRAGÁN, J. M. et al. Análises de Calidad de Um Modelo Digital de levaciones Generado con Distintas Técnicas de Interpolación. In: Congreso Internacional de Ingenieria Gráfica, 14., 2002, Santander. **Anais...** Santander: INGEGRAF, 2002, p. 1-12.

BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. **Matas ciliares**: conservação e recuperação. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001. p. 187-207.

BERG, M. et al. **Computational Geometry Algorithms and Applications**. 2. ed. Springer-Verlag: Germany, 2000.

BRASIL. Decreto-lei nº 9.817, de 20 de julho de 1984. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 20 de jul. 1984.

BURROUGH, P. A. **Principals of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1998.

CALÇAVARA, R. A.; NASCIMENTO, K. A. Modelo Digital de Elevação da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES obtido através de krigagem de dados SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009, p. 7243-7250.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. **Otimização de interpolação espaciais para estimar chuva no Sistema Agritempo**. Campinas: EMBRAPA – Embrapa Informatica Agropecuaria, 2003.

CASTRO, P.; LOPES, J. D. S. **Recuperação e Conservação de nascentes**. Viçosa: CPT, 2001.

CASTRO, F. da S. **Zoneamento agroclimático para a cultura do pinus no Estado do Espírito Santo**. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia Agrícola) – Programa de Pós Graduação em Agrometeorologia Agrícola, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2008.

CECÍLIO, R. A. **Modelagem da infiltração da água no solo fundamentada na equação de green-ampt-mein-larson**. 2005. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

CECÍLIO, R. A. et al. Avaliação de interpoladores para os parâmetros das equações de chuvas intensas no Espírito Santo. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 82-92, 2009.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO ESPÍRITO SANTO. CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E AGRONOMIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. IBGE. INCRA. **Rede Geodésica no Espírito Santo: um marco na engenharia capixaba**. Vitória: Resplendor, 2005.

CHAVES, M. A. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica**. 2002. 113 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

CHEREM, L. F. S.; MAGALHÃES JR., A. P.; FARIA, S. D. Análise morfológica de rede de drenagem extraída de MDE-SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 7251-7258.

CHONG, S. K., GREEN, R. E., AHUJA, L. R. Infiltration prediction based on estimation of Green-Ampt wetting front pressure head from measurements of soil water redistribution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, n. 46, p. 235-239, 1982.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Editora Ltda e EDUSP, 1974.

\_\_\_\_\_. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley and Sons Inc, 1991.

DE BIASI, M. A. Carta clinográfica: Os métodos de representação e sua confecção. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 6, p. 45-60, 1992.

DOORNKAMP, J. C.; KING, C. A. M. **Numerical analysis in geomorphology: An introduction**. London: Edward Arnold Ltd., 1971.

DUARTE, G. G. F.; ASSAD, M. L. L. Avaliação de MDE obtidos por meio de SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 4849-4855.

EASTMAN, J. R. **IDRISI for Windows: User's guide**. Massachusetts: Clark University, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro. **Súmula...** Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979.

EMERY, W.; THOMSON, R. **Data Analysis in Physical Oceanography**. New York: Pergamon Press, 1997.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGis, versão 9.3:** Html help control. Califórnia: Redlands, 2010.

ERBA, D. A. et al. **Topografia:** para estudantes de arquitetura, engenharia e geologia. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2005.

FAN, F. M. et al. **Manual arc-hydro para aplicação do modelo MGB-IPH.** Versão 2.0. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

FELGUEIRAS, C. A. E.; GOODCHILD, M. F. **Two Papers on Triangulated Surface Modeling**. Santa Bárbara: University of California, 1995.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica de Terreno**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas – INPE, 2001.

FERNANDES, M. do C.; MENEZES, P. M. L. de. Comparação entre métodos para geração de mde para a Obtenção de observações em superfície real no maciço da Tijuca-RJ. **RBC - Revista Brasileira de Cartografia**, n. 57, v. 02, 2005. P. 164-161, 2005.

FURTADO, A. M. **Metodologia para extração de informações hidrológicas a partir de um modelo digital de elevação utilizando sistemas de informações geográficas**. 1998. 42 f. Monografia (Curso de Especialização em Geoprocessamento), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

GALO, M.; CAMARGO, P. De O. O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO. 1., 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1994, v. 2, p. 41-48.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. Paper 1 - Digital elevation model issues in water resources modeling. In: MAIDMENT, D.; DJOKIC, D. (Eds). **Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2000. p. 1-28.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ G. A. **Hidrologia**. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1998.

GAVA, G. J. C. et al. **Ciclo hidrológico**. 2004. Disponível em: <[http://www.maenatureza.org.br/projetoeducando/folders/poster13\\_ciclo\\_hidrologico/index.htm](http://www.maenatureza.org.br/projetoeducando/folders/poster13_ciclo_hidrologico/index.htm)>. Acesso em: 01 ago. 2010.

GERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1996. p. 337-339.

GISHYDRO WORKSHOP, Dallas, 1998. <<http://www.ce.utexas.edu>>. Acesso em: 17 mai. 2010.

GOLDENFUM, J.; TUCCI, C. E. M. **Hidrologia de águas superficiais**. Brasília: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior, 1998.

HORTON, R. E. Drainage Basin Characteristics. **Trans. American Geophysical Union**, v. 13, p. 350-361, 1932.

\_\_\_\_\_. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bull. Geol. Soc. Am.**, v. 56, p. 275-370, 1945.



HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, 106, 211-232, 1989.

\_\_\_\_\_. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE/WORKSHOP ON INTEGRATING GIS AND ENVIRONMENTAL MODELING, NATIONAL CENTER FOR GEOGRAPHIC INFORMATION AND ANALYSIS. 3., 1996, Santa Bárbara. **Proceedings...** Santa Bárbara: University of California, 1996. CD-ROM.

\_\_\_\_\_. Adding the Z dimension. In: WILSON, J. P.; FOTHERINGHAM, A.S. **The handbook of geographic information science**. 1. ed. Blackwell Publishing Ltd. 2008. p. 144-168.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapas de biomas e de vegetação**. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_visualiza.php?id\\_noticia=169](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=169)>. Acesso em: 01 ago. 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Climatologia**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima.php#>>. Acesso em: 23 ago. 2010.

KELLNDORFER, J. et al. Vegetation height estimation from Shuttle Topography Mission and National Elevation Datasets. **Remote sensing of Environment**, v. 93, p. 339-358, 2004.

KUMLER, M. P. An intensive comparison of triangulated irregular network (TINs) and digital elevation model (DEMs). **Cartographica**, v. 31, n. 2, 99p., 1994.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2003.

LEGATES, D. R.; McCABE JR., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LIMA, W. P. **Princípios de manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ/USP. 1976.

\_\_\_\_\_. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ, 1994.

LIMA, W. de P.; ZAKIA, M. J. B. **As florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento**. São Carlos: Ed. RiMA, 2006.

LUIZ, S.; SANTOS, A. R. S.; BRENNER, T. L. Geração de Modelo Digital de Elevação a partir de Imagens Reference Stereo do Satélite IKONOS. In:

- SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 581-587.
- MANTELLI, L. R. et al. Applying SRTM digital elevation model to unravel Quaternary drainage in forested areas of North eastern Amazonia. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 12, p. 2331–2337, 2009.
- MARK, D. M. Computer analysis of topography: a comparison of terrain storage methods. **Geografiska Annaler**, v. 57, n. 3-4, p. 179-188, 1975.
- MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. Numerical definition of network and subcatchment areas from digital elevation models. **Computers and Geosciences**, v. 18, n. 6, p. 747-761, 1992.
- MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. **Digital elevation model issues in water resources modeling**: Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems, ESRI Press, 2000.
- MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos. **Braz. J. Aquat. Sci. Technol.**, v. 13, n. 1, p. 53-64, 2009.
- MEIJERINK, A. M. J. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, Wageningen, v. 1988, n. 1, p. 23-44, 1988.
- MELLO, C. R. et al. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 27, n. 5, p. 925-933, 2003.
- MENDONÇA, G. S. et al. Uso de SIG no zoneamento agroecológico de pequena escala para *Araucaria angustifolia*, *Hymenaea courbaril* e *Myrcarpus frondosus* para a Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim – ES. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 1741-1748.
- MEYBECK, M. et al. **Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes**. UNEP/WHO, 1996.
- MIRANDA, E. E. **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 01 mai. 2010.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.
- MOORE, I. D. et al. GIS and land-surface subsurface process modeling. In: GOODECHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. **Environmental Modeling with GIS**. Oxford: New York, 1993, p. 196- 230.

MOREIRA, M. C. **gestão de recursos hídricos: sistema integrado para otimização da outorga de uso da água**. 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

MOSCA, A. A. O. **Caracterização hidrológica de duas microbacias visando à identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas**. 2003. 96 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Programa de Pós Graduação em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), Piracicaba, 2003.

NAMIKAWA, L. M. A method for triangular grid surface fitting using breaklines. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.30, n. 4, p. 362-368, 1994.

NAMIKAWA, L. M. et al. **Modelagem numérica de terreno e aplicações**. São José dos Campos: Deposited in the URLib collection, 2003.

NASCIMENTO, M. C. et al. Mapeamento dos fragmentos de vegetação florestal nativa da Bacia Hidrográfica do rio Alegre, Espírito Santo, a partir de imagens do satélite IKONOS II. **Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 389-398, 2006.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, I, A discussin of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.

NAGALLI, A.; NEMES, P. D. Estudo da qualidade de água de corpo receptor de efluentes líquidos industriais e domésticos. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 131-144, 2009.

NOGUEIRA JR., J. B. **Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos: Uma proposta metodológica**. 2003. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Presidente Prudente, 2003.

NOGUEIRA, J. D. de L.; AMARAL, R. F. do. Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros – RN. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, **Anais...** Natal: INPE, 2009, p. 4117-4123.

OLIVEIRA, G. B.; IMAI, N. **Interpoladores: modelos digitais do terreno: grades regulares e irregulares e suas características**. Presidente Prudente: UNESP, 2010.

PINHEIRO, E. S. Comparação entre dados altimétricos shuttle radar topography mission, cartas topográficas e gps: numa área com relevo escarpado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 1, p. 1-9, 2006.

PIRES, J. M. et al. Análise da Exatidão de Diferentes Métodos de Interpolação para Geração de Modelos Digitais de Elevação e Obtenção de Características Morfométricas em Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 2, p. 39-47, 2005.

PODOBNIKAR, T. **Suitable digital elevation model**. Institute of Anthropological and Spatial Studies. Scientific Research Centre of the Slovenian, Academy of Sciences and Arts.  
<<http://www.gisdevelopment.net/technology/tm/tm003.htm>>. Acesso em: 23 out. 2010.

RESCK, D. V. S. **Manejo e Conservação do Solo em Microbacias Hidrográficas**. Planaltina: Embrapa – CPAC, 1992.

RIBEIRO, C. A. A. S. et al. Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Amazônia Legal. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO CENTRO-OESTE, 2., 2002a, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABRH, 2002. CD-ROM.

RIBEIRO, C. A. A. S. **Modelos digitais hidrologicamente consistentes**. Viçosa: DEF/UFV, 2002.

\_\_\_\_\_. **Tópicos Avançados de Sistema de Informações Geográficas**. Viçosa, UFV, 2003.

RISSE, L. M.; NEARING, M. A.; ZHANG, X. C. Variability in Green-Ampt effective conductivity under fallow conditions. **Journal of Hydrology**, v. 169, p.1-24, 1995.

ROMANOVSKI, Z. **Morfologia e aspectos hidrológicos para fins de manejo da microbacia da Rua Nova, Viçosa-MG, para fins de manejo**. 2001. 99 f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. 3. ed. São Paulo: Contexto, 1996.

ROSSI, R. E.; DUNGAN, J. L.; BECK, L. R. Kriging in the shadows: geostatistical interpolation for remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 1, p. 32-40, 1994.

SANTOS, M. S. T. et al. Geração e análise estatística de modelo digital de elevação (MDE) com dados de GPS em tempo real (GPS/RTK). **Estudos Geológicos**. v. 18, n. 1, p. 94-110, 2008.

SANTOS, A. R.; SAITO, N. S.; PELUZIO, T. M. O. **Ad'água 2.0: Sistema para simulação da autodepuração de cursos d'água**. Alegre: Editora Caufes, 2010.

SCHIETTI, J. et al. Avaliação do uso de dados SRTM para estudos ecológicos na Amazônia central. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO

REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 6949-6955.

SOARES, A. **Geoestatística Aplicada às Ciências da Terra e do Ambiente**. Portugal: IST PRESS, 2000.

SOUZA FILHO, C. R. O relevo das Américas como nunca antes visto. **Revista InfoGEO**, v. 30, p. 54-56, 2003.

STEINMAYER, M. Extração de Modelos Digitais de Terreno com o sensor ASTER. **Revista InfoGEO**. v. 30, p. 38-39, 2003.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 10, p.1117-1142, 1952.

\_\_\_\_\_. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. American Geophysical Union**, v. 38, p. 913-920, 1957.

\_\_\_\_\_. Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. **Bull. Geological Society of America**, v. 69, p. 279-300, 1958.

TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das pombas, Guanhões, MG**. 2005. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

TRIBE, A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. **Journal of Hydrology**, v. 139, p. 263-293, 1992.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 61-68, 2000.

\_\_\_\_\_. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.

VALERIANO, M. de M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539- 546, 2003a.

\_\_\_\_\_. Mapeamento da declividade em microbacias com Sistemas de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 303-310, 2003b.

\_\_\_\_\_. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004.

\_\_\_\_\_. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 3595-3602.

\_\_\_\_\_. **Topodata**: guia de utilização de dados geomorfométricos locais. São José dos Campos: INPE, 2008.

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

WILCOX, B. P. et al. Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models. **Water Resources Research**, v. 26, p. 2401-2410, 1990.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p.184-194, 1981.

WOLF, P. R.; CHILANI, C. D. **Elementary Surveying: an introduction to geomatics**. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006.

YU, B. A comparison of the Green-Ampt and a spatially variable infiltration model for natural storm events. **Transactions of the ASAE**, v. 42, n. 1, p. 88-97, 1999.

ZANARDI, R. P. **Geração de modelo digital de terreno a partir de par estereoscópico do sensor CCD do Satélite CBERS-2 e controle de qualidade das informações altimétricas**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras**. 1987. 3 v. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1987.

## **ANEXO**

## ANEXO – Coordenadas, Datum e localização do marco geodésico SAT 93726 que integra a Rede Geodésica do Espírito Santo

<b>Estação :</b>	93726	<b>Nome da Estação :</b>	93726	<b>Tipo :</b>	Estação Planimétrica - SAT
<b>Município :</b>	ALEGRE			<b>UF :</b>	ES
<b>Última Visita:</b>	24/8/2005	<b>Situação Marco Principal :</b>	Bom		

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	20 ° 45 ' 49,8514 " S	Altitude Ortométrica(m)	138,09	Gravidade(mGal)	
Longitude	41 ° 27 ' 23,0763 " W	Altitude Geométrica(m)	144,61	Sigma Gravidade(mGal)	
Fonte	GPS Geodésico	Fonte	GPS Geodésico	Precisão	
Origem	Ajustada	Data Medição	24/8/2005	Datum	
S Datum	SAD-69	Data Cálculo	28/6/2010	Data Medição	
A Data Medição	24/8/2005	Sigma Altitude Geométrica(m)		Data Cálculo	
D Data Cálculo	9/1/2006	Modelo Geoidal	MAPGEO2010	Correção Topográfica	
6 Sigma Latitude(m)	0,004			Anomalia Bouguer	
9 Sigma Longitude(m)	0,004			Anomalia Ar-Livre	
UTM(N)	7.702.035,292			Densidade	
UTM(E)	244.248,846				
MC	-39				
Latitude	20 ° 45 ' 51,6108 " S	Altitude Ortométrica(m)	137,96	Gravidade(mGal)	
S Longitude	41 ° 27 ' 24,5141 " W	Altitude Geométrica(m)	131,43	Sigma Gravidade(mGal)	
I Fonte	GPS Geodésico	Fonte	GPS Geodésico	Precisão	
R Origem	Ajustada	Data Medição	24/8/2005	Datum	
G Datum	SIRGAS2000	Data Cálculo	28/6/2010	Data Medição	
A Data Medição	24/8/2005	Sigma Altitude Geométrica(m)	0,011	Data Cálculo	
S Data Cálculo	6/3/2006	Modelo Geoidal	MAPGEO2010	Correção Topográfica	
2 Sigma Latitude(m)	0,002			Anomalia Bouguer	
0 Sigma Longitude(m)	0,002			Anomalia Ar-Livre	
0 UTM(N)	7.701.988,471			Densidade	
0 UTM(E)	244.208,992				
MC	-39				

\* Último Ajustamento Planimétrico Global SAD-69 em 15/09/1996

\*\* Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006

\*\*\* Dados Planimétricos para Fonte carta nas escalas menores ou igual a 1:250000, valores SIRGAS2000 = SAD-69

Estação Visada	Azimute	Tipo	Distancia (m)
AZ93726	25° 2' 30,0929"	Geodésico	1.033,600

#### Localização

Próximo a cerca, pelo lado de fora, da unidade de tratamento de água da Escola Agrotécnica Federal de Alegre.

#### Descrição

Marco de concreto formato piramidal medindo 0,18 m x 0,18 m de topo, 0,20 m de altura, 0,50 m x 0,50 m de base onde foi estampada chapa padrão CREA-ES SAT 93726.

#### Itinerário

Partir da portaria principal da Escola Agrotécnica Federal de Alegre em direção à ES-482. Chegando na rodovia seguir à esquerda, sentido Vitória. Acessar a primeira entrada à direita, uma porteira, e seguir subindo. Vire na primeira à direita e depois na primeira à esquerda subindo. Siga a estrada e logo a frente a unidade de tratamento de água da Escola Agrotécnica Federal de Alegre.

Figura 1 - Relatório do marco geodésico SAT 93726 que integra a Rede Geodésica do Espírito Santo. Fonte: IBGE, (2010).



Figura 2 - Localização do marco geodésico SAT 93726 que integra a Rede Geodésica do Espírito Santo. Fonte: IBGE, (2010).



## APÉNDICE

## Apêndice – Direção de escoamento e drenagem numérica para MDEHC

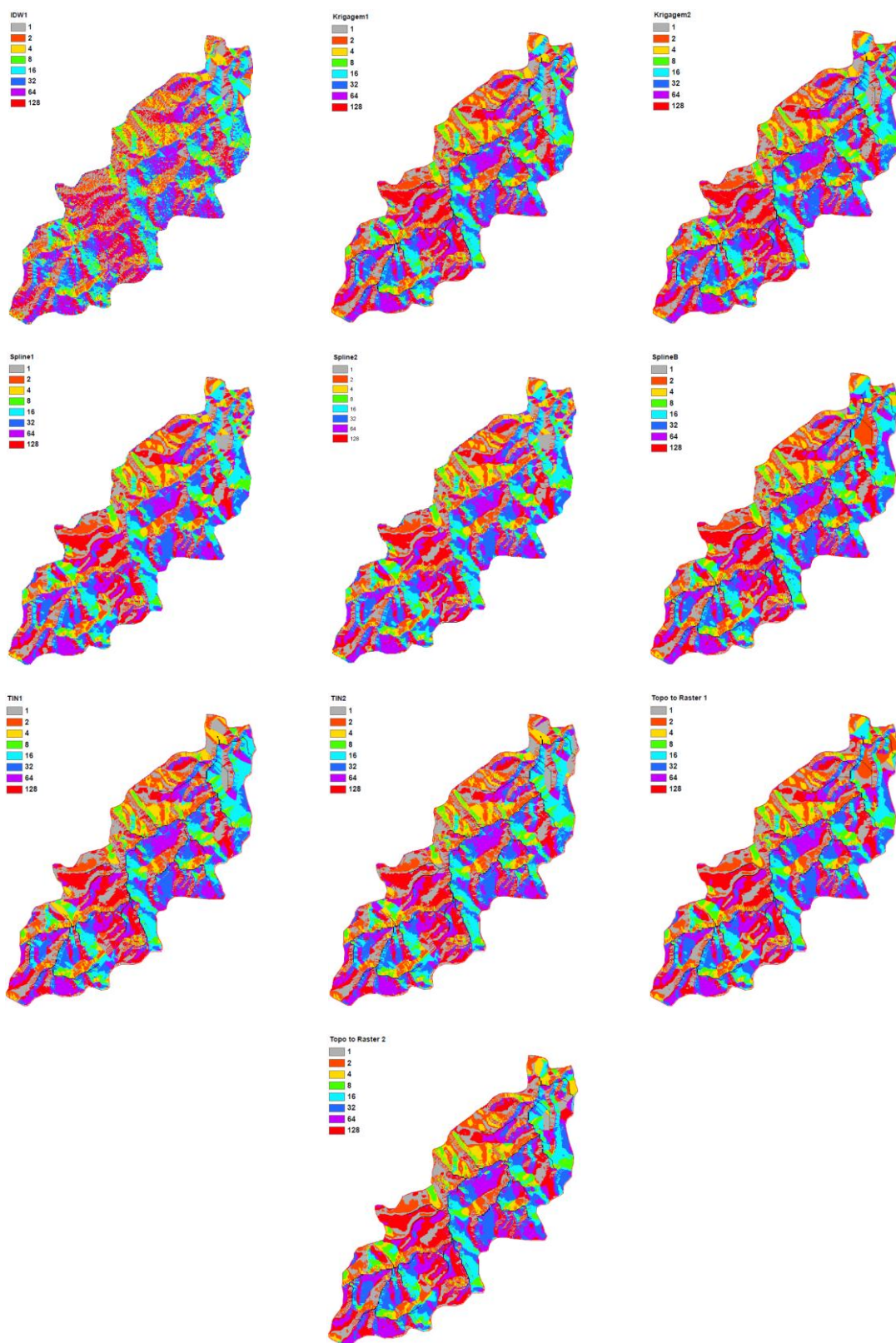


Figura 1 – Mapas de direção do escoamento superficial calculado pelo método D8 (determinístico de oito células vizinhas), onde: 1 – E; 2 – SE; 4 – S; 8 – SO; 16 – O; 32 – NO; 64 – N; 128 – NE para os MDEHC (IBGE).



Figura 2 – Drenagem numérica (de preto) gerada a partir dos MDEHC (IBGE).