

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOMÁTICA**

**ALTIMETRIA COM TOPOGRAFIA CONVENCIONAL E  
SENSORIAMENTO REMOTO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Leandro de Mello Pinto**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

# **ALTIMETRIA COM TOPOGRAFIA CONVENCIONAL E SENSORIAMENTO REMOTO**

**Leandro de Mello Pinto**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geomática, Área de Concentração Tecnologia da Geoinformação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Geomática**

**Orientador: Prof. Adroaldo Dias Robaina**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Geomática**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**ALTIMETRIA COM TOPOGRAFIA CONVENCIONAL E  
SENSORIAMENTO REMOTO**

elaborada por  
**Leandro de Mello Pinto**

como requisito parcial para a obtenção de grau de  
**Mestre em Geomática**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Adroaldo Dias Robaina, Dr.**  
(Presidente / Orientador)

---

**Ricardo Luis Schons, Dr.** (IFFarroupilha)

---

**Liane de Souza Weber, Dra.** (UFSM)

Santa Maria, 17 de abril de 2012

## **Dedico**

*À minha família,  
Que me apoiou em todos os momentos.*

*À Daniele,  
Que sempre foi uma grande companheira.*

*À minha vó Reasilva,  
Que foi um exemplo do melhor que uma pessoa pode ser nesse mundo.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me dar saúde e me levantar nos momentos de dificuldade.

À Universidade Federal de Santa Maria, mais especificamente ao Programa de Pós-Graduação em Geomática (PPGG), por ter me proporcionado a oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

Ao Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina, por ser um exemplo de mestre e pessoa, exemplo que levarei sempre comigo.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Márcia Xavier Peiter, por ser uma verdadeira mãe para com seus orientados.

Ao Prof. Gomercindo Gaspar Martins Marques, por me fornecer a base de todo o meu conhecimento em topografia.

Ao Prof. Carlito Vieira de Moraes que me auxiliou enormemente com sua vasta experiência em estatística.

À minha mãe Lei, que é simplesmente a pessoa a quem devo toda esta conquista.

Ao meu pai Sergio, que me ensinou a me manter firme aos meus ideais.

Ao meu irmão Marcelo, que mesmo distante, nunca deixou de estar ao meu lado.

À minha vó Reasilva, que foi uma segunda mãe para mim, me ensinando serenidade e bondade para com as pessoas.

À minha noiva Daniele, que me apoiou incondicionalmente, me dando forças para continuar o meu caminho.

Ao meu amigo Danton e à todo o pessoal da ProCampo, que me deram suporte e grande parte do conhecimento que possuo sobre a área.

Ao meu amigo e colega Sandro Cardinal que disponibilizou a área de estudo em sua propriedade. O meu mestrado não seria o mesmo sem a força de vocês.

Aos meus amigos e colegas de laboratório que, por várias vezes, me auxiliaram. Fica a vocês meu sincero agradecimento e carinho.

“Ignorância não é saber pouco,  
e sim acreditar saber o suficiente.”

A. J. Daniel

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Geomática  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **ALTIMETRIA COM TOPOGRAFIA CONVENCIONAL E SENSORIAMENTO REMOTO**

Autor: Leandro de Mello Pinto  
Orientador: Adroaldo Dias Robaina  
Santa Maria, 17 de abril de 2012.

A altimetria do terreno, por muitas décadas, tem sido obtida, quase que exclusivamente por meio da topografia convencional. O avanço da tecnologia permitiu o desenvolvimento de missões espaciais e a criação de satélites artificiais, fazendo com que a ciência do Sensoriamento Remoto se expandisse de forma exponencial. O SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e o ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) são programas espaciais que fornecem informações altimétricas de quase todo o globo terrestre. O programa Google Earth utiliza-se dessas informações e as disponibiliza para seus usuários de forma prática e rápida. Pela facilidade de acesso aos dados provenientes destas técnicas, muitos usuários os utilizam sem conhecer os problemas geométricos existentes nesses produtos, o que pode comprometer a qualidade dos resultados obtidos através dessas técnicas. Por esse motivo, há a necessidade de uma prévia avaliação para aferir a qualidade e a aplicabilidade de cada método. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi analisar a acurácia de três formas de obtenção de altitude: por SRTM, ASTER e Google Earth, comparando-os com a topografia convencional e com o GPS, por serem técnicas mais consolidadas. Para isso, foram realizados dois levantamentos *in situ*, um através de receptores GPS e outro por topografia convencional, onde as altitudes dos pontos foram comparadas com as altitudes obtidas pelos três métodos analisados, resultando nas discrepâncias. Os resultados mostram que os dados provenientes do SRTM, fornecidos pela Embrapa Monitoramento por Satélite, através do Projeto Brasil em Relevo, são mais acurados do que os dados ASTER e Google Earth, além disto, também foi constatado que a técnica de interpolação da Krigagem apresenta melhores resultados para a espacialização de dados altimétricos.

**Palavras-Chave:** Nivelamento. Interpolação espacial. Acurácia.

## **ABSTRACT**

Master's Dissertation  
Geomatic Post-Graduation Program  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

### **ALTIMETRY WITH CONVENTIONAL SURVEYING AND REMOTE SENSING**

Author: Leandro de Mello Pinto  
Adviser: Adroaldo Dias Robaina  
Santa Maria, 17<sup>th</sup> April, 2012

The altimetry of the surface terrain for many decades has been achieved almost exclusively by conventional surveying. The advancement of technology allowed the development of space missions and the creation of artificial satellites, making the science of remote sensing to expand exponentially. The SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) and ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) are spatial programs that provide altitude information of almost the entire globe. The program Google Earth uses that information, and provides for its users in a practical and rapid way. For ease of access to data from these techniques, many users use them without knowing the geometric problems existing in these products, which can compromise the quality of results obtained through these techniques. Therefore, there is a need for a prior evaluation to assess the quality and workability for each method. In this context, the objective was to analyze the accuracy of three ways of obtaining altitude: by SRTM, ASTER and Google Earth, comparing them with conventional surveying and with GPS, because they are more established techniques. To this end, two surveys were performed in situ, one using a GPS receiver and the other by conventional topography, where the heights of the points were compared with the heights obtained by the three methods analyzed, resulting in discrepancies. The results show that the data from the SRTM provided by Embrapa Monitoring by Satellites through the Project "Brasil em Relevo" are more accurate than ASTER data and Google Earth, moreover, was also found that the Kriging interpolation technique has best results for altimetric spatial data.

**Key Words:** Leveling, Spatial interpolation, Accuracy



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Alguns termos de nivelamento.....	18
FIGURA 2.2 – Medição da diferença de cota por trigonometria.....	20
FIGURA 2.3 – Representações de precisão e acurácia.....	23
FIGURA 2.4 – Três tipos de superfícies.....	25
FIGURA 2.5 – Esquema da aquisição de dados do SRTM.....	28
FIGURA 2.6 – Processo de refinamento do modelo digital SRTM.....	31
FIGURA 2.7 – Esquema da aquisição de dados ASTER.....	33
FIGURA 2.8 – Constelação dos satélites GPS.....	39
FIGURA 2.9 – Distribuição dos satélites na constelação final.....	39
FIGURA 2.10 – Sistema de referência adotado no GPS.....	44
FIGURA 2.11 – <i>Grid</i> de células de uso do solo.....	47
FIGURA 2.12 – Um exemplo de interpolação linear.....	48
FIGURA 2.13 – Representação das amostras coletadas.....	48
FIGURA 2.14 – Células numeradas indicando os valores conhecidos.....	49
FIGURA 2.15 – Superfície criada pelo Inverso Ponderado da Distância.....	50
FIGURA 2.16 – Superfície criada pela Curvatura Mínima.....	52
FIGURA 2.17 – Superfície criada pela Krigagem.....	53
FIGURA 2.18 – Triangulação de Delaunay.....	54
FIGURA 2.19 – Triangulação de Delaunay e polígonos Voronoi.....	55
FIGURA 2.20 – Quadrícula e média ponderada dos vizinhos naturais.....	55
FIGURA 3.1 – Localização das cidades de Santa Maria e Santiago (RS).....	58
FIGURA 3.2 – Delimitação das áreas A1 e A2.....	59
FIGURA 3.3 – Delimitação da área A3.....	60
FIGURA 3.4 – Esquema dos pontos coletados em A1 e A2 com receptores GNSS.....	61
FIGURA 3.5 – Fotografias do levantamento e de um piquete de madeira.....	62
FIGURA 3.6 – Esquema dos pontos coletados em A3 com topografia.....	63
FIGURA 3.7 – Pontos de apoio coletados com GPS em A3.....	65
FIGURA 3.8 – Site do projeto “Brasil em Relevo” e uma imagem SRTM.....	66
FIGURA 3.9 – Site do ERSDAC e uma imagem ASTER.....	67
FIGURA 4.1 – Histogramas das discrepâncias dos métodos analisados em A1.....	85
FIGURA 4.2 – Histogramas das discrepâncias dos métodos analisados em A2.....	87
FIGURA 4.3 – Histogramas das discrepâncias dos métodos analisados em A3.....	88

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Características das áreas e dos levantamentos. ....	70
TABELA 3.2 – Indicador de desempenho dos interpoladores. ....	73
TABELA 4.1 – Desempenho dos interpoladores para os dados SRTM em A1. ....	79
TABELA 4.2 – Desempenho dos interpoladores para os dados ASTER em A1. ....	79
TABELA 4.3 – Desempenho dos interpoladores para os dados SRTM em A2. ....	80
TABELA 4.4 – Desempenho dos interpoladores para os dados ASTER em A2. ....	81
TABELA 4.5 – Desempenho dos interpoladores para os dados SRTM em A3. ....	81
TABELA 4.6 – Desempenho dos interpoladores para os dados ASTER em A3. ....	82
TABELA 4.7 – Agrupamento dos métodos através do teste de Tukey. ....	83
TABELA 4.8 – Análise de tendência e acurácia dos métodos em A1. ....	84
TABELA 4.9 – Análise de tendência e acurácia dos métodos em A2. ....	86
TABELA 4.10 – Análise de tendência e acurácia dos métodos em A3. ....	87

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	14
<b>2.1 Topografia</b> .....	14
2.1.1 Divisões da Topografia .....	16
2.1.2 Altimetria .....	17
2.1.3 Definições Básicas da Altimetria .....	17
2.1.4 Nivelamento Geométrico .....	19
2.1.5 Nivelamento Trigonométrico .....	19
2.1.6 Nivelamento Barométrico .....	21
2.1.7 Precisão e Acurácia .....	22
<b>2.2 Geodésia</b> .....	23
2.2.1 Geoide e Elipsoide .....	24
<b>2.3 Sensoriamento Remoto</b> .....	26
2.3.1 Altimetria com Sensoriamento Remoto .....	27
2.3.2 SRTM .....	27
2.3.3 Projeto “Brasil em Relevo” .....	29
2.3.3.1 Objetivos e Finalidades .....	29
2.3.3.2 Material Utilizado .....	30
2.3.3.3 Refinamento do Modelo Digital de Elevação SRTM .....	30
2.3.4 ASTER .....	32
2.3.5 Google Earth .....	34
2.3.6 NAVSTAR-GPS .....	36
2.3.6.1 Segmento Espacial .....	38
2.3.6.2 Segmento de Controle .....	40
2.3.6.3 Segmento de Usuário .....	41
2.3.6.4 Coordenadas dos Satélites GPS .....	42
2.3.6.5 Órbitas Transmitidas ( <i>Broadcast Ephemeris</i> ) .....	43
2.3.6.6 Órbitas Precisas ( <i>Precise Ephemeris</i> ) .....	43
2.3.6.7 Sistema de Referência Associado ao GPS .....	44
2.3.7 Modelagem de Imagens com Sensoriamento Remoto .....	45
2.3.7.1 Modelagem de Imagens com o ArcGIS .....	45
2.3.7.2 Dados em 3 Dimensões (3D) .....	46
2.3.7.3 Imagens ( <i>Rasters</i> ) .....	46
<b>2.4 Interpoladores Espaciais</b> .....	47
2.4.1 Inverso Ponderado da Distância ( <i>Inverse Distance Weighted – IDW</i> ) .....	50
2.4.2 Curvatura Mínima ( <i>Spline</i> ) .....	51
2.4.3 Krigagem ( <i>Kriging</i> ) .....	52
2.4.4 Vizinho Natural ( <i>Natural Neighbor</i> ) .....	53
2.4.5 <i>Topo to Raster</i> .....	56

<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	58
<b>3.1 Localização do Experimento</b> .....	58
<b>3.2 Áreas dos Levantamentos</b> .....	59
<b>3.3 Obtenção dos Dados</b> .....	60
3.3.1 Levantamentos de Referência ( <i>in situ</i> ).....	60
3.3.1.1 Dados Obtidos por Receptores GNSS.....	61
3.3.1.2 Dados Obtidos por Topografia Convencional.....	62
3.3.2 Levantamentos Experimentais ( <i>ex situ</i> ).....	66
3.3.2.1 Dados Obtidos por SRTM.....	66
3.3.2.2 Dados Obtidos por ASTER.....	67
3.3.2.3 Dados Obtidos pelo Programa Google Earth.....	68
<b>3.4 Interpolação dos Dados SRTM e ASTER</b> .....	68
<b>3.5 Análise Estatística</b> .....	69
3.5.1 Organização dos Dados.....	69
3.5.2 Análise dos Interpoladores.....	71
3.5.3 Análise de Variância (ANOVA) dos Métodos.....	73
3.5.4 Teste de Comparação de Média dos Métodos (Teste de Tukey).....	75
3.5.5 Análise de Tendência e Acurácia dos Métodos.....	76
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	78
<b>4.1 Análise dos Interpoladores</b> .....	78
4.1.1 Área A1.....	78
4.1.2 Área A2.....	80
4.1.3 Área A3.....	81
<b>4.2 Teste de Comparação entre os Métodos</b> .....	82
<b>4.3 Análise de Tendência e Acurácia</b> .....	83
4.3.1 Área A1.....	84
4.3.2 Área A2.....	85
4.3.3 Área A3.....	87
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	89
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	91

# 1 INTRODUÇÃO

Para o planejamento das obras de engenharia, é necessário que se tenha um mapa ou planta topográfica, que represente a área de interesse ao projeto, com informações adequadas e atualizadas. A representação da superfície topográfica de forma adequada permite a obtenção de diversas informações, tais como: a distância vertical entre pontos, a inclinação de taludes, a construção de perfis, intervisibilidade entre pontos, elementos para o cálculo de áreas e volumes, entre outras. Os recursos tecnológicos disponíveis à cartografia têm viabilizado avanços consideravelmente importantes, através, principalmente, dos softwares que permitem velocidade na obtenção de dados, na troca de informações espaciais e em sofisticadas análises dos fenômenos espaciais. Santos & Segantine (2006, p. 1).

O advento da tecnologia moderna permitiu a criação de novos métodos de obtenção de dados altimétricos, possibilitando a confecção de modelos digitais de forma mais rápida, porém abrindo mão da precisão e da acurácia. A modelagem digital de terreno tem facilitado em muito os trabalhos cartográficos, contudo, há necessidade de se verificar a qualidade dos produtos obtidos, através da avaliação por métodos estatísticos.

Ramirez & Ali (2003) apud Santos & Segantine (2006), relatam que a qualidade de dados espaciais é uma questão muito importante e complexa. Tradicionalmente, tanto produtores como usuários de dados espaciais reconhecem sua importância, mas dedicam poucos esforços para entender a qualidade dos dados espaciais e para a avaliação dos documentos cartográficos em meio analógico. A ausência de dados precisos implica no fornecimento de informações não confiáveis, que conseqüentemente irão gerar erros comprometedores à qualidade dos estudos, promovendo desperdícios de verbas destinadas às soluções de problemas.

Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi analisar a acurácia de três formas de obtenção de altitude: por SRTM, ASTER e Google Earth, comparando-as com a topografia convencional e com GPS, verificando a aplicabilidade de cada método.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Topografia

O homem sempre necessitou conhecer o meio em que vive, por questões de sobrevivência, orientação, segurança, guerras, navegação, construção, etc. No princípio a representação do espaço baseava-se na observação e descrição do meio. Cabe salientar que alguns historiadores dizem que o homem já fazia mapas antes mesmo de desenvolver a escrita. Com o tempo surgiram técnicas e equipamentos de medição que facilitaram a obtenção de dados para posterior representação. A Topografia foi uma das ferramentas utilizadas para realizar estas medições.

A topografia está conosco há milhares de anos. Ela é a ciência que trata da determinação das dimensões e contornos (ou características tridimensionais) da superfície física da Terra, através da medição de distâncias, direções e altitudes. A topografia também inclui a locação de linhas e malhas necessárias para a construção de prédios, estradas, barragens e outras estruturas. Além dessas medições de campo, a topografia compreende o cálculo de áreas, volumes e outras quantidades, assim como a preparação dos respectivos mapas e diagramas.

Etimologicamente a palavra TOPOS, em grego, significa lugar e GRAPHEN descrição, assim, de uma forma bastante simples, Topografia significa descrição do lugar. A seguir são apresentadas algumas de suas definições: “A Topografia tem por objetivo o estudo dos instrumentos e métodos utilizados para obter a representação gráfica de uma porção do terreno sobre uma superfície plana” (DOUBEK, 1989). “A Topografia tem por finalidade determinar o contorno, dimensão e posição relativa de uma porção limitada da superfície terrestre, sem levar em conta a curvatura resultante da esfericidade terrestre” (ESPARTEL, 1987).

De acordo com a NBR 13133 (ABNT, 1991, p. 3), Norma Brasileira para execução de Levantamento Topográfico, o levantamento topográfico é definido por: “Conjunto de métodos e processos que, através de medições de ângulos horizontais

e verticais, de distâncias horizontais, verticais e inclinadas, com instrumental adequado à exatidão pretendida, primordialmente, implanta e materializa pontos de apoio no terreno, determinando suas coordenadas topográficas. A estes pontos se relacionam os pontos de detalhe visando a sua exata representação planimétrica numa escala pré-determinada e à sua representação altimétrica por intermédio de curvas de nível, com equidistância também pré-determinada e/ou pontos cotados”.

A Topografia tem por finalidade determinar o contorno, dimensão e posição relativa de uma porção limitada da superfície terrestre, sem levar em conta a curvatura resultante da esfericidade terrestre. Nestas condições, pode-se, sempre, figurar em um plano a imagem da região considerada, o que equivale a projetar sobre um plano, que se supõe horizontal, não só os limites da superfície a representar como todas as particularidades notáveis, naturais ou artificiais, do terreno. Assim, a Topografia é uma ciência aplicada, baseada na Geometria e na Trigonometria, de âmbito restrito, pois é um capítulo da Geodésia, que tem por objeto o estudo da forma e dimensões da Terra (ESPARTEL, 1987).

Na Topografia trabalha-se com medidas (lineares e angulares) realizadas sobre a superfície da Terra e a partir destas medidas são calculados áreas, volumes, coordenadas, etc. Além disto, estas grandezas poderão ser representadas de forma gráfica através de mapas ou plantas. Para tanto é necessário um sólido conhecimento sobre instrumentação, técnicas de medição, métodos de cálculo e estimativa de precisão (KAHMEN; FAIG, 1988).

Nas últimas décadas, têm sido quase inacreditáveis os avanços na tecnologia usada para medição, coleta, registro e visualização das informações referentes à superfície da Terra. Por exemplo, tradicionalmente os topógrafos faziam suas medições com fitas de aço, com aparelhos para medição de ângulos chamados de trânsitos e teodolitos, e determinavam altitudes com equipamentos denominados níveis de exatidão. Além do mais, as medições obtidas eram apresentadas por meio de tabelas e mapas preparados laboriosamente. Atualmente, o topógrafo utiliza instrumentos eletrônicos para medir, visualizar e registrar distâncias e posições de pontos automaticamente. Os computadores são usados para processar os dados de medição e produzir os mapas e tabelas necessários, com velocidade espantosa.

Esses avanços têm contribuído para maior progresso em muitas outras áreas, incluindo Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sistemas de Informações Territoriais e Sistema de Posicionamento Global (ou GPS — *Global Positioning System*), Sensoriamento Remoto e outros. Como consequência muitas pessoas admitiram que o termo topografia não era adequado para representar todas essas novas atividades atreladas ao trabalho tradicional do topógrafo (MCCORMAC, 2007).

### 2.1.1 Divisões da Topografia

Definido o campo que limita as operações topográficas de campo em extensão, pode-se subdividir a Topografia em quatro partes principais: a Topometria, abrangendo a planimetria e a altimetria, a Topologia, a Taqueometria e a Fotogrametria.

Os processos de medida são estudados sob o título genérico de Topometria e se baseiam na Geometria aplicada. Os elementos geométricos são obtidos utilizando-se aparelhos de medida, lineares e angulares. A topometria divide-se em planimetria e altimetria. Na planimetria as medidas, tanto lineares como angulares, são efetuadas em planos horizontais, obtendo-se ângulos azimutais e distâncias horizontais; na altimetria as medidas são efetuadas na vertical ou num plano vertical, obtendo-se as distâncias verticais ou diferenças de nível e ângulos zenitais (ESPARTEL, 1987).

O levantamento topográfico é planimétrico quando as projeções dos contornos e pontos medidos são representados sobre um plano básico horizontal de referência, e altimétrico, quando são medidas as alturas desses pontos com relação a um plano de referência de nível. Para levantamento planimétrico são empregados principalmente os teodolitos, que são goniômetros com círculos horizontais e verticais graduados.

A topologia, complemento indispensável da topometria, tem por objeto o estudo das formas exteriores da superfície terrestre e das leis a que deve obedecer



seu modelado. Sua aplicação principal é na representação cartográfica do terreno pelas curvas de nível, que são as interseções obtidas por planos equidistantes paralelos com o terreno a representar.

A taqueometria tem por finalidade o levantamento de pontos do terreno, pela resolução de triângulos retângulos aptos a representá-los, tanto plani como altimetricamente, ou, em outras palavras, dando origem a plantas cotadas ou com curvas de nível, ditas plani-altimétricas. Sua aplicação principal é em zonas fortemente acidentadas, em morros e montanhas, onde oferece reais vantagens sobre os métodos topométricos, pois o levantamento dos pontos é feito com rapidez, maior exatidão e economia. As posições destes pontos são determinadas por coordenadas retangulares  $x$ ,  $y$  e  $z$ , com as quais os mesmos permanecem individualizados no espaço (ESPARTEL, 1987).

### 2.1.2 Altimetria

A determinação de altitudes e cotas do terreno, conhecida como nivelamento, é um processo simples, porém extremamente importante. O significado das alturas relativas não pode maior do que já é. São tão importantes que ninguém pode sequer imaginar um projeto de construção em que elas não sejam críticas. Da construção de terraços em uma fazenda à construção de uma simples parede ou implantação de um projeto de drenagem ou edificação prédios maiores e pontes, o controle das cotas é da maior importância (MCCORMAC, 2007).

### 2.1.3 Definições Básicas da Altimetria

A altimetria ou hipsometria tem por finalidade a medir a distância vertical ou diferença de nível entre diversos pontos. Quando as distâncias verticais são referidas à superfície média dos mares, tomam o nome de altitudes ortométricas;

recebem o nome de cotas quando se referem a uma superfície de nível relativa, fictícia, situada acima ou abaixo das superfícies dos mares. A seguir estão apresentados alguns conceitos básicos necessários para o melhor entendimento da altimetria (ESPARTEL, 1987).

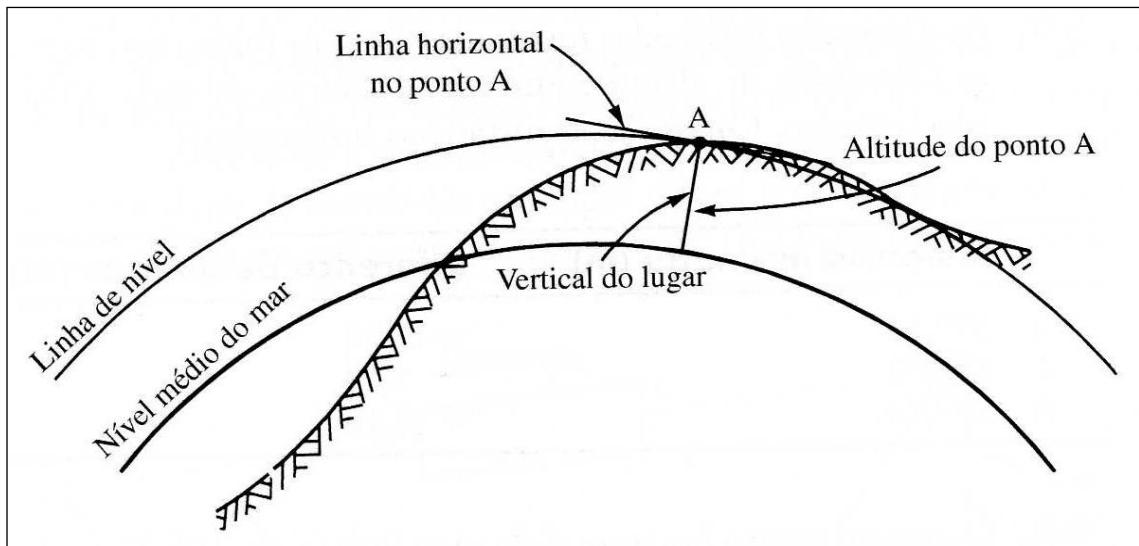


FIGURA 2.1 – Alguns termos de nivelamento.  
Fonte: McCormac, 2007.

A vertical do lugar (Figura 2.1) é a linha paralela à direção da gravidade em um determinado ponto, e coincide com a direção assumida por um fio de prumo quando se permite que o peso balance livremente. Devido à curvatura da Terra, os fios de prumo em pontos afastados de uma certa distância não são paralelos uns aos outros, mas em levantamento topográfico eles são considerados como se fossem.

Uma superfície de nível é a superfície de cota constante que é perpendicular ao fio de prumo em todos os pontos. É bem representada pela superfície de um grande corpo de água parado e não afetado pelas ondas e marés.

A cota relativa ou altura relativa ou diferença de nível relativa de um ponto específico é a distância vertical acima de uma superfície assumida como origem ou referência. Quando a referência é o nível do mar, chama-se de altitude ou cota

absoluta. A linha de nível é a linha curva em uma superfície de nível onde todos os pontos têm a mesma cota. Uma linha horizontal é a linha reta tangente à linha de nível em um ponto (MCCORMAC, 2007).

#### 2.1.4 Nivelamento Geométrico

O nivelamento geométrico ou direto é o método mais comum de nivelamento. As distâncias verticais são medidas em relação à linha horizontal, e estes valores são usados para calcular as diferenças de níveis entre vários pontos. Um instrumento chamado de nível de luneta ou simplesmente nível é utilizado para fixar a linha de visada da luneta. Esta linha de visada é tida como uma linha horizontal em relação a qual são medidas as distâncias verticais. (O termo *spirit leveling*, para o nivelamento geométrico em inglês, é frequentemente usado porque os níveis de bolha tubulares de muitos níveis antigos eram preenchidos com álcool) (MCCORMAC, 2007).

#### 2.1.5 Nivelamento Trigonométrico

O nivelamento trigonométrico é um método de nivelamento em que são medidas as distâncias e ângulos, sendo a diferença de nível ou cota calculada pela trigonometria. O método pode ser utilizado para determinar cotas de pontos inacessíveis como picos de montanhas, torres de igrejas ou plataformas no mar. O procedimento funciona muito bem para visadas de até 250 ou 300 metros, mas para distâncias maiores poderá ser necessário considerar o efeito da curvatura da Terra. O método trigonométrico é menos exato do que o geométrico, porque um pequeno erro na medida do ângulo dá lugar a um erro sensível na diferença de nível. Será preferível usar sempre da distância zenital em lugar do ângulo de inclinação, porque este deverá ser afetado dos sinais mais ou menos segundo a linha de visada achar-

se acima ou abaixo da linha do horizonte, o que pode dar lugar a erros, ao passo que o ângulo zenital será sempre positivo (MCCORMAC, 2007).

Para determinar a diferença de cota entre os dois pontos é necessário medir a distância horizontal ( $H$ ) entre os pontos ou a distância inclinada ( $S$ ) entre eles e também o ângulo vertical ( $\alpha$ ) ou o ângulo zenital ( $Z$ ).

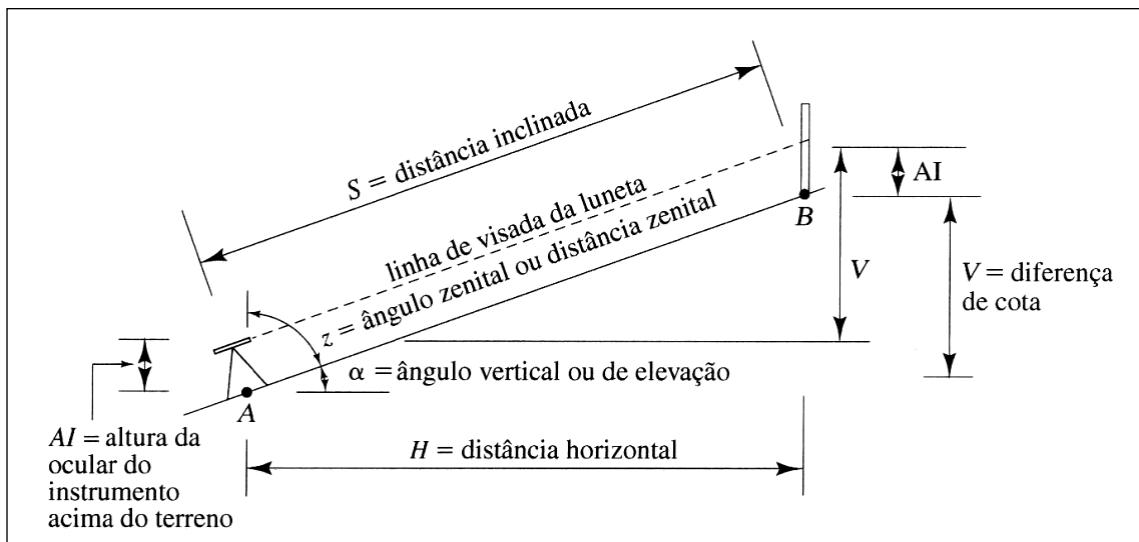


FIGURA 2.2 – Medição da diferença de cota por trigonometria.

Fonte: McCormac, 2007.

As equações necessárias para calcular as diferenças de cotas são as seguintes:

$$V = H \cdot \tan \alpha = H \cdot \cot z$$

$$V = S \cdot \sin \alpha = S \cdot \cos z$$

$$\text{cota de B} = \text{cota de A} + V$$

Onde:

$V$  é a diferença de nível;

$H$  é a distância horizontal;

$\alpha$  é a ângulo vertical;  
 $Z$  é a ângulo zenital.

Na Figura 2.2, um equipamento de levantamento é mostrado no lado esquerdo da Figura no ponto A. Note que a altura da linha de visada do instrumento é a distância  $A'$  acima do ponto A. Você verá, então, que é necessário também visar a mira na distância  $A'$  acima do ponto B para obter a medida correta do ângulo. Se isso não for feito, as diferenças existentes devem ser consideradas nos cálculos.

#### 2.1.6 Nivelamento Barométrico

O nivelamento barométrico envolve a determinação de cotas medindo as mudanças da pressão atmosférica. Embora a pressão atmosférica possa ser medida com barômetros mercúrio, estes instrumentos são difíceis de usar, são bastante frágeis e não são práticos para a utilização em levantamentos. Em vez deles, são utilizados os barômetros aneróides, leves e fortes, porém menos precisos, conhecidos como altímetros.

Têm sido fabricados altímetros de levantamento que podem determinar cotas com aproximação de mais ou menos 0,50 m. Tal precisão é suficiente apenas para trabalho preliminar ou de reconhecimento. Eles, apesar de tudo, oferecem a vantagem de determinar rapidamente cotas aproximadas de uma grande área. Quanto mais cautelosos os procedimentos e maiores os barômetros aneróides utilizados, melhores serão os resultados obtidos.

Leituras barométricas feitas em um mesmo marco variam devido às condições locais da pressão atmosférica e são afetadas pela variação de umidade e de temperatura. Ao se utilizar um barômetro, ele é ajustado em uma cota conhecida e depois são feitas as leituras de outros pontos. Então, o barômetro volta para o ponto inicial e é feita nova leitura. Se tal leitura for diferente, é necessário distribuir a diferença por todos os outros pontos (MCCORMAC, 2007).

### 2.1.7 Precisão e Acurácia

Os termos precisão e acurácia são constantemente usados em topografia. Já seus corretos significados são um pouco difíceis de compreender. Acurácia refere-se à perfeição obtida nas medições. Ela denota o quanto uma dada medida está próxima do valor verdadeiro da quantidade. Precisão é o grau de refinamento com que uma dada quantidade é medida. Em outras palavras, é a proximidade (dispersão) entre 2 ou mais medidas. Se uma quantidade é medida diversas vezes, e os valores obtidos são muito próximos entre si, a precisão é considerada alta. Ou seja, denota o quanto uma dada medida está em torno da média das medidas obtidas.

Não se deduz necessariamente que melhor precisão significa melhor exatidão. Considere o caso em que um topógrafo mediu cuidadosamente uma distância três vezes com uma trena de aço de 30 m e obteve os valores: 300,14m; 300,13 m e 300,15 m. Ele realizou um trabalho muito preciso e aparentemente também muito exato. Poderia, no entanto, ser descoberto que a trena mede realmente 30,02m de comprimento em vez dos 30 m. Assim os valores obtidos não são exatos, apesar de serem precisos. As medições podem ser exatas fazendo uma correção numérica de 0,02 m por comprimento da trena. É possível para o topógrafo obter precisão e exatidão pela observação cuidadosa e paciente, bem como usando instrumentos e procedimentos adequados (MCCORMAC, 2007).

Na medição de distâncias, a precisão é definida como a razão entre o erro da medição e a própria distância medida e é reduzida para uma fração tendo como numerador a unidade. Se uma distância de 1200 m é medida e o erro é depois estimado como 0,2 m, a precisão da medição é  $0,2/1200 = 1/6000$ . Isto significa que para cada 6000 m medidos, o erro deve ser de 1m se o trabalho foi feito com o mesmo grau de precisão.

Um método frequentemente usado pelos professores de topografia para definir e distinguir entre precisão e acurácia é ilustrado na Figura 2.3. Considera-se que uma pessoa está praticando tiro ao alvo com seu rifle. Seu resultado no alvo 1 foi muito preciso porque seus furos de bala foram muito próximos uns aos outros.

Eles, no entanto, não foram exatos, porque estão distribuídos a certa distância do centro do alvo. Os tiros do atirador no alvo 2 são considerados exatos porque os furos de bala estão posicionados relativamente próximos do centro do alvo. No entanto, não foram muito precisos, porque estão espalhados uns em relação aos outros. Finalmente, no alvo 3, os tiros foram precisos e exatos, porque eles estão colocados no centro do alvo e próximos uns dos outros. O objetivo do topógrafo é fazer medições que sejam precisas e exatas. A Figura 2.3 demonstra em (a) boa precisão e acurácia ruim (média fora do círculo central); (b) precisão ruim e boa acurácia (média dentro do círculo central) e (c) boa precisão e boa acurácia (média dentro do círculo central) (MCCORMAC, 2007).

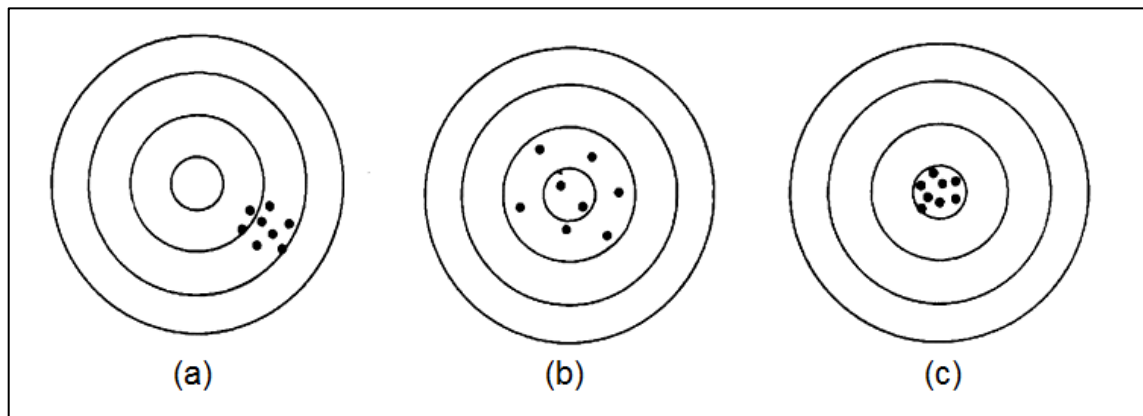


FIGURA 2.3 – Representações de precisão e acurácia.  
Fonte: McCormac, 2007.

## 2.2 Geodésia

A Geodésia, com o auxílio da geografia matemática, se ocupa dos processos de medida e especificação para o levantamento e representação cartográfica de uma grande extensão da superfície terrestre de um Estado ou de um país, projetada numa superfície de referência, geométrica e analiticamente definida por parâmetros, variáveis em número, de acordo com a consideração sobre a forma da Terra. No

desenvolvimento do estudo da Geodésia, se considera a superfície em referência como o elipsoide de revolução com parâmetros  $a$  e  $b$ , numericamente determinados.

A Geodésia, que determina com precisão as malhas triangulares justapostas à superfície do elipsoide de revolução terrestre determinando as coordenadas de seus vértices, é uma ciência que abrange o todo, ao passo que a Topografia se ocupa do detalhe de cada malha ou quadrícula e, admitindo-a plana, adota processos da Geometria e Trigonometria planas, com ligação às coordenadas de referência determinadas geodesicamente.

### 2.2.1 Geoide e Elipsoide

A Terra não é uma esfera perfeita, ela é achatada em seus polos e seu semieixo polar é aproximadamente 21 km menor que seu semieixo equatorial. Sua superfície é, aproximadamente, um elipsoide, também chamado de esferoide. Um elipsoide é uma superfície curva que se aproxima da forma e dimensões da Terra (um elipsoide é formado quando uma elipse é rotacionada em torno de seu eixo menor).

O geoide é definido como uma Figura hipotética que representa a forma elipsoidal da Terra, mas com sua superfície representada como o nível médio dos mares (NMM). Diz-se que a superfície do geoide é equipotencial, pois o potencial devido à gravidade é igual em todos os pontos sobre sua superfície. A superfície é perpendicular à direção da gravidade em cada ponto. O geoide é uma superfície que pode variar até 100 m do elipsoide (MCCORMAC, 2007). Partes do geoide, de elipsoide e da superfície da Terra são mostradas na Figura 2.4.

Os profissionais da área estavam acostumados a usar níveis para medir distâncias verticais referidas ao nível médio dos mares na Terra, ou ao geoide. Geralmente, eles executavam levantamentos planos de pequenas áreas da Terra. Na verdade, eles ignoravam as implicações da geodesia (o efeito que a superfície curva ou elipsoidal da Terra tem sobre seus trabalhos). As distâncias que eles



mediam eram relativamente pequenas e, então, as implicações globais eram negligenciáveis.

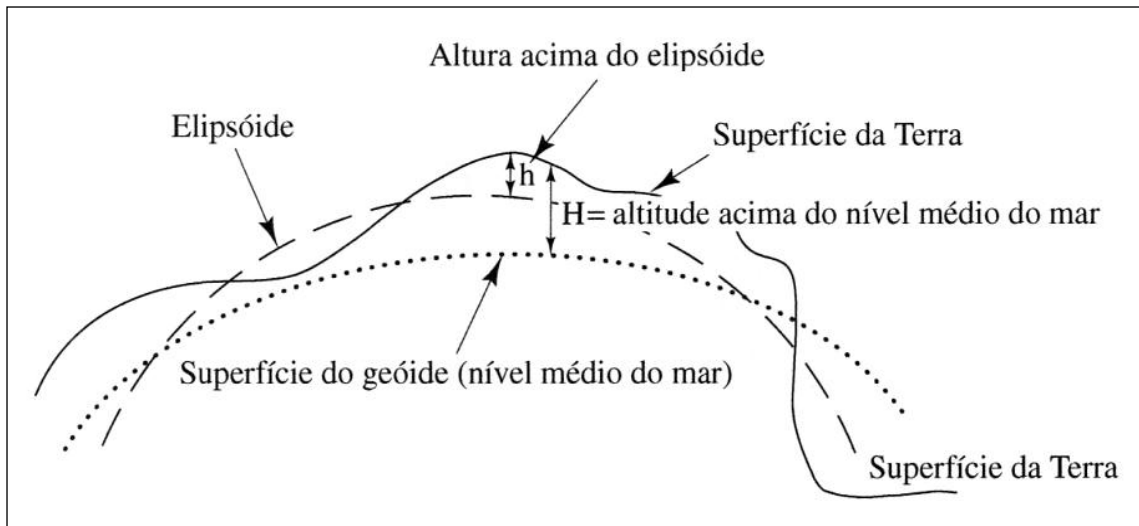


FIGURA 2.4 – Três tipos de superfícies.

Fonte: McCormac, 2007.

Hoje, contudo, o usuário necessita perceber que a medição da cota de um ponto em particular ( $h$ ) dado pelo uso de GPS é realmente a altura de um ponto na superfície do elipsoide para o ponto em questão. O topógrafo, no entanto, necessita da altura ( $H$ ) acima ou abaixo do NMM (ver a Figura 2.4).

O elipsoide usado para representar a Terra para trabalhos com GPS é conhecido como WGS 84 (onde WGS significa *World Geodetic System* — Sistema Geodésico Global). As observações de satélites nas últimas décadas têm nos permitido estimar melhor o tamanho, forma e massa da Terra. Esse elipsoide é consistente com o elipsoide GRS 80 (GRS representa o *Geodetic Reference System* da *International Union of Geodesy and Geophysics* — Sistema Geodésico de Referência da UGGI — União Geodésica Geofísica Internacional).

Para o elipsoide terrestre, é usado um sistema de coordenadas cartesianas, no qual o centro de massa da Terra coincide com as coordenadas zero para  $x$ ,  $y$  e  $z$  (origem do sistema). O eixo  $x$  vai desse centro de massa para a interseção do

equador do elipsoide, com o meridiano de Greenwich. O eixo  $y$  é perpendicular ao eixo  $x$  e o eixo  $z$  é perpendicular ao plano  $xy$ .

Na verdade, as observações GPS permitem que o topógrafo obtenha coordenadas cartesianas para todos os pontos. Esses valores podem ser transformados para latitude, longitude e altura elipsoidal (MCCORMAC, 2007).

### 2.3 Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto é a arte e a ciência de obter informação sobre um objeto sem estar em contato físico direto com o objeto. O sensoriamento remoto pode ser usado para medir e monitorar importantes características biofísicas e atividades humanas na Terra (Jensen, 2009).

Sensoriamento remoto foi formalmente definido pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) como: a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de um objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro que não esteja em contato físico ou íntimo com o objeto ou fenômeno em estudo (Colwell, 1983).

Em 1988, a ASPRS adotou uma definição combinada de fotogrametria e sensoriamento remoto: fotogrametria e sensoriamento remoto são a arte, ciência e tecnologia de obter informação confiável sobre objetos físicos e o ambiente por meio do processo de registro, medição, e interpretação de imagens e representações digitais dos padrões de energia derivados de sistemas sensores sem contato físico (Colwell, 1997).

Numerosas outras definições de sensoriamento remoto têm sido propostas. De fato, Colwell (1984) sugere que "uma medida de quão nova uma ciência é, ou da rapidez com a qual está se desenvolvendo, está na preocupação dos seus cientistas com assuntos de terminologia." Alguns têm proposto uma definição máxima globalizante: Sensoriamento remoto é a aquisição de dados sobre um objeto sem tocá-lo. Tal definição é curta, simples, geral e memorizável. Infelizmente, ela exclui pouco da esfera do sensoriamento remoto (Fussel et al., 1986). Ela abrange

virtualmente todos os dispositivos de sensoriamento remoto, incluindo câmeras, escâneres opto-mecânicos, dispositivos de imageamento lineares ou matriciais, lasers, sistemas de radar, sonares, sismógrafos, gravímetros, magnetômetros e cintilômetros.

### 2.3.1 Altimetria com Sensoriamento Remoto

O avanço da tecnologia permitiu o desenvolvimento de missões espaciais e a criação de satélites artificiais, fazendo com que a ciência do Sensoriamento Remoto se expandisse de forma exponencial. A seguir serão expostos algumas formas de obtenção de dados altimétricos através do sensoriamento remoto.

### 2.3.2 SRTM

SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) é o nome de uma missão espacial liderada pela NASA com parceria das agências espaciais da Alemanha (DLR) e Itália (ASI), realizada durante 11 dias do mês de fevereiro de 2000 visando gerar um modelo digital de elevação quase-global. Corresponde a um radar (SAR) a bordo do ônibus espacial Endeavour, que adquiriu dados sobre mais de 80% da superfície terrestre, nas bandas C e X e fazendo uso da técnica de interferometria. Nesta técnica a altitude é obtida através da medição da diferença de fase entre duas imagens radar sobre um mesmo local na Terra (CCRS, 2004).

Podem ser utilizadas imagens adquiridas em datas diferentes ou em uma mesma órbita, caso haja duas antenas de recepção separadas a bordo da plataforma. O sistema SRTM contava com 2 antenas de recepção, separadas por um mastro de 60 metros (Figura 2.5), o que possibilitou a aquisição dos dados em uma mesma órbita, garantindo a melhor qualidade dos mesmos. Os dados, adquiridos com resolução de 1 arco segundo, ou aproximadamente 30 metros, no

equador, estão sendo processados, gerando-se os Modelos Digitais de Elevação (MDE) da área coberta. Os MDEs relativos à banda C estão sendo distribuídos pela NASA, já se encontrando disponíveis gratuitamente para as Américas do Sul e do Norte, com resolução espacial de aproximadamente 90 x 90 metros.

Há a possibilidade de se adquirir dados com resolução de 30 x 30 metros dependendo de acordos analisados individualmente pela NASA. Os dados relativos à banda X estão sendo processados e distribuídos pelo DLR – Centro Aeroespacial Alemão (JPL, 2004). Ao se iniciar a missão, esperava-se atingir precisões da ordem de 16 metros na altimetria (Duren *et al.*, 1998).

Os dados disponibilizados do SRTM podem ter uma grande aplicabilidade, pois os MDE's de toda a América do Sul já se encontram disponíveis. Um ponto a seu favor – além da gratuidade para a resolução de 90 x 90 metros – é o uso da interferometria para o cálculo da altitude, que possui uma maior acurácia se comparada com a técnica da estereoscopia (CCRS, 2004).

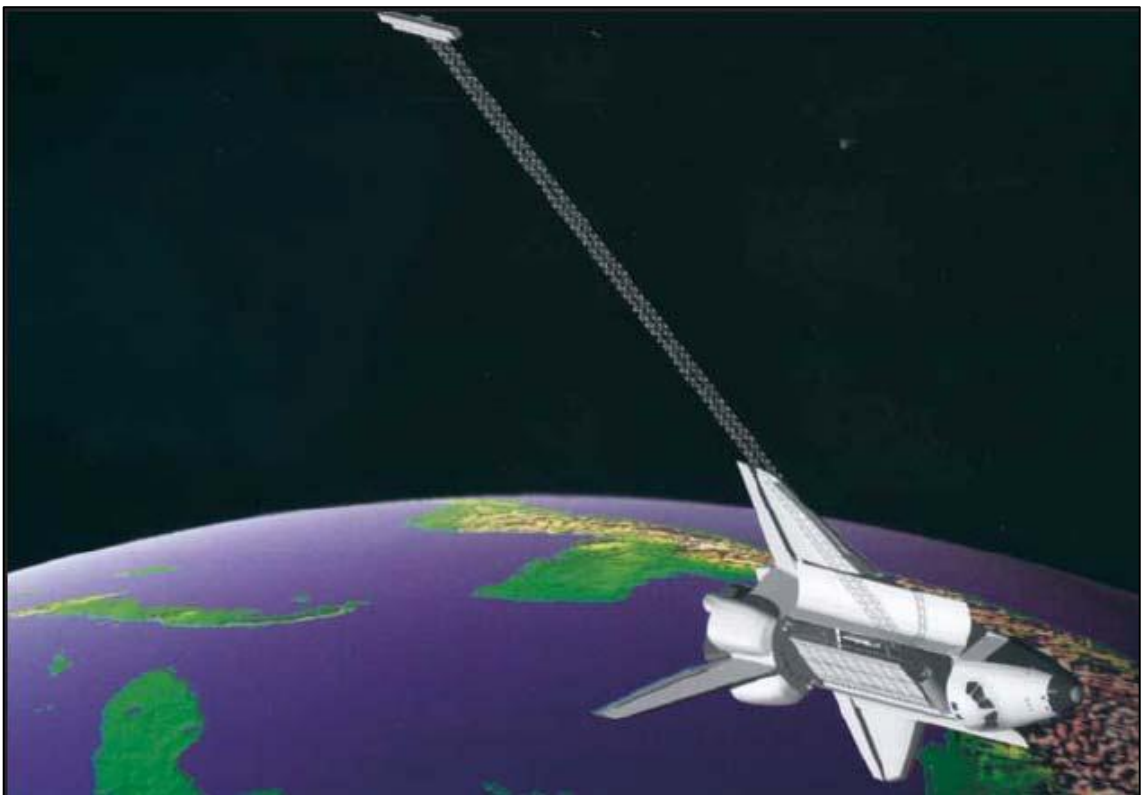


FIGURA 2.5 – Esquema da aquisição de dados do SRTM.

Fonte: <http://erg.usgs.gov/isb/pubs/factsheets/fs07103.html>. Acessado em 01/03/2012.

Alguns trabalhos indicam que podem ser atingidas precisões melhores do que as estimadas antes do início da missão, como por exemplo, em Heipke *et al.* (2002), que estimam em até 6 metros o erro vertical. Para atingir tais metas, os dados devem ser processados a fim de se eliminar imperfeições do sistema, tais como valores espúrios próximos ao litoral e alguns vazios no continente, referentes a áreas de sombra ao sinal. Rao (2004) em experimentos de campo encontrou erros menores que 5 metros na vertical e de 2 a 3 pixels na horizontal, o que chama a atenção para a necessidade de validação também para deslocamentos do dado.

### 2.3.3 Projeto “Brasil em Relevo”

Recentemente, a Embrapa Monitoramento por Satélite desenvolveu uma metodologia para gerar um novo produto de grande interesse para a sociedade brasileira. A base são os dados numéricos de relevo e da topografia do Brasil, obtidos pela nave espacial americana durante a missão conhecida como SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Para cada área de 90 metros por 90 metros do território nacional, dispõe-se de uma medida altimétrica precisa. Esse gigantesco arquivo de base foi recuperado e tratado matematicamente através de modelos que permitem reconstituir o relevo do país, como nas cartas topográficas, só que de forma digital e homogênea (MIRANDA, 2005).

#### 2.3.3.1 Objetivos e Finalidades

O principal objetivo desta pesquisa foi o de produzir e disponibilizar informações sobre o relevo do território nacional, a partir dos dados gerados pelo projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). A partir do processamento digital dessas imagens, a EMBRAPA - Monitoramento por Satélite recortou os mosaicos

estaduais, compatibilizando-os também com os produtos LANDSAT da série Brasil visto do espaço (MIRANDA, 2005).

#### 2.3.3.2 Material Utilizado

O projeto Brasil em relevo utilizou como fonte primária os modelos digitais de elevação, com aproximadamente 90 metros de resolução espacial, originários da missão de mapeamento do relevo terrestre SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*) dos Estados Unidos no ano 2000. Os dados obtidos pelo mapeamento foram disponibilizados pelo USGS Eros Data Center (*United States Geological Survey*) (MIRANDA, 2005).

Os dados originais foram obtidos em formato *raster*, com resolução radiométrica de 16 bits, em formato HGT, projeção geográfica. Também foram utilizados como fonte de informações, os modelos digitais de elevação da América do Sul derivados do SRTM e pós-processados pela FAO/UNEP (*Food Agriculture Organization/United Nations Environment Programme*), no âmbito do programa GLCN (*Global Land Cover Network*) (MIRANDA, 2005).

#### 2.3.3.3 Refinamento do Modelo Digital de Elevação SRTM

O modelo digital de elevação (MDE) do SRTM, com 3 segundos de arco (aproximadamente 90 metros de resolução espacial), é distribuído gratuitamente pelo governo norte-americano. Todavia, ele contém imperfeições caracterizadas por depressões espúrias, picos anômalos e pontos ou áreas com ausência de dados. Dentre as operações realizadas na correção desses problemas, destacam-se os cortes e preenchimentos (“corte/aterro”) com patamares altimétricos bem definidos, interpolações e produção de dados vetoriais (MIRANDA, 2005).

O preenchimento dos pontos ou áreas sem informação no modelo foi realizado utilizando-se como fonte de informação adicional os MDEs disponibilizados pela FAO/UNEP, no âmbito da rede de cooperação Global Land Cover Network (GLCN), corrigidos com a utilização do aplicativo ArcGIS (MIRANDA, 2005).

O método de interpolação usado pelo ArcGIS, incorporado no módulo Topogrid, conserva as características locais do relevo sem perder a continuidade do entorno, ou seja, considera de uma forma ampla toda a tendência global da superfície para gerar a elevação de um determinado ponto. Através de uma técnica iterativa de grade ou “grid” variável, a qual considera parâmetros e tolerâncias definidos pelo usuário e características do relevo, ocorre a convergência para o valor de altitude da célula (MIRANDA, 2005).

O método de interpolação usado pelo Topogrid procura reduzir o número de depressões espúrias no MDE, visto que as paisagens naturais detêm, em sua maioria, predominância de picos em relação à depressões, pois a água, ao promover erosão na superfície, modela a mesma para que tenha escoamento superficial contínuo. A interpolação realizada no ArcGIS considera vários aspectos das superfícies naturais, principalmente o aspecto hidrológico, o qual pode ser maximizado com a imposição da hidrografia mapeada, produzindo modelos digitais com consistência hidrológica (MIRANDA, 2005).

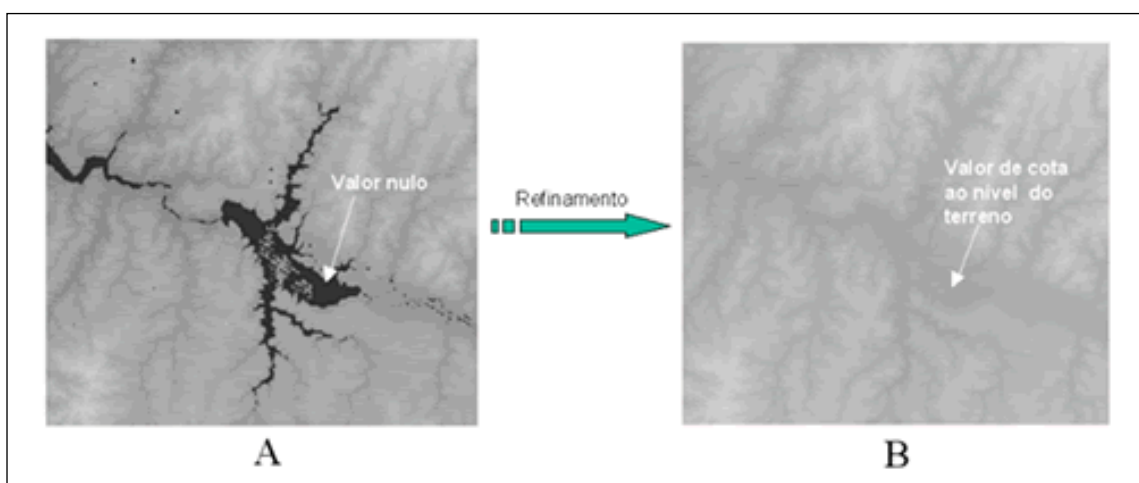


FIGURA 2.6 – Processo de refinamento do modelo digital SRTM.

Fonte: Miranda, 2005.

Neste contexto, conforme Miranda (2005), através de cruzamentos digitais entre o modelo original do SRTM e os dados da FAO/UNEP, as inconsistências foram solucionadas resultando no modelo digital de elevação do Brasil, conforme a Figura 2.6 que exemplifica o modelo digital SRTM antes da etapa de refinamento (A) e após a correção (B).

#### 2.3.4 ASTER

Lançado em dezembro de 1999, o sensor ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo do satélite Terra (Figura 2.7), é resultado de um consórcio entre a NASA e o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI), o *Earth Resources Data Analysis Center* (ERSDAC) e o *United States Geological Survey* (USGS) para construção de uma modelo digital de elevação global de livre acesso. A partir do dia 29 de junho de 2009, modelos digitais de elevação, construídos a partir de pares estereoscópicos de imagens oriundas da plataforma EOS AM-1 com o instrumento ASTER, sensor VNIR (ABRAMS et al, 1999), foram disponibilizados gratuitamente e sem restrições.

Para obtenção dos dados de elevação da superfície o sensor opera no modo estereoscópico com as bandas 3N (nadir) e 3B (*backward*) correspondentes a faixa do infravermelho próximo (0,78 - 0,86  $\mu\text{m}$ ) (Yamaguchi et al., 1999). Este produto apresenta uma resolução espacial de 30m e recobre todo globo terrestre. É o mais completo mapa da superfície da Terra, cobrindo 99% de sua superfície. Útil para o planejamento de cidades, combate a incêndios, conservação de recursos naturais e muitas outras aplicações que exigem informações geográficas detalhadas.

O GDEM foi criado com o processamento e correlacionamento de 1,3 milhões de arquivos de cenas ASTER, de imagens ópticas, cobrindo a superfície terrestre entre as latitudes de 83°N e 83°S. Ao todo o mosaico possui 22.895 imagens de 1° por 1°. As especificações quanto ao formato de saída são: GeoTIFF (*Geographic Tagged Image File Format*), 16 bits, 1m por ND, georreferenciado no sistema



WGS84/EGM96, com precisão estimada de 20 metros de confiança de 95% para os dados verticais e 30 metros de confiança de 95% para os dados horizontais.

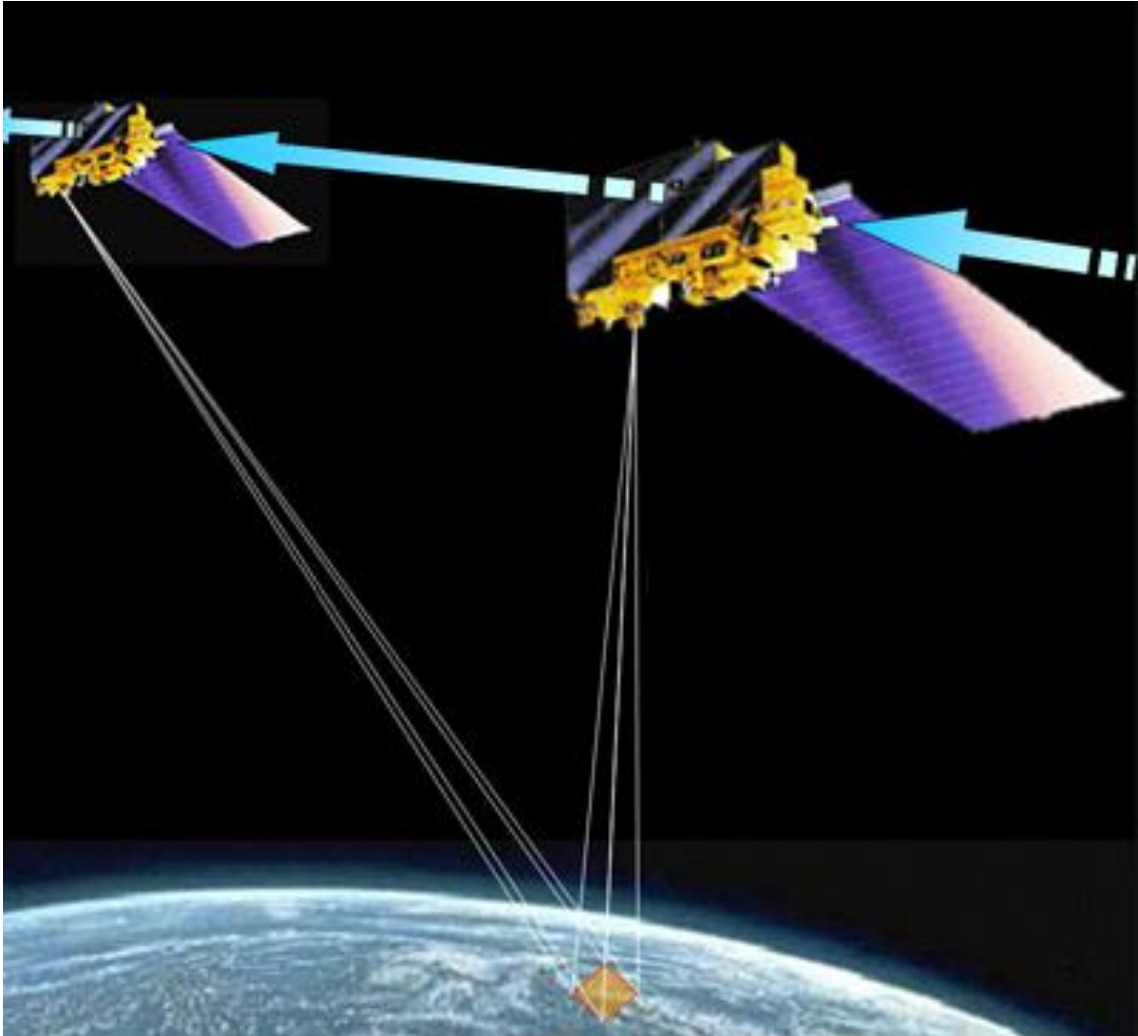


FIGURA 2.7 – Esquema da aquisição de dados ASTER.

Fonte: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/2.html>. Acessado em: 02/03/2012.

Os produtos do ASTER GDEM além de representarem aproximadamente toda a superfície terrestre e igualmente ao SRTM serem disponibilizados de forma gratuita possui algumas vantagens em relação aos dados do SRTM. No ASTER GDEM a construção de um produto com 30m de resolução espacial é feita de forma direta, sem a necessidade de interpolação. Também diferente do SRTM no ASTER GDEM não existem os chamados "voids" (ausência de informações), pelo fato de

estes produtos serem obtidos por processo estereoscópico. Porém, como as imagens ASTER são imagens óticas e não de radar como o SRTM, há a desvantagem de poder haver algumas falhas de correlação causadas por coberturas de nuvens nas imagens de entrada.

### 2.3.5 Google Earth

O avanço da tecnologia tem permitido a criação de aplicativos computacionais capazes de realizar análises de fenômenos espaciais, obter e transferir dados e informações sobre esses fenômenos com grande velocidade. O desenvolvimento desses programas tem proporcionado um importante progresso para a cartografia, auxiliando seus usuários (Santos & Segantine, 2006).

Um dos aplicativos de informações espaciais mais conhecidos e difundidos no mundo todo é o Google Earth, que permite visualizar imagens de satélite da superfície da Terra. Lançado em 2005 e liberado ao público em 2006 pela empresa Google, o programa rapidamente se tornou popular (*software* livre) como uma ferramenta de fácil acesso e extremamente útil para profissionais da área de Geoprocessamento e de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) assim como para a comunidade geral.

O Google Earth forma mosaicos de imagens de satélite e de fotografias aéreas. Como as imagens variam de um a cinco anos, há alguma variação na qualidade das imagens e algumas áreas podem aparecer borradas, sem cor ou cobertas de nuvens. Com o recurso de sobreposição de camadas (*layers*), o programa disponibiliza detalhes como, por exemplo, estradas, fronteiras e visualização altimétrica do terreno.

O aplicativo representa o planeta através de um modelo chamado Globo Digital ou Globo Virtual que é um modelo 3D simulado que possibilita a livre visualização do ambiente virtual representativo do planeta. Ele mostra a superfície dos continentes e dos oceanos sob uma projeção chamada Perspectiva Geral. O ponto perspectivo para esta projeção está localizado a uma distância finita, fazendo

com que o usuário observe a Terra, situado a milhares de quilômetros, a poucos metros acima da superfície ou até mesmo abaixo do nível do mar. A Projeção Perspectiva é semelhante à Projeção Ortográfica com exceção de que o ponto perspectivo está a uma distância finita da superfície (próximo à Terra) em vez do infinito (espaço) (Bandalize, 2007).

O sistema de coordenadas geográficas é referenciado ao Datum WGS 84 (*World Geodetic System*), podendo também informar as coordenadas no sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) (Bandalize, 2007).

O programa oferece o recurso terreno, que acrescenta dados de elevação da superfície terrestre, criando um modelo digital de elevação (MDE). As informações sobre os dados altimétricos foram obtidas através das imagens de satélite recolhidos pela NASA durante a missão STRM – *Shuttle Radar Topography Mission*, com resolução espacial de 90 metros. O erro médio das altitudes é de 5 a 10 metros (Bandalize, 2007).

A elevação é limitada a características geográficas naturais, como montanhas e vales, e não se aplica aos edifícios. Os dados originais contém imperfeições como depressões e picos anômalos e pontos ou áreas com ausência de dados. O software utiliza MDEs da SRTM processados por técnicas de interpolação, para corrigir essas falhas nos dados (Ribas, 2007). As informações altimétricas são espaçadas em aproximadamente 1 pé.

A cobertura das regiões do planeta é constituída de mosaicos, com diferentes resoluções espaciais, construídos com imagens dos satélites Landsat, Ikonos, Quickbird e Spot. As imagens disponíveis no Google Earth são atualizadas com maior frequência nos grandes centros urbanos, mas não são disponíveis em tempo real. A resolução espacial das imagens do Google Earth para a maioria dos locais é de 15 metros, dependendo do sensor utilizado (Ribas, 2007).

Além das imagens, o aplicativo também possibilita a sobreposição de camadas de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que podem conter dados matriciais ou vetoriais, como unidades territoriais, pontos de interesse, ruas e imagens.

Devido ao fácil acesso, à interface intuitiva, à velocidade de obtenção e transmissão de dados e à interação com outros programas de geoprocessamento, o

Google Earth tem se destacado como o programa de informações geográficas com maior número de usuários em todo o planeta, pois é utilizado não só pela comunidade acadêmica, mas também pela comunidade em geral.

### 2.3.6 NAVSTAR-GPS

O NAVSTAR-GPS, (*Navigation Satellite with Time and Ranging – Global Positioning System*) ou apenas GPS, é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos - DoD (*Department of Defense*), visando a ser o principal sistema de navegação das Forças Armadas norte-americanas. Ele resultou da fusão de dois programas financiados pelo governo norte-americano para desenvolver um sistema de navegação de abrangência global, sob responsabilidade da Marinha e da Força Aérea norte americana. Em razão da alta acurácia proporcionada pelo sistema e do grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores GPS, uma grande comunidade usuária emergiu dos mais variados segmentos da comunidade civil (navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas etc.).

No entanto, lendo o histórico sobre o desenvolvimento desse sistema, apresentado em Parkinson (1996, p.7), constata-se que NAVSTAR era apenas um bom nome para o projeto a ser proposto, e não uma sigla. Pode-se, portanto, depreender que esse nome é bem sugestivo da finalidade do projeto, pois conota "estrela da navegação".

Como o próprio nome sugere, o GPS é um sistema de abrangência global, que tem facilitado todas as atividades que necessitam de posicionamento, fazendo que algumas concepções antigas possam ser colocadas em prática. Exemplo claro é o que vem ocorrendo com o desenvolvimento da agricultura de precisão, um conceito estabelecido por volta de 1929, que só agora tem sido posto em prática, graças à integração de várias geotecnologias, entre elas o GPS (Stafford, 1996). Além disso, surgiram muitas outras aplicações, em razão da facilidade que o sistema proporciona na obtenção de coordenadas.

A concepção do sistema GPS permite que um usuário, em qualquer local da superfície terrestre, ou próximo a esta, tenha à sua disposição no mínimo quatro satélites para serem rastreados. Esse número de satélites permite que se realize o posicionamento em tempo real. Para os usuários da área de Geodésia, uma vantagem muito importante da tecnologia GPS, em relação aos métodos de levantamento convencionais, é que não há necessidade de intervisibilidade entre as estações. Além disso, o GPS pode ser usado sob quaisquer condições climáticas.

O princípio básico de navegação pelo GPS consiste na medida de distâncias entre o usuário e quatro satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites em um sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Do ponto de vista geométrico, apenas três distâncias, desde que não pertencentes ao mesmo plano, seriam suficientes. Nesse caso, o problema se reduziria à solução de um sistema de três equações com três incógnitas. A quarta medida é necessária por causa do não-sincronismo entre os relógios dos satélites e o do usuário, que adiciona uma incógnita ao problema.

O GPS foi declarado operacional em 27 de abril de 1985, com 24 satélites em órbita, mas desde 1983 já estava sendo utilizado no posicionamento geodésico. No final de 2005, 29 satélites estavam operacionais e, em junho de 2007, havia trinta satélites. O sistema proporciona dois tipos de serviços, conhecidos como SPS (*Standard Positioning Service* – Serviço de Posicionamento Padrão) e PPS (*Precise Positioning Service* - Serviço de Posicionamento Preciso).

O SPS é um serviço de posicionamento e tempo padrão disponível para todos os usuários do globo, sem cobrança de qualquer taxa. Até o dia 1º de maio de 2000, esse serviço proporcionava capacidade de acurácia horizontal e vertical dentro de 100 e 140 m, respectivamente, e 340 ns nas medidas de tempo, com nível de confiança de 95%. Até essa data, o PPS proporcionava melhores resultados (22,0 m horizontal, 27,7 m vertical e 200 ns), mas era restrito ao uso de militares e usuários autorizados, o que se mantém até hoje. Esse nível de acurácia é obtido com o método de posicionamento mais simples de ser empregado com o GPS (posicionamento por ponto simples, também conhecido como autônomo). Com a

aplicação de métodos mais avançados (posicionamento por ponto preciso e posicionamento relativo), o nível de acurácia melhora de modo considerável.

Na realidade, no posicionamento simples, o sistema sempre teve capacidade de proporcionar melhores níveis de acurácia, mas, ao que tudo indica, isso não era de interesse do DoD, haja vista que o sistema é global, o que poderia pôr em risco aspectos de segurança. Dessa forma, a limitação no nível de acurácia citada anteriormente era garantida pela adoção do AS (*Anti-Spoofing*) e da SA (*Selective Availability* - Disponibilidade Seletiva). O AS é um processo de criptografia do código P, um dos códigos utilizados no GPS para realizar medidas de distâncias, visando protegê-lo de imitações por usuários não autorizados. A SA, ou seja, a proibição de obter a acurácia capaz de ser proporcionada pelo GPS era consumada pela manipulação das mensagens de navegação (técnica *epsilon*: e) e da frequência dos relógios dos satélites (técnica *dither*: d). Para grande surpresa da comunidade usuária, essa técnica de deterioração da acurácia no SPS foi abolida do sistema à 0h TU) (Tempo Universal) do dia 2 de maio de 2000, o que melhorou a acurácia em torno de 10 vezes. Com isso, foi anunciado um plano de modernização do GPS. Em 18 de setembro de 2007 o presidente dos Estados Unidos aboliu definitivamente essa degradação dos futuros satélites GPS (GPSIII).

O GPS consiste de três segmentos principais: Espacial, Controle e de Usuários. Enquanto o primeiro está associado com a constelação dos satélites e seus sinais, o de Controle monitora e faz a devida manutenção do sistema. O sistema de Usuários do GPS é abrangente e continua a se ampliar (Monico, 2008).

#### 2.3.6.1 Segmento Espacial

O segmento espacial consiste de no mínimo 24 satélites MEO (*Medium Earth Orbits* - Satélites de Órbita Média) distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano, em uma altitude aproximada de 20.200 km. Os planos orbitais são inclinados 55° em relação ao Equador e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Dessa forma, a posição dos

satélites se repete, a cada dia, aproximadamente quatro minutos antes em relação ao dia anterior. Essa configuração garante que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora. As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram, respectivamente, a constelação dos satélites GPS e a distribuição destes em cada um dos planos orbitais (Monico, 2008).

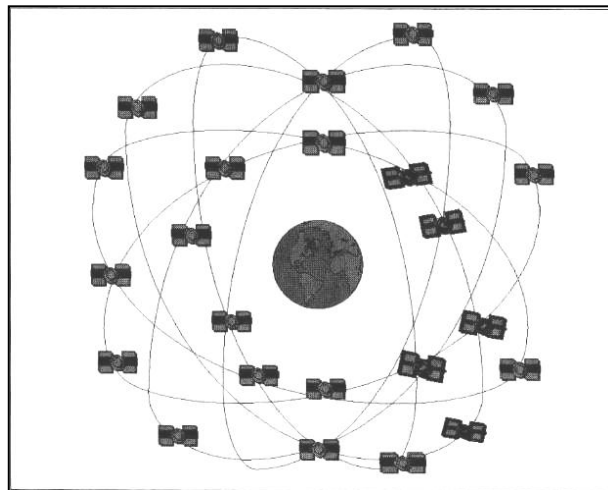


FIGURA 2.8 – Constelação dos satélites GPS.

Fonte: Monico, 2008.

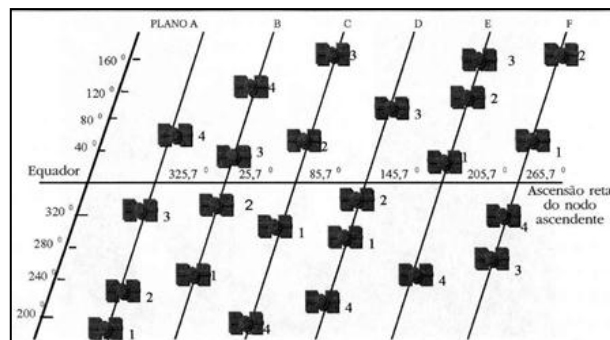


FIGURA 2.9 – Distribuição dos satélites na constelação final.

Fonte: Seeber, 1993.

Cada satélite carrega padrões de frequência altamente estáveis (césio e rubídio) com estabilidade entre  $10^{-12}$  e  $10^{-13}$  por dia, formando uma referência de tempo muito precisa. Os satélites GPS têm sido identificados por vários esquemas

de numeração. Entre eles pode-se citar o SVN (*Space Vehicle Number* - Número do Veículo Espacial), ou número NAVSTAR, o PRN (*Pseudo-Random-Noise* - Ruído Falsamente Aleatório) ou SVID (*Space Vehicle Identification* - Identificação do Veículo Espacial) e número da posição orbital (Monico, 2008).

### 2.3.6.2 Segmento de Controle

As principais tarefas do segmento de controle são: monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites; determinar o sistema de tempo GPS; prever as efemérides dos satélites, calcular as correções dos relógios dos satélites; e atualizar periodicamente as mensagens de navegação de cada satélite.

O sistema de controle é composto por cinco estações monitoras (Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia e Colorado Springs), três delas com antenas para transmitir os dados para os satélites (Ascension Island, Diego Garcia e Kwajalein), e uma estação de controle central (MCS: *Master Control Station*) localizada em Colorado Springs, Colorado. Essas cinco estações de monitoramento pertencem à AAF American Air Force, com as sete da NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*), antiga NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), compõem as estações monitoras GPS do DoD.

Cada estação monitora é equipada com oscilador externo de alta precisão e receptor de dupla frequência, o qual rastreia todos os satélites visíveis e transmite os dados para a MCS, via sistema de comunicação. Os dados são processados na MCS para determinar as órbitas dos satélites e as correções dos relógios dos satélites, de modo que periodicamente as mensagens de navegação transmitidas (*broadcast ephemeris* - efemérides transmitidas) sejam atualizadas. A informação atualizada é enviada para os satélites a partir das antenas terrestres.

A distribuição geográfica das estações monitoras somente ao longo do Equador atende aos requisitos de navegação e várias outras aplicações, mas não é adequada para a determinação de órbitas altamente precisas, em particular para aplicações em geodinâmica. Isso em razão do reduzido número de estações, que



torna a geometria um pouco deficiente. O IGS (*International GNSS Service* - Serviço Internacional GNSS), estabelecido pela IAG (*International Association of Geodesy* - Associação Internacional de Geodésia), tem capacidade de produzir efemérides com precisão da ordem de poucos centímetros em cada uma das coordenadas do satélite, podendo atender à maioria das aplicações que exigem alta precisão. Essas efemérides ficam disponíveis aos usuários no prazo de uma semana a partir da coleta dos dados. Atualmente o IGS também produz efemérides rápidas, denominadas IGR, com precisão da ordem de 5 cm, colocando-as à disposição dos usuários diariamente. Há ainda as efemérides ultra-rápidas (IGU), com precisão estipulada em aproximadamente 0,10 m para a parte predita (tempo real), e da ordem de 5 cm para a parte que apresenta latência de 3 horas (Monico, 2008).

### 2.3.6.3 Segmento de Usuário

O segmento de usuários está diretamente associado aos receptores GPS, os quais devem ser apropriados para os propósitos a que se destinam, como navegação, geodesia, agricultura ou outra atividade. A categoria de usuários pode ser dividida em civil e militar.

Os militares fazem uso dos receptores GPS para estimar suas posições e deslocamentos quando realizam manobras de combate e de treinamento. Durante a operação *Desert Storm*, na Guerra do Golfo, em 1991, vários receptores GPS foram utilizados para auxílio no deslocamento nas regiões desérticas, onde praticamente não há feições factíveis de ser localizadas em um mapa. Esse fato foi muito noticiado pela imprensa, fazendo que o GPS passasse a ser uma tecnologia bastante conhecida do público em geral. Em outras guerras também muito foi noticiado o uso do GPS. Várias outras atividades militares fazem uso do posicionamento com receptores GPS, como a navegação de mísseis. Mas não são apenas os militares, que desenvolveram o sistema, que tiram proveito dessa valiosa tecnologia.

Atualmente, há grande quantidade de receptores no mercado civil, para as mais diversas aplicações, limitadas apenas pela imaginação dos usuários, o que demonstra que o GPS realmente atingiu sua maturidade (Monico, 2008).

#### 2.3.6.4 Coordenadas dos Satélites GPS

Para obter a posição instantânea da antena de um receptor GNSS o usuário deve ter acesso às posições e ao sistema de tempo dos satélites em tempo real. Essas informações são acessadas via sinais dos satélites, contidas nas efemérides transmitidas (*Broadcast Ephemerides* para o GPS). Para usuários que não necessitem de posição instantânea, mas de alta acurácia, há a opção de acessar, via internet, as efemérides pós-processadas, denominadas efemérides precisas, produzidas por diversos centros de análises que compõem o IGS. Dependendo da precisão requerida no pós-processamento, podem-se adotar as próprias efemérides transmitidas. Enquanto essas efemérides, para o caso do GPS, são referenciadas ao WGS 84, na determinação das efemérides precisas adota-se um dos vários ITRFs.

O procedimento para a produção das efemérides transmitidas GPS envolve, em geral, duas etapas. Primeiro produzem-se as efemérides de referência para determinado período, com base em um modelo que considera as forças que atuam nos satélites, em um processamento *off-line*, usando programas computacionais apropriados. Trata-se basicamente da força de atração gravitacional da Terra, das forças de atração do Sol e da Lua, além da pressão de radiação solar sobre os satélites. Na segunda etapa, as discrepâncias entre as observações coletadas nas estações monitoras e as calculadas com base nas efemérides de referência são processadas, usando-se o algoritmo de filtragem Kalman, com a inclusão de quatro semanas de dados, para predição das correções das efemérides de referência e do comportamento dos relógios dos satélites. Esse procedimento envolve as observações de pseudodistâncias de todos os satélites visíveis nas estações monitoras, as quais são corrigidas da refração ionosférica e troposférica e dos efeitos relativistas. As primeiras 28 horas da predição são divididas em intervalos de

4 horas, com sobreposição de 1 hora. Uma vez por dia, ou mais frequentemente, se necessário, elas são transmitidas para os satélites (Monico, 2008).

#### 2.3.6.5 Órbitas Transmitidas (*Broadcast Ephemeris*)

A partir da predição da órbita de um satélite GPS com um arco de 28 horas, dividido em intervalos de 4 horas, com sobreposição de 1 hora, geram-se nove efemérides diferentes. Embora a predição das órbitas dos satélites GPS seja dada em coordenadas cartesianas, com as respectivas velocidades, elas são transformadas em elementos keplerianos, de acordo com o formato de navegação. Esse formato requer menor espaço em memória, proporcionando maior flexibilidade para o segmento de controle do GPS (Monico, 2008).

#### 2.3.6.6 Órbitas Precisas (*Precise Ephemeris*)

A produção de efemérides pós-processadas, denominadas efemérides precisas, visa atender usuários que necessitam de posicionamento com precisão melhor que a proporcionada pelas efemérides transmitidas. Inicialmente, o NGA era o único órgão a produzir esse tipo de serviço. Originalmente, os dados usados para estimar essas efemérides eram coletados em dez estações distribuídas em todo o globo. Além das cinco estações monitoras, utilizavam-se dados de outras cinco estações do NGA (Buenos Aires, Quito, Hermitage (Inglaterra), Bahrein e Smithfield (Austrália)). Essas efemérides eram então disponibilizadas apenas para usuários autorizados (Monico, 2008).

### 2.3.6.7 Sistema de Referência Associado ao GPS

O sistema de referência associado ao GPS, quando se utilizam efemérides transmitidas, é o WGS 84. Dessa forma, quando um levantamento é efetuado usando-se o GPS em sua forma convencional, as coordenadas dos pontos envolvidos são obtidas nesse sistema de referência. A Figura 2.10 ilustra o WGS 84. Sua origem é o centro de massa da Terra, com os eixos cartesianos X, Y e Z definidos de forma idêntica aos do CTRS para a época 1984,0. O elipsoide de referência é o WGS 84, um elipsoide de revolução geocêntrico, que em nível prático coincide com o GRS 80 (Monico, 2008).

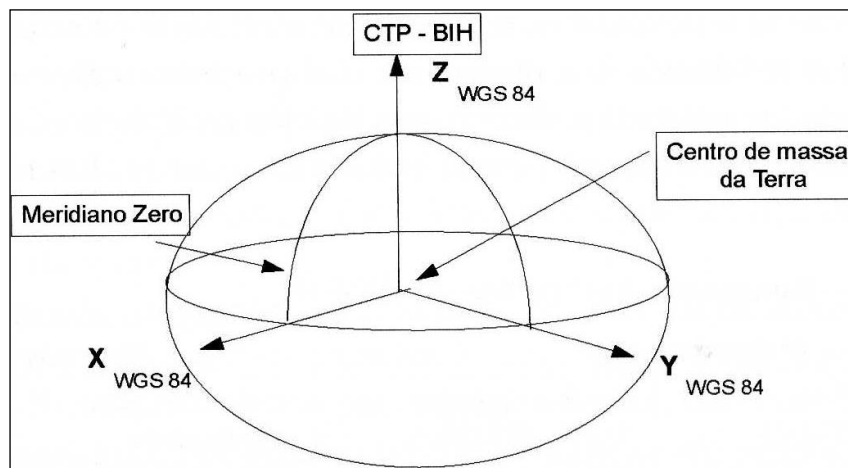


FIGURA 2.10 – Sistema de referência adotado no GPS.

Fonte: Monico, 2008.

Fazem parte ainda do WGS 84 as alturas geoidais entre o elipsoide WGS 84 e o geóide, as quais foram derivadas do EGM96 (*Earth Gravitational Model 1996 - Modelo Gravitacional da Terra*). A incerteza absoluta das alturas geoidais é estimada no intervalo de 0,5 a 1,0 m, em nível global (Monico, 2008).

### 2.3.7 Modelagem de Imagens com Sensoriamento Remoto

Dados de sensoriamento remoto não deveriam ser analisados num vácuo, sem o benefício de informações colaterais, tais como mapas de solos, hidrologia e topografia (Ramsey et al., 1995). Por exemplo, o mapeamento de cobertura da terra usando dados de sensoriamento remoto é significativamente melhorado pela incorporação de informação topográfica a partir de modelos digitais do terreno e outros dados SIG (p.ex., Stow et al., 2003). Os estudos de SIG requerem atualizações precisas e periódicas das variáveis distribuídas espacialmente na base de dados, as quais o sensoriamento remoto pode fornecer. O sensoriamento remoto pode beneficiar-se do acesso à informação auxiliar precisa para melhorar a exatidão da classificação e outros tipos de modelagem. Tal sinergia é crítica para que as análises com sistemas especialistas e redes neurais sejam feitas satisfatoriamente (Tullis e Jensen, 2003).

#### 2.3.7.1 Modelagem de Imagens com o ArcGIS

O ArcGIS é um programa computacional projetado, entre outras inúmeras funções, para criar dados de elevação de superfície e exibi-los em três dimensões. Ele fornece funções de análise adicionais, tais como, cálculo de área de superfície e de volume. Cada vez mais, os usuários de SIG e público em geral esperam ser capazes de visualizar mapas de forma interativa, na web, gratuitamente. Esta é em grande parte graças ao Google Earth, que revolucionou a forma de ver a informação espacial. O ArcGIS tem o poder de criar e analisar dados geográficos, e o Google Earth tem a velocidade e interface intuitiva tornando, a associação desses dois programas, uma excelente ferramenta para exibir mapas e informações espaciais e processá-los.

O ArcGIS, pode criar modelos de superfície de dados de elevação, tais como curvas de nível, pontos de GPS, ou pontos oriundos de topografia convencional. Ele

também pode montar imagens e características vetoriais sobre superfícies, calcular declives, volumes e áreas de superfície, criar linhas de contorno, e determinar a visibilidade de qualquer ponto sobre uma superfície (Kennedy, 2009).

#### 2.3.7.2 Dados em 3 Dimensões (3D)

Todos os dados geográficos contém coordenadas horizontais  $x$  e  $y$ . Para trabalhar em três dimensões, você precisa de dados que contém valores de  $z$  também. Para cada  $x$ ,  $y$  armazenado na localização de um conjunto de dados em 3D, o valor de  $z$  é armazenado também. Em um modelo digital de terreno, o valor  $z$  representa elevação, que pode ser altura elipsoidal, ortométrica ou simplesmente uma cota ou altitude relativa.

ArcGIS trabalha principalmente com *raster*, TIN, e vetores 3D. *Rasters* e TINs são utilizadas para modelar superfícies, não só de terrenos, mas de qualquer fenômeno que varia continuamente através de uma área, como precipitação, concentração química, dispersão da poluição, níveis de ruído, distribuição da população, ou o pH do solo (Kennedy, 2009).

#### 2.3.7.3 Imagens (*Rasters*)

O *raster* representa uma superfície como uma grade retangular de células quadradas e igualmente espaçadas. Cada célula é do mesmo tamanho e tem um endereço de linha e de coluna único. Uma célula pode representar um quilômetro quadrado, um metro quadrado, ou um centímetro quadrado. Quanto menor as células, mais detalhada é o *raster*, e maior será o espaço de arquivo retomado pelo *grid* (grade).

Uma vez que o *grid* é uniforme, as suas coordenadas horizontais ( $x$ ,  $y$ ) não precisam de ser armazenadas em cada célula. Em vez disso, são calculadas a partir

do x, y da localização da célula inferior esquerda do *grid*. Cada célula, no entanto, deve apresentar o seu próprio valor z que representa uma quantidade ou uma categoria de fenômenos como a elevação, o rendimento da cultura, ou a luz refletida (Kennedy, 2009).

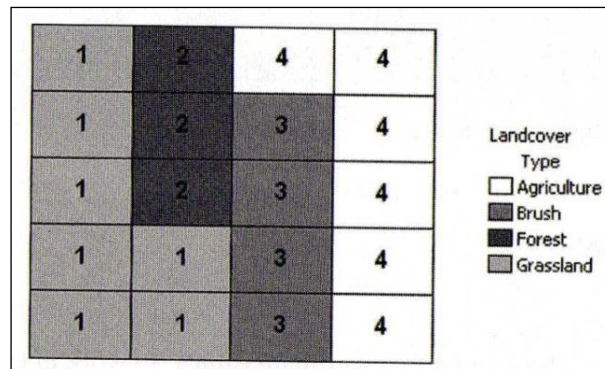


FIGURA 2.11 – *Grid* de células de uso do solo.

Fonte: Kennedy, 2009.

Na Figura 2.11, todas as células com o mesmo valor são simbolizadas pela mesma cor. Dados *raster* geralmente são divididos em duas categorias: imagem e temática. Em uma imagem, o fenômeno da superfície é o reflexo ou emissão da luz, ou alguma outra banda do espectro eletromagnético, e pode ser medida através de uma câmara ou satélite (Kennedy, 2009).

## 2.4 Interpoladores Espaciais

Em um *raster* temático, as amostras dos fenômenos, são utilizadas para estimar os valores das células desconhecidas no modelo. Este processo de estimação é chamado de interpolação, e é usado para criar modelos de fenômenos mensuráveis, tais como elevação, chuva, poluição do ar, profundidade da neve, ruído e contaminação (Kennedy, 2009).

Na Figura 2.12, o ponto no centro se encontra a meio caminho entre dois valores conhecidos, 3 e 5, de modo que o seu valor será estimado em 4, aproximadamente.

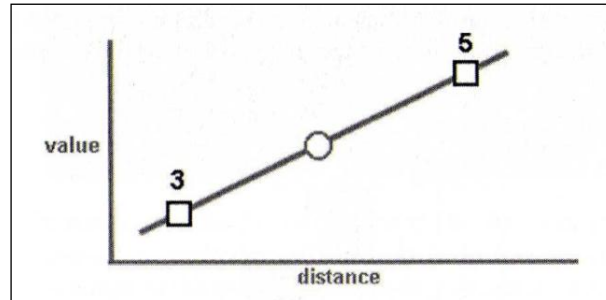


FIGURA 2.12 – Um exemplo de interpolação linear.

Fonte: Kennedy, 2009.

Interpolares valores através de uma superfície é mais complicado do que estimá-los ao longo de uma linha reta. Na Figura 2.13, uma superfície de elevação foi interpolada a partir de um conjunto de pontos. Cada ponto representa um local onde a elevação foi medida. A quadrícula resultante é uma previsão do que a elevação é em qualquer localização na superfície real. Quanto mais pontos forem coletados, maior será a precisão do modelo (Kennedy, 2009).

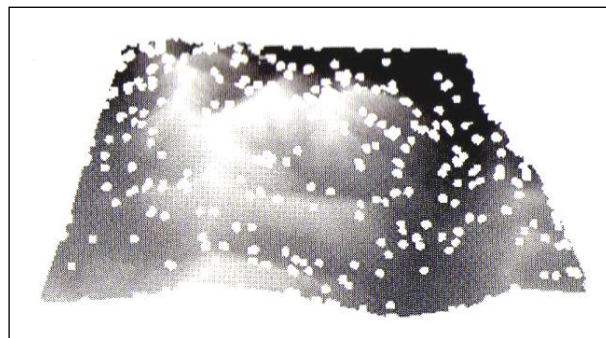


FIGURA 2.13 – Representação das amostras coletadas.

Fonte: Kennedy, 2009.



Recomenda-se, em locais aonde a declividade for mais acentuada, levantar pontos adicionais para criar um modelo mais preciso. A ideia central por trás de interpolação espacial é que os pontos próximos uns dos outros são mais parecidos do que aqueles mais distantes. Portanto, o valor em qualquer local deve ser estimado utilizando os pontos próximos. A maioria dos métodos de interpolação aplicam este princípio, dando os pontos mais próximos da amostra a maior influência ao estimar um valor de uma célula desconhecida. O ArcGIS oferece vários métodos de interpolação para a criação de superfícies *raster* de dados pontuais, incluindo Inverso Ponderado da Distância, Curvatura Mínima, Vizinho Natural e Krigagem (Kennedy, 2009).

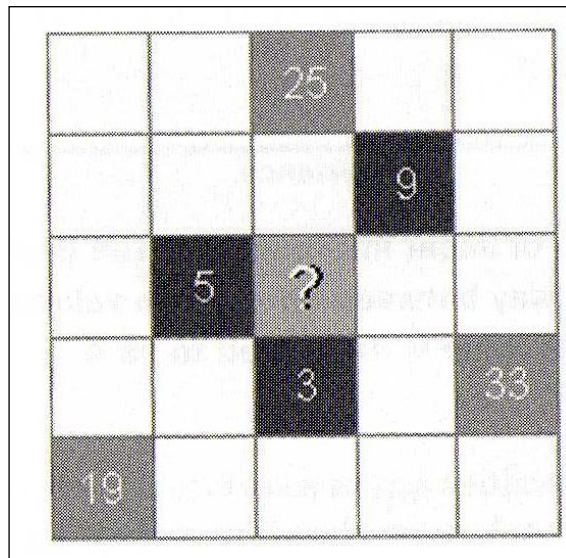


FIGURA 2.14 – Células numeradas indicam os valores conhecidos.  
Fonte: Kennedy, 2009.

Ao estimar o valor da célula central desconhecido, um método de interpolação utilizando autocorrelação espacial vai usar todos os seis pontos de amostragem, mas vai dar mais influência para os mais próximos. Na Figura 2.14, as células mais escuras indicam os pontos de amostragem mais influentes (Kennedy, 2009).

A seguir serão descritos os métodos de interpolação espacial, realizados pelo programa ArcGIS, utilizados neste trabalho.

### 2.4.1 Inverso Ponderado da Distância (*Inverse Distance Weighted – IDW*)

Este método 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 à distância do nó da malha. O fator peso pode ser pré-determinado pelo usuário, sendo que quanto maior o valor escolhido, menor será a influência dos pontos mais distantes do nó. Inversamente, quanto menor for o peso, maior o efeito de pontos distantes sobre toda a malha. Uma característica negativa deste método é a geração de efeito mira, ao redor dos pontos observados. Este é um método rápido e requer pouco custo computacional.

O IDW é um bom interpolador para medir fenômenos como o som, cuja distribuição cai drasticamente com a distância. Não é tão bom para medir fenômenos como a poluição do ar, porque não pode levar em conta todas as tendências predominantes nos dados, tais como o vento. Porque o modelo de superfície gerado, não irá passar além dos pontos de amostragem (Figura 2.15), e nenhuma estimativa será feita acima dos valores máximos ou abaixo dos valores mínimos da amostra (Kennedy, 2009).

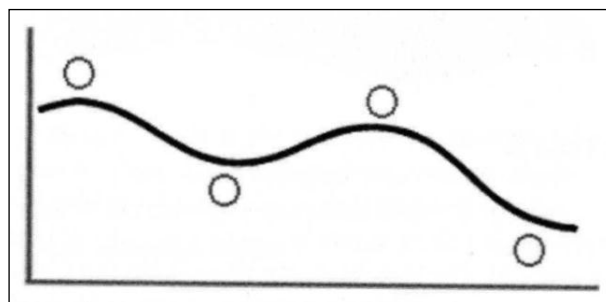


FIGURA 2.15 – Superfície criada pelo Inverso Ponderado da Distância.

Fonte: Kennedy, 2009.

#### 2.4.2 Curvatura Mínima (*Spline*)

O interpolador *Spline*, em vez de uma média de valores entre pontos de amostragem, cria uma superfície que passa exatamente sobre deles. Isso é útil se você quer ser capaz de estimar os valores que estão abaixo do mínimo ou acima dos valores máximos encontrados nos dados da amostra.

Seu 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. O grau de polinômio mais utilizado é 3, *Spline* cúbico (Emery & Thompson, 1997).

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).

O *Spline* é melhor para superfícies que variam gradualmente. Se as amostras são próximas umas das outras e têm diferenças extremas em termos de valor, ele pode exagerar nos valores estimados, porque utiliza cálculos de inclinação (mudança à distância) para descobrir a forma da superfície. Terrenos ou fenômenos que mudam de repente, tais como um penhasco ou uma linha de falha, não são bem representados por uma superfície lisa curva. Nesses casos, pode ser melhor usar o interpolador IDW.

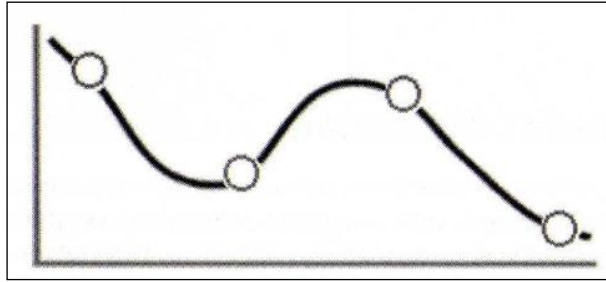


FIGURA 2.16 – Superfície criada pela Curvatura Mínima.  
Fonte: Kennedy, 2009.

Na Figura 2.16 a superfície criada pelo interpolador será uma linha que passa sobre os pontos da amostra. Os valores de superfície poderão ultrapassar os valores das amostras

#### 2.4.3 Krigagem (*Kriging*)

Krigagem é semelhante ao IDW na medida em que os pontos amostrais próximos aos serem estimados, possuem maior influência. No IDW, no entanto, este peso depende apenas da distância para estimar a localização desconhecida. A Krigagem assume que a distância e a direção entre os pontos de amostra indicam uma relação espacial na superfície, de modo que os pesos se baseiam não só na distância entre os pontos medidos, mas também no arranjo geral de entre os pontos medidos. A Krigagem envolve várias etapas antes de criar a superfície, incluindo a análise exploratória estatística dos dados e modelagem de variograma. Ele é frequentemente usado em ciência do solo e geologia (Kennedy, 2009).

A krigagem define o grau de dependência ou correlação espacial entre as amostras através do semivariograma (Cressie, 1991). Uma vez modelado o semivariograma, é possível verificar o nível de anisotropia dos dados, e então definir os melhores pesos para as amostras.

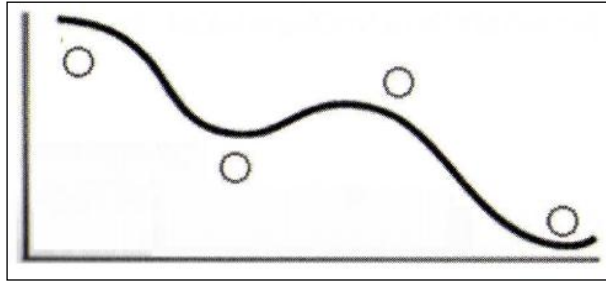


FIGURA 2.17 – Superfície criada pela Krigagem.  
Fonte: Kennedy, 2009.

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". A superfície criada pelo interpolador poderá exceder os valores da amostra, mas não irá passar sobre eles, conforme mostrado na Figura 2.17.

#### 2.4.4 Vizinho Natural (*Natural Neighbor*)

Como IDW, o interpolador Vizinho Natural é um método de média ponderada. No entanto, em vez de estimar o valor de um ponto usando as células de amostra mais próximas, o interpolador Vizinhos Natural primeiro executa uma triangulação de Delaunay (que também é usado para criar um TIN a partir de pontos de amostra). Uma triangulação de Delaunay conecta todos os pontos da amostra e faz com que cada ponto seja um nó de um triângulo, e todos os triângulos sejam contíguos e não sobrepostos.

Diferente das demais técnicas, esta não extrapola valores, resolvendo a interpolação somente para o interior do domínio dos dados. Esta técnica utiliza polígonos Thiessen para avaliação de pesos para os pontos. Este método faz a interpolação através da média ponderada dos pontos vizinhos, onde os pesos são proporcionais às áreas proporcionais (Kennedy, 2009).

A Triangulação de Delaunay (Figura 2.18) conecta os pontos localizados de forma irregular, com linhas para formar uma rede de triângulos contíguos, que não se sobrepõem. Quando os triângulos são formados, o interpolador cria um conjunto de polígonos Voronoi em torno dos pontos de amostra. Os Polígonos Voronoi, também chamados de polígonos Thiessen, são formados através da elaboração da mediatriz de cada uma das linhas de triângulo de modo que cada polígono circunda a região que está mais próximo de um ponto do que para qualquer outro ponto (Kennedy, 2009).

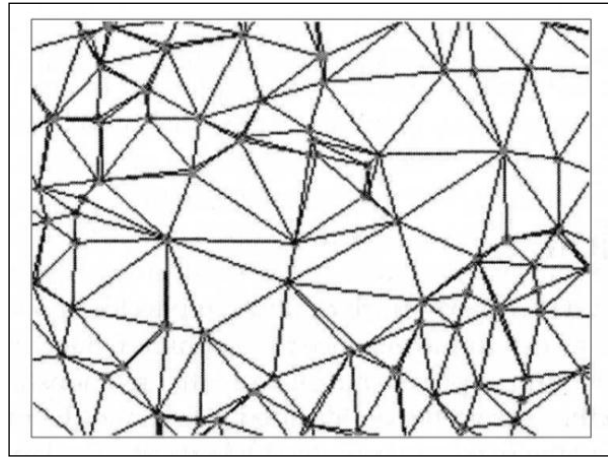


FIGURA 2.18 – Triangulação de Delaunay.  
Fonte: Kennedy, 2009.

A Figura 2.19 mostra um conjunto de pontos de amostra ligados por triangulação Delaunay, com os polígonos Voronoi no fundo (a) e os polígonos de Voronoi delimitando cada lado do triângulo (b).

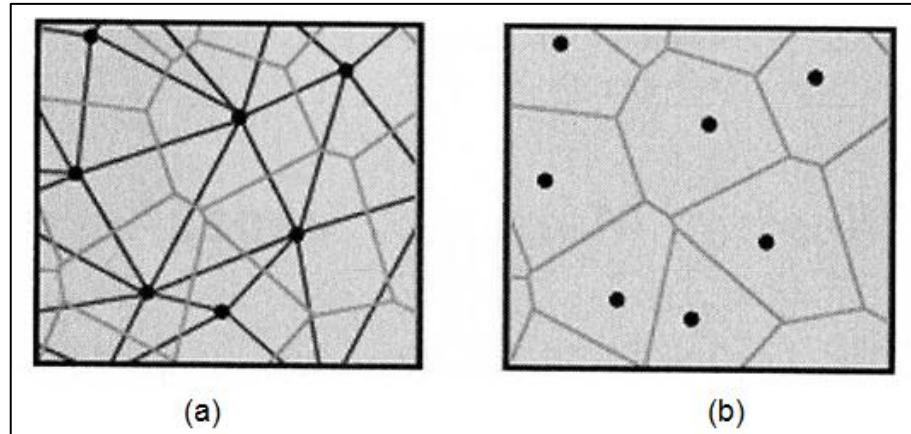


FIGURA 2.19 – Triangulação de Delaunay e polígonos Voronoi  
Fonte: Kennedy, 2009.

Finalmente, o *raster* de superfície é interpolado utilizando os pontos de amostragem de dados que são vizinhos naturais dos centros das células. O valor de um local estimado é uma média ponderada dos valores dos vizinhos naturais. Uma vez que o resultado é uma quadrícula, as localizações de estimação serão uma matriz regularmente espaçada igual ao número de células do *raster* (Kennedy, 2009). Na Figura 2.20, para cada célula na quadrícula (a) de saída, uma média ponderada dos vizinhos naturais do centro da célula (b) é calculada.

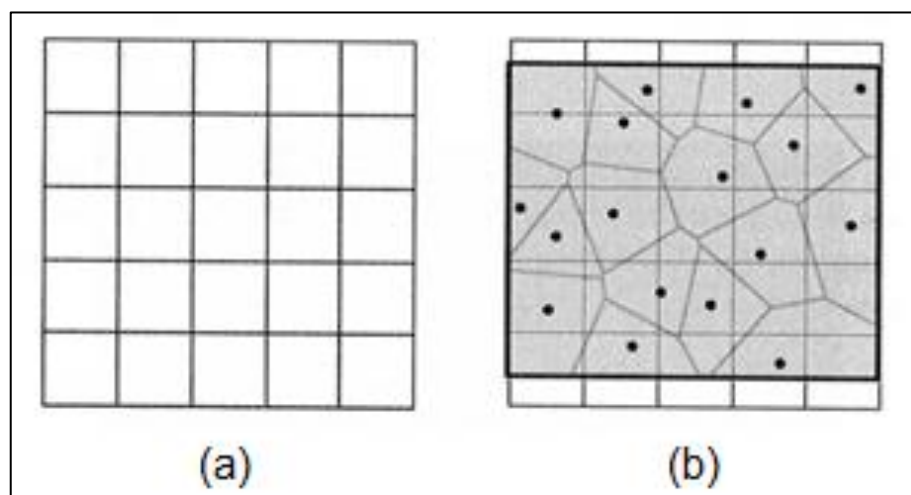


FIGURA 2.20 – Quadrícula e média ponderada dos vizinhos naturais.  
Fonte: Kennedy, 2009.

O interpolador Vizinho Natural é mais adequado para pontos de amostra que são desigualmente distribuídos. Porque usa uma média ponderada, que não requer parâmetros específicos, tais como o raio, o número de pontos de amostra, ou pesos (Kennedy, 2009).

#### 2.4.5 *Topo to Raster*

*Topo to Raster* é um método de interpolação especificamente projetado para a criação de modelos digital de elevação (MDE) hidrológicamente corretos. Baseia-se no programa ANUDEM desenvolvido por Michael Hutchinson (Hutchinson e Dowling, 1991, Hutchinson, 1993). A versão atual do programa ANUDEM usado no ArcGIS é a 4.6.3.

O *Topo to Raster* interpola valores de elevação, impondo restrições que garantam: Uma estrutura de drenagem interligada; a representação correta de cristas e dos córregos dos dados de entrada. É um interpolador especificamente projetado para melhor funcionar com dados de contorno, como curvas de nível e drenagens do terreno.

O procedimento de interpolação foi concebido para tirar vantagem de dados de características conhecidas de superfícies de elevação. Este método utiliza uma técnica de interpolação iterativa de finitas diferenças. Ele é otimizado para ter a eficiência computacional dos métodos de interpolação locais, tais como o IDW, sem perder a continuidade da superfície de outros métodos de interpolação globais, como Krigagem e Curvatura Mínima. É essencialmente uma discreta variação da técnica Curvatura Mínima (Wahba, 1990) projetada para permitir que o MDE acompanhe as mudanças abruptas no terreno, como córregos e cumes.

A água é a principal força erosiva que determina a forma geral da maioria das paisagens. Por este motivo, a maioria das paisagens têm muito altos e baixos, resultando em um padrão de drenagem interligada. O *Topo to Raster* usa esse conhecimento de superfícies e impõe restrições sobre o processo de interpolação que resulta em uma estrutura de drenagem conectada e a correta representação de



cordilheiras e riachos. Esta condição de drenagem imposta produz superfícies de maior precisão com menos dados de entrada (amostras). A quantidade de dados de entrada pode ser de até uma ordem de grandeza menor do que o normalmente necessário para descrever adequadamente uma superfície com contornos digitalizados, minimizando ainda mais o custo da obtenção dos MDEs. A condição de drenagem global também praticamente elimina qualquer necessidade de edição ou pós-processamento para remover falhas na superfície gerada (Kennedy, 2009).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram realizados dois levantamentos altimétricos a campo a partir da topografia convencional e GPS (levantamentos *in situ*), para servirem de base para a comparação aos levantamentos altimétricos oriundos de sensores orbitais como SRTM, ASTER e o programa Google Earth (levantamentos *ex situ*).

Para cada ponto levantado a campo, foi obtida a informação altimétrica a partir dos métodos avaliados, permitindo a análise da acurácia das diferentes fontes.

#### 3.1 Localização do Experimento

O trabalho foi realizado em dois locais, primeiramente na Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, no município de Santa Maria – RS (Figura 3.1 a), de coordenadas geográficas centrais latitude  $-29,68^\circ$  e longitude  $-53,8^\circ$  (IBGE, 2010), de altitude média de 113 m acima do nível do mar e, posteriormente em uma propriedade rural, no município de Santiago – RS (Figura 3.1 b), de coordenadas geográficas centrais de latitude  $-29,19^\circ$  e longitude  $-54,86^\circ$  (IBGE, 2010), de altitude média de 409 m acima do nível do mar.

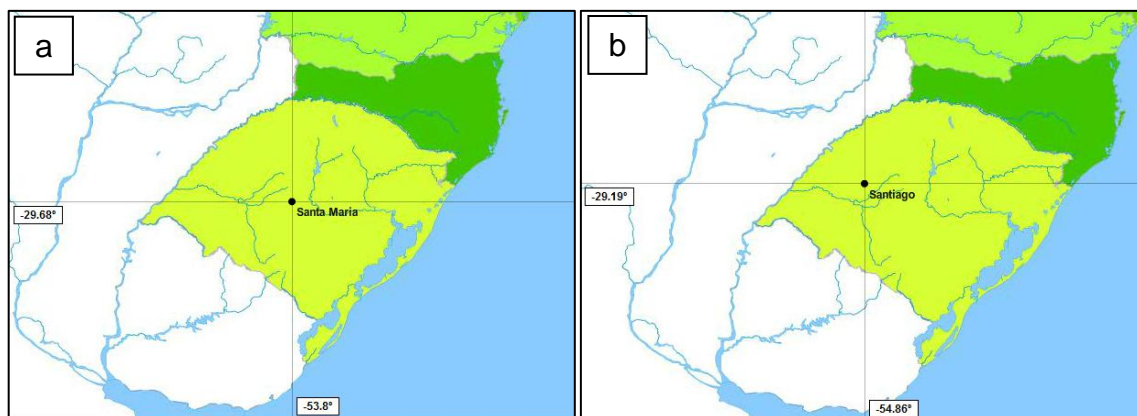


FIGURA 3.1 – Localização das cidades de Santa Maria e Santiago (RS).  
Fonte: IBGE, 2010.

### 3.2 Áreas dos Levantamentos

Os levantamentos foram realizados em três diferentes áreas, o primeiro levantamento foi realizado em uma área localizada no Jardim Botânico da UFSM, que será identificada como área A1, com 14,5 ha e que possui cobertura arbórea em grande parte de sua extensão (Figura 3.2). O segundo levantamento, foi realizado em uma área experimental de lavoura do Centro de Ciências Rurais da UFSM (área A2), com 25 ha e com pouca cobertura vegetal de grande porte (Figura 3.2). O terceiro levantamento foi realizado em uma área de lavoura (área A3), localizada em uma propriedade rural, no município de Santiago, com uma área de 16 ha, conforme demonstrado pela Figura 3.3.

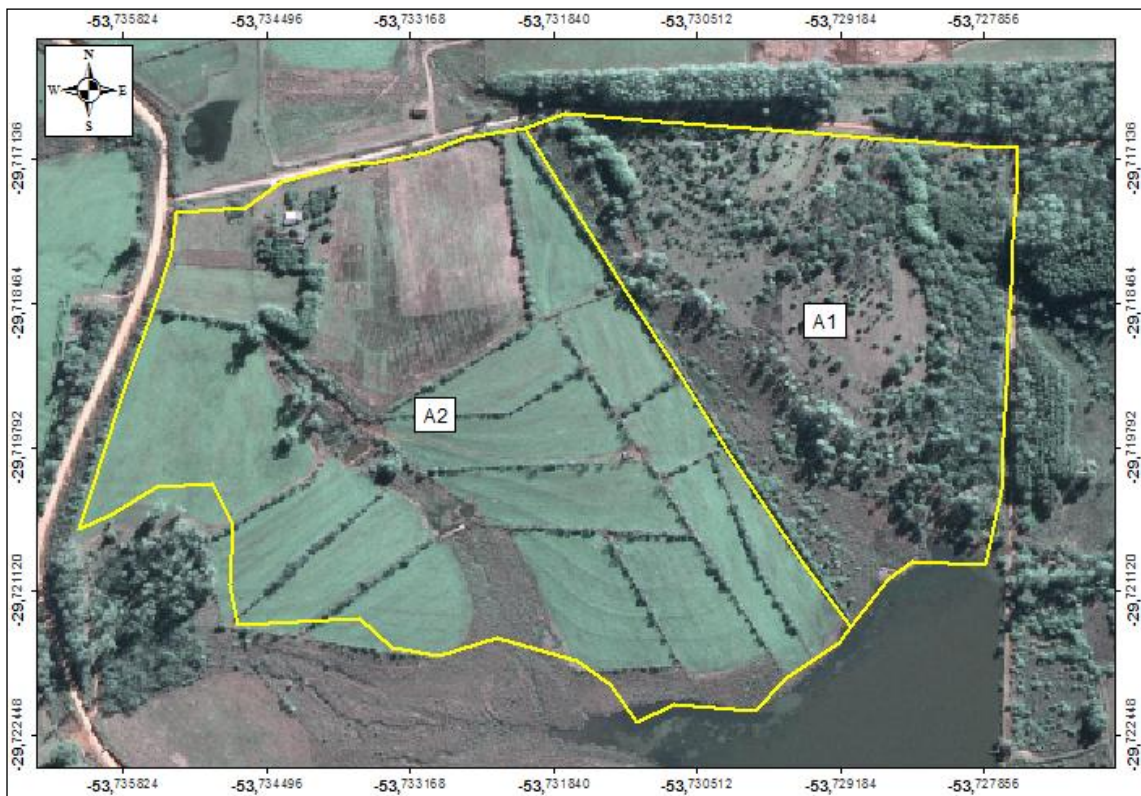


FIGURA 3.2 – Delimitação das áreas A1 e A2.

Fonte: Google Earth, 2009. Adaptado pelo autor.



FIGURA 3.3 – Delimitação da área A3.  
 Fonte: Google Earth, 2009. Adaptado pelo autor.

### 3.3 Obtenção dos Dados

A seguir serão descritas as formas de aquisição dos dados utilizados para a comparação entre os métodos de obtenção da altimetria nos locais estudados.

#### 3.3.1 Levantamentos de Referência (*in situ*)

Os levantamentos descritos a seguir foram utilizados como referência, ou seja, como base de comparação aos outros métodos avaliados, por serem as formas de levantamentos plani-altimétricos já consolidadas.

### 3.3.1.1 Dados Obtidos por Receptores GNSS

Nas áreas A1 e A2 foram levantados pontos aleatórios com receptores GNSS de dupla frequência, criando, uma malha irregular (Figura 3.4). Os receptores, da marca Topcon, modelo Hiper+, foram conFigurados para coletar os pontos de 5 em 5 segundos, no modo estático, com uma máscara de elevação de 15°. O tempo de permanência foi de 5 minutos em cada ponto. Foram coletados 64 pontos na área A1 identificados por caracteres numéricos (01 a 64), e 109 pontos na área A2 (65 a 173).

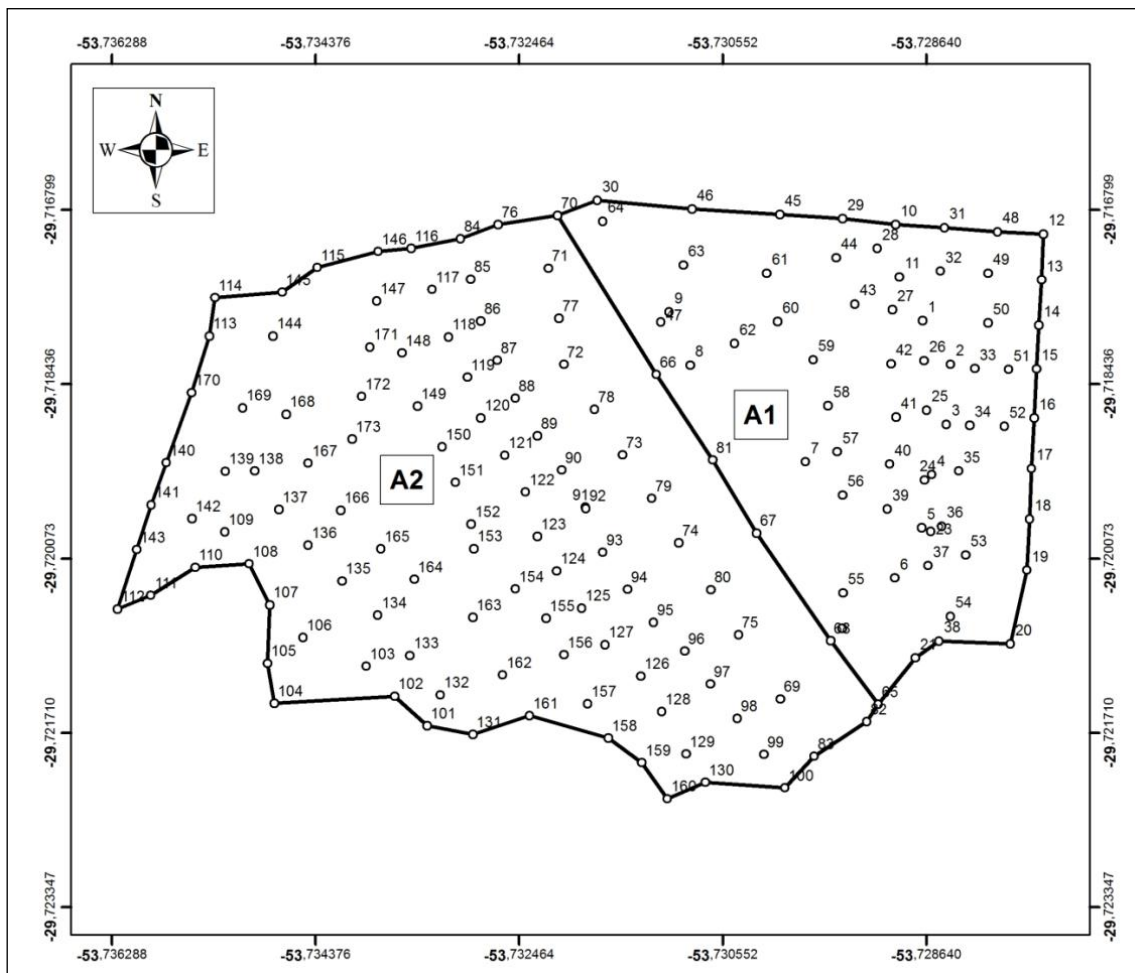


FIGURA 3.4 – Esquema dos pontos coletados em A1 e A2 com receptores GNSS.  
Fonte: o autor.



As coordenadas tridimensionais dos pontos rastreados foram obtidas a partir da correção diferencial, utilizando como base a estação SMAR, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), localizada no Campus da UFSM. A correção diferencial foi realizada pelo programa Topcon Tools 7.5 e, para a resolução das ambiguidades, foram utilizadas efemérides precisas, disponíveis no site do IGS – *International GNSS Service* (<http://igsb.jpl.nasa.gov/>).

### 3.3.1.2 Dados Obtidos por Topografia Convencional

Na área A3, foi realizado um levantamento plani-altimétrico utilizando uma estação total, para isso, foi implantada uma poligonal com 80 vértices, identificados por caracteres numéricos de 174 a 253.

Para a obtenção das coordenadas horizontais, foi utilizado o método do caminhamento perimétrico (Figura 3.5 a). Para a obtenção da diferença de nível entre os pontos foi utilizado o método do nivelamento trigonométrico. Para a demarcação dos pontos no terreno foram utilizadas de estacas de madeira de 25 cm, pintadas de branco (Figura 3.5 b). Os pontos foram regularmente espaçados, possibilitando-se obter informação altimétrica do terreno de 50 em 50 metros aproximadamente (Figura 3.6).



FIGURA 3.5 – Fotografias do levantamento e de um piquete de madeira.

Fonte: o autor.

Para verificar a qualidade do levantamento da poligonal, através do erro de fechamento angular, o levantamento foi dividido em quatro retângulos, com 20 pontos cada.

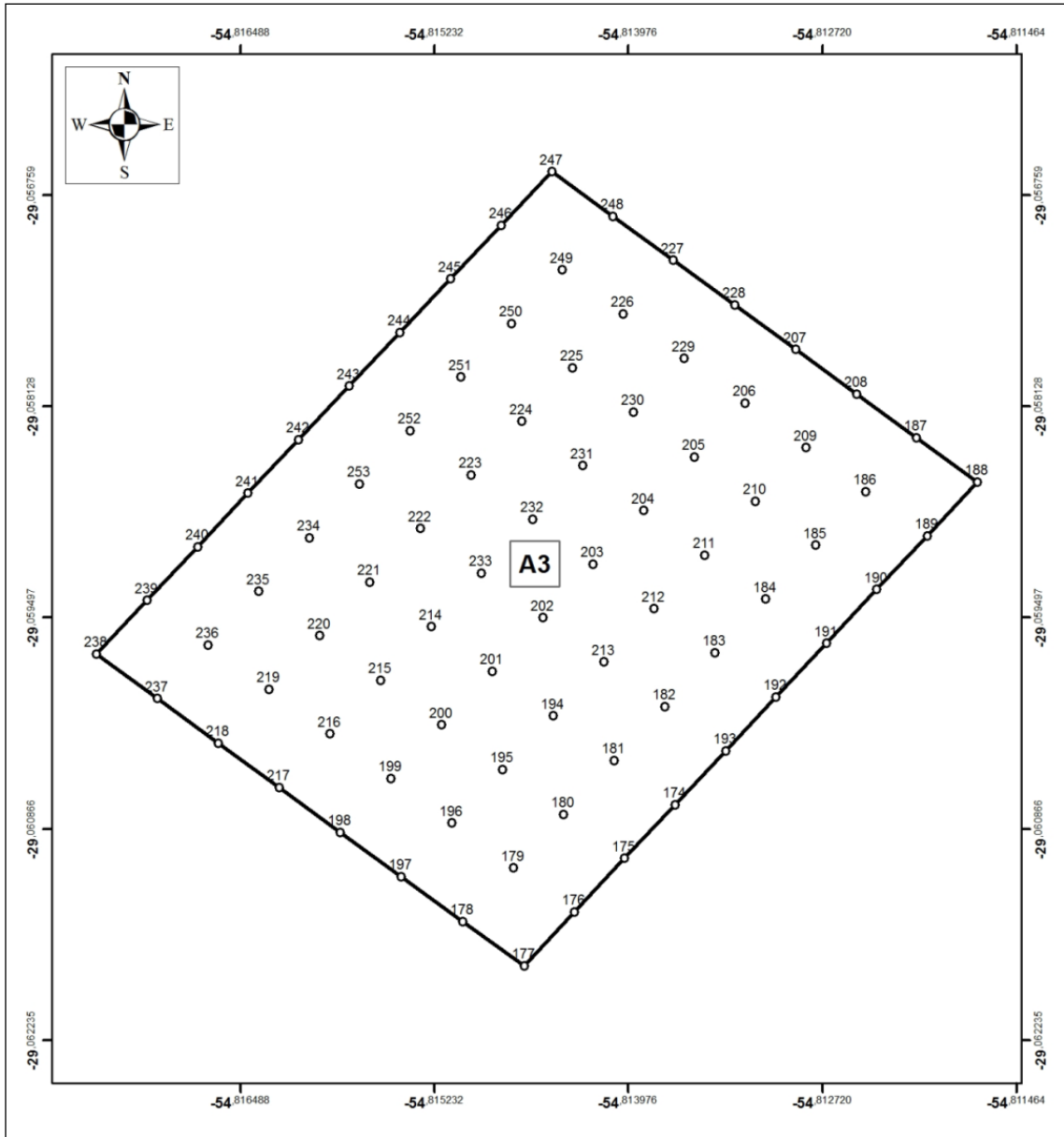


FIGURA 3.6 – Esquema dos pontos coletados em A3 com topografia.  
Fonte: o autor.

Os dados coletados a campo foram: ângulo horizontal, distância horizontal, ângulo zenital e altura do equipamento e dos prismas (vante e ré). A partir desses dados foram calculadas as coordenadas horizontais e as diferenças de nível dos pontos com as seguintes equações:

$$Az_{1-2} = Az_1 + AI_{1-2} \pm 180^\circ$$

$$\text{arc cos } Az'_n = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{\sqrt{(Y_n - Y_{n-1})^2 + (X_n - X_{n-1})^2}}$$

$$\Delta x_n = D_n \text{ sen } Az_n$$

$$\Delta y_n = D_n \text{ cos } Az_n$$

$$X_n = X_{n-1} + \Delta x_n$$

$$Y_n = Y_{n-1} + \Delta y_n$$

$$\Delta N_n = D_n \text{ cot } Z_n$$

Onde:

$Az_n$  é o azimute do alinhamento n;

$AI_n$  é o ângulo interno n;

$\Delta x_n$  é a projeção x;

$\Delta y_n$  é a projeção y;

$D_n$  é a distância horizontal do alinhamento n;

$X_n$  é a coordenada X do ponto n;

$Y_n$  é a coordenada Y do ponto n;

$\Delta N_n$  é a diferença de nível do alinhamento n;

$Z_n$  é o ângulo zenital do alinhamento n.



Para calcular as coordenadas dos pontos é necessário obter o azimute do primeiro alinhamento. Para isso foram levantados dois pontos com um receptor de dupla frequência, permitindo a obtenção do azimute da direção do ponto base ao ponto 174 (Figura 3.7). As coordenadas tridimensionais dos pontos rastreados foram corrigidas diferencialmente pelo método relativo estático, utilizando como base um marco da Rede Estadual GPS de Marcos Passivos, localizado no campus da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, na cidade de Santiago (RS). A correção diferencial dos pontos foi realizada pelo programa LEICA Geo Office 7.0.



FIGURA 3.7 – Pontos de apoio coletados com GPS em A3.  
Fonte: Google Earth, 2009. Adaptado pelo autor.

### 3.3.2 Levantamentos Experimentais (*ex situ*)

Os levantamentos *ex situ* realizados pelas técnicas de sensoriamento remoto, através do SRTM, do ASTER e do programa Google Earth, foram objeto de análise do trabalho.

#### 3.3.2.1 Dados Obtidos por SRTM

Os dados de elevação banda C ( $k = 5,6 \text{ cm}$ ), oriundos da missão SRTM, com resolução espacial de 90 metros, foram adquiridos gratuitamente, em formato geotiff com unidade de altitude em metros, em Sistema de Coordenadas Geográficas e articulação à escala 1:250.000, Datum Horizontal WGS-84 (*World Geodetic System 1984*) e Datum Vertical EGM96 (*Earth Gravitational Model 1996*), junto ao Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), no âmbito da Coleção "Brasil em Relevo".

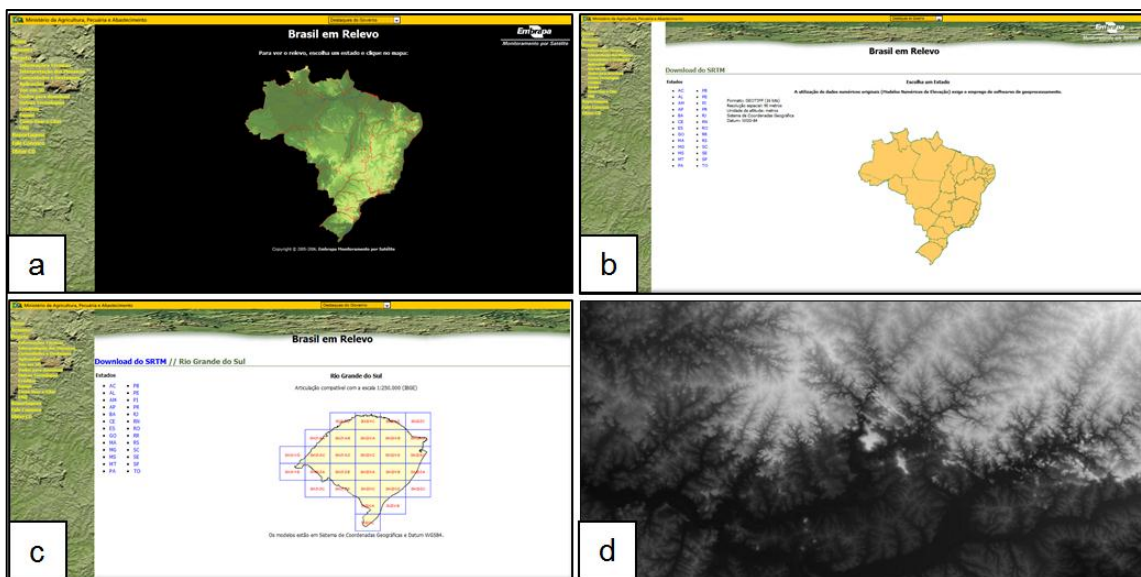


FIGURA 3.8 – Site do projeto “Brasil em Relevo” e uma imagem SRTM.  
Fonte: [www.relevobr.cnpm.embrapa.br](http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br). Acessado em 01/03/2012.

As Figuras 3.8 (a) mostra a página inicial do site do projeto Brasil em Relevô (www.relevobr.cnpm.embrapa), (b) permite a escolha do Estado que se encontra a imagem SRTM (www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download), (c) permite a seleção da quadrícula para o Estado do RS (www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/rs/rs), e (d) mostra uma imagem fornecida pelo site da Embrapa visualizada através do programa ArcGIS 9.3.

### 3.3.2.2 Dados Obtidos por ASTER

Os dados de elevação provenientes do sensor ASTER, com resolução espacial de 30 metros, também foram adquiridos gratuitamente, em formato geotiff com unidade de altitude em metros, em Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum Horizontal WGS-84 (*World Geodetic System 1984*) e Datum Vertical EGM96 (*Earth Gravitational Model 1996*), foram obtidos através do site do ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*).

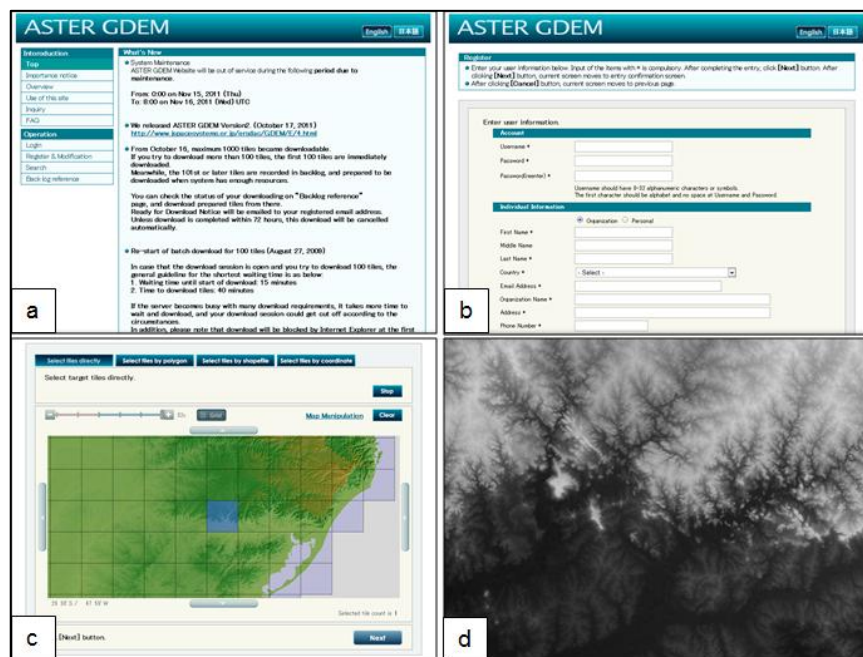


FIGURA 3.9 – Site do ERSDAC e uma imagem ASTER.  
Fonte: www.gdem.aster.ersdac.or.jp. Acessado em 01/03/2012.

As Figuras 3.9 (a) mostra a página inicial do site do ERSDAC ([www.gdem.aster.ersdac.or.jp](http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp)), (b) permite o acesso ou cadastro no site para a obtenção das imagens ([www.gdem.aster.ersdac.or.jp/register.jsp](http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/register.jsp)) e (c) permite a seleção da quadrícula que se encontra a imagem ([www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp](http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp)) e (d) mostra uma imagem fornecida pelo site do ERSDAC visualizada pelo programa ArcGIS 9.3.

### 3.3.2.3 Dados Obtidos pelo Programa Google Earth

Para a obtenção dos dados altimétricos dos pontos levantados a campo (*in situ*) das áreas A1, A2 e A3, foram inseridas, no programa Google Earth versão 6.1, as coordenadas de cada ponto coletado com GPS e com topografia convencional. Como o Google Earth não informa o valor da altitude com casas decimais, ou seja, somente valores inteiros, obteve-se a informação altimétrica na unidade de medida pé (1 pé = 1200/3937 m), pois, desta forma, o programa informa a variação de altitude a cada, aproximadamente, 0,3 m ao invés de 1,0 m. Posteriormente, as unidades foram convertidas para a unidade métrica.

## 3.4 Interpolação dos Dados SRTM e ASTER

Como as informações altimétricas do SRTM são fornecidas de 90 em 90 m e as do ASTER de 30 em 30 m, foi necessário interpolar os dados. Para isso, foram utilizadas as seguintes técnicas de interpolação espacial: Inverso Ponderado da Distância (IPD), Krigagem (KRG), Curvatura Mínima (CVM), Vizinho Natural (VZN) e *Topo to Raster* (TTR), realizadas pela ferramenta *Spatial Analyst Tools* do programa ArcGIS 9.3.

### 3.5 Análise Estatística

Para a análise estatística dos métodos estudados, foram realizadas três verificações: i) verificar qual o interpolador que apresentou melhor desempenho; ii) verificar se os métodos de levantamento *in situ* (GPS e topografia) são significativamente diferentes dos levantamentos *ex situ* (SRTM, ASTER e Google Earth) e iii) verificar qual dos métodos *ex situ* analisados apresentou menores discrepâncias em comparação aos métodos *in situ*.

#### 3.5.1 Organização dos Dados

A análise estatística foi realizada separadamente para as três áreas de estudo (A1, A2 e A3) devido à natureza da obtenção da informação altimétrica obtida através dos levantamentos e da presença de fatores que podem influenciar na acurácia dos métodos como o multicaminhamento do sinal, ou seja, a distorção do sinal que chega diretamente na antena dos receptores GNSS, que pode ser causada por superfícies próximas ao receptor como árvores, massa d'água e construções (Monico, 2008). A tabela 3.1 descreve as características das áreas de estudo.

Nas áreas A1 e A2, o levantamento *in situ* foi realizado com GPS, podendo ser feita a análise da acurácia em relação às altitudes elipsoidais. Já na área A3, o levantamento com estação total permitiu obter somente a diferença de nível entre os pontos. Para a conversão de altitudes ortométricas em elipsoidais, é necessário conhecer a ondulação geoidal do referido ponto, porém essa conversão pode resultar num erro médio padrão de +/- 0,32 m para as áreas mais desenvolvidas do país ou erros maiores em outras regiões (<http://www.ibge.gov.br>), o que comprometeria a análise de precisão dos levantamentos.

TABELA 3.1 – Características das áreas e dos levantamentos.

Área	Levantamento <i>in situ</i>	Tipo de altitude obtida	Levantamento <i>ex situ</i>	Tipo de altitude obtida	Cobertura vegetal de grande porte
A1	GPS	Elipsoidal	SRTM ASTER Google Earth	Elipsoidal	60%
A2	GPS	Elipsoidal	SRTM ASTER Google Earth	Elipsoidal	6%
A3	Topografia	Diferença de nível	SRTM ASTER Google Earth	Elipsoidal	1%

Fonte: o autor.

Por esse motivo, para A3, foi realizada a análise da acurácia a partir das altitudes relativas ou cotas. Para isso, diferenças de nível entre os pontos foram transformadas em altitudes relativas (cotas), ou seja, a altitude primeiro ponto da poligonal foi igualada para todos os métodos comparados na área (topografia, SRTM, ASTER e Google Earth). As diferenças de nível foram calculadas pela equação:

$$\Delta N_n = H_n - H_{n-1}$$

Onde:

$\Delta N_n$  é a diferença de nível do ponto n;

$H_n$  é a altura do ponto n;

$H_{n-1}$  é a altura do ponto n-1.

As altitudes relativas (cotas) foram obtidas pela equação:

$$AR_n = \Delta N_n + AR_{n-1}$$

Onde:

$AR_n$  é a altitude relativa do ponto n;

$\Delta N_n$  é a diferença de nível do ponto n;

$AR_{n-1}$  é a altitude relativa do ponto n-1.

### 3.5.2 Análise dos Interpoladores

A avaliação de desempenho dos interpoladores foi realizada utilizando os valores obtidos a campo (levantamento *in situ*) e os estimados pelos interpoladores nas diferentes formas de obtenção de altimetria em estudo (levantamento *ex situ*), para cada ponto. Para realizar a comparação entre os métodos de interpolação, foi utilizada a análise de regressão entre os dados altimétricos interpolados pelos diferentes métodos com o objetivo de se obter o coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) e o índice de concordância de Willmott ( $d$ ).

O coeficiente de correlação de Pearson permite quantificar o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise (SCHNEIDER, 1998), sendo seu campo de variação entre -1 e 1 e quanto maior o seu valor absoluto maior o grau de associação entre os valores observados e os valores estimados.

O coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) pode ser estimado por:

$$\rho = \left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right] \cdot \left\{ \left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2} \right\}^{-1}$$

Onde:

$\rho$  é o coeficiente de correlação de Pearson;

$x_i$  são os valores estimados;

$y_i$  são os valores observados;

$\bar{x}$  é a média dos valores interpolados;

$\bar{y}$  é a média dos valores observados.

O índice de concordância de Willmott ( $d$ ) fornece o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas, uma vez que está relacionada a diferença entre os valores estimados em relação aos valores observados, sendo seu campo de variação de 0 (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita) (WILLMOTT, 1981).

O índice de concordância  $d$  pode ser calculado pela expressão:

$$d = 1 - \left\{ \left[ \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \right] \cdot \left[ \sum_{i=1}^n (|x_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2 \right]^{-1} \right\}$$

Onde:

$d$  é o índice de concordância de Willmott;

$x_i$  são os valores estimados;

$y_i$  são os valores observados;

$\bar{y}$  é a média dos valores observados.

Conhecendo-se esses indicadores foi determinado o índice de confiança ( $c$ ), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que permite analisar conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados obtidos, pode ser calculado por:

$$c = \rho \cdot d$$

Onde:

$c$  é o índice de confiança;

$\rho$  é o coeficiente de correlação de Pearson;

$d$  é o índice de concordância de Willmott.

O índice de confiança ( $c$ ) tem a finalidade de avaliar o desempenho do método proposto (OLIVEIRA et. al, 2010). Os critérios de avaliação do desempenho de modelos quanto ao seu índice de confiança estão apresentados na Tabela 3.2.



TABELA 3.2 – Indicador de desempenho dos interpoladores.

Valores de $c$	Desempenho
> 0.85	Ótimo
0.76 a 0.85	Muito Bom
0.66 a 0.75	Bom
0.61 a 0.65	Regular
0.51 a 0.60	Fraco
0.41 a 0.50	Muito Fraco
<0.41	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

### 3.5.3 Análise de Variância (ANOVA) dos Métodos

Após definida a técnica de interpolação que melhor apresentou desempenho para a espacialização dos dados SRTM e ASTER, pode-se realizar a análise de variância (ANOVA) entre os métodos de obtenção de altimetria *in situ* e *ex situ*.

O teste de hipótese a ser comprovado é o seguinte:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$$

$H_1$  = Existe pelo menos uma das médias das discrepâncias diferentes.

A obtenção das discrepâncias dos métodos foi calculada pela diferença entre as altitudes encontradas, conforme a equação:

$$\Delta h = |h_{in\ situ} - h_{ex\ situ}|$$

Onde:

$\Delta h$  é a discrepância do método no ponto;

$h_{in\ situ}$  é a altitude do ponto no método de referência;

$h_{ex\ situ}$  é a altitude do ponto no método experimental.

Rejeita-se a hipótese básica  $H_0$  se:

$$F > F_{(\delta_1, \delta_2); v}$$

O valor teórico de  $F$  é obtido em tabelas próprias, onde os graus de liberdade utilizados como argumento é  $\delta_1 = k - 1$  e  $\delta_2 = \Sigma(N_k - 1)$  e o nível de confiança  $v = 1 - \alpha$ .

O teste é aplicado utilizando a estatística calculada:

$$F = \frac{S_B^2}{S_W^2}$$

Onde:

$F$  é o valor teórico;

$S_B^2$  é a dispersão entre os grupos;

$S_W^2$  é a dispersão dentro dos grupos.

A dispersão entre os grupos ( $S_B^2$ ) é dada por:

$$S_B^2 = S_x^2 \cdot N$$

Onde:

$S_B^2$  é a dispersão entre os grupos;

$S_x^2$  é a variância das médias amostrais;

$N$  é o número de amostras.

A variância das médias amostrais ( $S_x^2$ ) é calculada por:

$$S_x^2 = \frac{\Sigma \bar{x}_i^2 - \frac{(\Sigma \bar{x}_i)^2}{k}}{k - 1}$$

Onde:

$S_{\bar{x}}^2$  é a variância das médias amostrais;

$\bar{x}_i$  é a média da população;

$k$  é número de populações.

A dispersão dentro dos grupos  $S_W^2$  é dada por:

$$S_W^2 = \frac{(N_1 - 1)S_1^2 + (N_2 - 1)S_2^2 + \dots + (N_k - 1)S_k^2}{(N_1 - 1) + (N_2 - 1) + \dots + (N_k - 1)}$$

Onde:

$S_W^2$  é a dispersão dentro dos grupos;

$N_k$  é o número de amostras da população;

$S_k^2$  é o desvio padrão da população.

### 3.5.4 Teste de Comparação de Média dos Métodos (Teste de Tukey)

Após rejeitada a hipótese básica  $H_0$ , foi realizado o teste de Tukey ao nível de probabilidade de 5% para a análise do contraste entre as médias. Este teste é feito comparando-se a diferença absoluta (em módulo) entre as várias médias pareadas duas a duas, a um valor ( $\Delta$ ), previamente calculado da seguinte forma, segundo Gomes (2000):

$$\Delta = q \frac{s}{\sqrt{r}}$$

Onde:

$q$  é o valor da amplitude total estudentizada ao nível de significância escolhido;

$s$  é a estimativa do desvio padrão residual;

$r$  é o número de repetições, suposto o mesmo para todos os tratamentos.

### 3.5.5 Análise de Tendência e Acurácia dos Métodos

Segundo Silva (2009), na análise de tendências, é verificado se a média das discrepâncias pode ser considerada estatisticamente igual a zero. Então as hipóteses a serem avaliadas são as seguintes:

$$H_0: \overline{\Delta h} = 0$$

$$H_1: \overline{\Delta h} \neq 0$$

Para esta análise foi utilizada a distribuição de probabilidade  $t$  de Student, onde é calculado um  $t$  amostral contra um valor teórico obtido da tabela, com graus de liberdade  $\nu = n - 1$  e nível de confiança igual a  $1 - \alpha/2$ .

A estatística amostral  $t$  foi calculada através da seguinte:

$$\hat{t}_{\Delta h} = \frac{\overline{\Delta h}}{\hat{\sigma}_{\Delta h}} \sqrt{n}$$

O intervalo de confiança relativo ao teste  $t$  de Student analisado foi:

$$|\hat{t}_{\Delta h}| < t_{1-\alpha/2}^{\nu=n-1}$$

Se esse intervalo for verdadeiro a hipótese  $H_0$  é válida e os modelos de elevação gerados a partir dessas fontes estarão livres de tendências significativas.

Para a análise da acurácia dos métodos, os critérios de decisão foram o menor valor da média e do desvio padrão das discrepâncias, conforme utilizado por Silva e Nazareno (2009) e da raiz do erro médio quadrático (REMQ), conforme Phillips et al. (1992), Addink e Stein, (1999), Legates e McCabe Jr. (1999), apud Oliveira (2010).

A média das discrepâncias ( $\overline{\Delta h}$ ) foi calculada a partir da equação:

$$\overline{\Delta h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h$$

Onde:

$\overline{\Delta h}$  é a média das discrepâncias;

$n$  é o número de amostras;

$\Delta h$  são as discrepâncias do método.

O desvio-padrão das discrepâncias ( $S_{\Delta h}$ ) foi calculado utilizando a equação:

$$S_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \overline{\Delta h})^2}$$

Onde:

$S_{\Delta h}$  é o desvio-padrão das discrepâncias;

$n$  é o número de amostras;

$\Delta h$  são as discrepâncias do método;

$\overline{\Delta h}$  é a média das discrepâncias.

A raiz do erro médio quadrático ( $REMQ$ ) foi obtida por:

$$REMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|h_{in situ} - h_{ex situ}|)^2}$$

Onde:

$REMQ$  é a raiz do erro médio quadrático;

$n$  é o número de amostras;

$h_{in situ}$  é a altitude do ponto no método de referência;

$h_{ex situ}$  é a altitude do ponto no método experimental.

Segundo Robertson (1998) e Guimarães (2004) apud Oliveira (2010) a utilização do  $REMQ$  na seleção do método é o parâmetro estatístico preferido, por ser este mais sensível e mais robusto quando comparado somente com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). De acordo com este modelo, o melhor método é aquele que apresentar o menor valor do  $REMQ$ .

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão discutidos os resultados das comparações entre os métodos de obtenção de altimetria.

### 4.1 Análise dos Interpoladores

A escolha dos melhores interpoladores para cada método avaliado foi realizada com auxílio dos referidos índices, levando-se em conta principalmente a análise do valor REQM. Os métodos de interpolação definidos como melhores, consequentemente, apresentaram melhores resultados para os índices estatísticos calculados. Isto indica que estes métodos são aqueles capazes de proporcionar, a partir dos dados levantados, as melhores correlações possíveis entre os valores reais e os valores estimados das variáveis em estudo (OLIVEIRA, 2010).

A seguir serão expostos os índices estatísticos encontrados para as técnicas de interpolação para especializar os dados provenientes dos sensores SRTM e ASTER nas três áreas estudadas.

#### 4.1.1 Área A1

Para a área A1 foi realizado o levantamento *in situ* com a utilização de receptores GNSS, originando altitudes elipsoidais, possibilitando a comparação direta das informações dos métodos *ex situ*, pois estes também fornecem altitudes referenciadas ao elipsoide WGS 84.

A Tabela 4.1 apresenta os valores dos coeficientes de correlação ( $r$ ), índice de concordância ( $d$ ), índice de desempenho ( $c$ ) e classe de desempenho para as técnicas de interpolação analisadas para os dados SRTM na área A1.

TABELA 4.1 – Desempenho dos interpoladores para os dados SRTM em A1.

Variável	Coefficiente de Correlação (r)	Índice de Concordância (d)	Índice de Desempenho (c)	
IPD <sup>1</sup>	0,786	0,859	0,675	Bom
KRIG <sup>2</sup>	0,833	0,877	0,731	Bom
VN <sup>3</sup>	0,780	0,858	0,669	Bom
CM <sup>4</sup>	0,751	0,843	0,633	Regular
TTR <sup>5</sup>	0,783	0,860	0,673	Bom

<sup>1</sup> Inverso Ponderado da Distância; <sup>2</sup> Krigagem; <sup>3</sup> Vizinho Natural; <sup>4</sup> Curvatura Mínima; <sup>5</sup> *Topo to Raster*

A maioria das técnicas avaliadas apresentaram valores do índice de desempenho (c), entre 0,63 e 0,73, o que as classifica quanto ao desempenho comparativo como bom, e permite determinar que a técnica da Krigagem apresentou melhor desempenho na espacialização dos dados altimétricos provenientes do SRTM na área A1. Cabe ressaltar que a porcentagem de cobertura vegetal de grande porte nessa área é de 60%, o que pode explicar o desempenho inferior dos interpoladores em relação às outras áreas estudadas.

A Tabela 4.2 apresenta os índices estatísticos para as técnicas de interpolação dos dados ASTER na área A1.

TABELA 4.2 – Desempenho dos interpoladores para os dados ASTER em A1.

Variável	Coefficiente de Correlação (r)	Índice de Concordância (d)	Índice de Desempenho (c)	
IPD <sup>1</sup>	0,743	0,823	0,612	Regular
KRIG <sup>2</sup>	0,748	0,829	0,620	Regular
VN <sup>3</sup>	0,728	0,809	0,589	Fraco
CM <sup>4</sup>	0,700	0,787	0,551	Fraco
TTR <sup>5</sup>	0,719	0,816	0,586	Fraco

<sup>1</sup> Inverso Ponderado da Distância; <sup>2</sup> Krigagem; <sup>3</sup> Vizinho Natural; <sup>4</sup> Curvatura Mínima; <sup>5</sup> *Topo to Raster*

Quanto à espacialização dos dados ASTER na área A1, as técnicas avaliadas apresentaram valores inferiores, em relação aos dados SRTM, do índice de desempenho (*c*), sendo que a maioria foi considerada fraca, apresentando valores entre 0,55 e 0,62. A técnica da Krigagem foi classificada como a melhor técnica de espacialização dos dados ASTER na área A1.

#### 4.1.2 Área A2

O levantamento *in situ* realizado na área A2 foi feito através de receptores GNSS, seguindo a mesma metodologia empregada na área A1.

A Tabela 4.3 apresenta os valores dos parâmetros estatísticos para as técnicas utilizadas para interpolar os dados do SRTM na área A2.

TABELA 4.3 – Desempenho dos interpoladores para os dados SRTM em A2.

Variável	Coefficiente de Correlação (r)	Índice de Concordância (d)	Índice de Desempenho (c)	
IPD <sup>1</sup>	0,921	0,838	0,772	Muito Bom
KRIG <sup>2</sup>	0,928	0,839	0,778	Muito Bom
VN <sup>3</sup>	0,913	0,837	0,764	Muito Bom
CM <sup>4</sup>	0,903	0,837	0,755	Muito Bom
TTR <sup>5</sup>	0,908	0,832	0,755	Muito Bom

<sup>1</sup> Inverso Ponderado da Distância; <sup>2</sup> Krigagem; <sup>3</sup> Vizinho Natural; <sup>4</sup> Curvatura Mínima; <sup>5</sup> *Topo to Raster*

Na área A2 todas as técnicas avaliadas para interpolar os dados SRTM apresentaram valores do índice de desempenho (*c*) maiores do que em relação a A1, entre 0,75 e 0,77, foram classificadas como muito bom, apresentando baixa variação entre os interpoladores. Dentre os interpoladores a Krigagem apresentou melhor valor de índice de desempenho para os dados SRTM.



TABELA 4.4 – Desempenho dos interpoladores para os dados ASTER em A2.

Variável	Coefficiente de Correlação (r)	Índice de Concordância (d)	Índice de Desempenho (c)	
IPD <sup>1</sup>	0,904	0,802	0,724	Bom
KRIG <sup>2</sup>	0,910	0,807	0,734	Bom
VN <sup>3</sup>	0,904	0,801	0,724	Bom
CM <sup>4</sup>	0,887	0,794	0,704	Bom
TTR <sup>5</sup>	0,893	0,790	0,706	Bom

<sup>1</sup> Inverso Ponderado da Distância; <sup>2</sup> Krigagem; <sup>3</sup> Vizinho Natural; <sup>4</sup> Curvatura Mínima; <sup>5</sup> *Topo to Raster*

A tabela 4.4 mostra que o desempenho dos interpoladores para os dados ASTER na área A2 foi melhor do que o apresentado na área A1. Os valores de *c* ficaram entre 0,70 e 0,73 classificando as técnicas avaliadas em bom. Observou-se que, de maneira geral, ocorreram pequenas variações entre os interpoladores o que indica que, em áreas com menores índices de cobertura vegetal, as técnicas avaliadas apresentam melhores índices de desempenho e menor variação.

#### 4.1.3 Área A3

Na área A3, o levantamento *in situ* foi realizado com topografia convencional, permitindo comparar a variação da altura entre os pontos.

TABELA 4.5 – Desempenho dos interpoladores para os dados SRTM em A3.

Variável	Coefficiente de Correlação (r)	Índice de Concordância (d)	Índice de Desempenho (c)	
IPD <sup>1</sup>	0,967	0,969	0,937	Ótimo
KRIG <sup>2</sup>	0,974	0,976	0,951	Ótimo
VN <sup>3</sup>	0,972	0,974	0,947	Ótimo
CM <sup>4</sup>	0,968	0,969	0,939	Ótimo
TTR <sup>5</sup>	0,974	0,975	0,950	Ótimo

<sup>1</sup> Inverso Ponderado da Distância; <sup>2</sup> Krigagem; <sup>3</sup> Vizinho Natural; <sup>4</sup> Curvatura Mínima; <sup>5</sup> *Topo to Raster*

Conforme a tabela 4.5, todas as técnicas de interpolação avaliadas apresentaram valores do índice de desempenho (*c*), entre 0,94 e 0,95, o que as classifica quanto ao desempenho comparativo como ótimo, sendo que a Krigagem apresentou melhor índice de desempenho. Nota-se que não houve variação expressiva do valor do índice de desempenho para as técnicas avaliadas, com os valores se mantendo próximos a 1, o que pode indicar exatidão dos modelos. Assim, pode-se afirmar que existe uma aproximação entre os valores reais e os valores estimados pelos modelos de interpolação testados.

TABELA 4.6 – Desempenho dos interpoladores para os dados ASTER em A3.

Variável	Coefficiente de Correlação (r)	Índice de Concordância (d)	Índice de Desempenho (c)	
IPD <sup>1</sup>	0,828	0,903	0,747	Bom
KRIG <sup>2</sup>	0,864	0,926	0,800	Muito Bom
VN <sup>3</sup>	0,811	0,878	0,712	Bom
CM <sup>4</sup>	0,773	0,825	0,638	Regular
TTR <sup>5</sup>	0,797	0,856	0,682	Bom

<sup>1</sup> Inverso Ponderado da Distância; <sup>2</sup> Krigagem; <sup>3</sup> Vizinho Natural; <sup>4</sup> Curvatura Mínima; <sup>5</sup> *Topo to Raster*

Pela tabela 4.6 nota-se que o desempenho dos interpoladores para os dados ASTER foi inferior ao apresentado para os dados SRTM, além da variação entre as técnicas de interpolação ser maior, de 0,64 a 0,80, o que os classifica de regular para a técnica da Curvatura Mínima a muito bom para a técnica da Krigagem.

## 4.2 Teste de Comparação entre os Métodos

O objetivo da análise de variância foi verificar se haviam diferenças significativas entre os métodos *in situ* e *ex situ* ao nível de probabilidade de 5%. A análise foi realizada entre os métodos de referência (GPS e topografia) e os métodos avaliados, sendo que para os dados SRTM e ASTER foram utilizados os

resultantes da interpolação com a técnica da Krigagem, considerada com melhor índice de desempenho.

A análise de variância detectou diferenças significativas entre os métodos analisados e o teste de Tukey agrupou-os de acordo com os contrastes das médias das discrepâncias dos métodos *ex situ* em relação aos levantamentos de referência (*in situ*), como mostra a tabela 4.7.

TABELA 4.7 – Agrupamento dos métodos através do teste de Tukey.

Métodos Analisados	Áreas do Experimento		
	A1	A2	A3
GPS\Topografia	a	a	a
SRTM	b	b	b
ASTER	b	c	c
Google Earth	c	c	c

De acordo com a tabela 4.7, para todas as áreas do experimento, a análise de variância detectou diferenças entre os métodos utilizados. Para a área A1 o teste de Tukey agrupou os métodos SRTM e ASTER no mesmo grupo (b) e p Google Earth em outro (c). Já nas áreas A1 e A2 o agrupamento foi o mesmo, sendo que o SRTM esta em um grupo separado (b), logo após os levantamentos *in situ* (GPS e topografia), e os métodos ASTER e Google Earth agrupados juntamente em c.

De acordo com a tabela, a área A1 apresenta agrupamentos diferentes dos encontrados nas áreas A2 e A3, o reforça a ideia de que quanto maior a concentração de cobertura vegetal de grande porte na área analisada, pior será a qualidade do trabalho com esse tipo de material. Portanto, se levarmos em consideração somente as áreas A2 e A3, os métodos ASTER e Google Earth não se diferenciam estatisticamente ao nível de probabilidade de 5%.

### 4.3 Análise de Tendência e Acurácia

Na análise de tendências é verificado se a média das discrepâncias pode ser considerada estatisticamente igual à zero (SILVA, 2009), para esta análise foi utilizada a distribuição de probabilidade *t* de Student. Para a análise da acurácia foi utilizado o critério do menor *REMQ* (OLIVEIRA, 2010).

#### 4.3.1 Área A1

A tabela 4.8 traz as informações estatísticas, número de amostras, média, desvio-padrão, raiz do erro médio quadrático, valor calculado para *t* Student e valor teórico para *t* Student para os métodos analisados na área A1.

TABELA 4.8 – Análise de tendência e acurácia dos métodos em A1.

<b>Métodos Analisados</b>	<b>Nº de Amostras</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>REMQ</b>	<b>t</b>	<b>t (5%)</b>
SRTM	64	2,606	1,554	1,614	13,42	2,00
ASTER	64	3,183	2,701	1,784	9,43	2,00
Google Earth	64	5,013	2,241	2,239	17,89	2,00

Segundo a tabela 4.8, pode verificar-se que o valor calculado para *t* Student a partir das amostras dos três métodos analisados é maior que o valor teórico, então se conclui que o modelo de elevação gerado com dados SRTM tem uma variação média de  $\pm 2,606$  m, os MDEs gerados com dados ASTER irão possuir uma variação média de  $\pm 3,180$  m e os dados do Google Earth apresentam uma variação de  $\pm 5,013$  m, para a área A1.

O cálculo da *REMQ* permitiu verificar a acurácia dos métodos e, segundo a tabela, os dados SRTM possuem maior acurácia, ou seja, menor variação em relação aos dados levantados com GPS. Para a área A1 o teste de Tukey não detectou diferenças significativas entre o SRTM e o ASTER o que é confirmado pela

pequena variação da REMQ. O Google Earth apresentou acurácia inferior aos outros métodos analisados.

A figura 4.1 representa os histogramas das discrepâncias para os dados SRTM (a), ASTER (b) e Google Earth (c) encontrados na área A1.

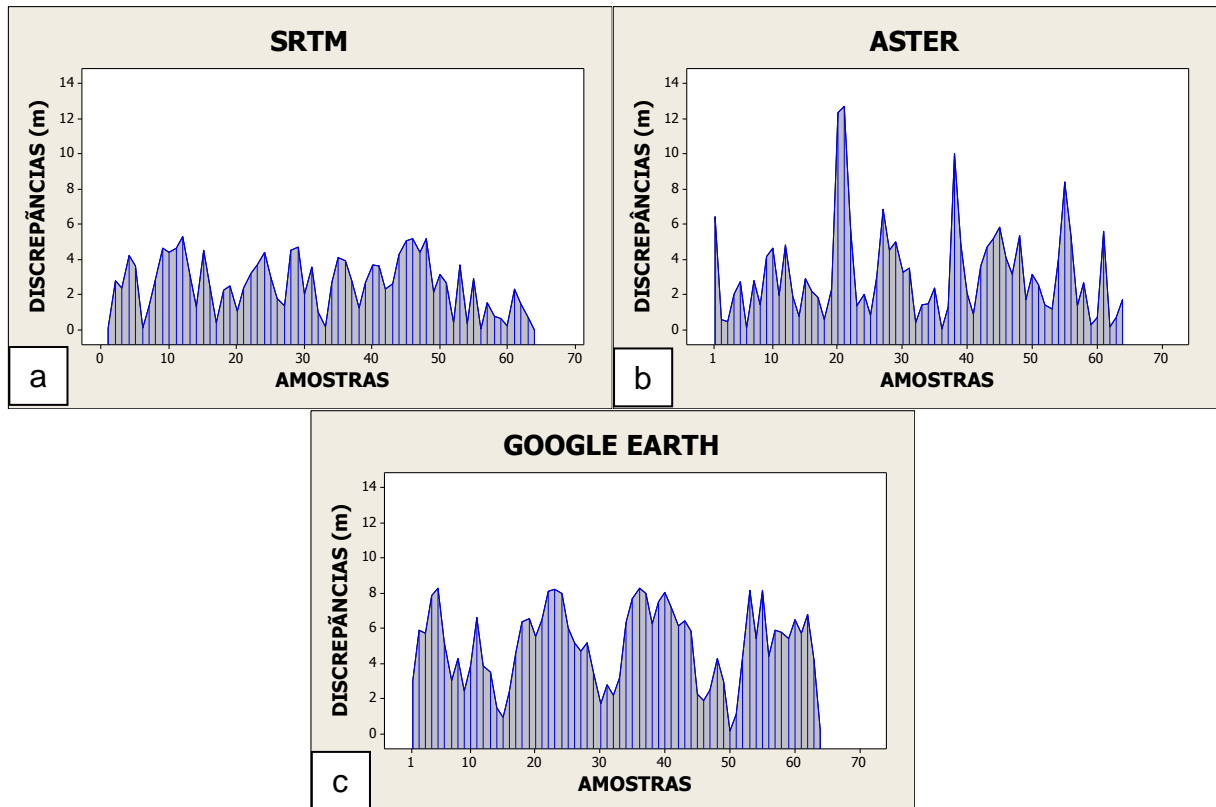


FIGURA 4.1 – Histogramas das discrepâncias dos métodos analisados em A1.

De acordo com a Figura 4.1 pode-se perceber a diferença as discrepâncias dos métodos, sendo que o SRTM apresentou um pico máximo de 5,286 m, o ASTER 12,671 m e o Google Earth 8,273 m.

#### 4.3.2 Área A2

A tabela 4.9 traz as informações estatísticas, número de amostras, média, desvio-padrão, raiz do erro médio quadrático, valor calculado para *t* Student e valor teórico para *t* Student para a área A2.

TABELA 4.9 – Análise de tendência e acurácia dos métodos em A2.

<b>Métodos Analisados</b>	<b>Nº de Amostras</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>REMQ</b>	<b>t</b>	<b>t (5%)</b>
SRTM	109	4,499	2,481	2,121	18,93	2,00
ASTER	109	6,133	2,858	2,476	22,40	2,00
Google Earth	109	6,732	1,781	2,595	39,47	2,00

Segundo a tabela 4.9, pode verificar-se que o valor calculado para *t* Student a partir das amostras dos três métodos analisados é maior que o valor teórico, então se conclui que o modelo de elevação gerado com dados SRTM tem uma variação média de  $\pm 4,499$  m, os MDEs gerados com dados ASTER irão possuir uma variação média de  $\pm 6,133$  m e os dados do Google Earth apresentam uma variação de  $\pm 6,732$  m, para a área A2.

O cálculo da REMQ permitiu verificar a acurácia dos métodos e, segundo a tabela, os dados SRTM possuem maior acurácia, ou seja, menor variação em relação aos dados levantados com GPS. Para a área A2 o teste de Tukey não detectou diferenças significativas entre o ASTER e o Google Earth o que é confirmado pela pequena variação da REMQ.

Apesar dos dados apresentados na área A2 serem inferiores aos apresentados em A1, eles representam com maior confiabilidade a real natureza dos métodos devido à menor presença de possíveis fontes de erros.

A figura 4.2 representa os histogramas das discrepâncias para os dados SRTM (a), ASTER (b) e Google Earth (c) em A2.

De acordo com a Figura 4.2 pode-se perceber a diferença as discrepâncias dos métodos, sendo que o SRTM apresentou um pico máximo de 8,420 m, o ASTER 12,349 m e o Google Earth 9,522 m.

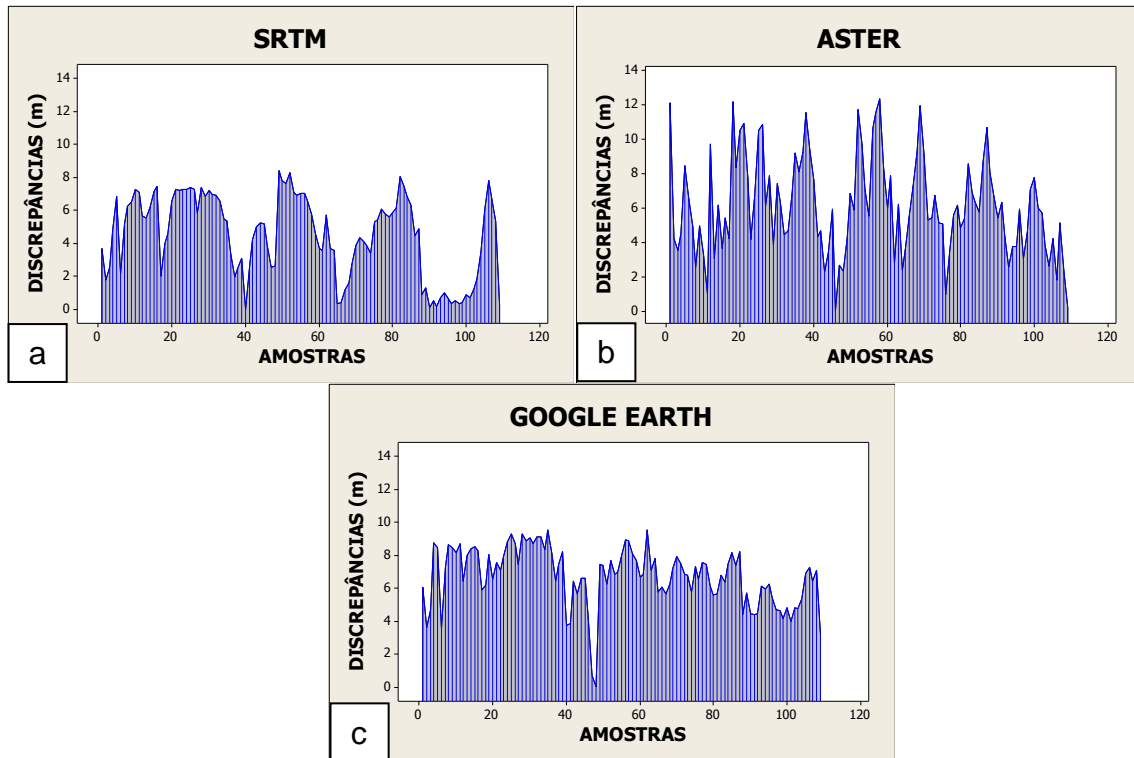


FIGURA 4.2 – Histogramas das discrepâncias dos métodos analisados em A2.

#### 4.3.3 Área A3

A tabela 4.10 traz as informações estatísticas, número de amostras, média, desvio-padrão, raiz do erro médio quadrático, valor calculado para  $t$  Student e valor teórico para  $t$  Student para A3.

TABELA 4.10 – Análise de tendência e acurácia dos métodos em A3.

Métodos Analisados	Nº de Amostras	Média	Desvio-padrão	REMQ	t	t (5%)
SRTM	80	1,338	0,709	1,157	16,880	2,00
ASTER	80	2,160	1,795	1,470	10,770	2,00
Google Earth	80	2,247	0,927	1,499	21,690	2,00

Segundo a tabela 4.10, pode verificar-se que o valor calculado para *t* Student a partir das amostras dos três métodos analisados é maior que o valor teórico, então se conclui que o modelo de elevação gerado com dados SRTM tem uma variação média de  $\pm 1,338$  m, os MDEs gerados com dados ASTER irão possuir uma variação média de  $\pm 2,160$  m e os dados do Google Earth apresentam uma variação de  $\pm 2,247$  m, para a área A3. Ressaltando que a área A3 representa a diferença de nível entre os métodos, ou seja, a variação da altura entre os pontos.

O cálculo da REMQ permitiu verificar a acurácia dos métodos e, segundo a tabela, os dados SRTM possuem maior acurácia. Para a área A3 o teste de Tukey não detectou diferenças significativas entre o ASTER e o Google Earth o que é confirmado pela pequena variação da REMQ.

A figura 4.3 representa os histogramas das discrepâncias para os dados SRTM (a), ASTER (b) e Google Earth (c) em A3.

De acordo com a Figura 4.3 pode-se perceber a diferença as discrepâncias dos métodos, sendo que o SRTM apresentou um pico máximo de 2,831 m, o ASTER 8,677 m e o Google Earth 3,707 m.

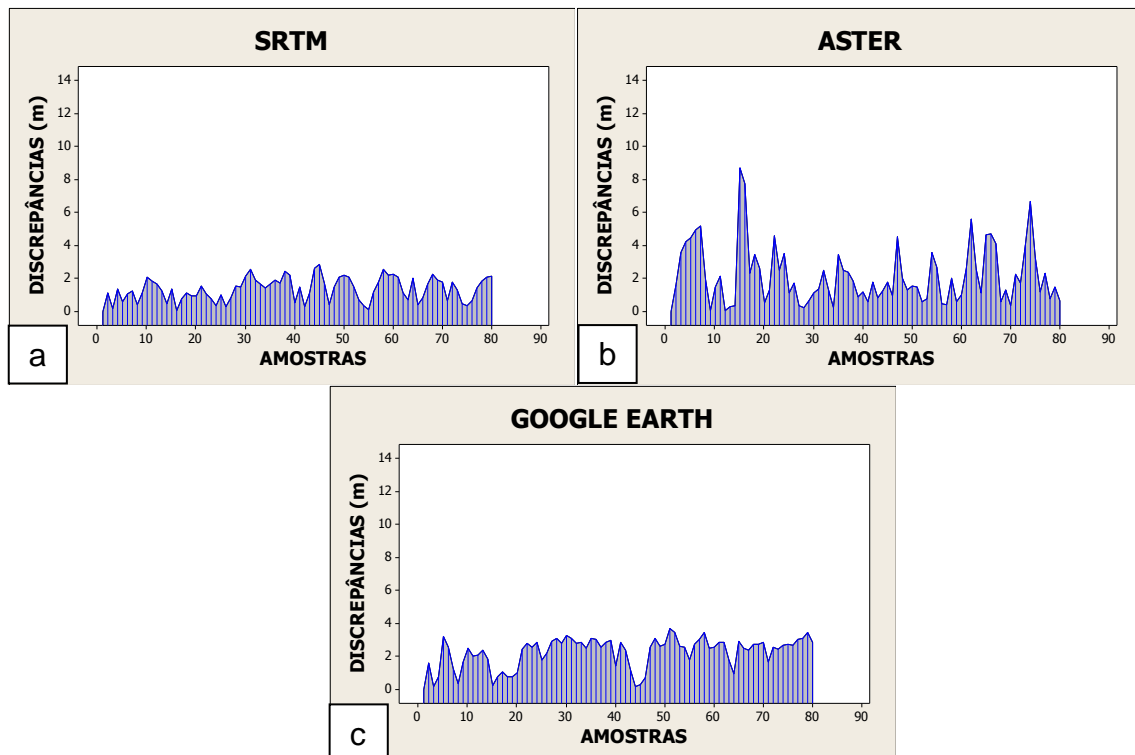


FIGURA 4.3 – Histogramas das discrepâncias dos métodos analisados em A3.



## 5 CONCLUSÃO

O advento de novas tecnologias permitiu o desenvolvimento de técnicas que necessitam de menos tempo a campo, ou muitas vezes nem há a necessidade de estar no local que se deseja obter informações. Algumas fontes de informação altimétrica vêm ganhando popularidade devido à sua forma de obtenção gratuita e à praticidade com que os usuários as têm acesso, tais como, o SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e o programa Google Earth. Porém há a necessidade de ter conhecimento da qualidade dessas fontes de dados, pois o seu uso sem uma prévia análise compromete os resultados dos trabalhos.

Para aferir a qualidade desses métodos de obtenção de altimetria foi realizada uma análise da acurácia dos seus dados, em relação aos dados obtidos por GPS (*Global Positioning System*) e por topografia convencional. A qualidade, dos resultados obtidos, foi avaliada através da análise estatística das discrepâncias entre as cotas dos pontos oriundas do levantamento de campo e as homólogas interpoladas dos métodos. Para a geração de modelos digitais de elevação faz-se necessário a utilização de métodos de interpolação espacial, entretanto é necessário definir, para cada situação qual interpolador é mais exato. A escolha de um modelo apropriado é essencial para se obter resultados aceitáveis (ARANOFF, 1989). Mediante este fato é importante avaliar o desempenho dos interpoladores para cada variável estudada. Para isso realizou-se uma análise de desempenho dos interpoladores Inverso Ponderado da Distância, Krigagem, Vizinho Natural, Curvatura Mínima e *Topo to Raster*.

Em relação às técnicas de interpolação analisadas a Krigagem apresentou maior índice de desempenho, seguido pelo Inverso Ponderado da Distância, com um índice de desempenho médio 3% inferior, o Vizinho Natural que apresentou índice 5% inferior, o Topo to Raster apresentando um índice médio 6% inferior, e, por último, a técnica da Curvatura Mínima que apresentou um índice de desempenho médio 9% inferior à técnica da Krigagem para a espacialização dos dados altimétricos provenientes dos sensores SRTM e ASTER nas áreas estudadas.

Dentre as áreas A1 e A2 (levantamento com GPS), a área A2 mostrou melhor desempenho dos interpoladores o que pode ser explicado devido às diferenças de cobertura vegetal de grande porte (60% em A1 e 6% em A2) o que pode interferir tanto na qualidade do levantamento *in situ* quanto nos levantamentos *ex situ*. A área A3 apresentou melhor desempenho dos interpoladores em relação à A1 e A2 devido à esta área estar praticamente livre de fontes que possam gerar erro nas imagens orbitais (1% de cobertura vegetal de grande porte) e devido ao tipo de levantamento *in situ* realizado (topografia convencional) que não está sujeito à de erros incidentes no levantamento com GPS.

Na análise da acurácia dos métodos, de um modo geral, os dados provenientes do SRTM apresentaram maior acurácia do que os dados ASTER e Google Earth nas três áreas estudadas o que pode ser explicado pela utilização dos dados SRTM corrigidos pelo projeto “Brasil em Relevo” da Embrapa Monitoramento por Satélite.

Estatisticamente os dados ASTER e Google Earth não são significativamente diferentes nas áreas em que praticamente não havia cobertura vegetal de grande porte, sendo que o ASTER apresentou uma acurácia 4% melhor, porém a amplitude das discrepâncias apresentadas foram 63% maiores do que as do Google Earth, o que faz do Google Earth uma fonte mais confiável do que o ASTER.

Nenhum dos métodos analisados é significativamente igual aos levantamentos realizados por GPS e topografia convencional. Isso mostra que a obtenção de dados altimétricos por meio dessas técnicas ainda necessitam de aprimoramento para fornecerem dados mais confiáveis. Ressaltando que é necessário fazer um estudo de caso para averiguar a aplicabilidade de cada método.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 13133 – Execução de Levantamento Topográfico**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 1994. 35 p.

ARANOFF, S. **Geographic information systems: a management perspective**. Ottawa: WDL Publications, 1989. 294p.

ASRAR, G., **Earth Science Applications Plan**, Washington: NASA, 89 p. Asrar, G. and Earth Observing System, Woodbury, MA: American Institute of Physics, 342 p. 2004.

BOCK, Y. **Reference System**, In: KLEUSBER, A.; TEUNISSEN, P. J. G., **GPS For Geodesy**. 2<sup>nd</sup> Edition, Berlin: Springer, 1996.

BRANDALIZE, A. A. **Globos Digitais**. Disponível em: <<http://www.esteio.com.br>> Acesso em 11 dez. 2011

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

CARUSO, C.; QUARTA, F. **Interpolation Methods Comparison. Computers Mathematical application**. v.35, p. 109-126, 1998.

CCRS (2004). **Canada Centre for Remote Sensing**. Disponível em: [www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs). Acesso: 05/01/20012.

CLARKE, K. C., **Getting Started With Geographic Information System, Upper Saddle River**: Prentice-Hall, 353 p. 2001.

COLWELL, R. N., “**From Photographic Interpretation to Remote Sensing**,” Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 50(9):1305. 1984.

COLWELL, R. N., "**History and Place of Photographic Interpretation**," in Manual of Photographic Interpretation, 2 nd Ed., W.R. Philipson (Ed.), Bethesda: ASPRS, 33-48. 1997.

COLWELL, R. N., **Manual of remote Sensing**, 2 nd. Ed., Falls Church: ASP&RS. 1983.

CRESSIE, N. **Statistics for Spatial Data**. John Wiley and Sons Inc., New York, 1991, 900p.

DOUBECK, A. **Topografia**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1989.

DUREN, R.; WWONG, E.; BRECKENRIDGE, B; SHAFFER, S; DUNCAN, C.; TUBBS, E.; SALOMON, P. **Metrology, attitude and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar**. AeroSense Conference on Aquisiten, Tracking and Pointing. XII. 1998.

EMERY, W. & THOMSON, R. **Data Analysis in Physical Oceanography**. Pergamon Press, New York, 1997. 634p.

ESPARTEL, L., **Curso de Topografia**. 9ed. Globo. Rio de Janeiro. 1987.

FUSSELL, J., RUNDQUIST, D. and HARRINGTON, J. A., "**On Defining Remote Sensing**," **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 52(9):1507-1511. 1986.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Curitiba: Editora da UFPR, 1999. 302 p.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba. Edusp, 2000. 477 p.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 76 p.

HARVEY, D., **Teorías, leyes y modelos en geografía**. Alianza Ed., Madrid, 1983. 568 p.

HEIPKE, C.; KOCH, A.; LOHNANN, P. **Analysis of SRTM DTM – Metodology and Practical Results**. ISPRS Commission – IV Symposium. Ottawa, 2002.

HODGSON, M. E. JENSEN, J. R., RABER, G., TULLIS, J., DAVIS, B., THOMPSON, G. and SCHUCKMAN, K. “**An Evaluation of LIDAR derived Elevation and Terrain Slope in Leaf-off Conditions**,” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71 (7): 817-823. 2005.

HODGSON, M. E., JENSEN, J. R., SCHMIDT, L., SCHILL, S. and DAVIS B. A., “**An Evaluation of LIDAR- and IFSAR- derived Digital Elevation Models in Leaf-on Conditions With USGS Level 1 and Level 2 DEMS**,” *Remote Sensing of Environment*, 84 (2003): 295-308. 2003 b.

HUTCHINSON, M. F. **Desenvolvimento de um DEM continente-largo com aplicações para terreno e análise de clima**. *Modelando Ambiental com GIS*, ed. M. F. Goodchild et al., 392–399. Nova Iorque: Oxford Imprensa Universitária. 1993.

HUTCHINSON, M. F., e T. eu. DOWLING. **Uma avaliação de hydrological continental de um modelo de elevação digital grid-baseado novo de Austrália**. *Hydrological Processes* 5: 45–58, 1991.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Pesquisa nacional de saneamento básico 2000**. IBGE, Depart. de População e Indicadores Sociais. Rio de Janeiro, 2002. 431 p. (Livro e CD-ROM).

JENSEN, J. R., **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. ; tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador)... [et al.]. São José dos Campos, SP : Ed. Parêntese, 2009.

KAHMEN, H. FAÍG, W. **Surveyng** – New York. Editora: de Gruyter, 1988. 578p.

KARASKA, M. A., HUGUENIN, J. R., BEACHAM, J. L., WANG, M., JENSEN, J. R., and R. S. KAUFMAN, “**AVIRIS Measurements of Chlorophyll, Suspended Minerals, Dissolved Organic Carbon, and Turbidity in the Neuse River, N. C.**,” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70 (1): 125-133. 2004.

KENNEDY, K. H., **Introduction to 3D data : modeling with arcGIS 3D analyst and Google Earth**. ISBN 978-0-470-38124-3. Ed. Wiley. US, 2009.

MANNING, J.; HARVEY, B. **A National Geodetic Fiducial Network**, *The Australian Surveyor*, v.3 37, n.2, p.87-90, June 1992.

MCCORMAC, J., **Topografia** / 5. ed. Rio de Janeiro : LTC, 2007. 391 p.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 14 fev. 2012.

MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. **Avaliação da qualidade altimétrica dos modelos digitais de elevação obtidos a partir da missão SRTM e de curvas de nível do Mapeamento Sistemático Nacional na escala 1:100.000 para o Estado de Goiás e Distrito Federal**. 2008

MONICO, J. F. G., **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Ed. UNESP, 2008.

MUELLER, I. I.; BEUTLER. **The International GPS Service for Geodynamics – Development and Current Status**, In: *Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Columbus, Ohio, March 1992, *Proceedings...* p.823-35, 1992.

NEMANI, R. R., KEELING, C. D., HASHIMOTO; H., JOLLY, W. M., PIPER, S. C., TUCKER, C. J., MYNENI, R. B. and RUNNING, S. W. **“Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999,”** *Science*, 300 (6): 1560-1563. 2003.

OLIVEIRA, O. M.; SILVA K. R.; SANTOS, E. M.; SANTOS, A. R. **Desempenho de diferentes técnicas de interpolação na espacialização de variáveis edáficas**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.6, N.11; 2010.

PARKINSON, B. W et al. **Global Positioning System: Theory and Applications**. 3. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996. v 1.

RAMSEY, R. D., FALCONER, A. and JENSEN, J. R., **“The Relationship Between NOAA-AVHRR Normalized Difference Vegetation Index and Ecoregions in Utah,”** *Remote Sensing of Environment*, 53:188-198. 1995.

RIBAS, W. K. **Os Limites Posicionais do Google Earth**. Disponível em: <<http://www.esteio.com.br>> Acesso em 12 dez. 2011.

ROBBINS, J., “**High-Tech Camera Sees What Eyes Cannot,**” New York Times, Science Section, September 14, D 5. 1999.

ROBERTSON, G. P. **GS+ Geostatistics for the environmental sciences: GS+ User’s Guide**. Plainwell: Gamma Desing Software, 1998. 152 p.

ROBINSON, T.P.; METTERNICHT, G. **Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties**. Computers and Electronics in Agriculture , v., p. 97-108, 2006.

SANTOS, A.G.; SEGANTINE, P.C.L. **Avaliação da Qualidade das Coordenadas geográficas de Mapas digitais**. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário – UFSC. Florianópolis, 15 a 19 de Outubro 2006.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2. ed. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1998. 236 p.

SCHWARZ, C. R. **North American Datum 83**, NOAA Professional Paper NOS 2, Rockville, MD, 256p. 1990.

SILVA, L. A.; NAZARENO, N. R. X. **Análise do padrão de exatidão cartográfica da imagem do Google Earth tendo como área de estudo a imagem da cidade de Goiânia**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 1723-1730.

STOW, D, COULTER, L., KAISER, J., HOPE, A., SERVICE, D., SCHUTTE, K. and WALTERS, A. “**Irrigated Vegetation Assessments for Urban Environments,**” Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69 (4): 381-390. 2003.

SURFER. **User’s Guide**. Golden Software Inc. USA. 1999.

TOMÁS, L. R.; OLIVEIRA, C. G.; FONSECA, L. M.; ALMEIDA, C. M. **Avaliação da Acurácia de Modelos Digitais de Superfícies Gerados a partir de um Estereopar de imagens IKONOS**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 1897-1903.

TULLIS, J. A. and J. R. JENSEN, "**Expert System House Detection in High Spatial Resolution Imagery Using Size, Shape, and Context**," *Geocarto International*, 18 (1):5-15. 2003.

WAHBA, G. **Spline modela para dados de Observational**. Papel apresentou a CBMS-NSF Série de Conferência Regional em Matemática Aplicada. Filadélfia: Soc. Ind. Appl. Matemáticas. 1990.

WALSH, S. J., EVANS, T. P., WALSH, W. F., ENTWISLE, B. and R. R. RINDFUSS, "**Scale-dependent Relationships between Population and Environment in N. E. Thaitand**," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65 (1): 97-105. 1999.

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

WILSON, J. I.; CHRISTIE, R. R. **A New Geodetic Datum for Great Britain: The Ordnance Survey Scientific GPS Network: SCINET92**, Ordnance Survey, South, Southampton, UK, 1992.