

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E  
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

---

**EMPREGO DE SIMULAÇÃO NO CONTROLE DE  
QUALIDADE EM CARTOGRAFIA APLICADO A  
MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIES ORIUNDOS  
DE SENSORES ORBITAIS SEGUNDO PEC-PCD**

**GILBERLAN DE FREITAS FERREIRA**

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Antonio Nero**

**Dissertação de Mestrado**

Recife, 2014

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E  
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

**Gilberlan de Freitas Ferreira**

**EMPREGO DE SIMULAÇÃO NO CONTROLE DE  
QUALIDADE EM CARTOGRAFIA APLICADO A MODELOS  
DIGITAIS DE SUPERFÍCIES ORIUNDOS DE SENSORES  
ORBITAIS SEGUNDO PEC-PCD**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Cartografia e Sistemas de Geoinformação.

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Antonio Nero**

Recife  
2014

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

F383e

Ferreira, Gilberlan de Freitas.

Emprego de simulação no controle de qualidade em cartografia aplicado a modelos digitais de superfícies oriundos de sensores orbitais segundo PEC-PCD / Gilberlan de Freitas Ferreira. - Recife: O Autor, 2014. x, 121 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Antonio Nero.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2014.

Inclui Referências e Anexos.

1. Ciências Geodésicas. 2. Simulação. 3. Controle de qualidade. 4. MDS. 5. Acurácia. I. Nero, Marcelo Antonio. (Orientador). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2014-182

**“CONTROLE DE QUALIDADE EM CARTOGRAFIA APLICADO A MODELOS  
DIGITAIS DE SUPERFICIES ORIUNDOS DE SENSORES ORBITAIS SEGUNDO  
PEC-PCD E COM EMPREGO DE SIMULAÇÃO”**

**POR**

**GILBERLAN DE FREITAS FERREIRA**

Dissertação defendida e aprovada em 19/02/2014.

Banca Examinadora:

---

**Prof. Dr. MARCELO ANTONIO NERO**

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco

---

**Prof. Dr. JORGE PIMENTEL CINTRA**

Departamento de Engenharia de Transportes - Universidade de São Paulo

---

**Prof. Dr. CARLOS ALBERTO BORBA SCHULER**

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco

**Agradeço ao Criador dos Céus, da Terra e de tudo em que  
nela há, por permitir a conclusão desse trabalho.  
Dedico essa Dissertação aos meus amados Pais, Saul e Josefa,  
ao meu irmão Gilmar e a minha amada esposa Lígia, pessoas  
essenciais em minha vida, responsáveis pelo que sou hoje.**

***“Fazei o melhor que podes e o Criador lhe ajudará”***

Gilberlan de Freitas Ferreira

# SUMÁRIO

	Pág.
<b>RESUMO .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>1.1 – Objetivos da Pesquisa.....</b>	<b>03</b>
1.1.1 – Objetivo Geral.....	03
1.1.2 – Objetivos Específicos.....	03
<b>1.2 – Justificativa da Pesquisa.....</b>	<b>04</b>
<b>1.3 – Estruturação da Pesquisa.....</b>	<b>06</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>07</b>
<b>2.1 – Representação digital de superfícies do terreno.....</b>	<b>07</b>
2.1.1 – Modelos Digitais de Superfície.....	08
<b>2.2 – Sensoriamento Remoto.....</b>	<b>10</b>
2.2.1 – Sistemas sensores orbitais.....	11
2.2.2 – Dados altimétricos de Sensoriamento Remoto.....	13
2.2.2.1 – Missão SRTM.....	15
2.2.2.2 – Projeto TOPODATA.....	17
2.2.2.3 – Sensor ASTER.....	18
<b>2.3 – Controle de Qualidade em Cartografia.....</b>	<b>21</b>
2.3.1 – Acurácia posicional e tipos de erros.....	22
2.3.2 – Normas de qualidade posicional.....	24
2.3.2.1 – Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).....	27

2.3.3 – Controle de Qualidade de MDS.....	29
2.3.4 – Análises Estatísticas.....	31
2.3.4.1 – Teste de Tendência (Avaliação do erro sistemático).....	33
2.3.4.2 – Teste do qui-quadrado (Avaliação da precisão).....	34
2.3.4.3 – Teste direto (Avaliação do PEC-PCD).....	34
2.3.5 – Simulação e aplicação computacional do programa Simula PEC 1.1...	34
<b>2.4 – Amostragem.....</b>	<b>42</b>
2.4.1 – Tipos de amostragens utilizadas na pesquisa.....	44
2.4.1.1 – Amostragem dirigida (ou não probabilística).....	44
2.4.1.2 – Amostragem por perfis transversais.....	45
2.4.1.3 – Amostragem sistemática.....	45
2.4.1.4 – Amostragem total pela população.....	46
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1 – Caracterização da Área de Estudo.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2 – Procedimentos metodológicos.....</b>	<b>49</b>
3.2.1 – Coleta de dados.....	50
3.2.2 – Estruturação dos dados.....	50
3.2.3 – Avaliação de qualidade dos modelos altimétricos.....	51
3.2.4 – Análise dos resultados.....	52
<b>3.3 – Recursos tecnológicos.....</b>	<b>53</b>
<b>4. RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1 – Estruturação e amostragem dos dados.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2 – Avaliação estatística de qualidade dos MDSs.....</b>	<b>61</b>
4.2.1 – Análise dos dados referentes à amostragem dirigida.....	62
4.2.2 – Análise dos dados referentes à amostragem por perfis transversais aleatórios.....	64
4.2.3 – Análise dos dados referentes à amostragem sistemática.....	66
4.2.4 – Análise dos dados referentes à População.....	67
<b>4.3 – Simulação das amostras.....</b>	<b>73</b>

4.4.1 – Simulação e análise da amostragem dirigida.....	76
4.4.1.1 – Dados SRTM.....	77
4.4.1.2 – Dados TOPODATA.....	79
4.4.1.3 – Dados ASTER GDEM.....	81
4.4.2 – Simulação e análise da amostragem por perfis transversais.....	84
4.4.2.1 – Dados SRTM.....	85
4.4.2.2 – Dados TOPODATA.....	87
4.4.2.3 – Dados ASTER GDEM.....	89
4.4.3 – Simulação e análise da amostragem sistemática.....	91
4.4.3.1 – Dados SRTM.....	93
4.4.3.2 – Dados TOPODATA.....	95
4.4.3.3 – Dados ASTER GDEM.....	97
4.4.4 – Simulação e análise da População.....	99
4.4.4.1 – Dados SRTM.....	104
4.4.4.2 – Dados TOPODATA.....	106
4.4.4.3 – Dados ASTER GDEM.....	107
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>111</b>
<b>5.1 – Conclusões.....</b>	<b>111</b>
<b>5.2 – Recomendações.....</b>	<b>113</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>120</b>

## RESUMO

As informações e características com respeito ao relevo são de fundamental importância para o planejamento e a execução de obras de engenharia. Atualmente, além do método convencional de obtenção de dados altimétricos através de levantamento topográfico, existem novos métodos e tecnologias para obtenção desses dados dentre os quais se destaca a estereoscopia de imagens orbitais, a interferometria SAR (Radar de Abertura Sintética) e o perfilamento a laser. Considerando a facilidade de aquisição de várias fontes de informações altimétricas que são disponibilizadas na internet, a qualidade altimétrica dos MDSs obtidos a partir de sensores orbitais tem recebido importante destaque. Pesquisas têm sido direcionadas no desenvolvimento de metodologias para a geração e validação de dados altimétricos de diferentes sensores. Dessa forma, a presente pesquisa apresenta a análise comparativa da qualidade posicional altimétrica dos modelos SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA, utilizando diferentes tipos de amostragem e a aplicação de simulação com diferentes tamanhos amostrais, tendo como referencia dados de maior precisão, obtidos através de aerofotogrametria e levantamento via GNSS. Todo o trabalho levou em conta o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), definido na nova norma de qualidade, considerando a abordagem proposta pela CONCAR (2011) no Brasil.

**Palavras-chave:** Simulação, controle de qualidade, MDS, acurácia.

## ABSTRACT

Information and characteristics with respect to the relief are of fundamental importance for the planning and execution of engineering works. Currently, besides the conventional method of obtaining elevation data through topographic survey, there are new technologies and methods for obtaining such data, among which stands out the stereoscopy of satellite images, SAR (*Sinthetic Aperture Radar*) interferometry and laser profiling. Considering the ease of acquisition of several altimetric information that are available on the internet, the quality of the altimeter's MDS obtained from satellite sensors has received great emphasis. Research has been focused on the development of methodologies for the generation and validation of altimetry data from different sensors. Thus, this research presents a comparative analysis of altimetry positional quality of SRTM, ASTER GDEM and TOPODATA models considering different types of sampling and the application of simulation sample size. All work will take into account the pattern Cartographic Accuracy of Digital Cartographic Products (PEC-PCD), set the new quality standard present in Brazil by CONCAR (2011).

**Keywords:** Simulation, quality control, DMS, accuracy.

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 01</b> – Espectro Eletromagnético.....	11
<b>Figura 02</b> – Satélites e sensores em operação a partir da década de 1980 e projetados para lançamento até 2020.....	12
<b>Figura 03</b> – Detalhes do Radar Interferométrico.....	15
<b>Figura 04</b> – Esquema de aquisição de dados pelo sensor ASTER.....	20
<b>Figura 05</b> – Interpretação do termo acurácia.....	23
<b>Figura 06</b> – Exemplo de um Processo de Simulação.....	36
<b>Figura 07</b> – Esquema geral da operação do programa Simula PEC 1.1.....	37
<b>Figura 08</b> – Tela inicial de dados de entrada do programa “Simula PEC 1.1”.....	38
<b>Figura 09</b> – Interface com a escolha da opção “Dados Reais”.....	39
<b>Figura 10</b> – Exemplo de arquivo texto de listagem de dados Reais.....	39
<b>Figura 11</b> – Alguns tipos de amostragens: a) aleatória, b) aleatória estratificada, c) sistemática não alinhada, e) conglomerados, f) por perfis aleatórios retos, g) por pontos equidistantes sobre perfis, h) por meios de comunicação, i) hierárquica ou multicelulares.....	43
<b>Figura 12</b> – Área de estudos, Campus da USP - Universidade de São Paulo - SP.....	48
<b>Figura 13</b> – Metodologia empregada na pesquisa.....	49
<b>Figura 14</b> – Recorte da imagem SRTM para a área do campus da USP.....	56
<b>Figura 15</b> – Recorte da imagem TOPODATA para a área do campus da USP.....	56
<b>Figura 16</b> – Recorte da imagem ASTER GDEM para a área do campus da USP.....	57
<b>Figura 17</b> – Representação da área do campus da USP, modelada a partir dos dados provenientes do mapeamento na escala de 1:1000.....	58
<b>Figura 18</b> – Representação da extração de valores do pixel correspondente aos	59

	pontos de referência, imagem SRTM.....	
<b>Figura 19</b>	– Representação da extração de valores do pixel correspondente aos pontos de referência, imagem TOPODATA.....	60
<b>Figura 20</b>	– Representação da extração de valores do pixel correspondente aos pontos de referência, imagem ASTER GDEM.....	60
<b>Figura 21</b>	– Representação da localização dos pontos da Amostragem Dirigida nos MDSs.....	63
<b>Figura 22</b>	– Representação dos perfis transversais aleatórios traçados nos MDSs.....	64
<b>Figura 23</b>	– Exemplo da representação dos pontos referentes a Amostragem Sistemática.....	66
<b>Figura 24</b>	– Representação da localização dos pontos referentes a População.....	68
<b>Figura 25</b>	– Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos (255 pontos e PEC-PCD 5m).....	74
<b>Figura 26</b>	– Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados da amostragem dirigida (255 pontos).	76
<b>Figura 27</b>	– Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos SRTM (255 pontos e PEC-PCD 10m).....	78
<b>Figura 28</b>	– Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos TOPODATA (255 pontos e PEC-PCD 10m).....	81
<b>Figura 29</b>	– Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos ASTER GDEM (255 pontos e PEC-PCD 10m).....	83
<b>Figura 30</b>	– Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados por perfis transversais (249 pontos).	85
<b>Figura 31</b>	– Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos SRTM (249 pontos e PEC-PCD 10m).....	86
<b>Figura 32</b>	– Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos TOPODATA (249 pontos e PEC-PCD 10m).....	88
<b>Figura 33</b>	– Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos ASTER GDEM (249 pontos e PEC-PCD 10m).....	90

<b>Figura 34</b> –	Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados SRTM (784 pontos).....	92
<b>Figura 35</b> –	Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados ASTER GDEM e TOPODATA (7.140 pontos) .....	92
<b>Figura 36</b> –	Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos SRTM (784 pontos e PEC-PCD 10m) .....	94
<b>Figura 37</b> –	Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos TOPODATA (7.140 pontos e PEC-PCD 10m).....	96
<b>Figura 38</b> –	Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos ASTER GDEM (7.140 pontos e PEC-PCD 10m).....	98
<b>Figura 39</b> –	Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados da população (99.676 pontos).....	102
<b>Figura 40</b> –	Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos para os dados fictícios (99.676 pontos e PEC-PCD 10m).....	102
<b>Figura 41</b> –	Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos SRTM, dados reais (99.676 pontos e PEC-PCD 10m).....	105
<b>Figura 42</b> –	Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos TOPODATA, dados reais (99.676 pontos e PEC-PCD 10m).....	107
<b>Figura 43</b> –	Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos ASTER GDEM, dados reais (99.676 pontos e PEC-PCD 10m).....	108

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
<b>Tabela 1</b> – Características técnicas gerais do sensor ASTER.....	18
<b>Tabela 2</b> – Resumo sobre as principais normas de qualidade internacionais.....	25
<b>Tabela 3</b> – Tabela comparativa entre normas de qualidade de produtos cartográficos.....	26
<b>Tabela 4</b> – Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais.....	28
<b>Tabela 5</b> – Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimetria (curvas de nível) dos Produtos Cartográficos Digitais.....	28
<b>Tabela 6</b> – Parâmetros de Transformação entre o SAD 69 e o SIRGAS2000.....	54
<b>Tabela 7</b> – Confrontação da porcentagem de pontos dentro do PEC-PCD de 13,70 m ( Classe A na escala de 1:100.000).....	69
<b>Tabela 8</b> – Confrontação da porcentagem de pontos dentro do PEC-PCD de 12 m ( Classe C na escala de 1:50.000).....	69
<b>Tabela 9</b> – Confrontação da porcentagem de pontos dentro do PEC-PCD de 10 m ( Classe B na escala de 1:50.000).....	69
<b>Tabela 10</b> – Confrontação da porcentagem de pontos dentro do PEC-PCD de 7,5 m ( Classe D na escala de 1:25.000).....	70
<b>Tabela 11</b> – Confrontação dos resultados obtidos nos testes realizados nos dados da amostragem total por população.....	70
<b>Tabela 12</b> – Confrontação dos resultados obtidos nos testes realizados nos dados da amostragem dirigida.....	71
<b>Tabela 13</b> – Confrontação dos resultados obtidos nos testes realizados nos dados da amostragem por perfis transversais.....	71
<b>Tabela 14</b> – Confrontação dos resultados obtidos nos testes realizados nos dados da amostragem sistemática.....	71
<b>Tabela 15</b> – Apresentação das discrepâncias entre pontos do modelo SRTM e população, classificados por um determinado PEC-PCD.....	72

<b>Tabela 16</b>	Apresentação das discrepâncias entre pontos do modelo TOPODATA e população, classificados por um determinado PEC-PCD.....	72
<b>Tabela 17</b>	Apresentação das discrepâncias entre pontos do modelo ASTER GDEM e população, classificados por um determinado PEC-PCD.....	73
<b>Tabela 18</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.....	75
<b>Tabela 19</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados SRTM.	77
<b>Tabela 20</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados TOPODATA.....	79
<b>Tabela 21</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados ASTER GDEM.....	82
<b>Tabela 22</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados SRTM.	84
<b>Tabela 23</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados TOPODATA.....	87
<b>Tabela 24</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados ASTER GDEM.....	89
<b>Tabela 25</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.....	93
<b>Tabela 26</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.....	95
<b>Tabela 27</b>	Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.....	97
<b>Tabela 28</b>	Comparação de classificação do PEC-PCD entre as duas amostras, sem a correção do erro sistemático.....	100
<b>Tabela 29</b>	Comparação de classificação do PEC-PCD entre as duas amostras, com a correção do erro sistemático.....	100

<b>Tabela 30</b> – Comparação do teste de tendência entre as amostras.....	100
<b>Tabela 31</b> – Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.....	103
<b>Tabela 32</b> – Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.....	104
<b>Tabela 33</b> – Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.....	106
<b>Tabela 34</b> – Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.....	108

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>ASI</b>	Agenzia Spaciale Italiana (Agência Espacial Italiana)
<b>ASPRS</b>	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto)
<b>ASTER</b>	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Transmissão Espacial Avançada de Emissão Termal e Reflexão Radiométrica)
<b>CEP</b>	Circular Error Probable (Erro Circular Provável)
<b>CONCAR</b>	Comissão Nacional de Cartografia
<b>DLR</b>	The German Aerospace Center (Centro Alemão Aeroespacial)
<b>DRDLR</b>	Department Rural Development & Land Reform (Departamento de Desenvolvimento rural e reforma Agrária)
<b>EB</b>	Exército Brasileiro
<b>EP</b>	Erro Padrão
<b>EMAS</b>	Engineering Map Accuracy Standard (Engenharia de Padrão de precisão de mapas)
<b>EMBRAPA</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>ET-ADGV</b>	Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
<b>GDEM</b>	Global Digital Elevation Map (Modelo Global Digital de Elevação)
<b>GSI</b>	Geospatial Information Authority of Japan (Autoridade de Informação Geoespacial do Japão)
<b>ICSM</b>	Intergovernmental Committee on Surveying & Mapping (Comitê Intergovernamental de Agrimensura e Mapeamento)
<b>IGP</b>	Instituto Geográfico Português
<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Instituto Nacional de Estatística e Geografia)
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<b>InSAR</b>	Interferometric Synthetic Aperture Rada (Radar Interferométrico de Abertura Sintética)
<b>IVP</b>	Infravermelho Próximo
<b>MDE</b>	Modelo Digital de Elevação

<b>MDS</b>	Modelo Digital de Superfície
<b>MDT</b>	Modelo Digital do Terreno
<b>MMQ</b>	Métodos dos Mínimos Quadrados
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço).
<b>NIMA</b>	National Imagery and Mapping Agency (Agência Nacional de Mapeamento e Imagens).
<b>NMAS</b>	National Map Accuracy Standards (Padrão Nacional de Acurácia de Mapas).
<b>NSSDA</b>	National Standard for Spatial Data Accuracy (Padrão Nacional de Acurácia de Dados Espaciais).
<b>PC</b>	Ponto de Controle
<b>PCD</b>	Produto Cartográfico digital
<b>PEC</b>	Padrão de Exatidão Cartográfica
<b>PRM</b>	Percentual de Rejeição de Mapeamento
<b>RMSE</b>	<i>Root Mean Square Error</i> (Erro Médio Quadrático)
<b>SIG</b>	Sistema de Informação Geográfica
<b>SIRGAS</b>	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas.
<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission (Missão Topográfica Radar Shuttle)
<b>SWIR</b>	Short Wave Infrared (Infravermelho de Ondas Curtas)
<b>TIR</b>	Thermal Infrared (Infravermelho Térmico).
<b>USGS</b>	United States Geological Survey (Instituição de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos).
<b>VNIR</b>	The visible and near-infrared (Visível e Infravermelho Próximo)
<b>WGS</b>	World Geodetic System (Sistema Geodésico Mundial)

## 1. INTRODUÇÃO

As informações e características com respeito ao espaço geográfico são de fundamental importância para o planejamento e a execução de obras de engenharia. Especialistas de diversas áreas e com diferentes objetivos apresentam na engenharia o mesmo interesse na representação fidedigna da superfície terrestre.

O desenvolvimento de sensores de imageamento, posicionamento e orientação, bem como de sistemas de aquisição, transmissão e processamento de dados, tem revolucionado os métodos de produção e as formas de disponibilização de dados espaciais em formato digital, ampliando significativamente as possibilidades de análise, interpretação, distribuição e uso da informação espacial para diversas aplicações.

As técnicas de modelagem digital de superfície destacam-se dentre os processos destinados à representação tridimensional (3D) da superfície terrestre e com o advento das novas tecnologias, evoluíram como uma forma de representação e análise eficiente da variação contínua de fenômenos. Utilizando uma quantidade finita e discreta de amostras de pontos da superfície física da Terra com coordenadas tridimensionais conhecidas, a modelagem digital de superfície tem como objetivo representar superfícies de forma contínua.

Os Modelos Digitais de Superfície (MDSs) gerados com base nas técnicas de modelagem digital apresentam maior qualidade e semelhança com a realidade em comparação com os modelos provenientes de representações analógicas. De acordo com CAMARGO, et. al. (2009a), os MDSs são importantes fontes de dados das características fisiográficas naturais ou antropizadas do terreno e suas aplicações abrangem diversos tipos de estudos e áreas do conhecimento.

De uma forma geral as representações do relevo são provenientes de dados altimétricos obtidos convencionalmente através de levantamentos topográficos e geodésicos, da extração de cartas topográficas analógicas, por restituição

aerofotogramétrica ou a partir de técnicas digitais mais recentes disponíveis em sistemas fotogramétricos digitais, de imagens de sensoriamento remoto orbital e de varredura a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Segundo SOUSA, SILVA e COSTA (2009), a geração de um MDS a partir de dados levantados com topografia em campo é feita em duas etapas, a saber, as quais correspondem à aquisição das amostras ou amostragem do terreno e à interpolação dos dados. Estes procedimentos são de alto custo, pois quanto maior e mais acidentada a área, maior a dificuldade no levantamento e maior o tempo de execução do serviço. Já para obtenção de MDS a partir de cartas topográficas, na grande maioria das vezes, é necessária a árdua tarefa de digitalização das curvas de nível e pontos cotados.

Na Cartografia, o MDS pode ser um subproduto de processamento fotogramétrico usado para a geração de imagens ortorretificadas do Sensoriamento Remoto, sendo de fundamental importância a adequação da qualidade desse subproduto à sua aplicação, tema este também tratado em IDOETA (2007) e NEVES (2009).

Para RIBEIRO FILHO, CRUZ e REIS (2007), a oportunidade de se obter facilmente o MDS reduz significativamente o trabalho de construção dos mapeamentos de terreno. Na última década, a obtenção de MDS tem sido facilitada pela disponibilidade de novos métodos e tecnologias, tais como a estereoscopia de imagens orbitais, a interferometria por RADAR (*Radio Detection And Ranging*) e o perfilamento a laser.

Nesse cenário a qualidade posicional dos MDSs obtidos a partir de sensores orbitais tem recebido importante destaque. Pesquisas têm sido direcionadas no desenvolvimento de metodologias para a geração e validação de dados altimétricos de diferentes sensores com o objetivo de avaliar o potencial de uso dessas imagens como fonte de dados tridimensionais. Trabalhos como os de CINTRA (1985), VEIGA (1996), PAIVA, et. al. (2009), DUARTE e ASSAD (2007) e RIBEIRO FILHO (2007)

acerca dos resultados obtidos do uso de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), bem como FUCKNER, FLORENZANO e MORAES (2009), GOUVÊA, et. al. (2005), CAMARGO, et. al. (2009a) e MELO (2003) sobre a qualidade altimétrica dos dados ASTER, além de CUARTERO (2003) que inclui a análise dos dados altimétricos SPOT-HRV e ASTER, entre outros.

Assim, essa pesquisa propõe o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da qualidade posicional altimétrica de MDSs extraídos de sensores orbitais. Algumas dissertações e teses foram desenvolvidas nessa linha de pesquisa, tais como CUARTERO (2003), IDOETA (2007), NEVES (2009), mas proporcionando o avanço do conhecimento, a metodologia apresentada se baseia nos parâmetros estabelecidos recentemente na nova norma publicada pela Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR, 2011) e considera o risco do usuário (de aprovar um MDS fora das especificações) e o risco do produtor (de rejeitar um MDS dentro das especificações) por meio de testes de simulação de tamanho de amostra, tema discutido em ARIZA (2002a, 2002b), ARIZA, GARCIA e AMOR (2004), NERO e CINTRA (2005), NERO (2005) e NERO (2006), dentre outros.

## **1.1 - Objetivos da Pesquisa**

### **1.1.1 - Objetivo geral:**

Determinar a classificação real de determinados tipos de Modelos Digitais de Superfície obtidos de sensores orbitais, tendo como base a nova norma proposta pela CONCAR (2011) a partir da comparação com dados altimétricos de fontes mais precisas e obter o melhor tamanho amostral.

### **1.1.2 - Objetivos específicos:**

- Verificar a qualidade posicional altimétrica de MDSs gerados a partir de sensores orbitais, utilizando como referência dados altimétricos de fontes mais precisas;

- Realizar uma análise comparativa entre diferentes tipos de amostragem usados na metodologia de avaliação de controle de qualidade altimétrica de MDSs;
- Realizar simulações para definição do tamanho amostral que garanta confiabilidade nos resultados estatísticos relacionados à análise de qualidade de MDSs;
- Analisar o emprego da Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (CONCAR, 2011) no controle de qualidade de MDSs.

## **1.2 - Justificativa da Pesquisa**

No Brasil, o Decreto-Lei nº243 de 28 de fevereiro de 1967 estabeleceu as diretrizes e bases das atividades cartográficas em todo o território nacional, definindo a cartografia sistemática convencional como base para a construção dos documentos cartográficos nas escalas do Sistema Cartográfico Nacional. Devido às dimensões continentais do país e ao avanço cada vez mais rápido das tecnologias de mapeamento, os órgãos públicos e a própria iniciativa privada passaram a produzir suas próprias bases cartográficas, com diferentes tecnologias e processos. Com a inexistência de dados do mapeamento sistemático em escalas grandes, grande parte dos projetos de engenharia não se baseia em informações altimétricas de confiabilidade.

Uma das formas potencialmente utilizáveis que representa uma considerável redução de custos e também uma alternativa viável para suprir a ausência de informações do terreno para a construção e atualização de dados altimétricos de documentos cartográficos seria o uso de Modelos Digitais de Superfície (MDSs) gerados a partir de plataformas orbitais. No entanto, deve-se considerar em qual fase do projeto e escala essas fontes de dados podem ser empregadas. Ou seja, surge a necessidade de se conhecer e quantificar a qualidade altimétrica desses dados.

Atualmente, existem dados de sensores orbitais com informações altimétricas disponíveis gratuitamente na internet, como por exemplo, os dados da missão SRTM realizada pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e os dados do Sensor ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*).

Diante da facilidade de aquisição de dados relacionados à altimetria extraída da superfície da Terra através do sensoriamento remoto, muitos trabalhos do ramo da engenharia e da pesquisa, estão usando tais dados indiscriminadamente em suas aplicações e necessidades, sem nenhuma consideração sobre a sua escala e compatibilidade para o produto final. O acesso gratuito de informações altimétricas desses sensores permite ao usuário uma boa manipulação desses dados e a geração de vários tipos de produtos com certa facilidade, porém sem a perfeita confiabilidade posicional para a aplicação. Assim, existe a necessidade da avaliação posicional vertical desses modelos digitais de elevação.

Com relação à formulação do problema têm-se as perguntas: Quais os erros que esses Modelos Digitais de Superfície obtidos de sensores orbitais apresentam em relação a uma base de dados real? O número de pontos para a amostra que a nova norma brasileira (CONCAR, 2011) propõe seria suficiente para a avaliação posicional desses modelos?

Diante desses questionamentos levanta-se a hipótese de que a simulação envolvendo processos estatísticos entre diferentes MDSs e um conjunto de dados de referência indicará as discrepâncias existentes entre os distintos modelos e a realidade. Dessa maneira será possível analisar os padrões de aceitação exigidos pela norma técnica vigente no país, além de possibilitar a definição mais segura do tamanho da amostra.

### **1.3 - Estruturação da Pesquisa**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos:

O Capítulo 1 discorre sobre a parte introdutória, ressaltando a justificativa e os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico que norteou a pesquisa. Para melhor entendimento, este capítulo foi subdividido em tópicos que apresentam a fundamentação da representação digital de superfícies relativa aos Modelos Digitais de Superfície, os conceitos envolvidos nos processos de controle de qualidade em Cartografia, a teoria de simulação e os métodos de amostragem.

O Capítulo 3 caracteriza a área de estudo e expõe a metodologia empregada na pesquisa a partir da descrição dos procedimentos metodológicos e recursos tecnológicos utilizados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados alcançados com a aplicação da metodologia exposta no capítulo anterior.

Finalizando, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas com a elaboração da pesquisa, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

Nos Anexos, constam as planilhas, tabelas de cálculo, gráficos, e os modelos gerados na simulação.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 – Representação digital de superfícies do terreno**

O avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas permitiu o desenvolvimento de diversas técnicas de representação digital de superfícies do terreno. Atualmente, a computação gráfica é amplamente usada para descrição, representação e visualização de superfícies.

Segundo LI, ZHU e GOLD (2004), a representação digital de superfícies pode ser matemática ou gráfica, sendo a representação gráfica a forma mais usada para expressar uma superfície digitalmente. De acordo com OKSANEN (2006), a representação gráfica pode ser caracterizada por linhas, pontos e áreas e é compatível com análises realizadas em ambientes de Sistemas de Informação Geográfica – SIG.

Na representação digital da superfície do terreno vale destacar a importância do conceito de modelo digital. Normalmente, a palavra modelo significa representação e pode ser considerado como uma abstração simplificada da realidade, envolvendo a descrição ou representação de algumas de suas propriedades, de tal forma que seja possível melhor compreendê-la (MEYER, 1985; JOLY, 2011).

LI, ZHU e GOLD (2004), classificam os modelos em conceituais, físicos e matemáticos. Para estes autores, os modelos conceituais são criados a partir do conhecimento e experiência do analista de um determinado fenômeno, correspondendo a uma fase da modelagem que precede ou o modelo físico ou o modelo matemático. Nesse conceito o modelo físico representa o objeto simplificado a partir de uma maquete, por exemplo, e o modelo matemático representa o objeto de estudo com base nos conceitos matemáticos de constantes, variáveis, funções, equações etc.

### 2.1.1 - Modelos Digitais de Superfície

A modelagem de superfície ou modelagem geométrica é a construção de representações para superfícies físicas ou artificialmente criadas, através de processos matemáticos, ou seja, através da modelagem procura-se determinar a superfície que melhor representa um conjunto de dados pontuais, em geral por ajuste de funções ou por interpolações (SIMÕES, 1993).

Existem em várias partes do mundo, diferentes conceitos e definições para os modelos digitais da superfície terrestre. MILLER e LAFLAME (1958) definiram o MDT (Modelo Digital de Terreno) como uma representação estatística de uma superfície contínua do terreno por um número de pontos selecionados com coordenadas X, Y e Z conhecidas.

Com o passar dos tempos o termo Modelo Digital de Elevação (MDE) foi muito utilizado no domínio norte-americano, como também, Modelo Digital de Terreno e Superfície (MDTS) foi o termo usado na Inglaterra, Modelo Digital de Alturas (MDA) na Alemanha e Modelo Numérico do Terreno (MNT) na década de 1990 no Brasil. Comumente os termos são utilizados como sinônimos, o que acarreta certas confusões devido à falta de padronização das nomenclaturas.

Diante disso, a presente pesquisa utilizará as nomenclaturas referentes às formas de representação do terreno em meio digital pela definição de IDOETA (2007) onde diz que, um Modelo Digital de Superfície - MDS (DSM - *Digital Surface Model*) é um conceito genérico que serve para estudos de superfícies de qualquer natureza e é definido como uma amostragem espacial de uma determinada superfície. Quando essa superfície se refere a da Terra, considerando edificações e vegetação dá-se o nome de Modelo Digital de Elevação - MDE (DEM - *Digital Elevation Model*), e quando as altitudes referem-se ao terreno (solo nu), então se denomina Modelo Digital do Terreno - MDT (DTM - *Digital Terrain Model*).

Na forma trivial, a terminologia Modelos Digitais de Terreno (MDT) é aplicada a arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem com um valor de elevação em cada pixel. Os registros altimétricos devem ser valores de altitude do relevo, idealmente, para que o MDT seja uma representação da topografia, considerando o solo sem elementos de vegetação, acidentes artificiais, edificações, entre outros.

Com aplicações geralmente associadas à altimetria, a partir de um MDT também é possível calcular diretamente volumes e áreas, desenhar perfis e secções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e aspecto, gerar fatiamento nos intervalos desejados e perspectivas tridimensionais (ANDRADE, 2008).

Para LI, ZHU e GOLD (2004), o MDS pode ser representado e armazenado segundo estruturas matriciais ou vetoriais, tendo em sua estrutura de modelagem malhas quadradas, rede de triângulos (triangulação) e a modelagem híbrida (junção de vários tipos de modelagens).

Existem diferentes formas de se obter um MDS, convencionalmente, ele pode ser gerado a partir de dados obtidos através de levantamento topográfico ou a partir de cartas topográficas, restituição aerofotogramétrica e imagens de sensores terrestres e orbitais. Essencialmente, a construção de MDS com mapas topográficos consiste na digitalização das isolinhas e sua posterior interpolação, quando as altitudes são estimadas ponto a ponto de uma grade regular para seu armazenamento. Já os dados altimétricos obtidos de sensores orbitais e aerofotos possuem uma abordagem um pouco distinta.

Segundo SANTOS et.al. (1999), a partir de estereopares de imagens obtidas pelos sensores remotos atuantes no espectro eletromagnético, é possível gerar um MDS pelo princípio da estereoscopia, que permite obter dados tridimensionais, por meio da observação de um par de imagens planas (estereopares) de uma mesma cena, com ângulos de incidência distintos.

Nesse caso, a paralaxe de qualquer ponto numa mesma imagem está diretamente relacionada à elevação desse ponto e é maior para pontos com altitudes mais elevadas. A partir de medidas fotogramétricas, a elevação (H) e as coordenadas (E e N) de um ponto podem ser determinadas no terreno e calculadas a partir de sua paralaxe (WOLF e DEWITT, 2000). Mais recentemente, foram desenvolvidas pesquisas e elaborados programas computacionais que geram automaticamente o MDS, como o que pode ser visto em IDOETA (2007).

LI, ZHU e GOLD (2004) tratam com detalhe os procedimentos de geração de MDS, bem como dos modelos matemáticos de interpolação e da análise da acurácia.

Existindo inúmeras aplicações para os MDS na área de Tecnologias da Geoinformação e em áreas afins, a presente pesquisa terá como destaque a verificação da qualidade cartográfica, tendo como foco a altimetria desses modelos segundo a classificação pelo tipo de amostragem e quantidade amostral e pela norma proposta pela CONCAR no Brasil (CONCAR, 2011). Assim, utilizam-se dados orbitais do sensor ASTER (ASTER GDEM), dados refinados pelo INPE no projeto TOPODATA e dados da missão SRTM.

## **2.2 – Sensoriamento Remoto**

De uma forma geral o termo Sensoriamento Remoto pode ser definido como a técnica de adquirir informações sobre um objeto sem estar em contato físico direto com o mesmo. Tal técnica pode ser usada para medir e monitorar importantes características biofísicas e atividades humanas na Terra (JENSEN, 2009).

Diversos tipos de estudos e trabalhos são realizados utilizando o sensoriamento remoto. Com o avanço da tecnologia é possível obter vários tipos de informações para as mais diversas áreas de conhecimento.

Com o advento de vários tipos de sensores orbitais que captam informações em diferentes faixas do espectro eletromagnético (Figura 01), o Sensoriamento Remoto contribuiu com uma percepção sensorial superabundante da superfície terrestre por meio de registro e de análises de interações entre a radiação eletromagnética e as diversas substâncias que compõem a Terra, permitindo a captação de informações em diferentes escalas.

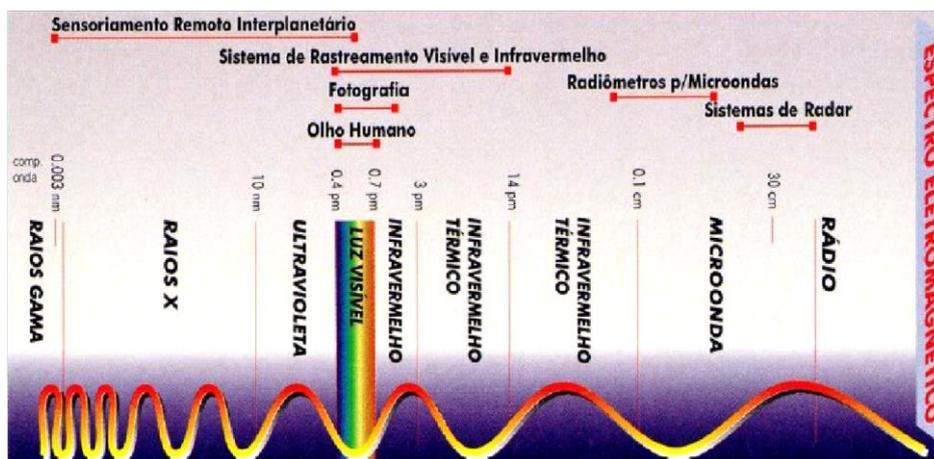


Figura 01: Espectro Eletromagnético. Fonte: MOREIRA (2005).

### 2.2.1 - Sistemas Sensores orbitais

Os sistemas sensores são os sistemas responsáveis pela captação e conversão da energia eletromagnética refletida pelos objetos imageados em um registro na forma de imagem ou gráfico que permita associar a distribuição da radiância, emitância, ou retroespalhamento com suas propriedades químicas, físicas, biológicas ou geométricas (NOVO, 2008).

Existem em órbita vários sistemas sensores a bordo de satélites, alguns em funcionamento e outros fora de operação. Com essa tecnologia a busca por coleta de informações via sensoriamento remoto aumentou de forma considerável, sendo lançados no espaço satélites contendo um ou mais sistemas sensores, com diferentes tecnologias e aplicações, como mostra a Figura 02.

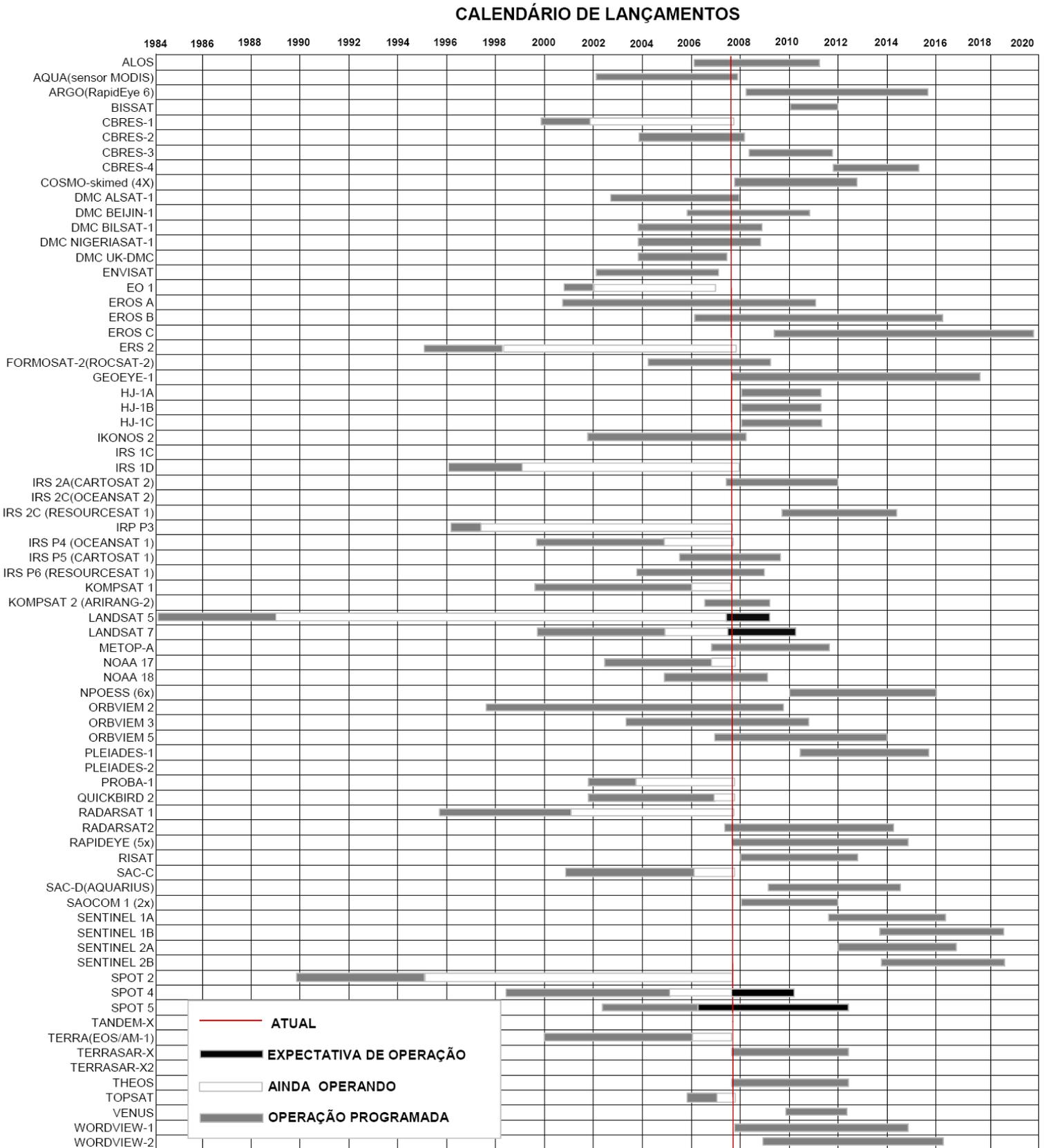


Figura 02: Satélites e sensores em operação a partir da década de 1980 e projetados para lançamento até 2020. (Fonte: Adaptado de NOVO, 2008).

Analisando a Figura 02 é possível ter uma dimensão da quantidade de sistemas de sensoriamento remoto disponíveis atualmente. Com um grande número de sensores, tem-se uma grande quantidade de informações geradas com diferentes características, inclusive dados altimétricos da superfície da Terra.

### **2.2.2 - Dados Altimétricos de Sensoriamento Remoto**

Desde o século passado o Sensoriamento Remoto vem auxiliando o conhecimento, a representação e o estudo da Terra. A partir da década de 70, com o aprimoramento dos sensores orbitais e dos computadores, estudos detalhados sobre a superfície terrestre puderam ser aperfeiçoados e o Sensoriamento Remoto contribuiu com análises de interações entre a radiação eletromagnética e as diversas substâncias que compõem a Terra.

Sua atuação é de grande importância aos estudos envolvendo interpretação da superfície terrestre, desde o trabalho de restituição fotogramétrica com vistas ao mapeamento altimétrico em diferentes escalas apoiado nos princípios da estereoscopia, até a obtenção de modelos digitais de terreno.

Com o advento de sensores orbitais os MDSs puderam ser extraídos através da estereoscopia, por meio de sensores ópticos que adquirem imagens com retrovisada ou através da interferometria, modo de operação de alguns sensores imageadores de microondas.

Os MDSs extraídos através da estereoscopia são provenientes de sensores orbitais que utilizam os mesmos conceitos da fotogrametria para a aquisição de dados em 3D, ou seja, a coleta é realizada através do imageamento de uma mesma área por diferentes ângulos pelo mesmo sensor (visada off nadir) gerando assim, a estereoscopia.

Na faixa de microondas existem sensores que obtêm dados 3D, utilizando o imageamento interferométrico por radar, que é o processo pelo qual as imagens radarmétricas de um mesmo local no terreno são registradas por antenas em diferentes localizações ou tempos diferentes (MADSEN, ZEBKER e MARTIN, 1993; RABUS, et. al., 2003; HODGSON, et. al., 2003). A análise e tratamento de dois interferogramas permite obter medidas muito precisas sobre o deslocamento de qualquer ponto específico  $x,y,z$ , encontrado em cada imagem do par interferométrico. A precisão pode alcançar escalas de subcomprimento de ondas.

O uso de imageamento por microondas apresenta algumas vantagens para a aquisição dos dados, como por exemplo:

- Certas frequências de microondas penetram nas nuvens, permitindo o imageamento em quaisquer condições meteorológicas.
- Visão sinóptica de grandes áreas para mapeamento nas escalas de 1:10.000 a 1:400.000. Assim, a cobertura por satélite de áreas com a presença de nuvens é possível.
- A cobertura pode ser obtida em horários especificados, inclusive à noite, desde que a frequência temporal seja controlável.
- Permite que a resolução seja independente da distância do objeto, com tamanhos de célula de resolução de até 1 x1 m.
- Pode produzir superposição de imagens para a observação estereoscópica e para radargrametria.
- Suporta operações interferométricas usando duas antenas para o mapeamento 3D e análise da assinatura dos objetos de acordo com o ângulo de incidência.

A seguir serão apresentados os conceitos relacionados aos dados altimétricos de sensores orbitais contemplados nesse trabalho e obtidos a partir da mistura de Sensoriamento Remoto convencional com equipamentos espaciais para altimetria.

### 2.2.2.1 - Missão SRTM

O *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi uma missão da NASA e NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), com parceria das agências espaciais da Alemanha, DLR (*Deutsche Zentrum für Luft-und Raumfahrt*), e da Itália, a ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*). O principal objetivo da SRTM foi obter dados topográficos da terra e, para aquisição de todos os dados, a missão durou 11 dias, no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000.

Para adquirir os dados topográficos, a SRTM utilizou um sistema de radar interferométrico de abertura sintética (InSAR). O sistema foi configurado para adquirir duas imagens ao mesmo tempo, através de duas antenas posicionadas separadamente, com distância de 60m entre si (Figura 03). Os radares empregados na missão trabalharam em duas bandas: banda C (5,6 cm, 5,3 GHz) e banda X (3,1 cm, 9,6 GHz). Cada antena InSAR possui fases diferentes e, por meio da diferença de sinais, foram medidas as elevações (VAN ZYL, 2001).

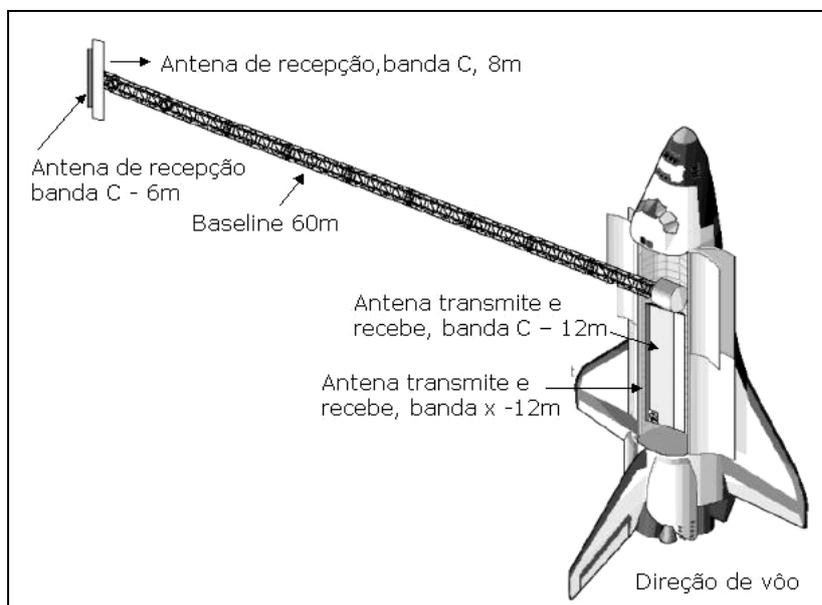


Figura 03: Detalhes do Radar Interferométrico. Fonte: RABUS et al. (2003).

A bordo do ônibus espacial *Endeavour* o sensor sobrevoou a Terra a uma altitude de 233 km com a inclinação de 57° e imageou 80% do planeta,

compreendendo as latitudes entre 60° Norte e 56° Sul. Durante a missão foram adquiridos 12,3 terabytes de dados para gerar modelos digitais de terreno da Terra. Os MDE's gerados pela missão SRTM são distribuídos gratuitamente em coordenadas geográficas, para o Estados Unidos com resolução de 30x30m (aproximadamente 1" de arco, ou 0,000277°) e para o resto mundo com resolução de 90x90m (aproximadamente 3" de arco ou 0,000833°). O datum horizontal e o elipsóide de referência são WGS 84 (*World Geodetic System* 1984) com dados de altitude (H) em metros inteiros (HALL, FALORNI e BRAS, 2005). Os dados altimétricos têm referência no datum vertical EGM96, conforme relatado em MUKHERJEE et. al. (2013).

Os dados foram adquiridos com resolução de um 1" de arco, ou aproximadamente 30x30m, no Equador. Os MDSs relativos à banda C, para as Américas do Sul e do Norte, são distribuídos gratuitamente pela NASA com resolução espacial de aproximadamente 90x90m. Os dados relativos à banda X estão sendo distribuídos pelo Centro Aeroespacial Alemão – DLR (JPL, 2004).

Segundo DUREN et al. (1998), no início da missão esperava-se atingir precisões da ordem de 16 metros na altimetria. No entanto, alguns trabalhos indicam que podem ser atingidas precisões melhores do que as estimadas antes do início da missão, como por exemplo, em KOCH (2002), que atingiu 6 metros. Para conseguir tais metas, os dados devem ser processados a fim de eliminar imperfeições do sistema, tais como valores espúrios próximos ao litoral e alguns vazios no continente, referentes às 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, além de RABUS et al. (2003) que afirmam que o produto final possui precisão vertical global de  $\pm 16\text{m}$  e RODRIGUEZ, MORIZ e BELZ (2006) que afirmam que a precisão vertical para a América do Sul atinge cerca de 6,2m.

Os dados SRTM da NASA são arquivados e disponibilizados, gratuitamente em meio digital pelo endereço:

<<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/cbanddataproducs.html>>. Para maiores detalhes consultar DUARTE e ASSAD (2007).

Outros trabalhos recentes foram desenvolvidos para analisar as acurácias dos dados do SRTM, tais como os obtidos em SAHOLIARILIVA (2011), ZHOU et.al. (2012), MUKHERJEE et. al. (2013).

### **2.2.2.2 - Projeto TOPODATA**

Desde a oferta de dados da SRTM para a América do Sul, em meados de 2003, dados topográficos de todo o território nacional estão à disposição gratuitamente na internet.

A partir da conceituação física das variáveis geomorfométricas, os recursos de processamento de SIG foram adaptados às metodologias de estimativa análogas aos procedimentos de medição direta em carta ou em campo. Os processos foram pormenorizados desde a fase de preparo do MDS a partir da interpolação, ou refinamento, dos dados SRTM originais, com ênfase aos procedimentos de derivação e aos cuidados de pós-processamento.

O Projeto TOPODATA realizado pelo INPE, com participação da EMBRAPA no tratamento dos dados, disponibiliza dados topográficos e suas derivações básicas em cobertura nacional a partir de processamentos digitais do MDS do SRTM.

Os dados disponíveis do TOPODATA sofreram correções como a inclusão de informações em pontos/áreas anteriormente com ausência de dados. Estes passaram por um processamento computacional para refinamento no tamanho da célula (pixel) para 30 m. O refinamento foi realizado a partir de interpolação de todo o universo de dados pelo método de krigagem, processo embasado na análise geoestatística da variabilidade dos dados, onde se definem coeficientes que respondem melhor ao modelo de superfície real. Além

dos dados de entrada, o processo demanda informações geoestatísticas (coeficientes) que controlam a distribuição dos pesos para o cálculo dos valores interpolados (VALERIANO, 2008).

Os dados do Projeto TOPODATA estão arquivados e disponibilizados, gratuitamente em meio digital pelo endereço: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/data/grd/>>.

### 2.2.2.3 - Sensor ASTER

O sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) é um dos dispositivos a bordo do Satélite TERRA (EOS-AM1) em funcionamento desde 1999.

Desenvolvido pela NASA, o sistema ASTER consiste em três subsistemas de sensores: VNIR (*Visible and Near Infrared*), SWIR (*Shortwave Infrared*) e TIR (*Thermal Infrared*). As imagens ASTER cobrem uma região espectral larga com 14 bandas ou canais espectrais com cobertura radiométrica desde o espectro visível até o espectro do infravermelho térmico, com alta resolução espacial, espectral e radiométrica, segundo o indicado na Tabela 01.

Tabela 01 - Características técnicas gerais do sensor ASTER (Fonte:PARMA, 2007).

Instrumento	Bandas Espectrais	Resolução Espacial (m)	Quantidade de Bandas
VNIR	0.5 - 0.9 $\mu\text{m}$	15	3 verticais e 1 inclinada
SWIR	1.6 - 2.5 $\mu\text{m}$	30	6
TIR	8.0 - 12.0 $\mu\text{m}$	90	5

Para a geração da imagem falsa cor composta, MDS e imagem ortorretificada, são utilizadas as bandas do subsistema VNIR, o qual captura dados no espectro visível nas bandas do verde (Banda 1: 0.52 - 0.60  $\mu\text{m}$ ), vermelho (Banda 2: 0.63 - 0.69  $\mu\text{m}$ ) e na banda do infravermelho próximo (Banda 3: 0.76 - 0.86), com uma resolução espacial de 15 metros na direção vertical. Adicionalmente, na visada vertical, o sistema possui um segundo

sensor com visada da mesma órbita para trás, que registra só no espectro do infravermelho próximo (IVP), a qual permite gerar por estereoscopia, junto à banda nadiral no IVP, o MDS (PARMA, 2007).

O princípio básico da geração do MDS é o efeito da paralaxe. Uma correlação de pixels entre as imagens do par estereoscópico determina esse deslocamento que é transformado em valores de elevação (ZOCOLOTTI FILHO e CENTENO, 2004).

O ASTER é o dispositivo de mais alta resolução espacial do satélite EOS AM-1 e o único que não adquire os dados continuamente. As imagens ASTER são disponibilizadas em vários níveis de correções, dos quais, o nível “1A” é o mais simples, com as imagens individuais e os dados radiométricos e geométricos, para realizar todas as correções (PARMA, 2007).

O sistema sensor óptico ASTER, a bordo do satélite Terra, destaca-se pela qualidade geométrica dos seus MDSs, por integrar dados altimétricos e multiespectrais e também por oferecer imagens de baixo custo. Os MDSs são obtidos dos pares estereoscópicos de imagens do infravermelho próximo, geradas no subsistema VNIR (CAMARGO et al., 2009b). A Figura 04 ilustra a aquisição de uma cena pelo sensor ASTER.

O modelo digital de elevação global (GDEM) foi criado a partir do processamento e correlacionamento de 1,3 milhões de arquivos de imagens ópticas de cenas ASTER.

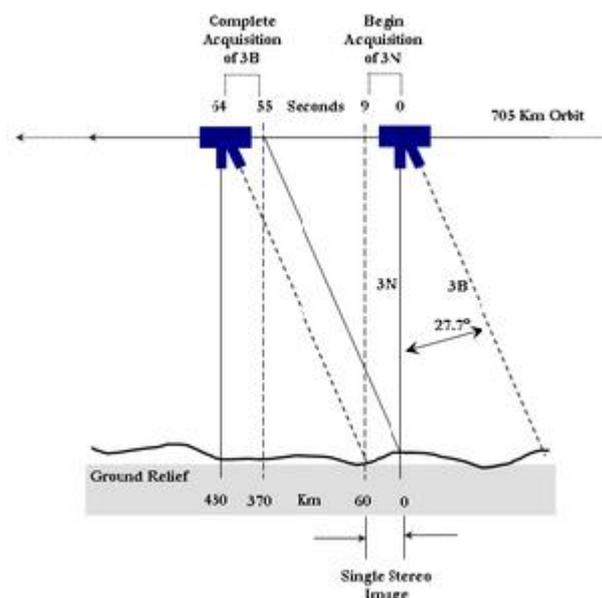


Figura 04: Esquema de aquisição de dados pelo sensor ASTER. (Fonte: USGS, 2013).

Segundo RODRIGUES, DE BIASI e SOUZA (2010), ao todo o mosaico possui 22.895 imagens de 1° por 1°, no formato GeoTIFF (*Geographic Tagged Image File Format*), 16 bits, 1m por ND (nível digital), georreferenciadas no sistema geoidal WGS84/EGM96, com coordenadas geográficas, níveis digitais especiais de -9999 para pixels sem dados e 0 para corpos de água marítimos.

As principais aplicações são: representação do terreno até a escala 1:50.000 com curvas de nível com 20 m de equidistância; modelos de declividade, modelagem de bacias hidrográficas e drenagens; cartografia, geomorfologia, pedologia e outras ciências do solo; estudos de uso e ocupação de solos, em áreas urbanas e rurais e todas as aplicações derivadas.

Os dados ASTER GDEM estão disponibilizados gratuitamente em meio digital pelo endereço: <<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>>.

## 2.3 - Controle de qualidade em Cartografia

O termo qualidade pode ser entendido como uma descrição do conjunto de características de um produto/processo para satisfazer as necessidades do usuário (ARIZA, 2002a). Dentro dessa abordagem o controle de qualidade é o processo de acompanhamento da produção de modo a permitir que os produtos sejam gerados dentro das especificações estabelecidas.

Na Cartografia, o processo de controle de qualidade é aplicado para definir as possibilidades de usos de um conjunto de dados espaciais.

A produção de dados cartográficos gera modelos de representação da realidade para servir de base à tomada de decisões. Assim, quanto maior a qualidade dos produtos cartográficos, maior a confiabilidade na tomada de decisão. Dessa forma, segundo NERO (2005), considerando o fim ao qual se destina o produto cartográfico e os erros admissíveis para tal aplicação são definidas as especificações de qualidade para cada etapa de produção e também para o produto cartográfico final.

Em trabalhos de levantamento e mensuração é comum se ter alguns erros nas medições realizadas, oriundos desde o manuseio do equipamento até mesmo às condições naturais. ARIZA (2002a) apresenta alguns erros possíveis de ocorrer nas etapas de modelagem, coleta, conversão, armazenamento, manipulação e uso de dados espaciais.

De acordo com a teoria dos erros, existem três diferentes tipos de erros: grosseiros, sistemáticos ou aleatórios (GHILANI e WOLF, 2006; RODRIGUES, 2008). Os erros grosseiros, em geral, são de mais fácil detecção e podem ser eliminados quando detectados. São erros frequentemente causados pela imperícia do operador, erro de formato na leitura computacional ou erro de identificação do objeto, que às vezes podem ser perceptíveis com observações redundantes.

Os erros sistemáticos se manifestam como uma tendência constante, comprometendo a estimativa do parâmetro medido. Esses erros devem ser eliminados ou compensados, pois, são geralmente oriundos de causas conhecidas. Este tipo de erro está relacionado ao instrumento e o método utilizado.

Os erros aleatórios ou randômicos resultam da combinação de problemas de natureza acidental e desconhecida, e permanecem mesmo após a remoção dos erros grosseiros e sistemáticos, sendo imprevisível sua ocorrência.

Segundo ARIZA (2002a) e NOGUEIRA JR. (2003), o controle de qualidade em Cartografia considera diversos componentes: a acurácia posicional (que indica quão próximo a posição de um dado espacial está em relação à sua realidade no terreno); a acurácia/exatidão temática (que avalia as componentes temáticas ou de atributos de um dado espacial em relação à realidade); a linhagem (que corresponde a descrição de metadados, ou seja, informações sobre o dado espacial); a completude (que indica se todas as feições ou atributos que devem ser representados estão presentes); a consistência lógica (que avalia a topologia para normatizar o comportamento geométrico dos dados); a fidelidade semântica (que avalia a adequabilidade da simbologia utilizada para representar uma feição em relação à realidade) e a temporalidade (que define prazos para atualização).

Visando atender aos objetivos propostos no Capítulo 1, a presente pesquisa considerou apenas a componente acurácia posicional em suas análises.

### **2.3.1 – Acurácia Posicional**

Considerando todas as possibilidades de existência de erros nos levantamentos, a qualidade posicional é um dos parâmetros mais importantes quando se trata da classificação de um produto cartográfico e, dentro desse assunto, existem termos como acurácia e precisão (exatidão), comumente abordados na bibliografia.

Segundo ÖSTMAN (1997) e ARONOFF (1995), a acurácia posicional, por definição, é um parâmetro de qualidade indicador do afastamento esperado de um objeto em relação à sua posição real no terreno. Para o *Federal Geographic Data Comitee* – EUA (1998), acurácia é a proximidade de um valor estimado (calculado ou medido) em comparação com o seu valor real ou verdadeiro, ou tido como verdadeiro, de uma grandeza particular, ou seja, quanto mais acurado, mais o valor real esta próximo do valor estimado.

Para RODRIGUES (2008), a precisão é normalmente definida pelo desvio-padrão e pelo coeficiente de correlação entre os dados e, segundo MONICO et al. (2009), expressa o grau de consistência da grandeza medida com sua média.

De acordo com GEMAEL (1994), o termo precisão está ligado apenas a efeitos aleatórios de dispersão das observações, enquanto que a acurácia é atrelada a ambos, efeitos aleatórios e sistemáticos, ou seja, a acurácia considera a precisão e a existência de tendências.

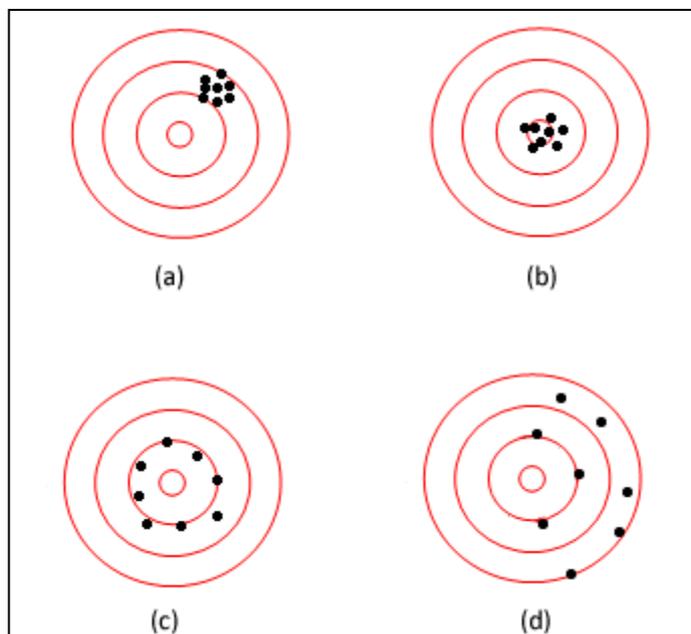


Figura 05: Interpretação do termo acurácia. Fonte: GHILANI e WOLF (2006).

A Figura 05 apresenta uma interpretação para os termos: acurácia, precisão e tendência. Considerando que o centro do alvo corresponde ao valor mais provável de um posicionamento e que todas as observações realizadas (pontos na imagem) estão livres de erros grosseiros, temos que no alvo (a), os dados são altamente precisos, mas baixa acurácia devido à presença de tendência; no alvo (b), os dados são altamente precisos e acurados; no alvo (c), os dados possuem baixa acurácia devido a baixa precisão, mas não apresentam tendência e no alvo (d), os dados apresentam a menor acurácia devido a baixa precisão e a alta tendência.

### **2.3.2 – Normas de qualidade posicional**

O controle de qualidade posicional é um procedimento indispensável na produção cartográfica e os prejuízos podem ser significativos com a utilização de um produto cartográfico de má qualidade (ARIZA, 2002a). Diante disso, devem ser estabelecidas e padronizadas especificações e normas para a avaliação da acurácia posicional de dados espaciais.

Vários países possuem normas que regem o controle de qualidade posicional de dados espaciais em seu território, onde a componente posicional é um dos dados mais estudados e importante quando se trata de controle de qualidade.

Alguns autores como ARIZA (2002a), NERO (2005), PEREIRA e NERO (2012) e SANTOS (2010) tratam de normas de controle de qualidade em dados espaciais e abordam a aplicação das mesmas em vários países. A Tabela 02 apresenta um resumo das principais normas de qualidade internacionais.

Tabela 02 – Resumo sobre as principais normas de qualidade internacionais.

NORMA	DESCRIÇÃO
<b>United States National Map Accuracy Standards (NMAS)</b>	Norma precursora criada em 1947 pela USGS ( <i>United States Geology Society</i> ) nos EUA. Baseada em um teste de qualidade por amostragem em percentual, onde 10% dos pontos analisados (amostra) não pode ultrapassar o valor definido como erro máximo.
<b>Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps – Merchant (1982)</b>	Criada em 1982, a metodologia se baseia em testes estatísticos que avaliam a amostra como um todo e analisam a precisão e a existência de tendências nos dados espaciais.
<b>Norma Alemã (NDATAVLBD)</b>	Criada em 1983, essa norma alemã indica o uso da fórmula de Koppe para verificar a acurácia vertical dos dados espaciais.
<b>Norma da ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing)</b>	Criada em 1989 pela ASPRS se baseia no cálculo do erro médio quadrático (RMSE) para classificar o produto em uma das três classes definidas para determinada escala.
<b>National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)</b>	Norma atual dos EUA criada em 1998 pelo FGDC ( <i>Federal Geographic Data Committee</i> ) baseada na norma ASPRS para analisar escalas menores que 1:20.000.
<b>Australian Map and Spatial Horizontal Data Accuracy Standard (AMSDAS)</b>	Norma Australiana elaborada pelo <i>Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping</i> , que se baseia na norma dos EUA, apresentada em FGDC (1998), considerando também as normas da série ISO 19.000 (ISO 19115, ISO 19113, 2002, ISO 19114, 2003, 2002), todas relacionadas à qualidade de dados espaciais.
<b>Série ISO 19.000</b>	Elaborada pela Organização Internacional de Padronização ( <i>International Organization for Standardization - ISO</i> ), a Série ISO 19.000 contempla algumas normas específicas para qualidade de dados espaciais, tais como a ISO 19.113 (2002) que apresenta os princípios de qualidade em dados espaciais, e a ISO 19.114 (2003) que define procedimentos para avaliação da qualidade em dados espaciais.
<b>Standard for the National Control Survey Network</b>	Tendo iniciadas suas aplicações em 2010, as normas utilizadas na África do Sul, se aplicam ao controle dos processos e ao processo de produção de ortofotomapas nas escalas de 1:10.000, 1:50.000, 1:250.000, e 1:500.000.
<b>Procedimento para os trabalhos de fiscalização da execução de ortofotomapas e cartografia digital</b>	Criadas pelo Instituto Geográfico Português- IGP se enquadram nas seguintes escalas: 1:1.000, 1:2.000, 1:5.000 e 1:10.000.
<b>Especificação Técnica para Aquisição de Dados</b>	Norma brasileira publicada em 2011 pela DSG (Diretoria de Serviço Geográfico do Exército) em substituição a

<b>Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)</b>	antiga norma de 1984. Trata das metodologias convencionais e dos produtos digitais com quatro classes (A, B, C e D) de classificação, sendo a classe A mais rígida que a mesma classe da norma anterior.
---	--

Dentre outras normas existentes, a Tabela 03 faz uma comparação resumida da norma Brasileira com outras normas, abordando algumas informações relevantes.

Tabela 03 – Tabela comparativa entre normas de qualidade de produtos cartográficos. Fonte: PEREIRA e NERO (2012).

País	Fonte	Pontos de Controle	Indicador Estatístico	Nível de Confiança	Avaliação Planimétrica	Escala(s)	Erro Padrão (EP)
África do Sul	DRDLR (2010a, 2010b, 2010c)	-	M.M.Q	95%	Conjunta	1:10.000 e 1:50.000	0,26 e 0,36mm
Austrália	ICMS (2009)	20	RMSE	95%	Separada	Qualquer	-
Brasil	CONCAR-EB (2011)	-	PEC-PCD	90%	Não fica claro	1:25.000, 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000	-
Japão	GSI (2010)	-	Desvio Padrão	-	Conjunta	1:2.500 e 1:5.000	-
México	INEG (2009)	-	CEP ou RMSE	50% e 95%	Conjunta	Qualquer	0,3 ou 0,5mm
Portugal	IGP (2004a, 2004b, 2004c)	Deve ser Calculado	RMSE	95%	Conjunta	1:1.000, 1:2.000, 1:5.000 e 1:10.000	-

Onde,

CEP – Erro Circular Provável

CONCAR-EB – Comissão de Cartografia do Exército Brasileiro

DRDLR – *Department Rural Development & Land Reform*

EP – Erro Padrão

GSI – *Geospatial Information Authority of Japan*

ICMS – *Intergovernmental Committee on Surveying & Mapping*

INEG – *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*

IGP – Instituto Geográfico Português

M.M.Q – Método dos Mínimos Quadrados

PEC-PCD – Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais

RMSE – *Root Mean Square Error*

No Brasil, a primeira norma oficial vigente de controle posicional em Cartografia corresponde ao Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984 (BRASIL, 1984) que estabeleceu as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Brasileira através de padrões e procedimentos a serem considerados na elaboração e apresentação de peças e produtos cartográficos dentro do Território Brasileiro criando o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC e também uma classificação de produtos (planimétricos e altimétricos) em três classes: A, B e C que denominavam a qualidade posicional do produto de acordo com sua exatidão.

### **2.3.2.1 – Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – (PEC-PCD)**

Recentemente em junho de 2011, a CONCAR (2011) criou a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais – ET-ADGV, na qual se aborda a classe de qualidade de MDSs. Esta norma tem como objetivo atualizar sua antecessora, considerando o avanço tecnológico para definição de parâmetros de análise de arquivos digitais. A nova norma tem por finalidade definir as regras para a construção do atributo “geometria” de cada classe de objetos constante da ET-ADGV, bem como dos atributos essenciais à perfeita individualização das instâncias e os respectivos metadados.

A norma ET-ADGV (CONCAR, 2011) criou um novo indicador estatístico, o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD. A norma tornou-se mais rigorosa com os valores do PEC-PCD, inclusive criando uma nova classe de acurácia, sendo agora os produtos cartográficos classificados nas classes A, B, C e D.

Portanto, para avaliar um produto cartográfico digital de acordo com a ET-ADGV, no que se refere aos MDSs avaliados nessa pesquisa, basta calcular o PEC-PCD e comparar com o valor correspondente à escala do produto nas Tabelas 04 e 05.

Tabela 04: Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais. (Fonte: CONCAR, 2011).

PEC - PCD <sup>(3)</sup>	1:1.000 (Eqd = 1 m)		1:2.000 (Eqd = 1 m)		1:5.000 (Eqd = 2 m)		1:10.000 (Eqd = 5 m)		1:25.000 (Eqd = 10 m)		1:50.000 (Eqd = 20 m)		1:100.000 (Eqd = 50 m)		1:250.000 (Eqd = 100 m)	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Tabela 05 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Altimetria (curvas de nível) dos Produtos Cartográficos Digitais. (Fonte: CONCAR, 2011).

PEC <sup>(1)</sup>	PEC-PCD	1:1.000 (Eqd = 1 m)		1:2.000 (Eqd = 1 m)		1:5.000 (Eqd = 2 m)		1:10.000 (Eqd = 5 m)		1:25.000 (Eqd = 10m)		1:50.000 (Eqd = 20m)		1:100.000 (Eqd = 50m)		1:250.000 (Eqd = 100m)	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,67	25,00	16,67	50,00	33,33
B	B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
C	C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00
	D <sup>(2)</sup>	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	20,00	12,00	50,00	30,00	100,00	60,00

Onde,

EP - Erro Padrão

PEC-PCD - Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais

<sup>(1)</sup> Valores determinados, ou adaptados, com base nos valores do PEC Planimétrico previstos no Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984.

<sup>(2)</sup> Valores do PEC-PCD iguais a 1 equidistância e EP de 3/5 da equidistância do produto cartográfico. (CONCAR, 2011).

<sup>(3)</sup> Valor calculado levando-se em consideração os erros existentes nos processos de medição de pontos apoio e de fototriangulação.

### 2.3.3 – Controle de Qualidade de MDS

A acurácia posicional de um dado espacial deve ser avaliada realizando testes estatísticos no posicionamento horizontal e vertical desse dado usando como referência informações mais confiáveis daquela posição no terreno, ou seja, usando dados obtidos por métodos mais acurados que o dado a ser avaliado.

Segundo NEVES (2009), a qualidade de um MDS é resultante da acurácia dos pontos amostrados, da densidade dos mesmos e do método de interpolação aplicado. Os MDSs são ferramentas de suporte para projetos de engenharia e como tal devem ter sua qualidade posicional tridimensional garantida. Assim, o controle de qualidade desse produto cartográfico é extremamente importante.

Para ARIZA (2002a) a acurácia de um MDS sofre influência direta de diversos parâmetros, pois ela é função de diferentes variáveis, tais como a rugosidade (heterogeneidade altimétrica) da superfície terrestre, métodos de interpolação usados e os atributos dos dados de entrada (acurácia, densidade e distinção dos pontos). A rugosidade do terreno determina a dificuldade de um modelo digital representar a realidade altimétrica do terreno, pois, quanto menor a rugosidade, menor é o número de pontos necessários para representar aquela superfície. Dessa maneira, as superfícies complexas requerem um maior número de medições em campo com a possibilidade de uso de polinômios de maior ordem para representação.

De acordo com LI, ZHU e GOLD (2004) podem ser aplicadas quatro abordagens para avaliação da acurácia altimétrica de MDSs:

- A previsão por produção: que avalia os erros semelhantes introduzidos nas diferentes etapas da produção do MDT que resultam na concatenação de erros no modelo final;

- A previsão por área: que se baseia no fato de que existe uma alta correlação entre a acurácia vertical e as curvas de nível de um mapa topográfico;
- A avaliação por testes cartográficos: que corresponde a uma avaliação experimental com base em uso de pontos de controle para checagem do modelo;
- A avaliação por pontos de diagnóstico: ou seja, a avaliação do comportamento do modelo em pontos de altura conhecida.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos nessa linha de controle de qualidade de MDS provenientes de sensores orbitais, tais como:

- CAMARGO et. al. (2009b), intitulado de "*Acurácia posicional de MDE ASTER/TERRA em área montanhosa*" que utilizou as normas técnicas da Cartografia nacional para verificar o Padrão de Exatidão Cartográfica do MDS.
- HÖHLE (2009), intitulado de *Accuracy assessment of Digital Elevation Models by means of robust statistical methods*, que utiliza vários métodos estatísticos para avaliação de MDSs.
- CRUZ, et. al. (2011), Intitulado de "*Avaliação da exatidão planialtimétrica dos Modelos Digitais de Superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR*", que utilizou ortofotos como base de referência para a verificação dos padrões de exatidão especificados na norma Brasileira para a classificação da base cartográfica.
- OLIVEIRA (2011), intitulado de "*Análise de Modelos Digitais de Superfície gerados a partir de imagens do sensor PRISM/ALOS*", que empregou além da análise da qualidade posicional, técnicas de processamento de imagens.
- SAHOLIARILIVA (2011), intitulado de "*Techniques for quantifying the accuracy of gridded elevation models and for mapping uncertainty in digital terrain*

*analysis*", que realiza um estudo crítico dos procedimentos estatísticos utilizados na literatura para testar a incerteza na análise de MDSs.

- ENE, et. al. (2012), intitulado de "*Assessing the accuracy of regional LiDAR-based biomass estimation using a simulation approach*" que também utilizou a simulação usando pontos obtidos por laser scanner aerotrasportado.
- MUKHERJEE, et. al. (2013), intitulado de "*Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM)*", que verifica a qualidade posicional de dados ASTER GDEM e SRTM.

Vale destacar os resultados obtidos em ECKERT (2005) e mais recentemente em SAHOLIARILIVA (2011) e em MUKHERJEE et. al. (2013), que são estudos com respeito à acurácia dos dados provenientes de sensores orbitais, incluindo os provenientes do ASTER GDEM.

Na presente pesquisa foi empregada a avaliação por testes cartográficos e análises estatísticas, conforme descrito no decorrer do presente Capítulo.

### **2.3.4 – Análises Estatísticas**

Segundo MERCHANT (1982), os dados utilizados como referência posicional de documentos cartográficos devem ter uma acurácia pelo menos três vezes melhor que a do produto analisado. Além disso, devem ser realizados os testes específicos para a análise de acurácia e precisão de um produto, em duas fases.

A primeira fase consiste no teste de detecção de tendências, baseada na distribuição t de *Student*, quando é verificada a presença de erros sistemáticos. A segunda fase trata da análise da precisão, baseada na distribuição do qui-quadrado. Tais testes verificam a acurácia através de análises estatísticas das discrepâncias entre as coordenadas medidas e as coordenadas de referência.

No contexto da presente pesquisa, para a realização das análises de qualidade posicional altimétrica dos pontos contidos nas diferentes amostragens testadas, é necessária a aplicação de alguns testes estatísticos, são eles: Teste de tendência (avaliação de erro sistemático), teste do qui-quadrado (avaliação da precisão) e o teste direto (avaliação do PEC-PCD).

Para ser possível a realização dos testes estatísticos são calculados a média e o desvio padrão da diferença para os conjuntos de dados analisados.

O cálculo da média das diferenças ( $\mu$ ) entre as alturas corresponde à divisão da soma dos erros pelo número dos pontos de controle, conforme a equação 4.

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta X_i}{n} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (x_{c_i} - x_{d_i}) \right]}{n} \quad (4)$$

Onde:

$\mu$  = média dos erros;

$n$  = número de pontos de controle;

$x_{c_i}$  = coordenadas dos pontos de controle de referência obtidos numa dada direção;

$x_{d_i}$  = coordenadas dos pontos correspondentes no produto a ser avaliado (imagem).

O cálculo do desvio padrão ( $S_x$ ) entre as alturas corresponde à raiz quadrada da soma dos erros menos a média ( $\mu$ ) elevado ao quadrado e dividido pelo número de pontos de controle menos 1, conforme a equação (5).

$$S_x = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \mu)^2}{(n-1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Onde:

$S_x$  = desvio padrão;

$\Delta X_i = (x_{c_i} - x_{d_i})$ , que neste caso sai diretamente da tabela criada;

$\mu$  = Média dos erros;

$n$  = número de pontos de controle.

Com os dados livres de erros grosseiros e os resultados da média e desvio padrão calculados para as diferenças de altitudes (Z) encontradas nas diferentes amostragens, aplicam-se os seguintes testes estatísticos descritos a seguir.

### 2.3.4.1 – Teste de Tendência (Avaliação do erro sistemático)

Este teste tem por objetivo a detecção de erro sistemático numa dada coordenada, para tanto, aplica-se as seguintes hipóteses:

- H0: Se  $\mu = 0$ , então não existe tendência numa dada coordenada.
- H1: Se  $\mu \neq 0$ , então existe tendência numa dada coordenada.

Ou seja, é realizado inicialmente o Teste de Tendência, para um nível de confiança  $(1-\alpha)$  e, como habitualmente se adota  $\alpha = 0.9$  ou 90%, pode-se concluir se a coordenada em questão possui ou não tendência.

Pela Função Distribuição Normal Unidimensional “Z” chega-se ao valor de 1,645 para o nível de 90%. Assim, se  $|Z_x| < Z_{(1-\alpha/2)}$ , o documento cartográfico pode ser aceito como livre de efeito sistemático numa dada coordenada X qualquer.

A equação (6) a seguir é utilizada para o cálculo de  $Z_x$ :

$$Z_x = \left(\frac{1}{EP}\right)\mu\sqrt{n} \quad (6)$$

Ocorrendo erro sistemático  $\left(|Z_x| > Z_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)}\right)$ , ou seja, existindo tendência, deve-

se avaliar se o valor encontrado é significativo, na escala avaliada. Caso seja significativo, pode-se eliminá-lo, subtraindo a média de cada valor, o que equivale a uma simples translação na direção em que se constata tal ocorrência.

### 2.3.4.2 – Teste do qui-quadrado (Avaliação da precisão)

O Teste de Precisão avalia as seguintes hipóteses numa dada coordenada qualquer X:

- H0: Se  $S_x^2 \leq \sigma_x^2$  o documento cartográfico atende à precisão desejada numa dada coordenada, para um valor de  $S_x$  pré-fixado, que pode ser compatível com os valores do EP da norma brasileira (CONCAR, 2011).
- H1: Se  $S_x^2 > \sigma_x^2$  o documento cartográfico não atende à precisão desejada numa dada coordenada.

Considerando o erro padrão (EP), em (7) tem-se:

$$\sigma_X = \text{EP} \quad (7)$$

Se  $\chi_{(x,n-1)}^2 \leq \chi_{(n-1,\alpha)}^2$ , então o documento cartográfico atende à precisão numa dada direção qualquer X.

A equação (8), utilizada para o cálculo de  $\chi_{(x,n-1)}^2$ , é apresentada a seguir:

$$\chi_{(x,n-1)}^2 = (n-1) \left( \frac{S_x^2}{\sigma_x^2} \right) \quad (8)$$

### 2.3.4.3 – Teste direto (Avaliação do PEC-PCD)

Neste caso, toda a amostra é analisada e é verificado se 10% ou menos pontos de controle tem erro inferior ou igual ao erro admissível. No caso da presente pesquisa, os valores de erro admissível usados serão extraídos da norma brasileira (CONCAR, 2011), correspondentes ao PEC-PCD (Tabela 04).

## 2.3.5 - Simulação e aplicação computacional do programa Simula PEC 1.1

De acordo com ARIZA (2002a) a simulação é simplesmente a construção de um programa computacional que descreve o comportamento de um sistema mediante um modelo e permite obter conclusões para o apoio às tomadas de

decisão. Assim, a simulação consiste em uma metodologia de análise baseada em um suporte informático e define-se através dos passos indicados abaixo:

- Geração de valores aleatórios: para o processo de simulação, é necessária a obtenção de um conjunto de dados (amostras) superabundantes, que podem ser de caráter fictício ou real.
- Transformação dos valores aleatórios nas entradas dos modelos: a partir dos dados (amostras) superabundantes, um subconjunto desses dados é selecionado de forma aleatória para servir de entrada para o modelo de simulação.
- Execução do modelo: os dados de entrada são submetidos à aplicação de testes (de qualquer finalidade ou propósito), que selecionam n-vezes os dados aleatoriamente e novamente aplica os testes n-vezes, gerando resultados de acordo com os testes abordados.
- Estudo estatístico das saídas para entender o comportamento do modelo: os resultados serão expressos em tabelas ou gráficos e são representados qualitativamente e quantitativamente.

A simulação pode ser realizada utilizando os mais variados testes (parâmetros e cálculos efetuados) para a obtenção dos mais variados resultados, como por exemplo: Teste do NMAS (*National Map Accuracy Standard*), teste do EMAS (*Engineering Map Accuracy Standard*), teste da ASPRS (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*), teste da NSSDA (*National Standard for Spatial Data Accuracy*), teste da USGS de categorias de exatidão de MDE e o teste da fórmula de KOPPE. Para maiores detalhes dos testes consultar ARIZA (2002a).

A Figura 06 mostra os passos de um exemplo de simulação aplicada ao controle posicional, conforme ARIZA (2002a), que realiza repetições de seleções de pontos de controle dentro de uma amostra de dados superabundante.

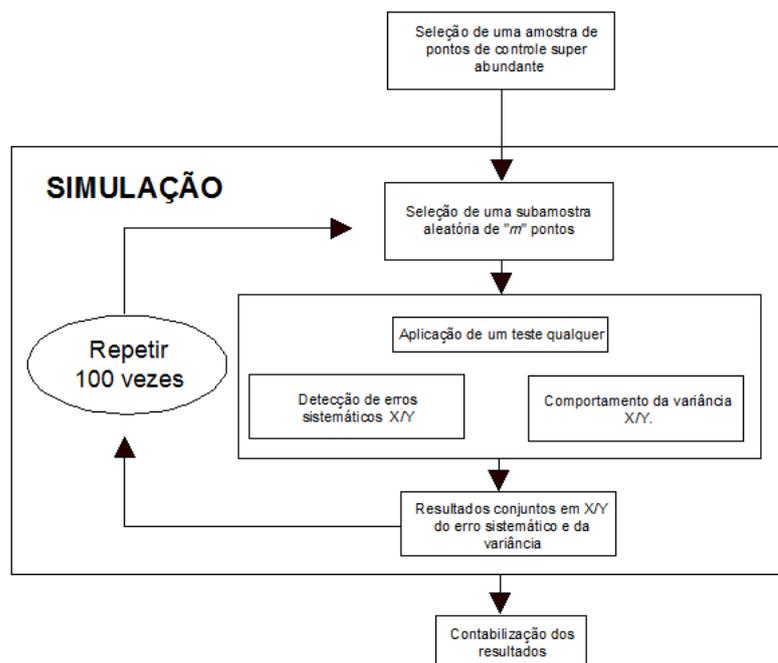


Figura 06: Exemplo de um Processo de Simulação (Fonte: adaptado de ARIZA, 2002a).

No presente trabalho as simulações foram realizadas pelo software Simula PEC 1.1, desenvolvido por NERO, MARDEGAN e PIRES (2006) e teve como modelo teórico de simulação os processos representados na Figura 07. Nessa figura, para um melhor entendimento, apresenta-se o esquema geral de funcionamento do programa Simula PEC 1.1, o qual será detalhado adiante.

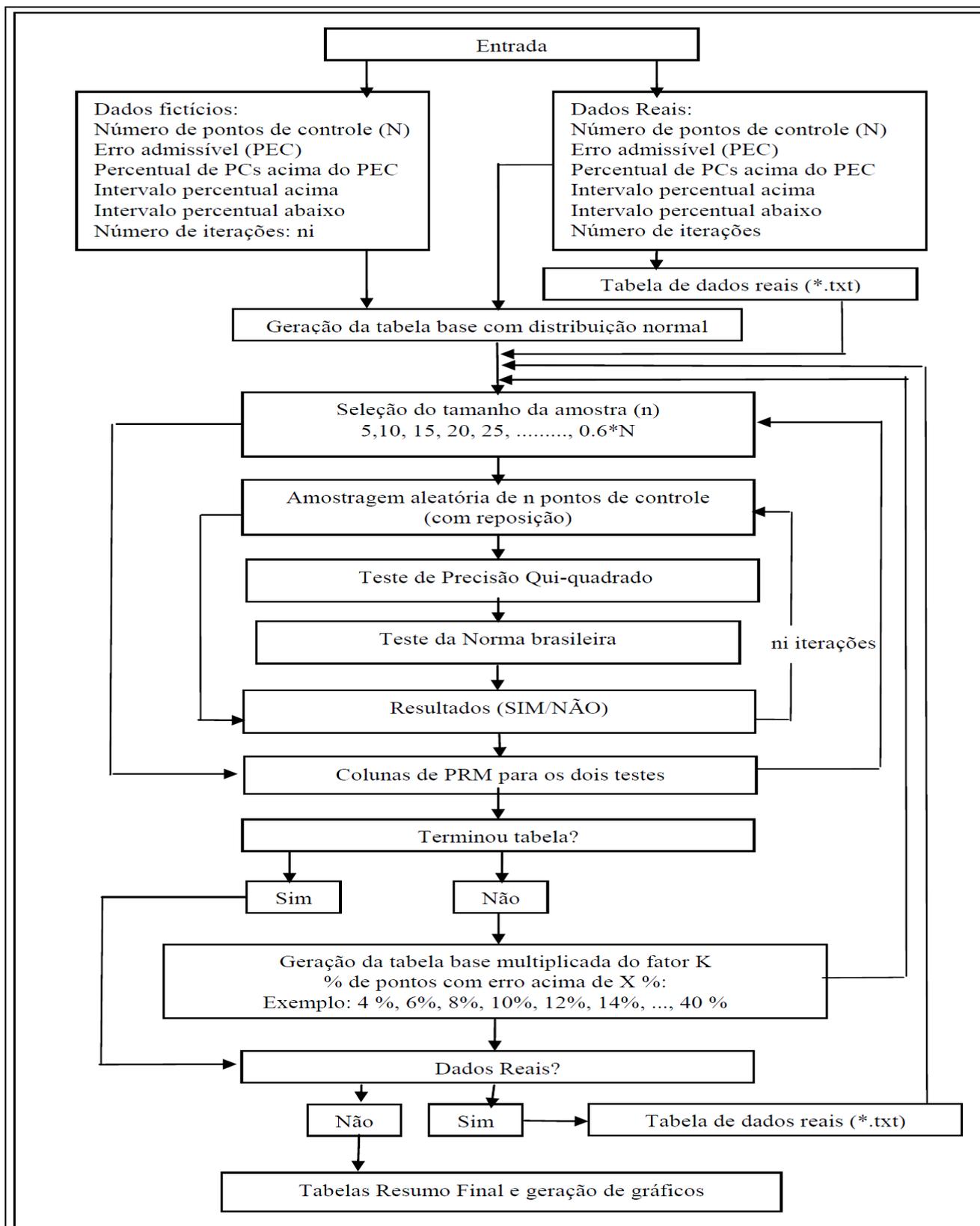


Figura 07: Esquema geral da operação do programa Simula PEC 1.1 (Fonte: NERO, MARDEGAN e PIRES, 2006).

Desenvolvido por NERO, MARDEGAN e PIRES. (2006), o programa “Simula PEC 1.1” foi elaborado com o objetivo de simular uma situação sem a necessidade de ir ao campo, ainda que este permita a simulação com dados reais de campo.

A linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento do software foi o Delfi 7.0, sendo realizada a integração com banco de dados PostgreSQL e com saída gráfica no Excel 2003. A Figura 08 apresenta a interface inicial do programa.

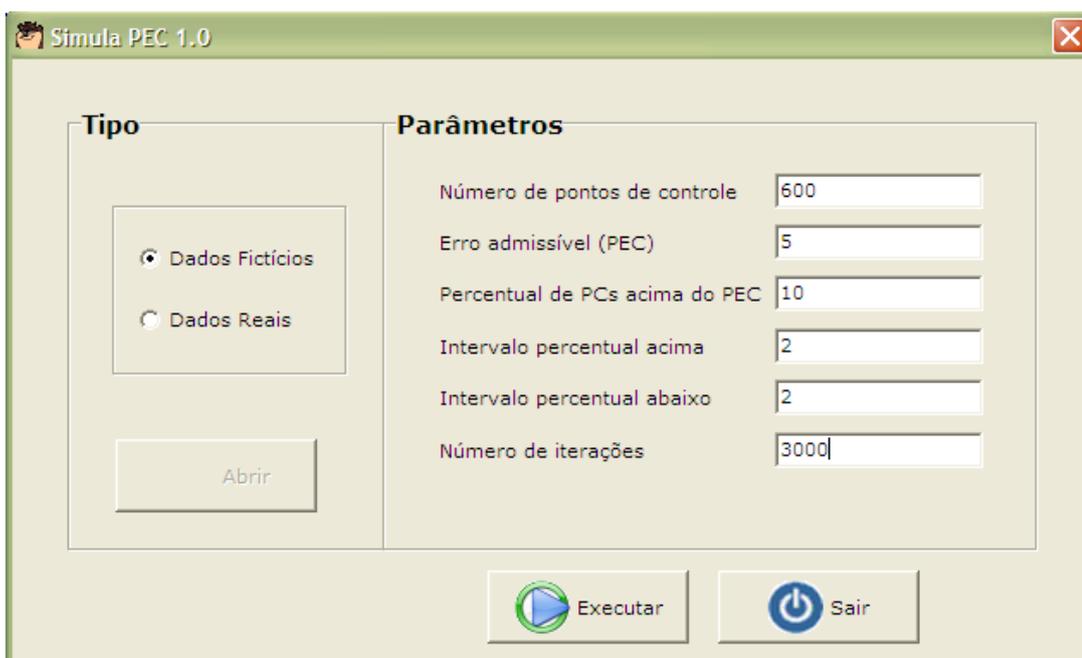


Figura 08: Tela inicial de dados de entrada do programa “Simula PEC 1.1”.  
Fonte: NERO (2006).

Na Figura 08 verificam-se os dados de entrada, que podem ser do tipo "Dados Fictícios" (dados com erros supondo uma distribuição normal) ou "Dados Reais" (dados verdadeiros, coletados de fonte precisa, real), e os parâmetros necessários para a simulação.

Baseado em NERO, MARDEGAN e PIRES (2006), tem-se que, na escolha de "Dados Fictícios" (como mostra a Figura 08), os gráficos a serem gerados terão suas curvas de percentual de rejeição de mapeamento provenientes de listagens simuladas de diferenças entre pontos homólogos da base cartográfica e da fonte mais acurada, sendo geradas diferenças que obedecem à distribuição normal. Já no

caso da escolha da opção “Dados Reais” são criadas as referidas curvas, descritas anteriormente, com a adição de uma curva processada para uma listagem de dados reais das diferenças entre pontos de controle homólogos da base cartográfica e da fonte mais acurada. Assim, é habilitado o botão “Abrir”, sendo que o usuário deve apontar um arquivo texto, como é apresentado na Figura 09. A Figura 10 mostra como deve ser feita a listagem dos dados reais em arquivo.txt, onde os valores representam as diferenças posicionais entre as fontes utilizadas.

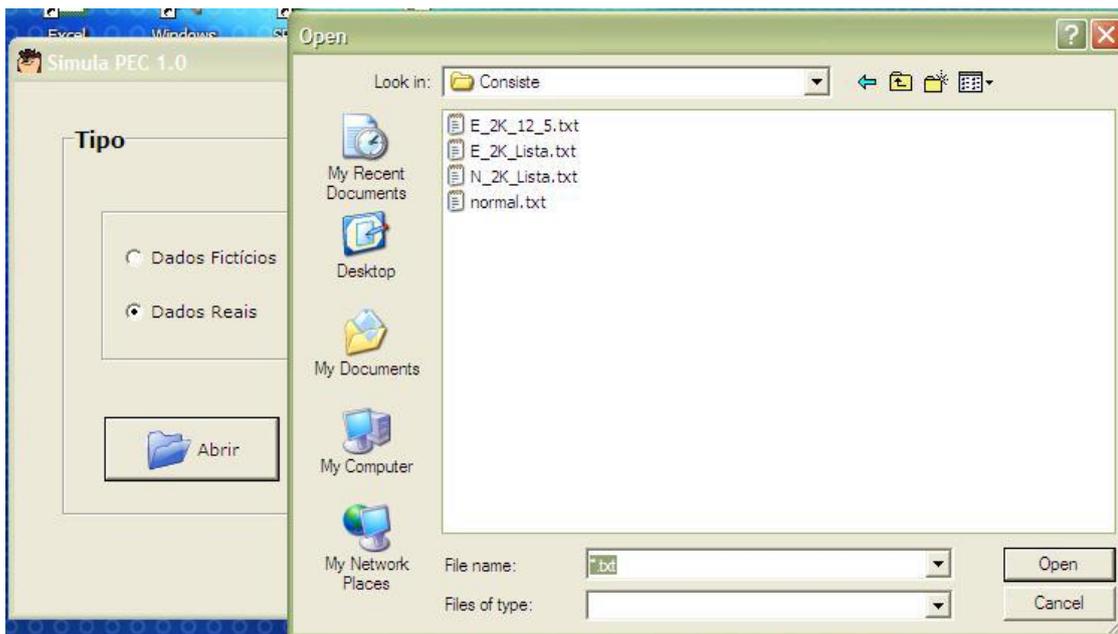


Figura 09: Interface com a escolha da opção “Dados Reais”. Fonte: NERO (2006).

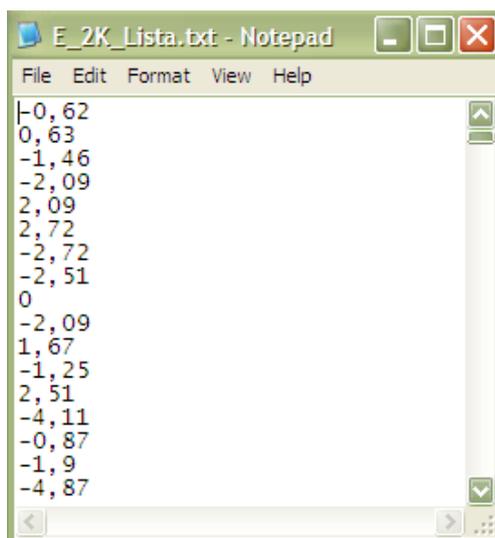


Figura 10: Exemplo de arquivo texto de listagem de dados reais. Fonte: NERO (2006).

No grupo dos "Parâmetros" têm-se as seguintes entradas:

- "Número de pontos de controle": corresponde ao tamanho da população de pontos de controle, ou seja, o total de pontos de controle possíveis de serem coletados e bem identificáveis na base cartográfica. No exemplo da Figura 07 corresponde a 600 pontos de controle;

- "Erro admissível (PEC)": corresponde ao valor em metros do erro aceitável no mapeamento. No exemplo apresentado o valor de entrada corresponde ao PEC-PCD classe B, para uma base cartográfica na escala 1:25.000, ou seja, 5 metros;

- "Percentual de PCs acima do PEC": corresponde ao percentual de pontos de controle com erros superiores ao valor do PEC-PCD estabelecido.

- "Intervalo percentual acima": corresponde ao incremento do intervalo de populações de pontos com erro superior ao PEC-PCD que estejam acima do valor indicado no parâmetro "Percentual de PCs acima do PEC". Assim, serão gerados gráficos para mapas com percentuais que variam de 2 em 2% acima do permitido, ou seja de 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 28, 30, assim por diante até a de 40 %, limite superior que se escolheu através da prática: não há mapas tão errados e o resultado não varia muito;

- "Intervalo percentual abaixo": analogamente corresponde a mapas com erro inferior aos 10% previstos no PEC-PCD, de 2 em 2%, ou seja: 8, 6 e 4%, limite inferior também definido pela prática;

- "Número de iterações": corresponde ao número de vezes que são realizados os testes de precisão e o teste do percentual de pontos acima do PEC-PCD, para cada uma das populações (distintas curvas de 4 a 40 %), com variação de tamanho de amostra de 5 em 5 pontos de controle (ou seja, 5, 10, 15, 20, até 60 % do valor

total da variável “Número de pontos de controle”. No exemplo seria de 360 pontos (60% de 600).

Com esses parâmetros de entrada inseridos é realizado todo o processamento: inicialmente é gerada uma tabela base com os erros nos pontos de controle obedecendo a uma perfeita distribuição normal (ou uma tabela com Dados Reais é inserida no programa). Tal tabela corresponderá no exemplo (Figura 08) a uma listagem de 600 registros (“Número de pontos de controle”), onde não mais que 10 % (100 % - “Percentual de PCs acima do PEC” = 90 %) destes terão erros superiores ao valor do “Erro admissível (PEC-PCD)”. A seguir é extraída uma primeira amostra randômica de 5 (cinco) pontos de controle, para a qual se aplicam os testes de precisão (qui-quadrado) e o teste direto (PEC-PCD). Os testes de precisão e o teste direto são então repetidos tantas vezes quantas especificadas pelo usuário através do parâmetro de entrada “Número de iterações”.

A partir dos dados resultantes da simulação, são aplicadas análises estatísticas e gerados gráficos de rejeição de mapeamento, criando-se as curvas operacionais, expressão utilizada em alguns trabalhos, como por exemplo, HANSEN e GHARE (1990), ARIZA et al. (2001), ARIZA (2002b), ARIZA, GARCIA e AMOR (2004), MONTGOMERY (2005), NERO (2005) e NERO, MARDEGAN e PIRES (2006), para análise e comparação dos resultados com informações da norma técnica em vigor.

Na presente pesquisa a simulação foi aplicada para verificar o índice de rejeição de uma curva gerada a partir de pontos de controle existentes, respeitando um índice de porcentagem do número de pontos abaixo ou acima do PEC-PCD tido como referência, analisando assim o risco do produtor e o risco do usuário. Isto é, para cada valor do PEC-PCD existirão riscos distintos, do usuário e do produtor.

## 2.4 – Amostragem

A amostragem é o processo de obtenção ou extração de amostras, utilizado quando existe a necessidade de analisar uma população e há uma grande dificuldade (ou até mesmo impossibilidade) de se obtê-la por completo, logo se pode avaliá-la por uma pequena parte (amostra) dessa população. O processo de inferir fatos diante da população a partir de amostras extraídas da mesma denomina-se inferência estatística.

Uma amostra deve sempre representar a população, considerando algumas exceções de discrepâncias que existirão no processo de aleatoriedade de coleta de informações, ela tem que possuir as características básicas da população. Quando não é possível ter os dados referentes a toda a população de uma classe considerada, usa-se o processo de amostragem. Tal processo deve ser considerado com muito cuidado, pois o resultado se comportará de acordo com a forma que essa amostragem foi realizada.

De acordo WONG e LEE (2005), em geral existem duas categorias de amostragens: amostragem aleatória e sistemática.

- Amostragem aleatória: quando a coleta de informações é realizada aleatoriamente sem nenhuma regra pré-estabelecida.
- Amostragem sistemática: quando a coleta de informações é realizada de acordo com regras predefinidas de acordo com o objetivo de estudo.

Dentro desses dois tipos gerais de amostragem existem variações como a amostragem estratificada e a amostragem espacial. Quando algumas observações possuem certas características que são comuns e podem ser reunidas em diferentes grupos ou extratos, tem-se a amostragem estratificada. No entanto, a amostragem aleatória e a amostragem sistemática podem conter a amostragem estratificada.

A amostragem espacial é caracterizada quando as observações estão espacialmente referenciadas, ou seja, quando essas observações que compõem a amostra estão respeitando um determinado sistema de referência compondo um sistema de informações geográficas (SIG) e sua localização é definida por coordenadas x e y.

A amostragem espacial pode ser representada pela amostragem sistemática espacial, onde as observações que compõem a amostragem estão respeitando um padrão sistemático regular, ou seja, estão regularmente espaçadas, obedecendo a um padrão de distancias para seus vizinhos mais próximos, ou pela amostragem aleatória espacial, onde as observações que compõem a amostragem não respeitam nenhum padrão sistemático, sendo distribuídas aleatoriamente no espaço.

Diante dos diferentes tipos de métodos de obtenção de observações para compor um tipo de amostragem, cabe ao usuário determinar o melhor tipo que atenderá seu propósito. Na Figura 11 são apresentados alguns tipos de amostragens, por ARIZA (2002a).

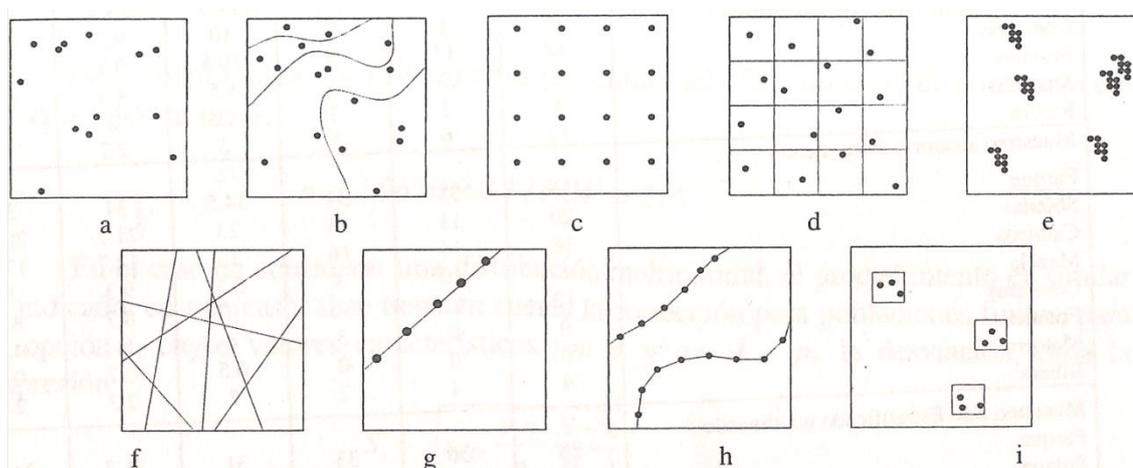


Figura 11: Alguns tipos de amostragens: a) aleatória, b) aleatória estratificada, c) sistemática, d) sistemática não alinhada, e) conglomerados, f) por perfis aleatórios retos, g) por pontos equidistantes sobre perfis, h) por meios de comunicação, i) hierárquica ou multicelulares. Fonte: ARIZA (2002a).

Segundo ARIZA (2002a), o tamanho da amostra utilizada é um dos aspectos mais importantes no que se baseia a qualidade do trabalho e seus custos. Para

determinar o número apropriado de observações que darão um significado estatístico ao trabalho, sem dúvida, em primeiro lugar se deverá estudar a qualidade (linhagem) de cada unidade de amostra para o trabalho em função das fontes e procedências cartográficas.

#### **2.4.1 – Tipos de amostragens utilizadas na pesquisa**

Na presente pesquisa as amostragens corresponderam ao processo de aquisição de conjuntos de pontos dos MDSs que representam a variação de um fenômeno espacial de interesse, nesse caso, a altimetria. Para aplicação da metodologia de análise da qualidade de MDSs obtidos de sensores orbitais foram utilizados quatro diferentes tipos de amostragem, a saber:

##### **2.4.1.1 – Amostragem Dirigida (ou não probabilística)**

Nos métodos de amostragem dirigida, a seleção de cada elemento que fará parte da amostra é baseada em maior ou menor grau em termos de valor sobre a população alvo. Pretende-se que a amostra represente certas características que se conhece sobre a população, não sendo, no entanto, possível conhecer a probabilidade de determinado elemento do universo a ser selecionado para constituir a amostra.

A amostragem foi realizada através de análise multivariada, que corresponde a métodos e técnicas que utilizam simultaneamente todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos. Tal amostragem constituiu-se na escolha dos pontos de controle através de uma amostra estratificada. Na presente pesquisa, para definir as classes dos pontos foram utilizados os parâmetros de declividade e de distância dos pontos de apoio de campo como variáveis de interpretação teórica do conjunto de dados.

Um exemplo de uso da amostragem dirigida, conforme menciona NERO (2005), seria: “Aplica-se a norma ISO 2859-1 (Procedimentos de amostragem

para inspeção por atributos – Parte 1: Esquemas de amostragem indexados por nível de qualidade aceitável (NQA) para inspeção lote por lote) (ISO, 1999) considerando os fatores predefinidos de erro alto, médio, baixo e a ponderação da amostragem como variáveis de interpretação teórica do conjunto de dados para definir os parâmetros de inspeção (tamanho da amostra, número de aceitação e rejeição) a fim de auxiliar na definição sobre a aprovação ou não dos lotes inspecionados”.

#### **2.4.1.2 – Amostragem por perfis transversais**

A amostragem por perfis transversais consiste em uma amostragem semi-regular, que preserva a regularidade da distribuição espacial dos pontos na direção x ou y, mas nunca as duas ao mesmo tempo.

No geral, a aplicação desse tipo de amostragem consiste em traçar perfis transversais aleatoriamente de forma a cobrir a área de interesse, extraindo os pontos de modo equidistante ao longo do traçado dos perfis.

Por exemplo, considerando a necessidade de se extrair uma amostra de 50 pontos de um conjunto de dados hipotéticos, enquadrados pela ISO 2859-1 (ISO, 1999), com esse tipo de amostragem poderiam ser traçados 5 perfis com 10 pontos espaçados de modo equidistante no terreno (ou 10 perfis com 5 pontos cada).

#### **2.4.1.3 – Amostragem sistemática**

A amostragem sistemática consiste na amostragem regular preservando a equidistância na distribuição espacial dos pontos amostrais nas direções x e y, ou seja, gerando uma grade regular de pontos.

Por exemplo, na aplicação da amostragem sistemática em dados *raster*, como é o caso de MDS oriundos de imagens orbitais, a extração da amostra

compreende a extração dos pontos correspondentes ao centro de cada pixel formando uma grade regular espaçada equidistantemente em x e y.

#### **2.4.1.4 – Amostragem total pela População**

Na amostragem total pela população devem ser considerados todos os pontos existentes no conjunto de dados, ou seja, não são formados subconjuntos a partir dos dados a serem analisados. No caso de análise de modelos de representação do terreno a população deve corresponder ao número total de pontos possíveis de serem coletados e que representem fidedignamente as nuances de todo o terreno.

Na presente pesquisa, considerando a disponibilização de dados formados por curvas de nível com equidistância de 1 (um) metro e pontos cotados correspondentes ao mapeamento na escala 1:1000 da área de estudo, realizado pela Empresa Base Aerofotogrametria e Projetos S/A, a população será representada pelo número total de pontos com coordenadas X,Y,Z obtidos desses dados de referência. Esta análise foi utilizada para a validação das amostragens apresentadas anteriormente.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 – Caracterização da área de estudos

O Campus "Armando Salles de Oliveira", também conhecido como Campus da USP, representa a área de estudo (Figura 12) selecionada para a pesquisa e está localizada na Zona Oeste do Município de São Paulo – SP delimitada entre as coordenadas 23°32'50"S e 46°45'00"O (referentes ao canto superior esquerdo) e coordenadas 23°34'40"S e 46°42'30"O (referentes ao canto inferior direito), ambas no Sistema de Referência *World Geodetic System 84* (WGS-84). Com aproximadamente 6 km<sup>2</sup> (600 hectares) de extensão, a área foi escolhida devido à disponibilidade de dados os quais, relacionados à parte orbital, podem ser adquiridos de forma gratuita na internet.

Além disso, estavam disponíveis dados levantados por GPS com precisão melhor que 10 cm, tanto em planimetria como em altimetria, bem como a base cartográfica da área com a linhagem dos dados e acurácia compatível à classe A para a escala 1:1.000. Isto é, 90 % dos pontos com erros inferiores a 0,5 m na planimetria e 90 % com erros inferiores a 0,5 m na altimetria. Material documentado e relatado em Nero (2005).

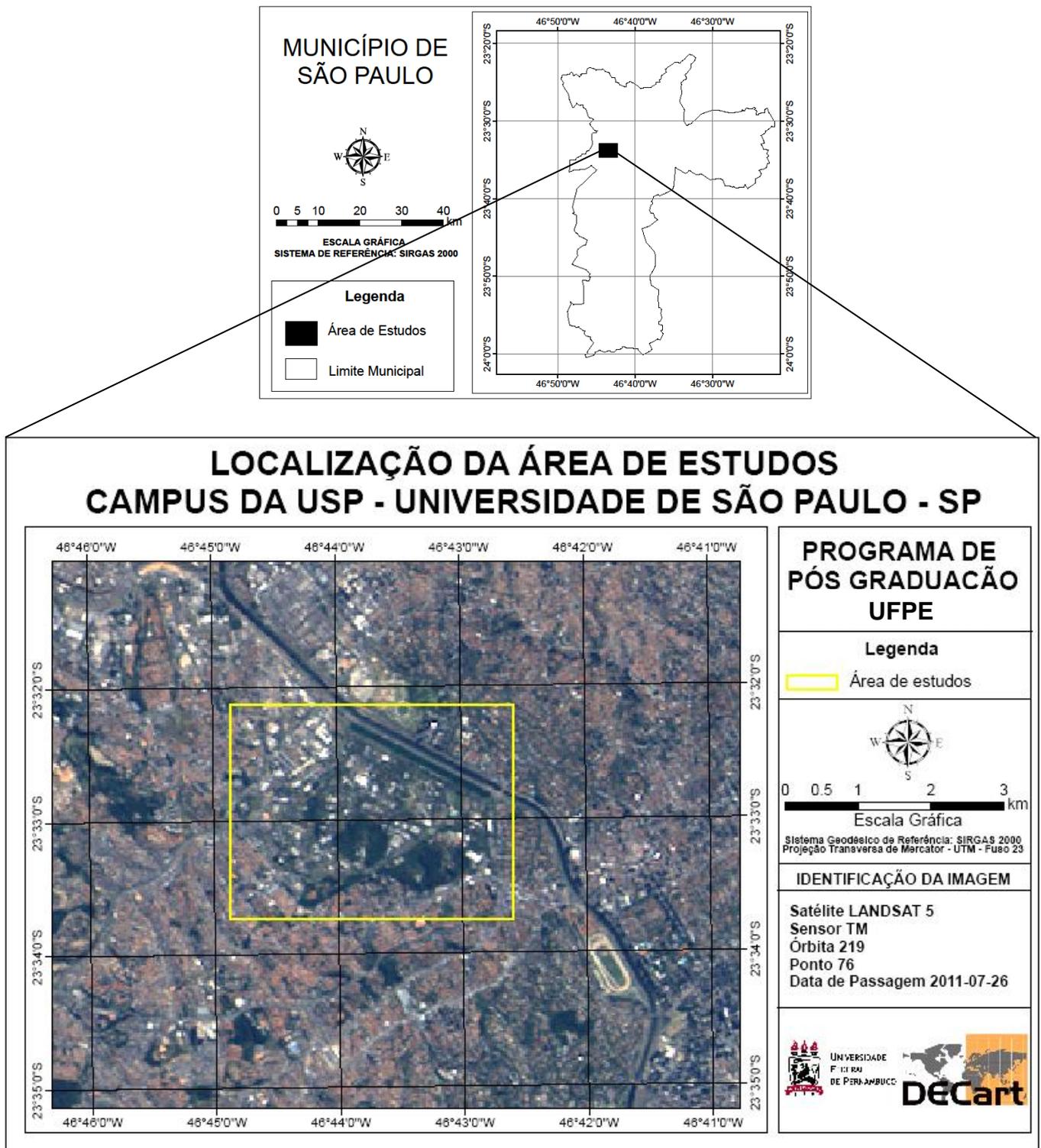


Figura 12: Área de Estudos, Campus da USP - Universidade de São Paulo – SP.

### 3.2 – Procedimentos Metodológicos

A metodologia empregada na pesquisa envolve a aplicação de análises estatísticas e simulação de amostras para classificação de produtos cartográficos quanto à sua qualidade posicional altimétrica. A Figura 13 apresenta os procedimentos metodológicos adotados.



Figura 13: Metodologia empregada na pesquisa.

### **3.2.1 – Coleta dos dados**

A primeira etapa da metodologia correspondeu à coleta dos dados altimétricos a serem trabalhados. Após a definição da área de estudo foram pesquisados dados de altimetria provenientes de sensores orbitais disponíveis na internet.

No dia 19 de março de 2013, foram coletados, de forma gratuita, arquivos matriciais de dados altimétricos de sensores orbitais nos seguintes endereços:

- SRTM: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/listImages.asp>
- ASTER GDEM: <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>
- TOPODATA: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>

O produto cartográfico tomado como referencial altimétrico para análise de qualidade posicional dos dados de altimetria dos sensores orbitais foi o mapeamento na escala 1:1000 adquirido junto à Empresa Base Aerofotogrametria e Projetos S/A, a qual realizou em 2001 o levantamento da área de estudo utilizando aerofotogrametria apoiada em pontos GPS.

O mapeamento na escala de 1:1000 foi realizado de forma sistemática, constituído por 34 folhas contendo dados de altimetria em um arquivo vetorial formado por curvas de nível com equidistância de 1 (um) metro e pontos cotados. Tais dados já foram analisados quando do desenvolvimento da tese de doutorado de NERO (2005) sendo classificados como PEC Classe A na escala 1:1000.

### **3.2.2 – Estruturação e amostragem dos dados**

A etapa de estruturação dos dados englobou todas as atividades de preparação dos dados altimétricos coletados para realização da análise de qualidade, ou seja, teve como objetivo a construção dos conjuntos de pontos (população e amostras) a serem utilizados nos procedimentos de análise.

Para garantir a realização de análises entre os dados de diferentes fontes preservando a veracidade dos mesmos e evitando a ocorrência de interpolações entre os pontos com a consequente geração de valores não existentes nas imagens orbitais, nesta etapa foram realizadas: a compatibilização entre sistemas de referência, a conversão dos dados vetoriais do mapeamento 1:1000 para pontos, o recorte das imagens orbitais para a área de estudos, a aplicação dos diferentes tipos de amostragem ao MDS obtido a partir dos dados de referência e a extração dos valores altimétricos das imagens orbitais para as posições X e Y dos dados de referência, ou seja, extração de altitudes dos pontos homólogos aos pontos extraídos dos dados de referência.

### **3.2.3 – Avaliação de qualidade dos modelos altimétricos**

Esta etapa correspondeu à aplicação de testes estatísticos para análise dos conjuntos de dados altimétricos selecionados na etapa anterior em relação ao novo Padrão de Exatidão Cartográfica definido pela CONCAR (PEC-PCD) e à realização de simulação de amostras para definição da quantidade de pontos necessários à classificação de cada conjunto de dados segundo um valor de PEC-PCD pré-estabelecido.

Para a realização da análise, primeiramente foi feita a extração de amostras de pontos para cada conjunto de dados usando os diferentes tipos de amostragens descritos no Capítulo 2.

Após a realização das amostragens nos conjuntos de dados altimétricos foi realizada a eliminação de erros grosseiros descartando os pontos que possuam valores de Z fora do intervalo de variação altimétrica do MDS sob análise. Tais erros grosseiros estariam relacionados com problema de correspondência entre a amostra e o modelo, ou seja, valores que estariam fora da área de um MDS, geralmente apresentados nos limites de contorno da área de estudos.

Com a eliminação dos erros grosseiros, a qualidade altimétrica dos dados foi avaliada através da análise estatística das diferenças encontradas entre os valores

de Z dos pontos de referência (escala 1:1.000) e os dados de Z extraídos das imagens orbitais. Para ser possível a realização dos testes estatísticos foram calculados a média e o desvio padrão da diferença para cada um dos três conjuntos de dados analisados (dados de referência - imagem SRTM, dados de referência - imagem TOPODATA, dados de referência - imagem ASTER) e em cada tipo de amostragem aplicada, totalizando 12 (doze) conjuntos de dados.

Com os valores de média e desvio padrão para cada conjunto de dados foram aplicados os testes de tendência (*teste t de student*), teste direto e teste do qui-quadrado. O teste de tendência foi aplicado para avaliar a existência de erro sistemático no conjunto de dados, o teste direto para classificação quanto ao PEC-PCD segundo a norma brasileira (CONCAR, 2011) e o teste do qui-quadrado para verificar a correlação entre os pontos de referência e os pontos amostrados.

Após a análise de qualidade pelos testes estatísticos, com os dados compatibilizados, os modelos foram comparados dois a dois, realizando as análises por simulação de amostras utilizando o programa Simula PEC 1.1 e tendo como referência o MDT de maior escala (1:1.000).

Para controle de qualidade posicional da altimetria dos modelos de acordo com a nova norma da CONCAR (2011), o processo de simulação utilizado buscou obter resultados de modo a se avaliar o risco do usuário e o risco do produtor, definindo o tamanho da amostra ideal para análise de qualidade dos modelos e realizando a classificação dos mesmos quanto às classes do PEC-PCD altimétrico segundo a ET-ADGV.

#### **3.2.4 – Análise dos resultados:**

Após a aplicação dos passos descritos anteriormente, os dados produzidos foram analisados de modo a comparar todos os resultados derivados dos diferentes tipos de amostragem e das simulações realizadas pelo programa Simula PEC 1.1

para identificar a qualidade dos MDS analisados e definir as escalas de uso adequado dos mesmos.

Os resultados representaram os riscos do produtor e do usuário, além do comportamento dos resultados obtidos por diferentes tipos de amostragem.

### **3.3 - Recursos Tecnológicos**

#### **Equipamento:**

- Computador: marca Samsung, Processador INTEL CORE I7 2630QM com 8GB de RAM, Clock: 2,0 GHz. cache 3MB, HD 1TB 5400 rpm SATA, Placa de vídeo NVIDIA® GeForce GT540M (Optimus) - 2GB DDR3 Memória Dedicada, tela de 15.6" LED HD (1366 x 768) 16:9 Brilhante, Windows® 7 Professional Original (64 Bits).

#### **Softwares:**

- ArcGIS 10, AutoCAD 2013, Surfer, Global Mapper, Excel e Simula PEC 1.1 (NERO, MARDEGAN e PIRES, 2006), entre outros.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 - Estruturação e amostragem dos dados

Conforme descrito no Capítulo 3, após a coleta dos dados altimétricos foi realizada a compatibilização de sistemas entre os dados coletados. Os dados de referência foram projetados para o mesmo sistema das imagens orbitais tendo em vista que os dados de referência foram referenciados originalmente ao Datum Sul-Americano de 1969 (*South American Datum of 1969 – SAD 69*) e os arquivos de imagens orbitais estão disponibilizados no Sistema Geodésico de Referência WGS84 (*World Geodetic System 1984*).

Sabendo que o sistema SIRGAS2000 é compatível com o sistema WGS 84 ao nível de centímetro, para a transformação entre os sistemas de referência foram utilizados os parâmetros oficiais do IBGE definidos na Resolução R. PR. nº1/2005 de 25/2/2005 (IBGE, 2005). A Tabela 06 apresenta os valores utilizados na transformação.

Tabela 06: Parâmetros de Transformação entre o SAD 69 e o SIRGAS2000.

Valores a serem aplicados na transformação
$DX = + 67,35m$
$DY = - 3,88m$
$DZ = + 38,22m$

No ArcGIS 10 foi criada uma transformação de sistema com os parâmetros definidos pelo IBGE no menu *ArcToolbox > Data Management Tools > Projections and Transformations > Create Custom Geographic Transformation*.

A compatibilização de sistemas foi possível com a utilização da ferramenta *Project Raster (ArcToolbox > Data Management Tools > Projections and Transformations > Raster > Project Raster)*, a qual realizou a conversão dos

arquivos de curvas de nível e de pontos cotados do sistema SAD 69 para o SIRGAS2000.

Para a execução dos testes de qualidade posicional altimétrica, foco da presente pesquisa, foi necessária a utilização de pontos XYZ (N, E, h) provenientes de dados reais de maior escala, tidos como padrão para a comparação com dados de menor escala (dados provenientes de imagens orbitais).

Para geração do arquivo de pontos XYZ com os dados do mapeamento 1:1000, o arquivo de curvas de nível foi convertido para arquivo de pontos utilizando a ferramenta *FeatureClass Z to ASCII* (*ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Conversion > From Feature Class > Feature Class Z to ASCII*). O arquivo ASCII foi formatado no Excel e a tabela final foi importada no ArcGIS para geração do arquivo shapefile de pontos XYZ de referência. A ferramenta Merge (*ArcToolbox > Data Management Tools > General > Merge*) foi utilizada para junção dos dados de pontos cotados aos pontos provenientes das curvas de nível.

Possuindo aproximadamente 191.000 pontos com coordenadas X, Y e Z, o conjunto de dados provenientes do levantamento na escala de 1:1000 representou uma densa malha de informações que abrange de forma satisfatória a análise em toda a extensão da área de estudo, tendo sido considerado como população na análise dos MDSs, devido à superabundância numérica e à boa distribuição espacial na área estudada.

As imagens digitais, representadas por uma matriz de valores em níveis de cinza que variam de 0 a 255, correspondendo ao valor de altura média do pixel, foram recortadas para a área de estudo, usando a ferramenta *Extract by Mask* na plataforma ArcGIS10, tendo como máscara de recorte o arquivo shapefile do limite do campus da Universidade de São Paulo – USP. A ferramenta em questão pode ser encontrada no menu *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract by Mask*. As Figuras 14, 15 e 16 foram geradas usando o programa Global Mapper e mostram os recortes para a área de estudo dos arquivos SRTM, TOPODATA e ASTER GDEM, respectivamente.

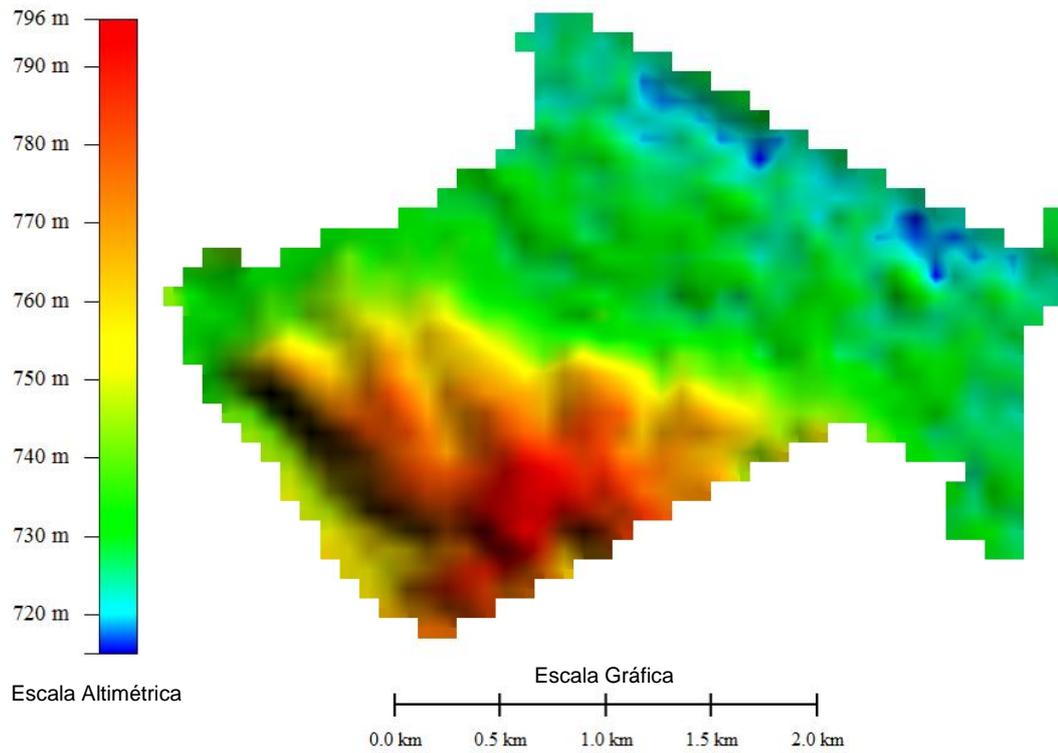


Figura 14: Recorte da imagem SRTM para a área do campus da USP. (resolução espacial de 90 metros)

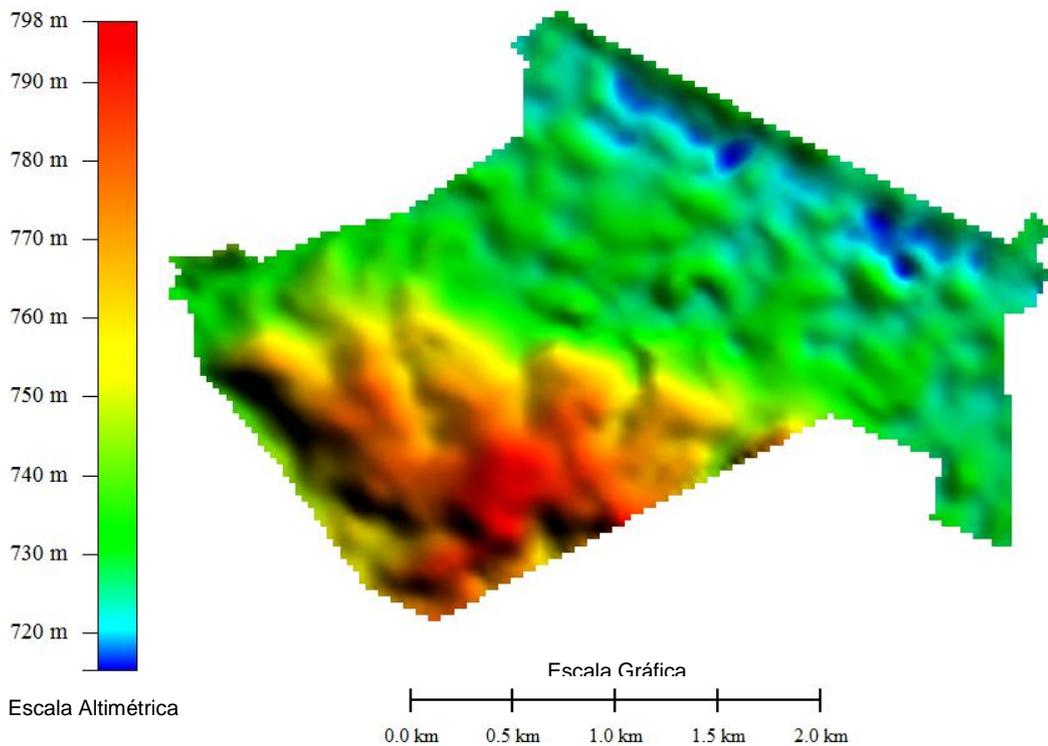


Figura 15: Recorte da imagem TOPODATA para a área do campus da USP. (resolução espacial de 30 metros)

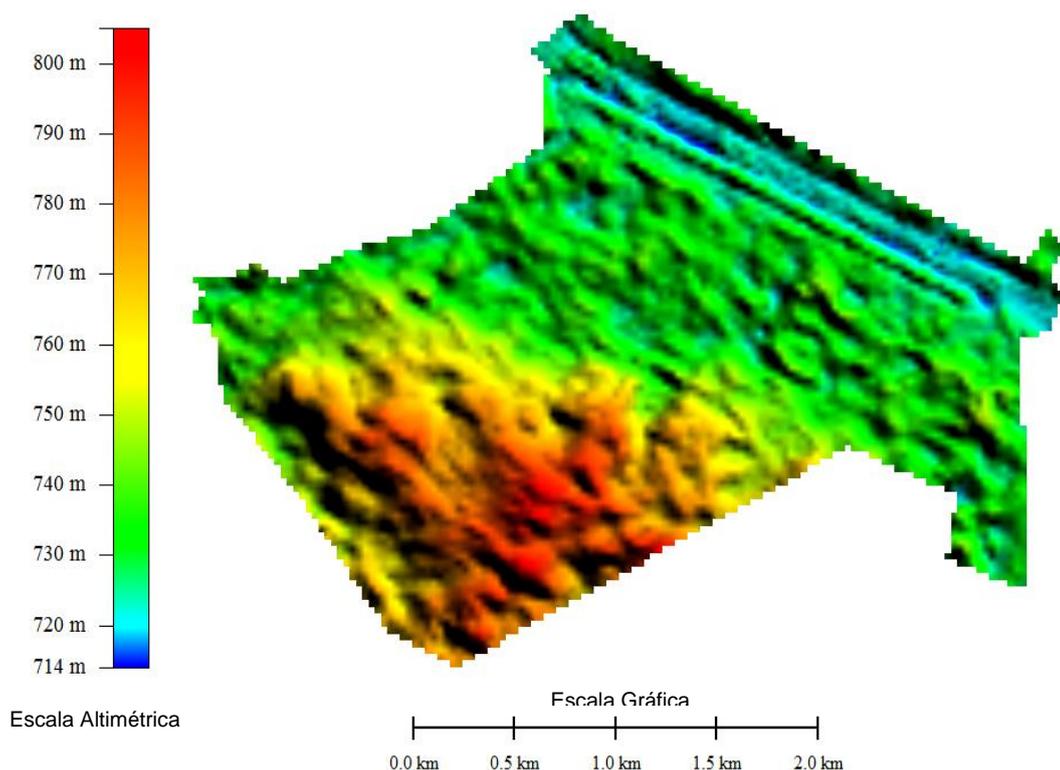


Figura 16: Recorte da imagem ASTER GDEM para a área do campus da USP. (resolução espacial de 30 metros)

Com o objetivo de servir de base à extração de pontos nas amostragens pelo método sistemático e por perfis transversais, foi gerado um MDS a partir dos dados de referência compostos por curvas de nível e pontos cotados (mapeamento 1:1000). Com o emprego do programa ArcGIS, primeiramente, foi gerada uma grade irregular triangular (*Triangular Irregular Network* - TIN) com a ferramenta *Create TIN* (*ArcToolbox* > *3D Analyst Tools* > *TIN Management* > *Create TIN*). A seguir, foi criado o arquivo raster com a resolução dos pixels de um metro, utilizando a ferramenta *TIN to Raster* do menu *ArcToolbox* > *3D Analyst Tools* > *Conversion from TIN* > *TIN to Raster*, sendo que o interpolador usado na modelagem foi o *Natural Neighbors* (vizinho natural, o qual faz a interpolação através da média ponderada dos pontos vizinhos, onde os pesos são proporcionais às áreas proporcionais). A Figura 17 mostra a visualização do arquivo raster obtido a partir dos dados de referência no Global Mapper. No arquivo nota-se bem as linhas de quebra, representando as feições do terreno, o que demonstra o alto nível de detalhamento dos dados de referência.

Validando o MDS gerado a partir dos dados de referência através de pontos precisos procedentes de levantamento GPS associados a valores de ondulação geoidal originários do estudo realizado em NERO (2005), foi identificado que a modelagem dos dados de referência usando a resolução espacial de um metro para definição do pixel atende de forma plena o objetivo proposto na presente pesquisa. Assim, este produto pode ser usado como modelo de referência nas análises de qualidade dos MDS de sensores orbitais.

Para fins de verificação da viabilidade de uso desse modelo como referência na análise comparativa de qualidade de MDSs, usando os pontos da pesquisa de NERO (2005), foi aplicado o teste direto na amostra. Nessa análise de qualidade o MDS gerado a partir dos dados de referência foi classificado como classe B, para escala de 1:1000, alcançando o PEC-PCD de 0,6 metros, ou seja, a análise mostrou que o modelo atende às necessidades da pesquisa e pode ser usado com base de referência nas análises comparativas usando as amostragens pelo método sistemático e por perfis transversais.

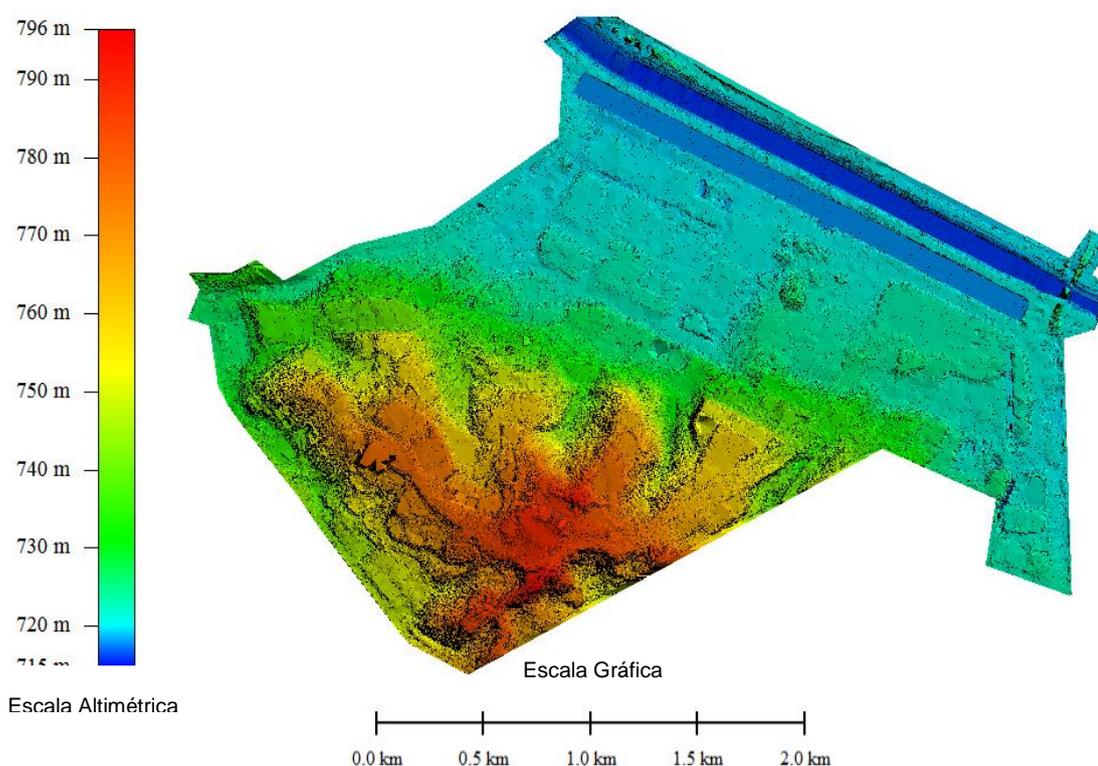


Figura 17: Representação da área do campus da USP, modelada a partir dos dados provenientes do mapeamento na escala de 1:1000.

Após o recorte dos arquivos raster para a área de estudo, foi realizada a extração dos pontos homólogos aos pontos de referência com valor de altitude correspondente ao valor de altitude do pixel envolvente, utilizando o programa ArcGIS. Isto é, para cada conjunto de pontos dos dados de referência que sobrepujam um determinado pixel no arquivo raster em análise, foram extraídos pontos homólogos com os valores de X e Y de acordo com a posição dos pontos de referência e os valores de Z iguais ao do pixel envolvente. Esse procedimento foi realizado para a amostragem dirigida e para amostragem pela população.

Nas Figuras 18, 19 e 20 é possível visualizar os pontos de referência sobrepostos a um pixel em destaque nas imagens digitais SRTM, TOPODATA e ASTER GDEM, respectivamente. Na prática, tem-se que para cada posição X e Y definida no arquivo de pontos de referência, foi extraído um valor de Z referente ao valor de Z do pixel ao qual este ponto estava sobreposto. Isto é, todos os pontos contidos no pixel em destaque (amarelo) possuem a mesma coordenada Z.

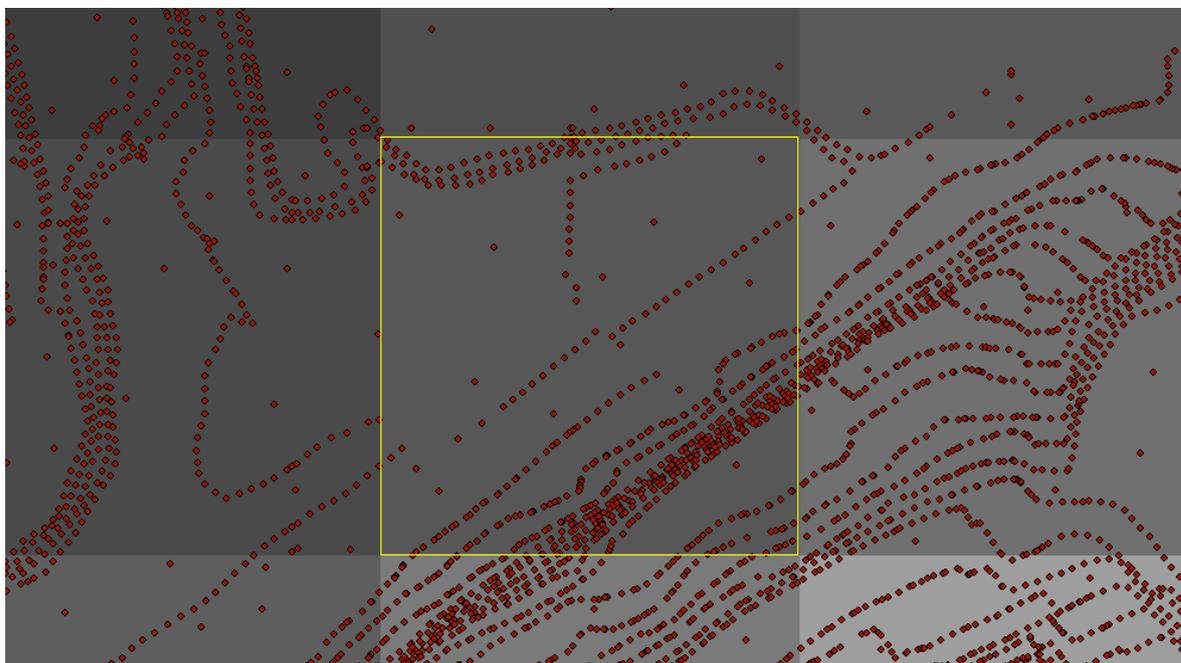


Figura 18: Representação da extração de valores do pixel correspondente aos pontos de referência, imagem SRTM (resolução espacial 90x90 metros).

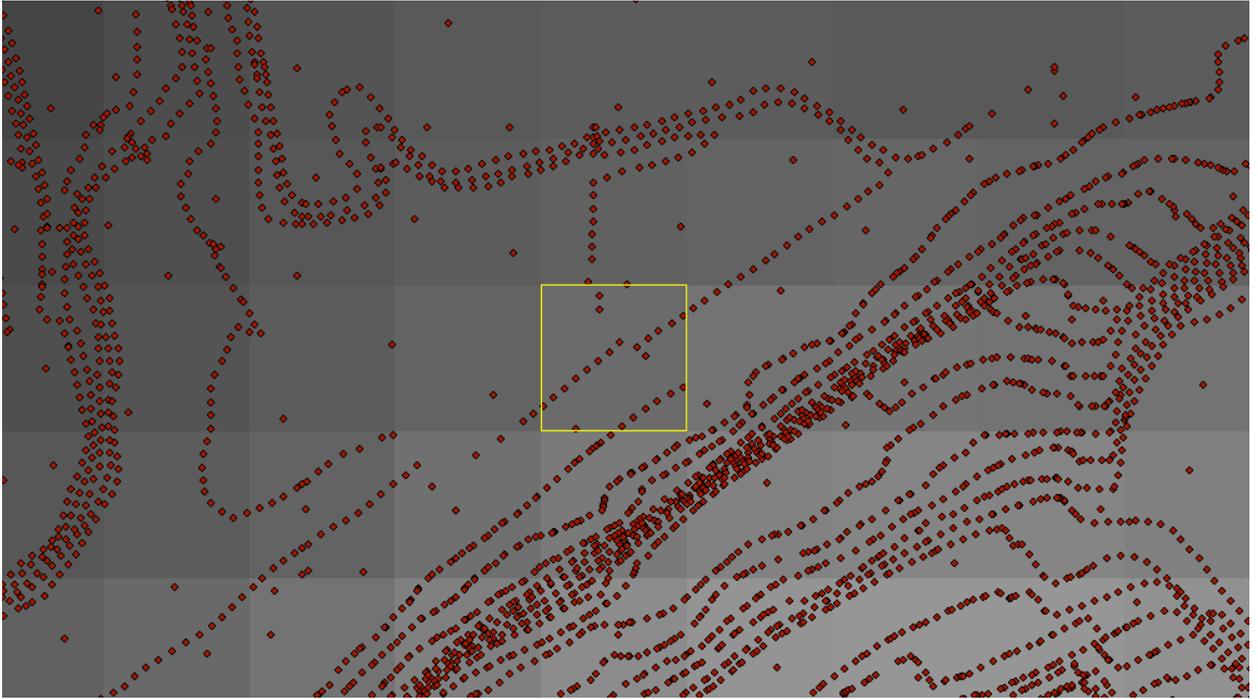


Figura 19: Representação da extração de valores do pixel correspondente aos pontos de referência, imagem TOPODATA (resolução espacial 30x30 metros).

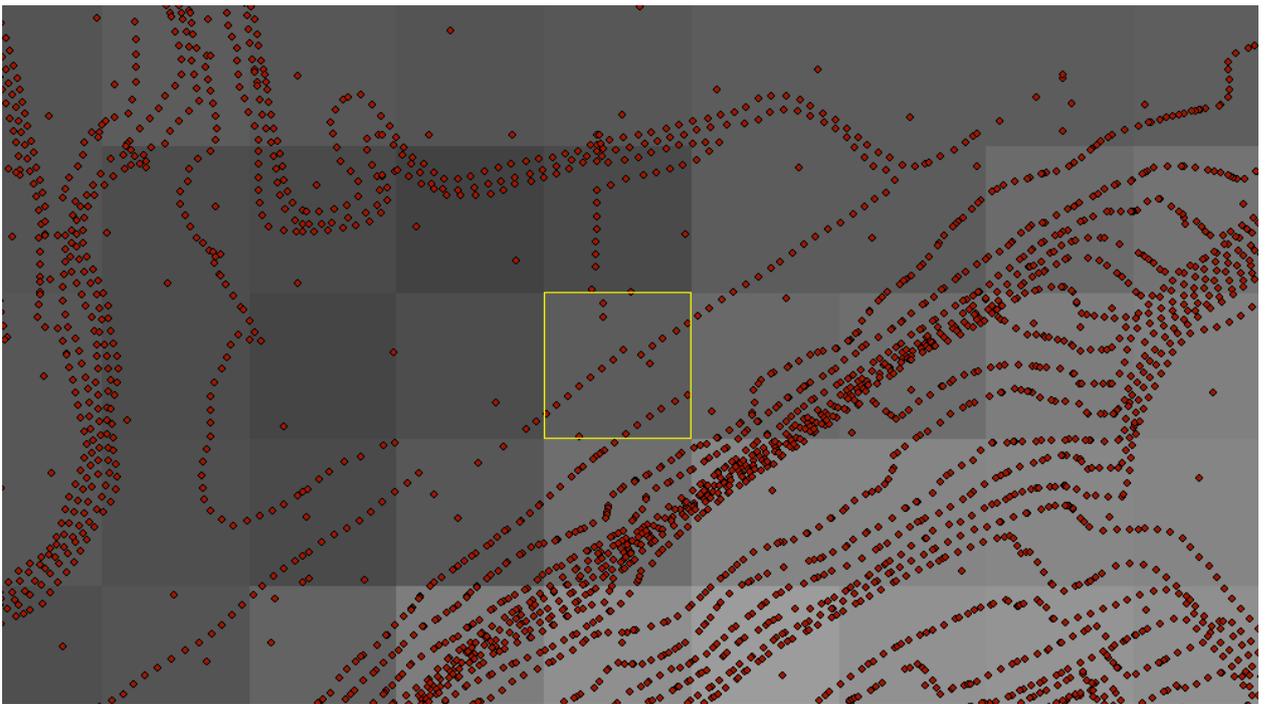


Figura 20: Representação da extração de valores do pixel correspondente aos pontos de referência, imagem ASTER GDEM (resolução espacial 30x30 metros).

A extração dos valores altimétricos dos pixels das imagens orbitais para as posições X e Y do arquivo de pontos de referência foi realizada utilizando a ferramenta *Extract Multi Values to Point* (*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract Multi Values to Point*) do ArcGIS.

Ao final desta etapa, utilizando os procedimentos descritos até agora e seguindo a fundamentação teórica do Capítulo 2, a partir dos modelos digitais de superfície, foram gerados conjuntos de pontos X,Y,Z para cada tipo de amostragem da pesquisa. Nas amostragens foram gerados quatro conjuntos de dados (Mapeamento 1:1000, imagem SRTM, imagem TOPODATA e imagem ASTER), obtendo 255 pontos na amostragem dirigida, 249 pontos na amostragem por perfis transversais, aproximadamente 191.000 pontos na representação da população e 7.140 pontos na amostragem sistemática dos modelos ASTER GDEM e TOPODATA e 784 pontos na amostragem sistemática do modelo SRTM.

Os valores de Z homólogos em X e Y extraídos para todos os conjuntos de dados da pesquisa (Mapeamento 1:1000, imagem SRTM, imagem TOPODATA e imagem ASTER) foram exportados para realização das análises estatísticas no Microsoft Excel.

#### **4.2 – Avaliação estatística dos MDSs**

Após a eliminação dos erros grosseiros identificados nos conjuntos de pontos, realizada a partir do descarte dos pontos que apresentaram valor de Z fora do intervalo de variação altimétrica do MDS analisado, os dados foram agrupados em pares mantendo como referência para análise de qualidade os dados do mapeamento 1:1000. Dessa forma, foram gerados os seguintes conjuntos a serem analisados por testes estatísticos para cada tipo de amostragem: dados de referência - imagem SRTM, dados de referência - imagem TOPODATA, dados de referência - imagem ASTER.

Para cada conjunto foi realizado o cálculo da média e do desvio padrão da diferença entre os valores de Z obtidos nos dados de referência e os valores de Z obtidos nos MDSs e aplicados os testes de tendência, direto e do qui-quadrado, conforme fundamentação teórica apresentada no Capítulo 2. Considerando os estudos de MUKHERJEE, et. al.(2013), RODRIGUES, DE BIASI e SOUZA (2010), dentre outros, é esperado que os resultados de alguns testes estatísticos como, por exemplo, o teste de tendência, apresente valores de erro sistemático relacionados à falta de compatibilização de datum vertical, pois os dados de referência (mapeamento 1:1000) estão referenciados ao Sistema Geodésico Brasileiro – SGB com datum vertical referido à Imbituba-SC, em discordância à referência do datum vertical dos modelos ASTER GDEM e SRTM, os quais possuem referência vertical originada do EGM96.

#### **4.2.1 – Análise dos dados referentes à amostragem dirigida.**

Para a presente pesquisa, foram utilizados os pontos da amostragem dirigida realizada em NERO (2005) para os dados de referência do mapeamento 1:1000, resultando em um conjunto com 255 pontos (Figura 21). Para análise dos MDSs foram extraídos os valores de Z nas posições homólogas à amostragem.

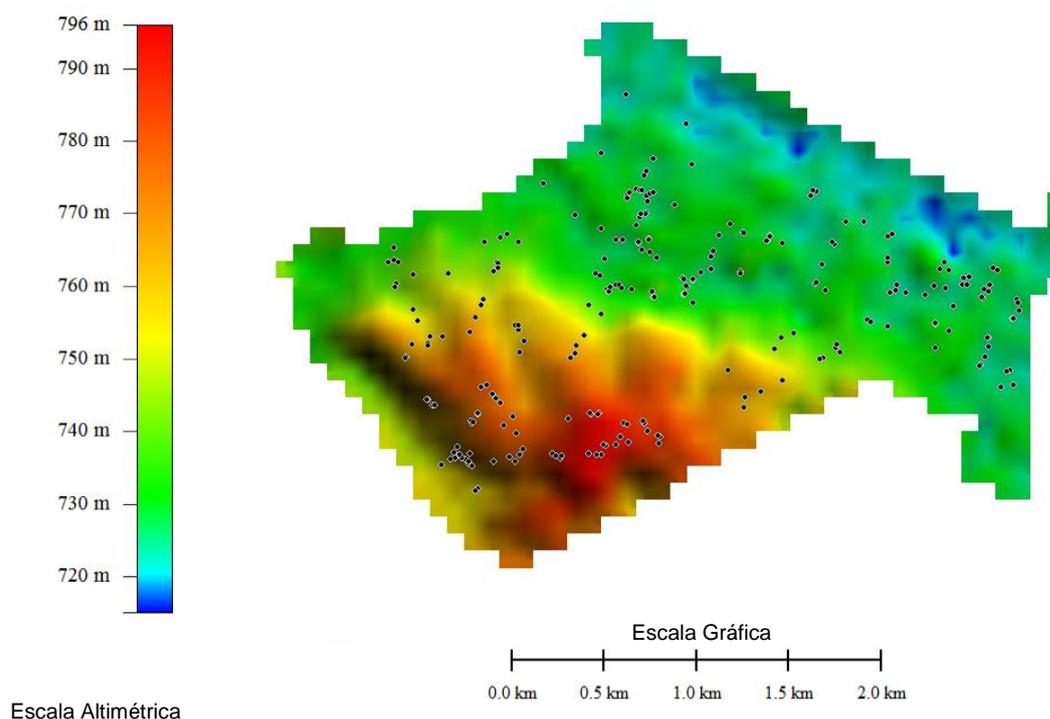


Figura 21: Representação da localização dos pontos da amostragem dirigida nos MDSs.

A aplicação do teste de tendência para a verificação do erro sistemático apontou um deslocamento no eixo Z. A amostra referente aos dados da imagem SRTM apresentaram um deslocamento de -4,8 metros em relação aos dados de referência (Mapeamento 1:1000); a amostra pertencente aos dados TOPODATA apresentaram um deslocamento de -5,2 metros e a amostra referente aos dados do sensor ASTER GDEM foram os que apresentaram o maior deslocamento com relação aos dados de referência, no valor de -8,5 metros.

Aplicando o teste direto, com relação à classificação dos MDSs, tendo como referência a norma da CONCAR (2011), os três MDSs estudados se enquadraram em diferentes classes. O MDS extraído da fonte de dados SRTM foi classificado como classe B na escala de 1:50.000, o MDS extraído da fonte TOPODATA foi classificado como classe C na escala de 1:50.000, enquanto o MDS extraído da fonte ASTER GDEM foi classificado como classe B na escala de 1:100.000.

Depois da retirada do erro sistemático apresentado para cada MDS no teste de tendência, foram apresentados os seguintes resultados: o MDS extraído da fonte

de dados SRTM foi classificado como classe C na escala de 1:25.000, o MDS extraído da fonte TOPODATA foi classificado como classe B na escala de 1:50.000 e o MDS extraído da fonte ASTER GDEM também foi classificado como classe B na escala de 1:50.000.

Neste caso, se aplicou também a análise de precisão com o emprego do teste do qui-quadrado, tendo em vista que se trata de análise amostral dos MDSs. Assim, verificou-se que o MDS decorrente dos dados SRTM foi classificado como Classe C na escala de 1:25.000; o MDS decorrente dos dados TOPODATA foi classificado como Classe D na escala 1:25.000, e o MDS referente aos dados ASTER GDEM foi classificado como Classe B na escala de 1:50.000.

#### 4.2.2 – Análise dos dados referentes aos perfis transversais aleatórios

A amostragem por perfis transversais aleatórios resultou em um número de 249 pontos em cada MDS, extraídos de 12 perfis (Figura 22) espaçados com equidistância de 150 metros.

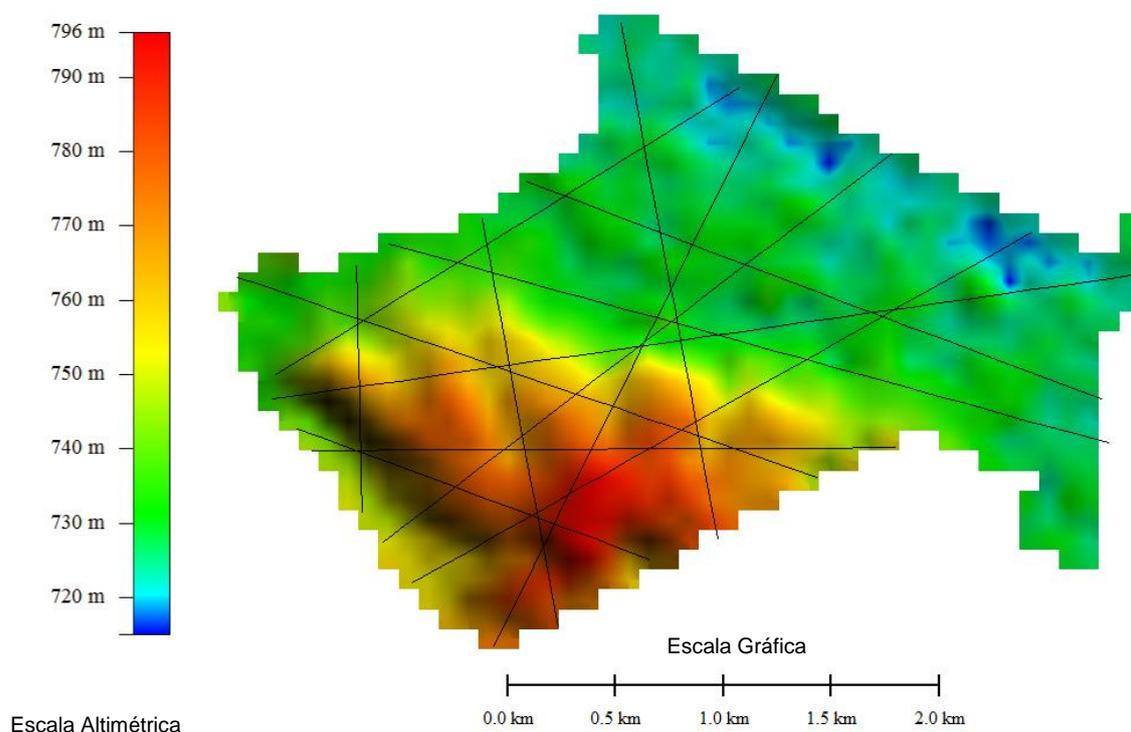


Figura 22: Representação dos perfis transversais aleatórios traçados nos MDSs.

A aplicação do teste de tendência para a verificação do erro sistemático apresentou a existência de um erro sistemático em todas as amostras (imagens orbitais), indicando um deslocamento no eixo Z. A amostra referente aos dados da imagem SRTM apresentou um deslocamento de -6,2 metros em relação aos dados de referência (dados 1:1000), a amostra pertencente aos dados TOPODATA apresentou um deslocamento de -6,6 metros, a amostra referente aos dados do sensor ASTER GDEM foi a que apresentou um maior deslocamento com relação aos dados de referência, no valor de -10,1 metros.

Aplicando o teste direto com relação à classificação dos MDSs, tendo como referência à norma da CONCAR (2011), os três MDSs estudados se enquadraram em diferentes classes. O MDS extraído da fonte de dados SRTM foi classificado como classe A na escala de 1:100.000; já o MDS extraído da fonte TOPODATA foi classificado como classe C na escala de 1:50.000; enquanto o MDS extraído da fonte ASTER GDEM foi classificado como classe B na escala de 1:100.000.

Depois da retirada do erro sistemático apresentado para cada MDS no teste de tendência, foram apresentados os seguintes resultados: o MDS extraído da fonte de dados SRTM foi classificado como classe B na escala de 1:50.000; já o MDS extraído da fonte TOPODATA foi classificado como classe D na escala de 1:25.000 e; o MDS extraído da fonte ASTER GDEM foi classificado como classe B na escala de 1:50.000.

Na análise de precisão (teste do qui-quadrado) dos MDSs, associando o valor do PEC-PCD com o da Norma Brasileira, verificou-se que o MDS decorrente dos dados SRTM foi classificado como Classe B na escala de 1:50.000, o MDS decorrente dos dados TOPODATA foi classificado como Classe D na escala 1:25.000, e o MDS referente aos dados ASTER GDEM foi classificado como Classe B na escala de 1:50.000.

### 4.2.3 – Análise dos dados referentes à Amostragem Sistemática

A amostragem sistemática apresentou um número de 784 pontos para o MDS SRTM (resolução espacial 90 metros), e um número de 7.140 pontos para as imagens TOPODATA e ASTER GDEM (resolução de 30 metros). Os testes de tendência realizados nas amostras apresentaram erro sistemático em todos os casos, indicando um deslocamento no eixo Z. A amostra referente aos dados da imagem SRTM apresentou um deslocamento de -6,2 metros em relação aos dados de referência (dados 1:1.000); a amostra pertencente aos dados TOPODATA apresentou um deslocamento de -6,2 metros; a amostra referente aos dados do sensor ASTER GDEM apresentou um maior deslocamento com relação aos dados de referência, no valor de -9,4 metros.

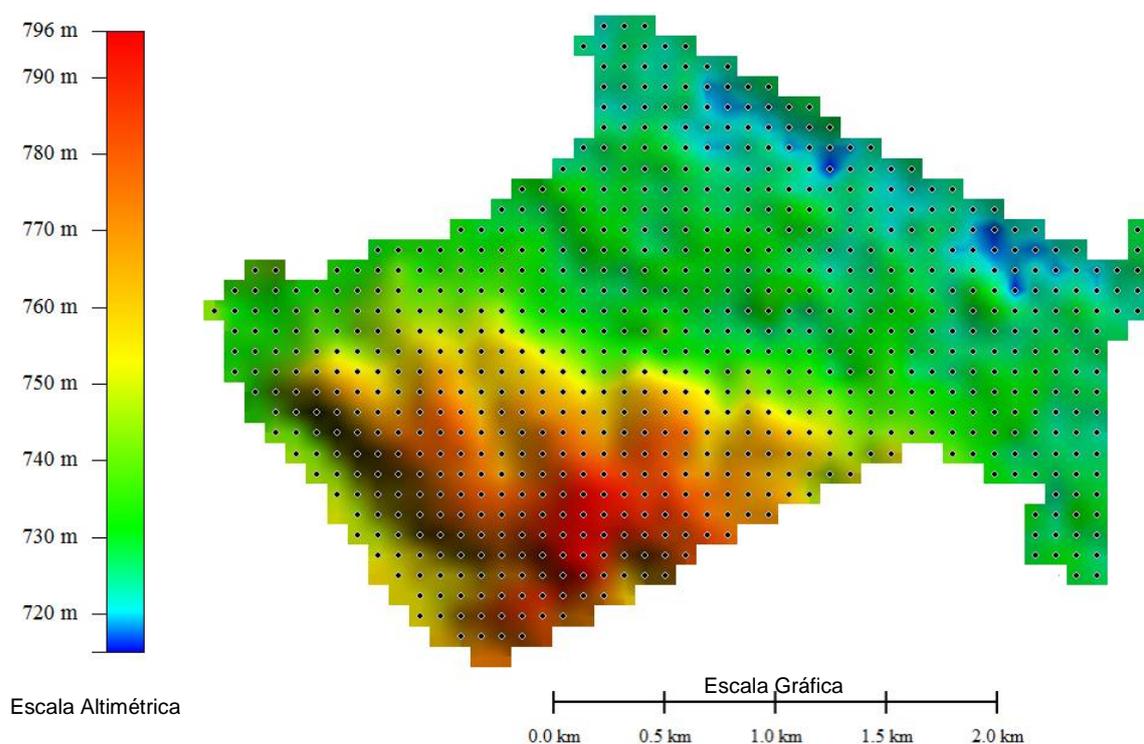


Figura 23: Exemplo da representação dos pontos referentes à Amostragem Sistemática.

Aplicando o teste direto com relação à classificação dos MDSs tendo como referência a norma da CONCAR (2011), os três MDSs estudados se encaixaram em duas classes. O MDS extraído da fonte de dados SRTM foi classificado como classe C na escala de 1:50.000, o MDS extraído da fonte TOPODATA foi classificado como

classe C na escala de 1:50.000, e o MDS extraído da fonte ASTER GDEM foi classificado como classe B na escala de 1:100.000.

Depois da retirada do erro sistemático apresentado para cada MDS no teste de tendência, foram obtidos os seguintes resultados: o MDS extraído da fonte de dados SRTM foi classificado como classe D na escala de 1:25.000, o MDS extraído da fonte TOPODATA foi classificado como classe D na escala de 1:25.000 e o MDS extraído da fonte ASTER GDEM foi classificado como classe B na escala de 1:50.000.

Para esta etapa, como se trata de uma amostra, também foi realizada a análise de precisão (teste do qui-quadrado) dos MDSs associando o valor do PEC-PCD com o da norma brasileira e verificou-se que o MDS decorrente dos dados SRTM foi classificado como Classe D na escala de 1:25.000, já o MDS decorrente dos dados TOPODATA foi classificado como Classe C na escala 1:25.000 e o MDS referente aos dados ASTER GDEM foi classificado como Classe B na escala de 1:50.000.

#### **4.2.4 – Análise dos dados referentes à população (todos os pontos)**

A análise realizada com a população de 190.764 pontos de cada MDS (Figura 24) mostrou, a partir do teste de tendência, a existência de um erro sistemático em todas as amostras indicando um deslocamento no eixo Z. A amostra referente aos dados da imagem SRTM apresentou um deslocamento de -6,09 metros em relação aos dados de referência (dados 1:1000), a amostra pertencente aos dados TOPODATA apresentou um deslocamento de -6,4 metros, já a amostra referente aos dados do sensor ASTER GDEM foi a que apresentou um maior deslocamento com relação aos dados de referência, no valor de -9,3 metros. Cabe destacar que as duas últimas fontes de dados estavam uma maior resolução espacial do que a primeira, na proporção de três vezes maior, e apresentaram um maior deslocamento no eixo Z do plano de referência.

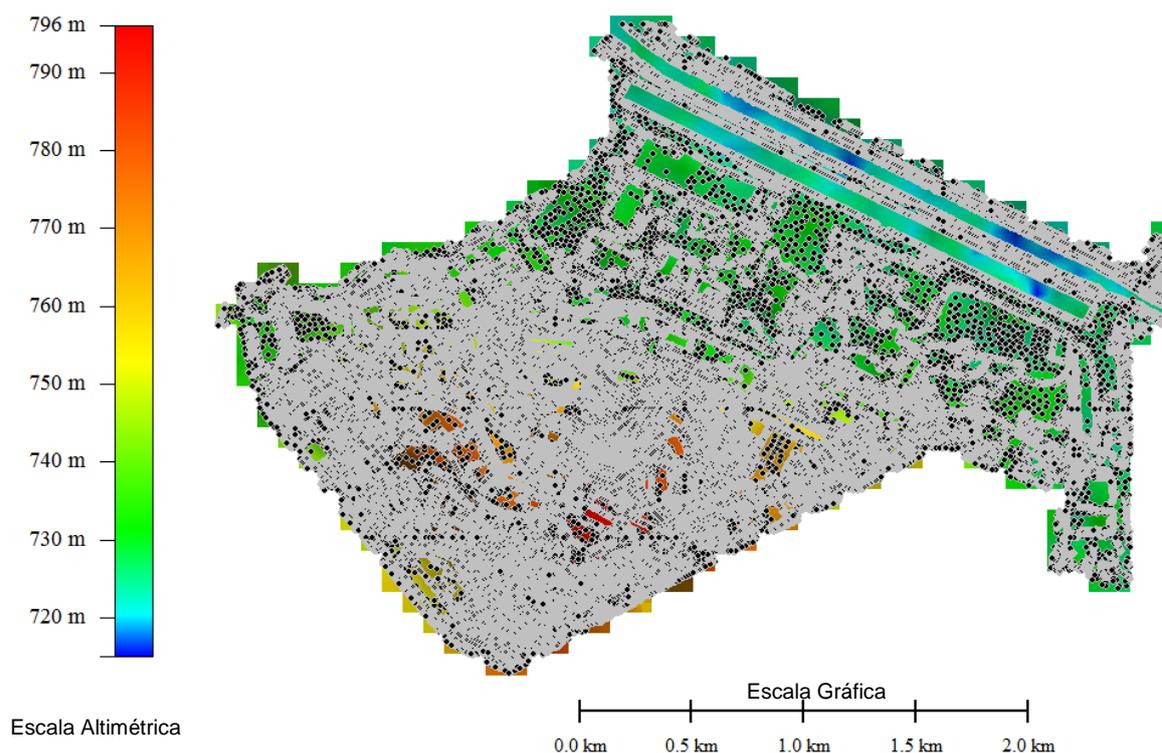


Figura 24: Representação da localização dos pontos referentes à população.

Aplicando o teste direto com relação à classificação dos MDSs, tendo como referência a norma da CONCAR (2011), os três modelos estudados se encaixaram em duas classes. O MDS extraído da fonte de dados SRTM foi classificado como classe A na escala de 1:100.000; o MDS extraído da fonte TOPODATA também foi classificado como classe A na escala de 1:100.000; enquanto o MDS extraído da fonte ASTER GDEM foi classificado como classe B na escala de 1:100.000.

Depois da retirada do erro sistemático apresentado para cada MDS no teste de tendência, foram apresentados os seguintes resultados: o MDS extraído da fonte de dados SRTM foi classificado como classe B na escala de 1:50.000; já o MDS extraído da fonte TOPODATA também foi classificado como classe B na escala de 1:50.000 e; o MDS extraído da fonte ASTER GDEM também foi classificado como classe B na escala de 1:50.000.

Verificando a grande melhora obtida na classificação dos MDSs segundo a ET-ADGV com a retirada do erro sistemático dos conjuntos de pontos estudados e

considerando os resultados obtidos anteriormente com as análises do teste de tendência, os dados da população foram corrigidos pelo erro sistemático obtido na amostragem sistemática e confrontados com os resultados obtidos em relação ao PEC-PCD utilizado, as tabelas abaixo mostram a porcentagem dos pontos aprovados que compuseram a classificação dos MDSs.

Tabela 7: Confrontação da porcentagem de pontos dentro do PEC-PCD de 13,70 m (Classe A na escala de 1:100.000).

		CORREÇÃO DO ERRO SISTEMÁTICO		
		População / População % pontos dentro do PEC-PCD	População / Amostragem Sistemática % pontos dentro do PEC-PCD	Diferença de % entre os pontos
<b>PEC-PCD</b>  <b>13,7</b>	SRTM	96,4%	96,4%	0,00%
	TOPODATA	98,83%	98,79%	0,04%
	ASTER GDEM	98,65%	98,66%	0,01%

Tabela 8: Confrontação da porcentagem de pontos dentro do PEC-PCD de 12 m (Classe C na escala de 1:50.000).

		CORREÇÃO DO ERRO SISTEMÁTICO		
		População / População % pontos dentro do PEC-PCD	População / Amostragem Sistemática % pontos dentro do PEC-PCD	Diferença de % entre os pontos
<b>PEC-PCD</b>  <b>12</b>	SRTM	94,74%	94,73%	0,01%
	TOPODATA	97,83%	97,76%	0,07%
	ASTER GDEM	97,02%	97,02%	0,00%

Tabela 9: Confrontação da porcentagem de pontos dentro do PEC-PCD de 10 m (Classe B na escala de 1:50.000).

		CORREÇÃO DO ERRO SISTEMÁTICO		
		População / População % pontos dentro do PEC-PCD	População / Amostragem Sistemática % pontos dentro do PEC-PCD	Diferença de % entre os pontos
<b>PEC-PCD</b>  <b>10</b>	SRTM	90,89%	90,89%	0,00%
	TOPODATA	95,29%	95,25%	0,04%
	ASTER GDEM	93,64%	93,64%	0,00%

Tabela 10: Confrontação da porcentagem de pontos dentro do PEC-PCD de 7,5 m (Classe D na escala de 1:25.000).

		CORREÇÃO DO ERRO SISTEMÁTICO		
		População / População % pontos dentro do PEC-PCD	População / Amostragem Sistemática % pontos dentro do PEC-PCD	Diferença de % entre os pontos
PEC-PCD 7,5	SRTM	82,35%	82,34%	0,01%
	TOPODATA	88,95%	88,93%	0,02%
	ASTER GDEM	84,62%	84,62%	0,00%

Analisando as Tabelas 7, 8, 9 e 10, verifica-se que o valor da porcentagem dos pontos da população (190.761 pontos) corrigidos do valor do erro sistemático da amostragem sistemática (784 pontos para SRTM e 7.140 pontos para TOPODATA e ASTER GDEM) que estão dentro do PEC-PCD apresentado, está bem próximo dos valores dos pontos da população corrigido do valor do erro sistemático real. Isso mostra que para a obtenção de um valor do erro sistemático de um MDS basta aplicar o teste de tendência nos dados referente à uma amostragem sistemática no modelo, pois o resultado pode ser considerado equivalente (muito próximo) ao valor do erro sistemático real do modelo em questão.

Para análise comparativa dos resultados obtidos nos métodos de análise estatística de qualidade aplicados na pesquisa foram geradas as Tabelas 11, 12, 13 e 14, onde a coluna “PEC-PCD SEM ERRO SISTEMÁTICO” apresenta a classificação real do modelo conforme a amostragem utilizada.

Tabela 11: Confrontação dos resultados obtidos nos testes realizados nos dados gerais referentes à população.

POPULAÇÃO	ERRO SISTEMÁTICO	PEC-PCD COM ERRO SISTEMÁTICO	PEC-PCD SEM ERRO SISTEMÁTICO
SRTM	-6,090	CLASSE A 1:100.000	<b>CLASSE B 1:50.000</b>
TOPODATA	-6,427	CLASSE A 1:100.000	<b>CLASSE B 1:50.000</b>
ASTER GDEM	-9,355	CLASSE B 1:100.000	<b>CLASSE B 1:50.000</b>

Tabela 12: Confrontação dos resultados obtidos nos testes realizados nos dados da amostragem dirigida.

<b>AMOSTRAGEM DIRIGIDA</b>	<b>ERRO SISTEMÁTICO</b>	<b>PEC-PCD COM ERRO SISTEMÁTICO</b>	<b>PEC-PCD SEM ERRO SISTEMÁTICO</b>	<b>TESTE DE PRECISÃO</b>
SRTM	-4,800	CLASSE B 1:50.000	CLASSE C 1:25.000	CLASSE C 1:25.000
TOPODATA	-5,225	CLASSE C 1:50.000	CLASSE B 1:50.000	CLASSE D 1:25.000
ASTER GDEM	-8,475	CLASSE B 1:100.000	CLASSE B 1:50.000	CLASSE B 1:50.000

Tabela 13: Confrontação dos resultados obtidos nos testes realizados nos dados da amostragem por perfis transversais aleatórios.

<b>PERFIS TRANSVERSAIS</b>	<b>ERRO SISTEMÁTICO</b>	<b>PEC-PCD COM ERRO SISTEMÁTICO</b>	<b>PEC-PCD SEM ERRO SISTEMÁTICO</b>	<b>TESTE DE PRECISÃO</b>
SRTM	-6,245	CLASSE A 1:100.000	CLASSE B 1:50.000	CLASSE B 1:50.000
TOPODATA	-6,613	CLASSE C 1:50.000	CLASSE D 1:25.000	CLASSE D 1:25.000
ASTER GDEM	-10,128	CLASSE B 1:100.000	CLASSE B 1:50.000	CLASSE C 1:50.000

Tabela 14: Confrontação dos resultados obtidos nos testes realizados nos dados da amostragem sistemática.

<b>AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA</b>	<b>ERRO SISTEMÁTICO</b>	<b>PEC-PCD COM ERRO SISTEMÁTICO</b>	<b>PEC-PCD SEM ERRO SISTEMÁTICO</b>	<b>TESTE DE PRECISÃO</b>
SRTM	-6,218	CLASSE C 1:50.000	CLASSE D 1:25.000	CLASSE D 1:25.000
TOPODATA	-6,188	CLASSE C 1:50.000	CLASSE D 1:25.000	CLASSE C 1:25.000
ASTER GDEM	-9,422	CLASSE B 1:100.000	CLASSE B 1:50.000	CLASSE B 1:50.000

Analisando as Tabelas 11, 12, 13 e 14, onde:

- A coluna "PERFIS TRANSVERSAIS" apresenta o MDS abordado;
- A coluna "ERRO SISTEMÁTICO" apresenta o deslocamento vertical entre o plano do modelo abordado e o plano de referência;
- A coluna "PEC-PCD COM ERRO SISTEMÁTICO" apresenta a classificação do MDS segundo a Norma Brasileira (CONCAR, 2011) sem a retirada do erro sistemático;

- A coluna "PEC-PCD SEM ERRO SISTEMÁTICO" apresenta a classificação do MDS segundo a Norma Brasileira (CONCAR, 2011) com a retirada do erro sistemático;
- E a coluna "TESTE DE PRECISÃO" apresenta a classificação do MDS segundo o teste do qui-quadrado.

Verificou-se que, tendo como classificação real os resultados derivados da análise pela população (Tabela 11) que representa o terreno estudado através de pontos superabundantes, os riscos do produtor e do usuário estão ligados de forma direta ao tipo de amostragem utilizada para classificar um MDS, ou seja, um MDS pode apresentar diferentes classificações dependendo do tipo de amostragem utilizado como base na análise de qualidade.

Utilizando os dados da amostragem sistemática (a qual contém o maior número de pontos dentre as amostras) foram feitas análises e apresentadas nas tabelas a seguir:

Tabela 15: Apresentação das discrepâncias entre pontos do modelo SRTM e população, classificados por um determinado PEC-PCD.

PEC-PCD	Dados SRTM		Discrepância entre os pontos
	Percentagem de pontos aprovados segundo PEC-PCD		
	Amostragem sistemática	População	
10 m	96,7%	90,9%	5,80%
7.5 m	90,95%	82,36%	8,59%

Tabela 16: Apresentação das discrepâncias entre pontos do modelo TOPODATA e população, classificados por um determinado PEC-PCD.

PEC-PCD	Dados TOPODATA		Discrepância entre os pontos
	Percentagem de pontos aprovados segundo PEC-PCD		
	Amostragem sistemática	População	
10 m	97,09%	95,3%	1,79%
7.5 m	93,74%	88,95%	4,79%

Tabela 17: Apresentação das discrepâncias entre pontos do modelo ASTER GDEM e população, classificados por um determinado PEC-PCD.

PEC-PCD	Dados ASTER GDEM		Discrepância entre os pontos
	Percentagem de pontos aprovados segundo PEC-PCD		
	Amostragem sistemática	População	
10 m	94,22%	93,65%	0,57%
7,5 m	85,50%	84,62%	0,88%

Analisando as Tabelas 15, 16 e 17, verificou-se, como esperado, que o modelo ASTER GDEM, com melhor resolução espacial, apresenta uma menor discrepância quanto à classificação do PEC – PCD com os dados da população.

#### 4.3 – Simulação das amostras

Conforme metodologia descrita no item 2.3.5 (pág. 34) foi utilizado o programa Simula PEC 1.1 (NERO, MARDEGAN e PIRES, 2006) para realização da simulação com aplicação de análises estatísticas e geração de gráficos de rejeição/aceitação baseados em curvas operacionais para análise e comparação dos resultados com informações da ET-ADGV.

Na simulação, para cada conjunto de dados foram geradas curvas operacionais a partir dos dados reais (curva R-10) e de dados fictícios (demais curvas). As curvas fictícias são geradas com valores criados pelo programa mencionado, respeitando uma distribuição normal. As curvas reais foram calculadas com base no arquivo txt de entrada, o qual contém os valores de diferença de altitude calculada entre os pontos de controle amostrados dos dados de referência e os seus respectivos pontos homólogos extraídos dos MDSs analisados.

A Figura 25 apresenta um exemplo de simulação baseada na norma brasileira (CONCAR, 2011), a qual considera o nível de confiança de 90% dos pontos dentro do erro admissível (PEC-PCD), para análise do modelo SRTM com aplicação da amostragem sistemática.

No exemplo, inicialmente, foi aplicado o método de amostragem sistemática para extração da amostra. Para os 784 pontos extraídos na amostragem, foram aplicados os seguintes parâmetros de entrada na simulação: Erro admissível = 5 metros (PEC - PCD Classe B 1:25.000) e número de iterações = 5000. No Simula PEC 1.1 foi obtido o gráfico abaixo que mostra a quantidade de pontos necessária para a rejeição do PEC-PCD estabelecido para a análise.

Ressalta-se que o número de iterações utilizadas da análise (5000 vezes), representa a quantidade necessária no programa Simula PEC 1.1, para um resultado confiável, segundo NERO (2005).

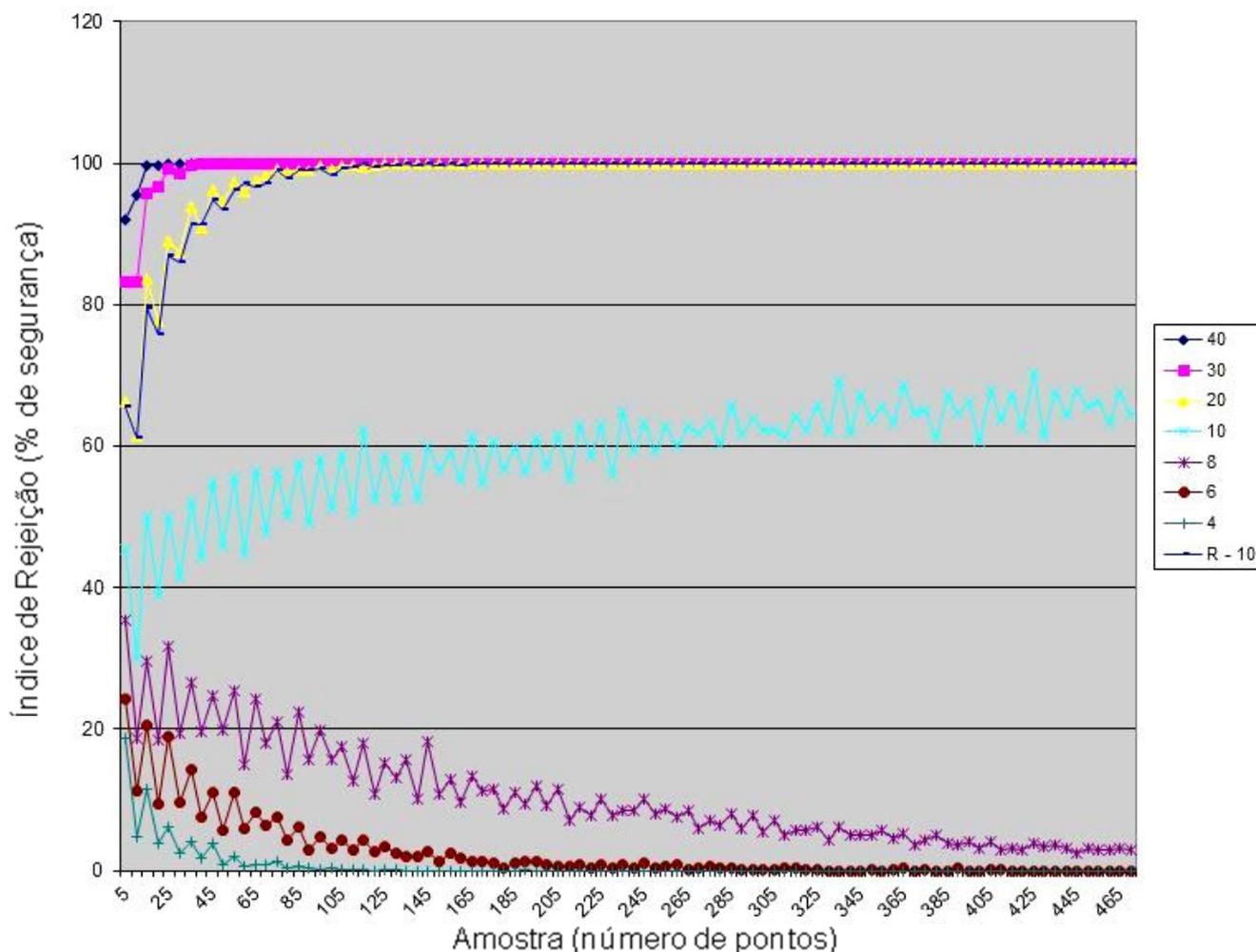


Figura 25: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos (255 pontos e PEC-PCD 5m).

Tabela 18: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
5	92,1	83,3	66,2	45,3	35,5	24,2	18,6	65,6
10	95,4	83,1	61,4	30,1	18,7	11,2	4,8	61,1
15	99,6	95,8	83,6	50	29,6	20,5	11,4	79,4
20	99,6	96,7	77,6	38,9	18,5	9,4	3,8	75,7
25	100	99,2	89	50	31,7	18,9	6,2	87
30	99,9	98,6	87,3	41,5	19,5	9,7	2,5	86
35	100	99,6	93,8	52,2	26,7	14,4	4,1	91,3
40	100	99,9	90,8	44,2	19,6	7,6	1,7	91,4
45	100	99,9	96,1	54,8	24,8	11	3,9	94,8
50	100	100	94,6	45,9	19,9	5,6	0,9	93,4
55	100	100	97,4	55,5	25,4	11	2,1	96,3
60	100	100	96	44,8	14,9	6	0,5	97,2
65	100	100	97,7	56,6	24,3	8,2	0,9	96,7
70	100	100	98,3	47,8	17,9	6,3	0,8	97,2
75	100	100	99,2	56,3	21,1	7,6	1,2	98,9
80	100	100	98,8	50	13,6	4,3	0,3	97,9
85	100	100	98,9	57,7	22,5	6,1	0,5	99,1
90	100	100	98,9	49,1	15,6	2,9	0,3	98,9
95	100	100	99,7	58,2	19,8	4,8	0,2	99,3
100	100	100	99,2	51,2	15,6	3,1	0,4	98,3
105	100	100	99,7	58,8	17,5	4,2	0,1	99,3
110	100	100	99,7	50,4	12,6	2,9	0,2	99,4
115	100	100	99,4	62,3	18	4,4	0,1	99,8
120	100	100	99,6	52,4	10,9	2,7	0	99,4
125	100	100	99,9	58,5	15,2	3,3	0,2	99,6
130	100	100	99,8	52,3	13,2	2,4	0,2	99,7
135	100	100	99,8	58,5	15,6	1,9	0	100

•  
•  
•

No exemplo da Figura 25 e na Tabela 18, nota-se pela curva operacional R-10, a qual representa os pontos reais do terreno (canto superior esquerdo), que a simulação apresentou um índice de rejeição de 100% a partir de 135 pontos de controle para um PEC-PCD de 5 metros (vide Tabela 10). Isto é, para que se tenha um índice de confiança de 100% de rejeição de um valor de PEC-PCD de 5 metros, para o universo dos 784 pontos abordados, é necessário que se tenha, no mínimo, 135 pontos amostrados. Vale ressaltar que o número de pontos que indicará a rejeição ou aprovação em uma amostra é diretamente influenciado pela qualidade altimétrica dos pontos de controle e do MDS abordado. As demais curvas (4, 6, 8,

10, 20, 30 e 40%) representam o comportamento do número de pontos contidos na amostra para cada porcentagem respeitando uma distribuição normal com dados fictícios (criados pelo programa).

Na pesquisa foram realizadas três simulações para cada conjunto de dados obtidos por cada tipo de amostragem, totalizando doze resultados de simulação a serem analisados. A condição de convergência adotada para análise foi de valores acima de 99%. Os resultados são apresentados a seguir.

#### **4.4.1 – Simulação por amostragem dirigida.**

As simulações da amostragem dirigida para análise dos MDSs SRTM, TOPODATA e ASTER GDEM foram realizadas no Simula PEC 1.1 (NERO, MARDEGAN e PIRES, 2006), utilizando como parâmetros para simulação o número de pontos de controle igual ao número de pontos obtidos na amostragem dirigida realizada em NERO (2005) e o valor de PEC-PCD baseado na classificação real dos modelos obtida no item 4.2.4 (pág. 67), que tem como referência a norma brasileira vigente.

Os parâmetros definidos foram:

- Número de pontos de controle: **255**
- Erro admissível (PEC-PCD): **10**
- Percentual de Pontos de controle (PCs) acima do PEC-PCD: **10**
- Intervalo percentual acima: **10**
- Intervalo percentual abaixo: **2**
- Número de iterações: **5.000**

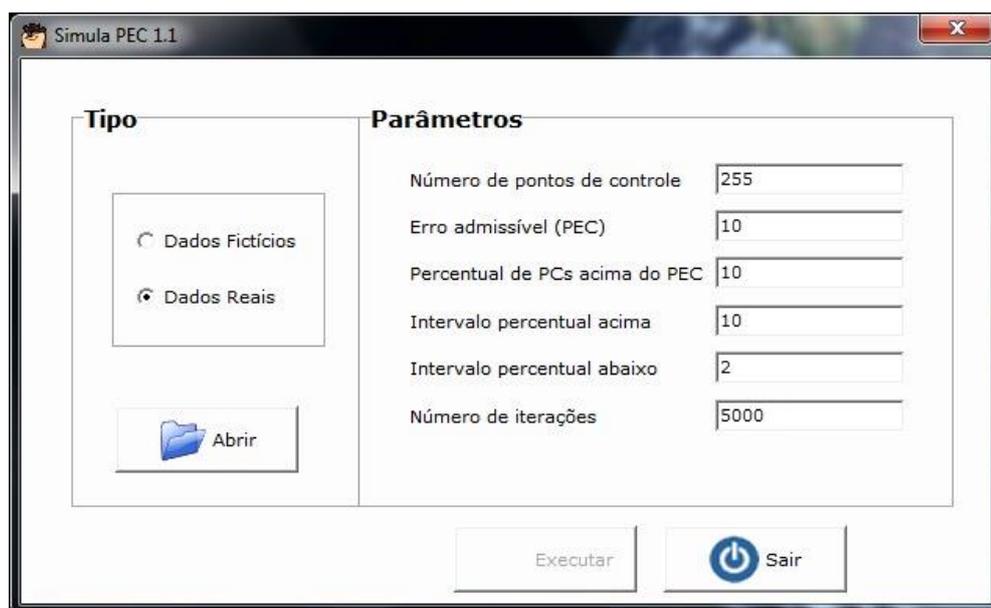


Figura 26: Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados da amostragem dirigida (255 pontos).

#### 4.4.1.1 – Dados SRTM

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo SRTM com a amostragem dirigida no Simula PEC 1.1, a Tabela 19 apresenta os valores das curvas operacionais da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados e a Figura 27 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos amostrados.

Tabela 19: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados SRTM.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
5	92,3	82,36	64,56	41,58	31,06	24,38	15,04	12,76
10	95,12	84,02	59,02	27,56	14,76	9,4	3,72	2,86
15	99,52	96,42	80,76	45,12	28,98	19,18	8,72	6,58
20	99,54	95,82	76,88	33,54	16,54	9,42	2,08	1,56
25	99,94	98,74	87,46	47,98	26,84	17,3	4,44	3,02
30	99,94	98,92	85,52	37,96	16,08	7,9	1,52	0,98
35	100	99,74	91,24	48,14	23,48	12,54	2,46	1,44
40	100	99,7	89,78	40,32	15,7	6,66	0,76	0,56
45	100	99,88	94,86	50,54	20,54	9,42	1,18	0,58
50	100	99,96	92,42	39,82	13,9	5,26	0,52	0,26
55	100	100	96,08	49,18	18,64	8,28	0,88	0,38
60	100	99,98	94,66	42,76	12,66	4,58	0,3	0,1

65	100	100	97,38	49,16	17,42	6,26	0,28	0,38
70	100	99,96	97,1	43,18	12,02	4,04	0,2	0
75	100	99,98	98,24	48,4	16,56	5,54	0,12	0,06
80	100	100	97,76	42,78	11,68	3,14	0,1	0,04
85	100	100	98,8	51,06	14,7	4,4	0,18	0,06
90	100	100	98,22	44,92	9,96	2,54	0,02	0
95	100	100	98,92	50,82	13,04	4,08	0,1	0
100	100	100	98,58	46	9,2	2,02	0,04	0,02
105	100	100	99,28	50,76	12,14	2,78	0,04	0,02
110	100	100	99,36	45,64	9,34	1,9	0,02	0
115	100	100	99,46	51,82	11,74	2,5	0	0,02
120	100	100	99,5	45,7	7,82	1,34	0,02	0
125	100	100	99,68	51,7	10,82	2,12	0,02	0,02
130	100	100	99,7	45,18	7,76	1,3	0,02	0
135	100	100	99,72	52,84	10,32	1,56	0	0
140	100	100	99,64	47,16	6,96	1,1	0	0
145	100	100	99,82	52,32	8,86	1,64	0	0
150	100	100	99,72	47,78	6,36	0,68	0	0

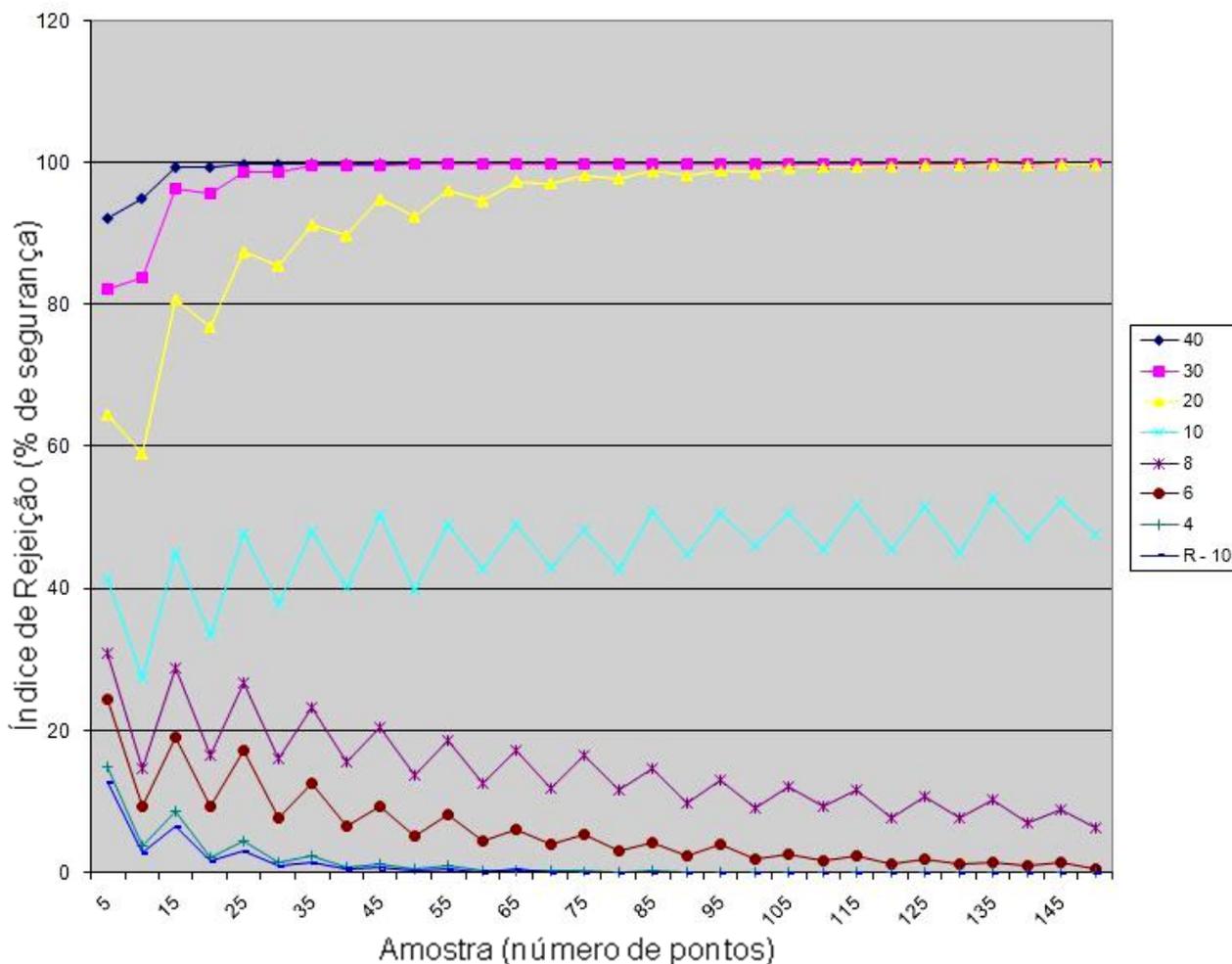


Figura 27: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos SRTM (255 pontos e PEC-PCD 10m).

A amostragem dirigida aplicada ao MDS do SRTM mostra que o risco do usuário (aceitar um produto de má qualidade) é bem maior que o risco do produtor (rejeitar um produto de boa qualidade), considerando a quantidade de pontos que a amostragem apresenta (255 pontos). O modelo digital do SRTM foi classificado segundo a norma ET-ADGV como classe C 1:25.000 (PEC-PCD de 6 metros), que mostra uma discrepância da escala real atendida pelo modelo que é de Classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros). Logo, pela análise de classificação segundo a norma brasileira, considerando como verdade o PEC-PCD alcançado com os dados da população, nota-se que, a qualidade e a quantidade dos pontos decorrentes da amostragem em questão para os dados do MDS do SRTM, estatisticamente, apresenta uma grande probabilidade de que uma combinação de pontos nos dê uma falsa classificação do MDS.

Na Tabela 19 nota-se a convergência para os 100% de aceitação para o PEC-PCD de 10 metros, a partir de 30 pontos da amostra, e que o risco do usuário existe até aproximadamente 30 pontos, depois disso o risco do usuário é inexistente.

#### 4.4.1.2 – Dados TOPODATA

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo TOPODATA com a amostragem dirigida no Simula PEC 1.1, a Tabela 20 apresenta os valores das curvas operacionais da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados e a Figura 28 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos amostrados.

Tabela 20: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados TOPODATA.

	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>R - 10</b>
<b>5</b>	91,88	81,84	65,58	42,12	30,4	25,78	14,28	32,06
<b>10</b>	94,72	83,82	58,88	26,4	15,96	10,28	3,52	15,38
<b>15</b>	99,6	96,22	79,96	46,44	28,62	20,12	7,54	27,86
<b>20</b>	99,6	96,14	76,62	33,62	17	9,22	2,26	16,68
<b>25</b>	99,98	99,06	87,42	47,14	26,46	15,7	4,2	25,76
<b>30</b>	99,94	98,74	84,72	37,92	16,14	8,88	1,14	15,98
<b>35</b>	99,98	99,68	91,56	49,78	23,7	12,86	2,22	23,62

<b>40</b>	100	99,56	89,52	39,54	15,04	6,5	0,6	13,92
<b>45</b>	100	99,96	94,72	49,98	21,26	10,22	1,14	20,54
<b>50</b>	100	99,88	92,8	39,88	14,62	5,1	0,42	13,82
<b>55</b>	100	99,98	96,34	49,04	19,9	8,36	0,7	20,12
<b>60</b>	100	100	95,22	40,14	12,44	5,06	0,22	12,78
<b>65</b>	100	100	97,26	51,48	17,38	7,3	0,42	17,66
<b>70</b>	100	100	96,52	41,22	11,86	4,1	0,16	11,68
<b>75</b>	100	100	98	50,56	16,2	5,64	0,2	16,2
<b>80</b>	100	100	98	43,68	11,58	3,1	0,1	11,16
<b>85</b>	100	100	98,22	50,84	15,64	4,24	0,16	14,54
<b>90</b>	100	100	98,26	44,38	10,72	2,68	0,02	9,76
<b>95</b>	100	100	99,16	50,7	12,7	3,72	0,14	14,18
<b>100</b>	100	100	98,82	44,08	10,08	2,02	0	9,56
<b>105</b>	100	100	99,32	51,7	12,38	3,46	0,08	12,72
<b>110</b>	100	100	99,18	44,7	9,2	1,66	0,02	8,92
<b>115</b>	100	100	99,68	51,1	11,52	2,38	0,04	11,1
<b>120</b>	100	100	99,36	45,44	7,92	1,7	0,02	8,08
<b>125</b>	100	100	99,7	52,6	10,46	2,44	0	10,08
<b>130</b>	100	100	99,48	46,52	7,6	1,26	0,02	7,3
<b>135</b>	100	100	99,78	50,8	10,24	1,64	0	10,44
<b>140</b>	100	100	99,68	46,96	7,06	0,96	0	6,98
<b>145</b>	100	100	99,78	53,44	9,1	1,36	0	8,22
<b>150</b>	100	100	99,7	47,4	7,14	0,96	0	6,12

A amostragem dirigida aplicada aos dados do MDS do TOPODATA mostra que o risco do usuário (aceitar um produto de má qualidade) é menor que o risco do produtor (rejeitar um produto de boa qualidade), tendo em vista o número de pontos (255 pontos) que a amostragem apresenta. O modelo digital do TOPODATA foi classificado segundo a norma ET-ADGV como classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros), onde mostra uma coerência segundo a classificação real da escala atendida pelo modelo que também é de Classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros). Todavia o gráfico mostra que a qualidade dos pontos do MDS e o número amostral não foram suficientes para uma convergência de 100% de aceitação do PEC-PCD de 10 metros, mostrando um índice de aceitação de 93,88% (considerando que a simulação utiliza apenas 60% dos pontos contidos na amostra).

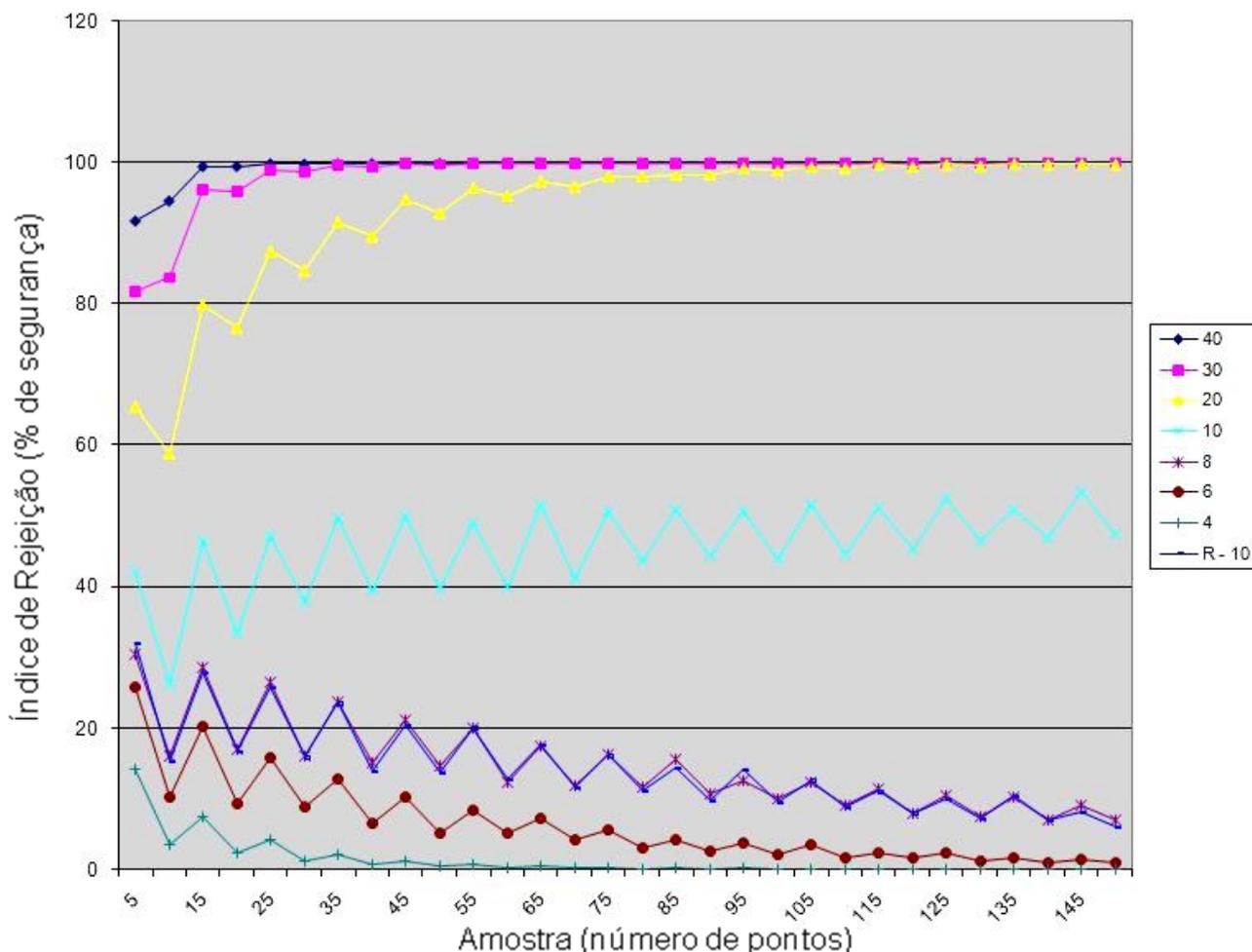


Figura 28: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos TOPODATA (255 pontos e PEC-PCD 10m).

No gráfico apresentado (Figura 28) nota-se que a convergência para os 100% de aceitação para o PEC-PCD de 10 metros, se concretizará bem acima de 150 pontos. Na quantidade de pontos abaixo de 150 ainda existirá os riscos, tanto para o produtor como para o usuário, predominado na amostra o risco do produtor.

#### 4.4.1.3 – Dados ASTER GDEM

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo ASTER GDEM com a amostragem dirigida no Simula PEC 1.1, a Tabela 21 apresenta os valores das curvas operacionais da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados e a Figura 29 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos amostrados.

Tabela 21: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados ASTER GDEM.

	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>R - 10</b>
<b>5</b>	91,72	82,46	64,76	40,4	30,98	24,6	14,2	34
<b>10</b>	95,16	83,9	59,6	28,24	15,5	10,52	3,66	19,4
<b>15</b>	99,5	96,4	80,64	46,12	28,86	18,96	7,68	35,52
<b>20</b>	99,66	95,94	76,14	34,3	16,14	9,06	2,58	21,26
<b>25</b>	99,96	98,98	87,6	48,4	26,4	16,24	4,16	34,36
<b>30</b>	99,98	98,88	84,64	36,24	16,22	8,4	1,48	22,68
<b>35</b>	99,98	99,74	92,22	48,6	23,48	13,36	2,58	32,5
<b>40</b>	100	99,7	89,18	39,12	15,08	6,86	0,84	22,58
<b>45</b>	100	99,9	94,68	48,42	20,32	10,36	1,28	30,2
<b>50</b>	100	99,9	93	41,54	13,96	5,46	0,58	22,22
<b>55</b>	100	99,98	96,38	48,94	19,96	8,26	0,62	29,86
<b>60</b>	100	99,96	95,06	42,66	12,54	4,5	0,22	22,62
<b>65</b>	100	100	97,82	50,2	16,98	6,54	0,38	28,72
<b>70</b>	100	100	96,42	42,12	11,94	3,84	0,2	23,2
<b>75</b>	100	100	98,3	50,04	15,56	5,42	0,2	27,68
<b>80</b>	100	100	97,36	42,72	11,56	3,04	0,16	21,52
<b>85</b>	100	100	98,56	50,7	14,32	4,44	0,12	26,1
<b>90</b>	100	100	98,62	44,38	10,74	2,66	0,12	21,98
<b>95</b>	100	100	99,24	51,76	15	3,6	0,1	25,48
<b>100</b>	100	100	98,7	44,58	9,76	2,3	0,02	19,7
<b>105</b>	100	100	99,06	51,74	12,66	2,78	0	24,18
<b>110</b>	100	100	99,22	44,72	8,66	1,88	0	18,64
<b>115</b>	100	100	99,72	51,56	11,9	2,54	0,06	24,78
<b>120</b>	100	100	99,32	46,02	8,04	1,22	0	18,62
<b>125</b>	100	100	99,52	51,7	10,46	1,96	0	22,72
<b>130</b>	100	100	99,6	46,14	7,98	0,98	0,02	17,88
<b>135</b>	100	100	99,84	51,58	10,04	2,04	0,02	21,7
<b>140</b>	100	100	99,68	46,48	7	1,3	0	18,26
<b>145</b>	100	100	99,86	52,4	9,76	1,54	0,02	21,4
<b>150</b>	100	100	99,76	46,72	7,1	0,86	0	17,88

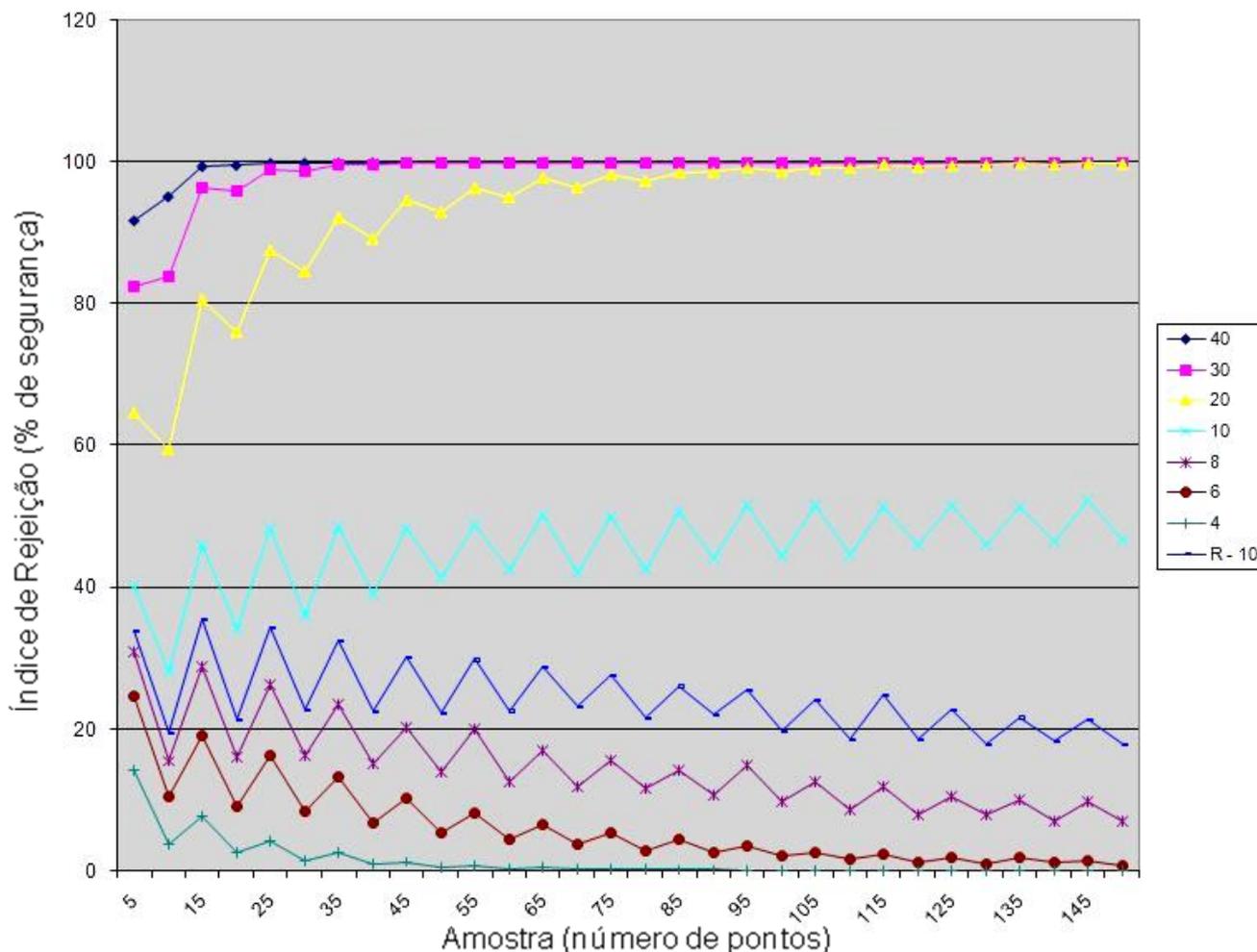


Figura 29: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos ASTER GDEM (255 pontos e PEC-PCD 10m).

A amostragem dirigida aplicada aos dados do MDS do ASTER GDEM mostra que o risco do usuário (aceitar um produto de má qualidade) é menor que o risco do produtor (rejeitar um produto de boa qualidade), tendo em vista o número de pontos (255 pontos) que a amostragem apresenta. O modelo digital do ASTER GDEM também foi classificado segundo a norma ET-ADGV como classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros) mostrando uma coerência segundo a classificação real da escala atendida pelo modelo que também é de classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros).

O gráfico da Figura 29 mostra que a qualidade dos pontos do MDS e o número amostral simulado, não foram suficientes para uma convergência de 100% de aceitação do PEC-PCD de 10 metros, e que estatisticamente, existe a probabilidade em torno de 20% de que uma combinação de pontos nos dê uma falsa classificação do MDS. Também nota-se que a convergência para os 100% de aceitação para o PEC-PCD de 10 metros, se concretizará bem além de 150 pontos. Na quantidade de pontos abaixo de 150 ainda existirá os riscos, tanto para o produtor como para o usuário.

#### **4.4.2 – Simulação da amostragem por perfis transversais.**

As simulações da amostragem por perfis transversais para análise dos MDSs SRTM, TOPODATA e ASTER GDEM foram realizadas no Simula PEC 1.1 (NERO, MARDEGAN e PIRES, 2006) utilizando como parâmetros para simulação o número de pontos de controle igual ao número de pontos obtidos na amostragem por perfis transversais apresentado no item 4.2.2 (pág. 64) e o valor de PEC-PCD baseado na classificação real dos modelos obtida no item 4.2.4 (pág. 67), que tem como referência a norma brasileira vigente.

Os parâmetros definidos foram:

- Número de pontos de controle: **249**
- Erro admissível (PEC-PCD): **10**
- Percentual de Pontos de controle (PCs) acima do PEC-PCD: **10**
- Intervalo percentual acima: **10**
- Intervalo percentual abaixo: **2**
- Número de iterações: **5.000**

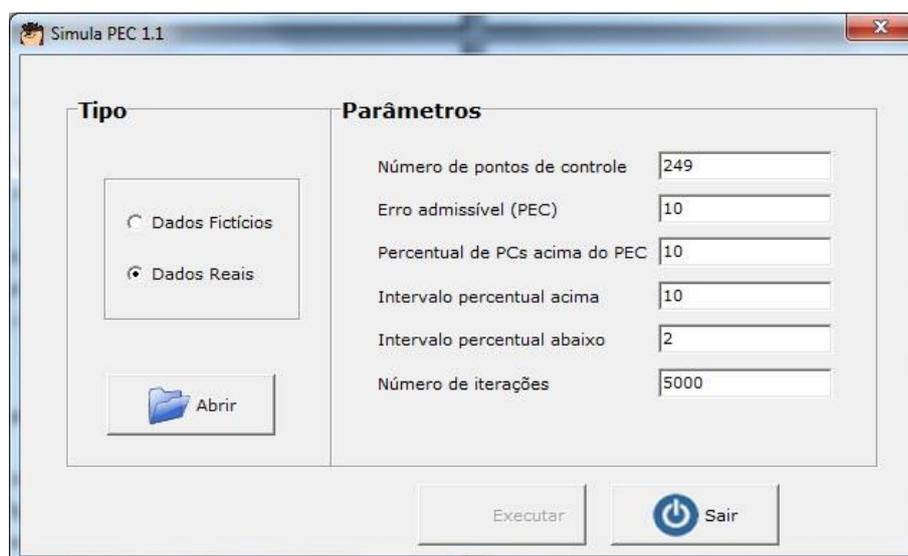


Figura 30: Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados por perfis transversais (249 pontos).

#### 4.4.2.1 – Dados SRTM

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo SRTM com a amostragem por perfis transversais no Simula PEC 1.1, a Tabela 22 apresenta os valores das curvas operacionais da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos utilizados na amostra dos dados e a Figura 31 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos amostrados.

Tabela 22: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados SRTM.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
5	92,18	81,88	66,04	41,38	30,56	22,64	14,96	24,46
10	94,42	84,9	60,64	27,34	15,92	8,62	3,58	9,86
15	99,2	96,28	82,2	46,44	29,54	16,6	7,82	20,72
20	99,54	96,28	77,24	35,36	17,16	7,02	2,6	10,74
25	99,92	98,96	88,86	49,34	27,14	12,66	4,24	16,08
30	99,96	99,04	86,22	39,28	16,46	5,5	1,5	8,32
35	100	99,72	92,84	51,12	24,68	8,48	2,66	13,9
40	100	99,72	90,24	39,94	15,64	4,9	1,06	7,38
45	100	99,92	95,24	52,12	22,5	6,84	1,42	11,44
50	100	99,9	94,22	42,72	14,38	3,44	0,54	5,76
55	100	99,98	96,18	52,5	19,94	5,7	0,94	8,74
60	100	100	96,12	43	13,62	2,32	0,28	5,28
65	100	100	97,84	52,72	19,04	3,94	0,42	7,56

70	100	99,96	97,34	45,64	13,34	1,68	0,18	4,1
75	100	100	98,76	53,32	17,52	2,7	0,42	6,32
80	100	100	97,94	46,48	11,66	1,46	0,06	3,84
85	100	100	99,1	54,28	15,94	1,68	0,18	4,88
90	100	100	98,8	46,36	11,1	1,44	0,04	2,94
95	100	100	99,38	53,08	15,24	1,84	0,16	4,3
100	100	100	99,06	47,92	11,36	1,06	0,04	2,5
105	100	100	99,44	54,3	14,46	1,38	0,04	3,22
110	100	100	99,56	48,32	10,82	0,68	0,02	2,4
115	100	100	99,68	55,5	13,6	1,1	0,08	3,58
120	100	100	99,54	49,02	9,18	0,66	0	2
125	100	100	99,76	55,18	12,58	0,74	0,02	2,8
130	100	100	99,64	49,46	8,38	0,46	0	1,58
135	100	100	99,72	54,74	11,28	0,44	0,02	1,64
140	100	100	99,84	50,78	8,14	0,38	0,02	1,18
145	100	100	99,88	57,68	10,8	0,64	0,04	1,56

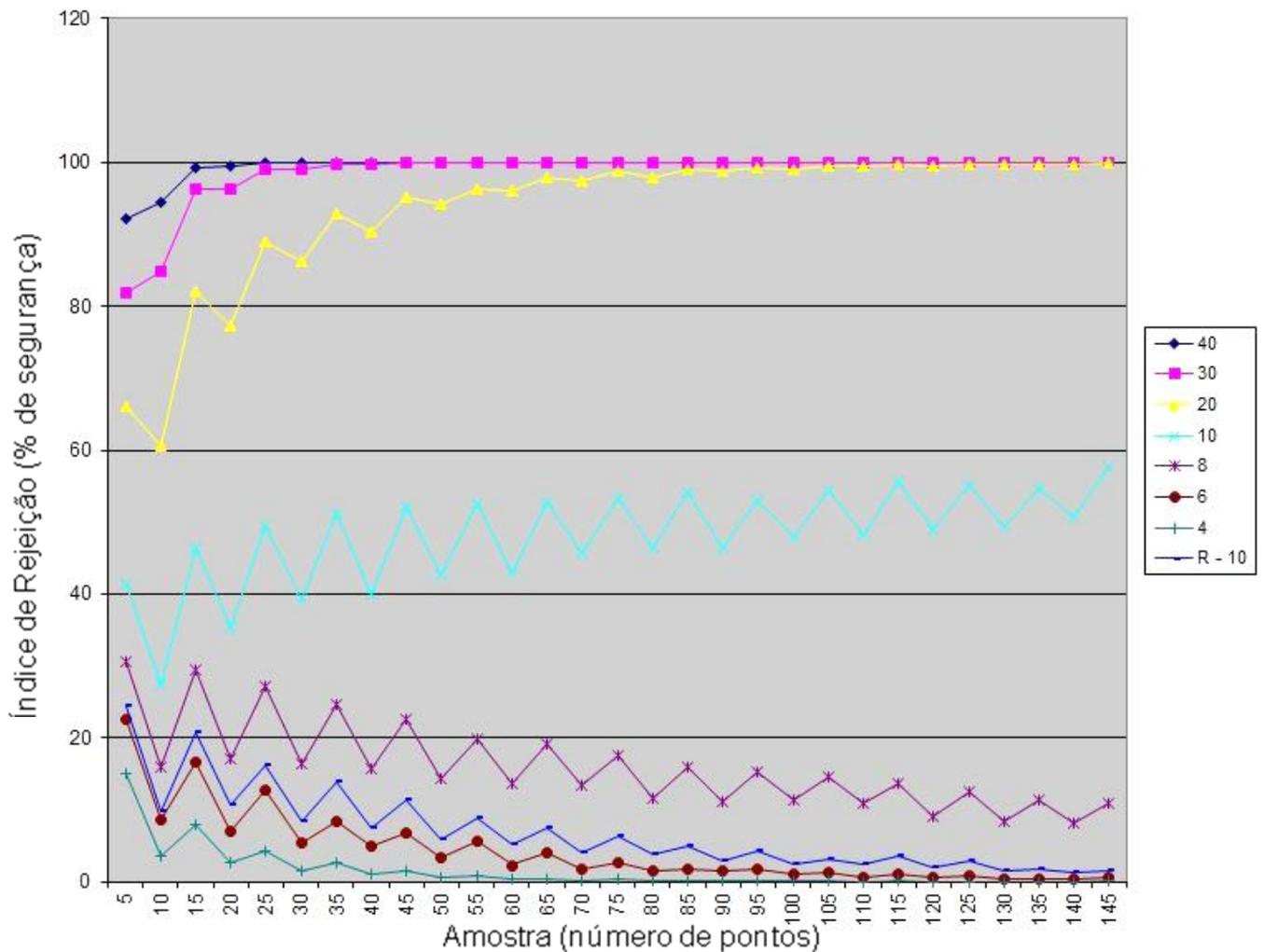


Figura 31: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos SRTM (249 pontos e PEC-PCD 10m).

A amostragem por perfis transversais, aplicada aos dados do MDS do SRTM mostra que o risco do usuário (aceitar um produto de má qualidade) é menor que o risco do produtor (rejeitar um produto de boa qualidade), tendo em vista o número de pontos (249 pontos) que a amostragem apresenta. O modelo digital do SRTM também foi classificado segundo a norma ET-ADGV como classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros) mostrando uma coerência segundo a classificação real da escala atendida pelo modelo que também é de classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros).

No gráfico apresentado nota-se que a convergência para os 100% de aceitação para o PEC-PCD de 10 metros, se concretizará com pouco mais de 145 pontos, eliminando conseqüentemente o risco do usuário.

#### 4.4.2.2 – Dados TOPODATA

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo TOPODATA com a amostragem por perfis transversais no Simula PEC 1.1, a Tabela 23 apresenta os valores das curvas operacionais da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados e a Figura 32 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos amostrados.

Tabela 23: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados TOPODATA.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
5	91,54	82,34	65,98	42,22	30,22	21,52	14,9	18,54
10	94,7	84,32	61,52	28,74	15,8	8,36	4,1	5,7
15	99,6	96,28	80,76	48,24	30,34	15,8	6,94	12,2
20	99,64	95,8	77,5	34,72	17,02	6,34	2,4	4,3
25	99,92	98,98	88,68	48,28	27,7	11,64	4,42	7,44
30	100	99,06	86,1	38,18	16,34	5,56	1,36	2,48
35	99,98	99,74	92,8	50,54	23,82	8,28	2,36	5,26
40	100	99,58	90,66	41,64	16,76	3,96	0,9	2,36
45	100	99,84	95,92	52,16	22,92	6,74	1,7	3,94
50	100	99,88	93,68	43,66	15,56	3,12	0,36	1,5
55	100	100	96,8	52,24	20,04	5,08	1,06	2,24
60	100	99,98	96,1	43,34	14,48	2,32	0,16	0,78
65	100	99,98	97,38	52,54	19,36	3,78	0,4	1,72
70	100	100	97,22	46,34	13,4	2,2	0,14	0,94

75	100	100	98,58	54,04	17,02	2,74	0,24	0,9
80	100	99,98	98,18	47,48	12,56	1,78	0,16	0,48
85	100	100	99,14	52,64	16,44	2,06	0,14	0,88
90	100	100	98,92	47,44	11,24	1,02	0,06	0,52
95	100	100	99,34	54,6	14,94	1,6	0,06	0,5
100	100	99,98	98,82	48,3	10,58	0,8	0	0,18
105	100	100	99,48	54,22	13,42	1,24	0,04	0,28
110	100	100	99,5	48,54	9,58	0,74	0	0,18
115	100	100	99,56	54,04	12,76	0,92	0,1	0,26
120	100	100	99,62	50,44	8,7	0,58	0	0,14
125	100	100	99,78	55,48	12,1	0,74	0,06	0,14
130	100	100	99,7	50,4	8,8	0,36	0,04	0,12
135	100	100	99,84	55,48	11,42	0,7	0,02	0,12
140	100	100	99,84	49,8	8,26	0,48	0	0,06
145	100	100	99,9	56,52	10,28	0,52	0	0,1

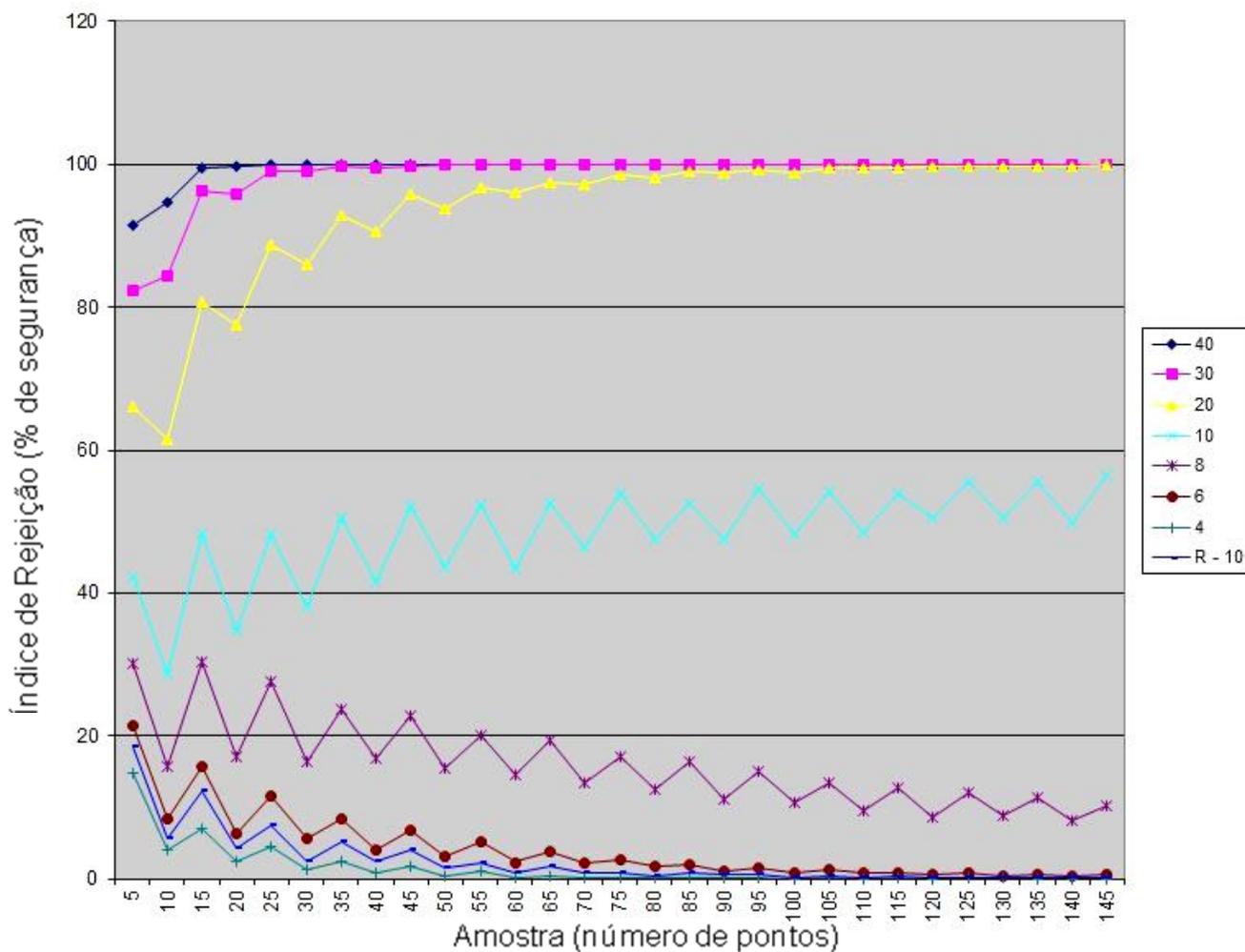


Figura 32: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos TOPODATA (249 pontos e PEC-PCD 10m).

A amostragem por perfis transversais, aplicada ao MDS do TOPODATA, mostra que o risco do usuário (aceitar um produto de má qualidade) é bem maior que o risco do produtor (ver rejeitado um produto de boa qualidade), considerando a quantidade de pontos (249 pontos) que a amostragem apresenta, o modelo digital do TOPODATA foi classificado segundo a norma ET-ADGV como classe D 1:25.000 (PEC-PCD de 7,5 metros), onde mostra uma discrepância da escala real atendida pelo modelo que é de Classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros). Logo, pela análise de classificação segundo a norma brasileira, considerando como verdade o PEC-PCD alcançado com os dados da população, nota-se que, a qualidade e a quantidade dos pontos decorrentes da amostragem em questão para os dados do MDS do TOPODATA, estatisticamente, apresenta uma grande probabilidade de que uma combinação de pontos nos dê uma falsa classificação do MDS.

No gráfico apresentado nota-se que a convergência para os 100% de aceitação para o PEC-PCD de 10 metros, se concretizará próximo ao número de 60 pontos, eliminando assim o risco do usuário.

#### 4.4.2.3 – Dados ASTER GDEM

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo ASTER GDEM com a amostragem por perfis transversais no Simula PEC 1.1, a Tabela 24 apresenta os valores das curvas operacionais da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados e a Figura 33 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos amostrados.

Tabela 24: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra dos dados ASTER GDEM.

	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>R - 10</b>
<b>5</b>	92,18	81,78	65,2	42,86	30,58	21,98	15,92	41,26
<b>10</b>	94,62	84,54	58,78	28,32	16,7	8,32	4,04	26,08
<b>15</b>	99,54	96,16	81,88	46,4	29,36	15,96	7,64	45,02
<b>20</b>	99,62	95,74	76,82	35,72	17,48	7,2	2,2	32,5
<b>25</b>	99,96	98,84	88,48	50,64	27,4	11,28	4,24	46,1
<b>30</b>	99,96	99	86,12	39,24	16,18	5,16	1,6	35,9
<b>35</b>	100	99,6	93,02	51,34	24,72	8,62	2,44	46,64

40	100	99,88	90,54	41,82	16,18	4,22	0,78	38,5
45	100	99,9	95,66	51,46	21,64	6,2	1,32	47,44
50	100	99,92	94,2	42,16	15,38	3,34	0,52	37,76
55	100	99,96	97,06	52,26	20,44	5,16	0,82	47,16
60	100	100	95,98	43,6	14,34	2,94	0,38	39,4
65	100	99,96	97,76	53,66	19,48	3,8	0,6	47,92
70	100	99,98	97,02	47,52	13,06	2,04	0,18	41,1
75	100	100	98,58	54,44	17,8	2,86	0,36	48,1
80	100	100	97,78	45,36	13	1,4	0,06	40,7
85	100	100	98,8	54,22	17,56	2,38	0,16	48,98
90	100	100	98,72	47,16	12,68	1,22	0,06	40,2
95	100	100	99,34	53,3	15,32	1,42	0,08	48,78
100	100	100	99,08	49,86	11,16	1	0,06	42,28
105	100	100	99,48	54,32	14,92	1,32	0,12	47,42
110	100	100	99,42	48,24	10,46	0,8	0,02	42,3
115	100	100	99,52	56,08	13,66	1,34	0,08	47,22
120	100	100	99,52	48,92	9,5	0,46	0,02	43,2
125	100	100	99,84	55,4	12,42	0,88	0,04	49,24
130	100	100	99,64	50,24	8,28	0,56	0,02	43,3
135	100	100	99,78	56,08	11,04	0,74	0	48,94
140	100	100	99,88	50,02	8,48	0,26	0	45,06
145	100	100	99,86	53,72	10,62	0,4	0	49,06

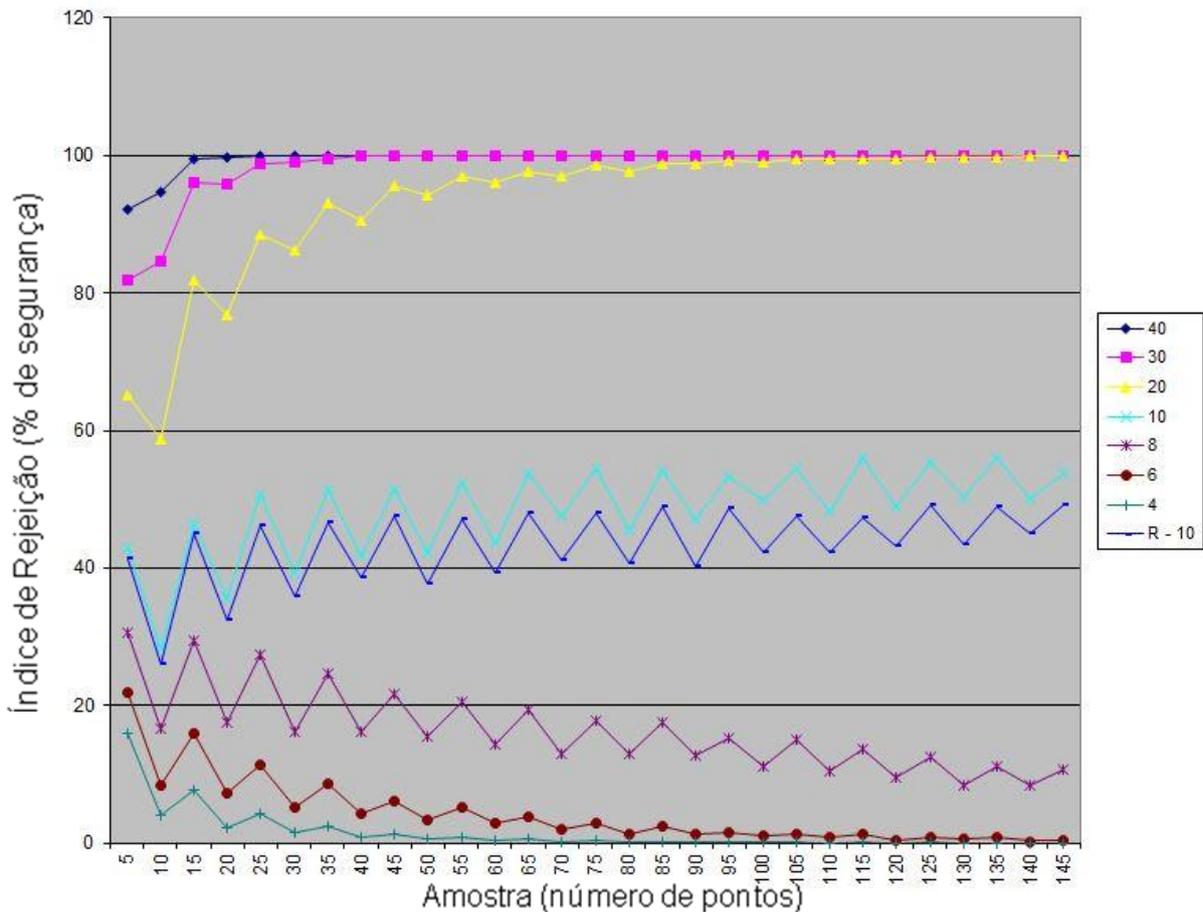


Figura 33: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos ASTER GDEM (249 pontos e PEC-PCD 10m).

A amostragem por perfis transversais, aplicada aos dados do MDS do ASTER GDEM mostra que o risco do usuário (aceitar um produto de má qualidade) é menor que o risco do produtor (rejeitar um produto de boa qualidade), tendo em vista o número de pontos (255 pontos) que a amostragem apresenta. O modelo digital do ASTER GDEM foi classificado segundo a norma ET-ADGV como classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros), onde mostra uma coerência segundo a classificação real da escala atendida pelo modelo que também é de classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros).

O gráfico mostra que a qualidade dos pontos do MDS e o número amostral simulado, não foram suficientes para uma convergência de 100% de aceitação do PEC-PCD de 10 metros, e que estatisticamente, existe a probabilidade em torno de 50% que uma combinação de pontos nos dê uma falsa classificação do MDS.

Também nota-se que a curva com dados reais tende a convergência ao índice de rejeição de 100% para o PEC-PCD de 10 metros, e que na quantidade de pontos abaixo de 145 ainda existirá os riscos, tanto para o produtor como para o usuário, predominando o risco do usuário.

#### **4.4.3 – Simulação da amostragem sistemática.**

As simulações da amostragem sistemática para análise dos MDSs SRTM, TOPODATA e ASTER GDEM foram realizadas no Simula PEC 1.1 (NERO, MARDEGAN e PIRES, 2006) utilizando como parâmetros para simulação o número de pontos de controle igual ao número de pontos obtidos na amostragem sistemática (7.140 pontos para ASTERGDEM e TOPODATA e 784 para SRTM), conforme apresentado no item 4.2.3 (pág. 66), e o valor de PEC-PCD baseado na classificação real dos modelos obtida no item 4.2.4 (pág. 67), que tem como referência a norma brasileira vigente.

Os parâmetros definidos foram:

- Número de pontos de controle: **784** (SRTM) e **7.140** (TOPODATA e ASTER GDEM)
- Erro admissível (PEC-PCD): **10**
- Percentual de Pontos de controle (PCs) acima do PEC-PCD: **10**
- Intervalo percentual acima: **10**
- Intervalo percentual abaixo: **2**
- Número de iterações: **5.000**

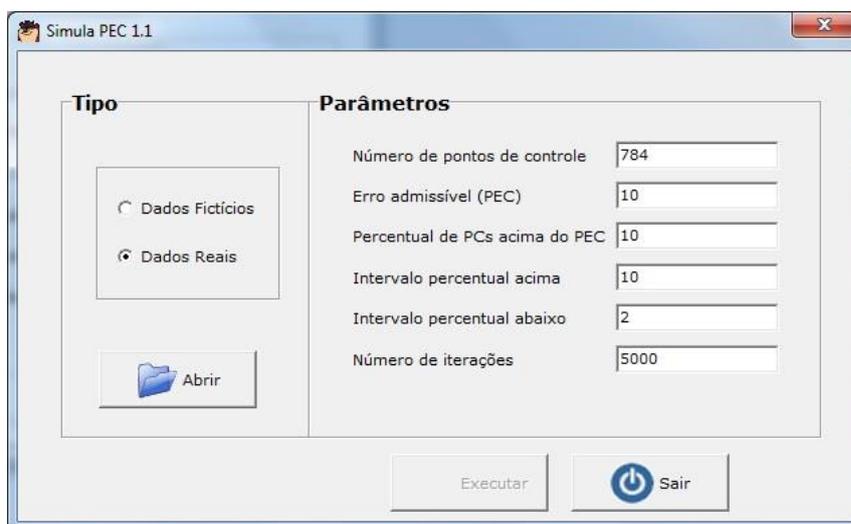


Figura 34: Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados SRTM (784 pontos).

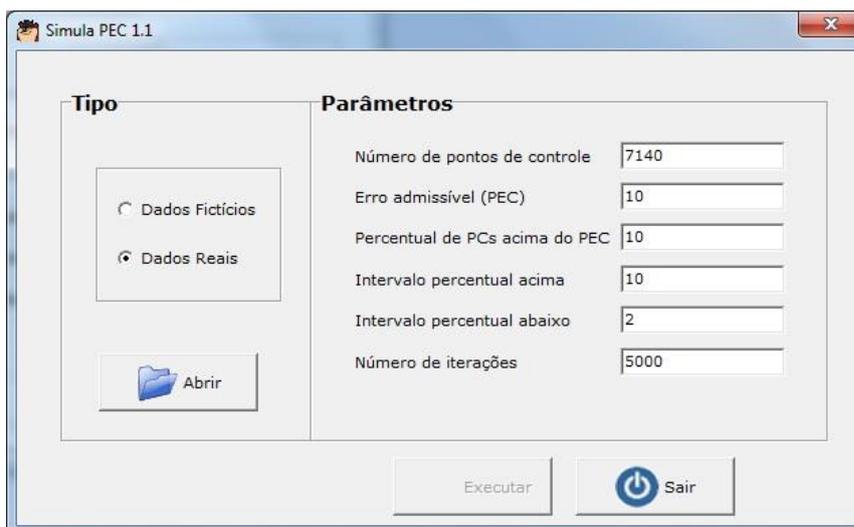


Figura 35: Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados ASTER GDEM e TOPODATA (7.140 pontos).

#### 4.4.3.1 – Dados SRTM

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo SRTM com a amostragem sistemática no Simula PEC 1.1, a Tabela 25 apresenta os valores das curvas operacionais da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados e a Figura 36 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos amostrados.

Tabela 25: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
5	92,18	83,8	66,66	42,8	33,44	23,78	17,52	15,38
10	94,86	84,78	60,54	29	18,26	10,86	5,12	4,12
15	99,4	96,06	82,68	49,46	31,84	20,86	11,36	9,04
20	99,64	95,84	79,08	36,64	19,38	9,36	3,8	2,76
25	99,96	98,86	90,12	51,32	31,34	17,38	6,36	4,82
30	99,96	99,02	86,68	40,92	19,08	9,24	2,34	1,92
35	99,98	99,74	93,32	53,46	27,82	13,88	4,38	2,48
40	100	99,72	91,76	43,46	18,6	7,54	1,7	0,86
45	100	99,86	95,8	53,68	25,48	11,22	3,28	1,8
50	100	99,96	94,44	45,6	18,48	6,04	1	0,44
55	100	99,98	97,4	55,3	23,5	8,84	1,8	1,24
60	100	99,96	96,38	47,06	18,56	5,5	0,9	0,54
65	100	99,98	98,1	54,66	23,08	7,12	0,96	0,62
70	100	100	97,5	49,34	17,42	4,26	0,6	0,32
75	100	100	99,04	55,98	22,02	6,3	0,98	0,28
80	100	100	98,38	50,66	16,32	4,1	0,54	0,08
85	100	100	99,14	56,56	20,64	4,96	0,5	0,2
90	100	100	99,12	51,6	16,16	2,62	0,14	0,12
95	100	100	99,32	57,9	20,16	3,76	0,32	0,16
100	100	100	99,3	50,68	14,12	2,46	0,24	0,02
105	100	100	99,72	58,24	18,6	3,26	0,36	0,04
110	100	100	99,6	52,46	13,96	2,02	0,12	0
115	100	100	99,74	59,62	17,82	3,08	0,16	0,08
120	100	100	99,76	52,62	13,26	2,02	0,06	0,02
125	100	100	99,84	60,1	16,64	2,5	0,18	0
130	100	100	99,78	54,98	12,72	1,44	0,06	0
135	100	100	99,94	61	16,16	2	0,08	0
140	100	100	99,88	54,06	11,52	1,36	0,06	0
145	100	100	99,92	60,92	14,88	1,92	0,02	0,02
150	100	100	99,92	55,92	11,92	1,16	0,08	0

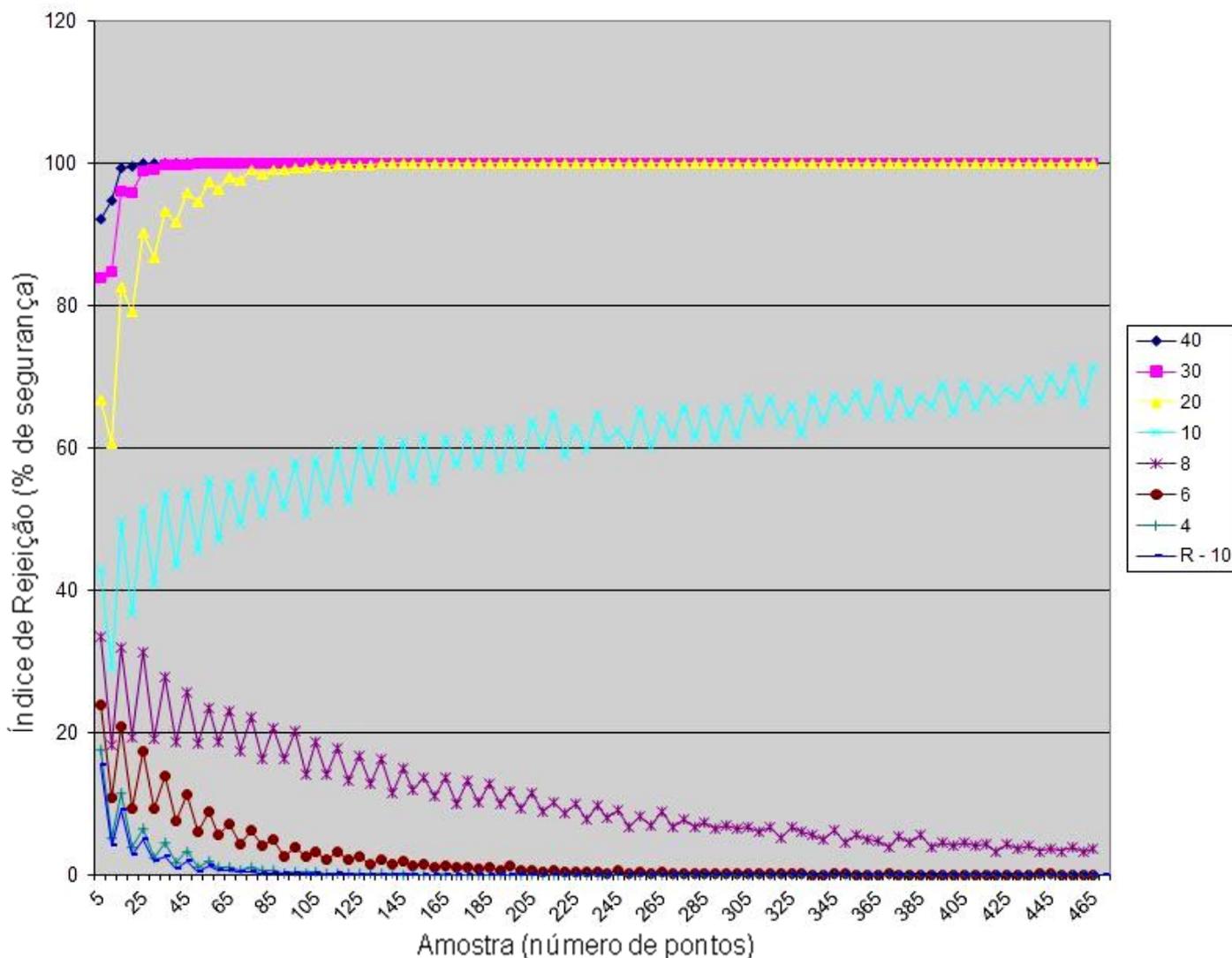


Figura 36: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos SRTM (784 pontos e PEC-PCD 10m).

A amostragem sistemática, aplicada ao MDS do SRTM, mostra que o risco do usuário (aceitar um produto de má qualidade) é bem maior que o risco do produtor (rejeitar um produto de boa qualidade), considerando a quantidade de pontos (784 pontos) que a amostragem apresenta, o modelo digital do SRTM foi classificado segundo a norma ET-ADGV como classe D 1:25.000 (PEC-PCD de 7,5 metros), onde mostra uma discrepância da escala real atendida pelo modelo que é de Classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros). Logo, pela análise de classificação segundo a norma brasileira, considerando como verdade o PEC-PCD alcançado com os dados da população, nota-se que, a qualidade e a quantidade dos pontos decorrentes da amostragem em questão para os dados do MDS do SRTM, estatisticamente,

apresenta uma grande probabilidade de que uma combinação de pontos nos dê uma falsa classificação do MDS.

No gráfico apresentado nota-se que a convergência para os 100% de aceitação para o PEC-PCD de 10 metros, se concretizará próximo ao número de 40 pontos, eliminando o risco do usuário.

#### 4.4.3.2 – Dados TOPODATA

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo TOPODATA com a amostragem sistemática no Simula PEC 1.1, a Tabela 26 apresenta os valores das curvas operacionais da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados e a Figura 37 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos amostrados.

Tabela 26: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
5	92,14	82,88	66,9	43,74	32,84	26,28	18,48	13,88
10	95,48	84,5	60,54	28,8	19,7	12,02	5,6	3,44
15	99,4	96,5	83,38	50,42	34,52	22	12,1	6,24
20	99,66	95,82	78,52	36,54	20,86	11,76	4,42	2,08
25	99,98	99,26	89,82	53,06	33,24	19,16	7,88	3,4
30	99,98	98,88	87,18	40,66	19,66	9,84	2,88	1
35	100	99,72	94,78	54,14	30,78	15	4,52	1,84
40	100	99,7	93,12	44,56	22,08	9,14	2,24	0,72
45	100	99,86	96,7	56,74	28,92	12,94	3,38	0,98
50	100	99,96	95,26	47,08	20,2	8,6	1,34	0,32
55	100	99,98	97,5	56,32	27,44	10,1	2,4	0,52
60	100	99,96	96,68	48,84	19,74	6,76	0,92	0,14
65	100	100	98,2	57,44	25,06	8,64	1,58	0,34
70	100	100	98,16	50,4	20,46	6,26	0,64	0,12
75	100	100	98,9	59,5	24,44	8	0,88	0,22
80	100	100	98,6	53,34	18,88	5,46	0,36	0,02
85	100	100	99,26	59,08	21,48	6,58	0,8	0,12
90	100	100	99,26	53,48	17,9	4,08	0,22	0,02
95	100	100	99,56	60,66	22,84	5,64	0,3	0,04
100	100	100	99,42	53,04	17,12	3,36	0,26	0,02



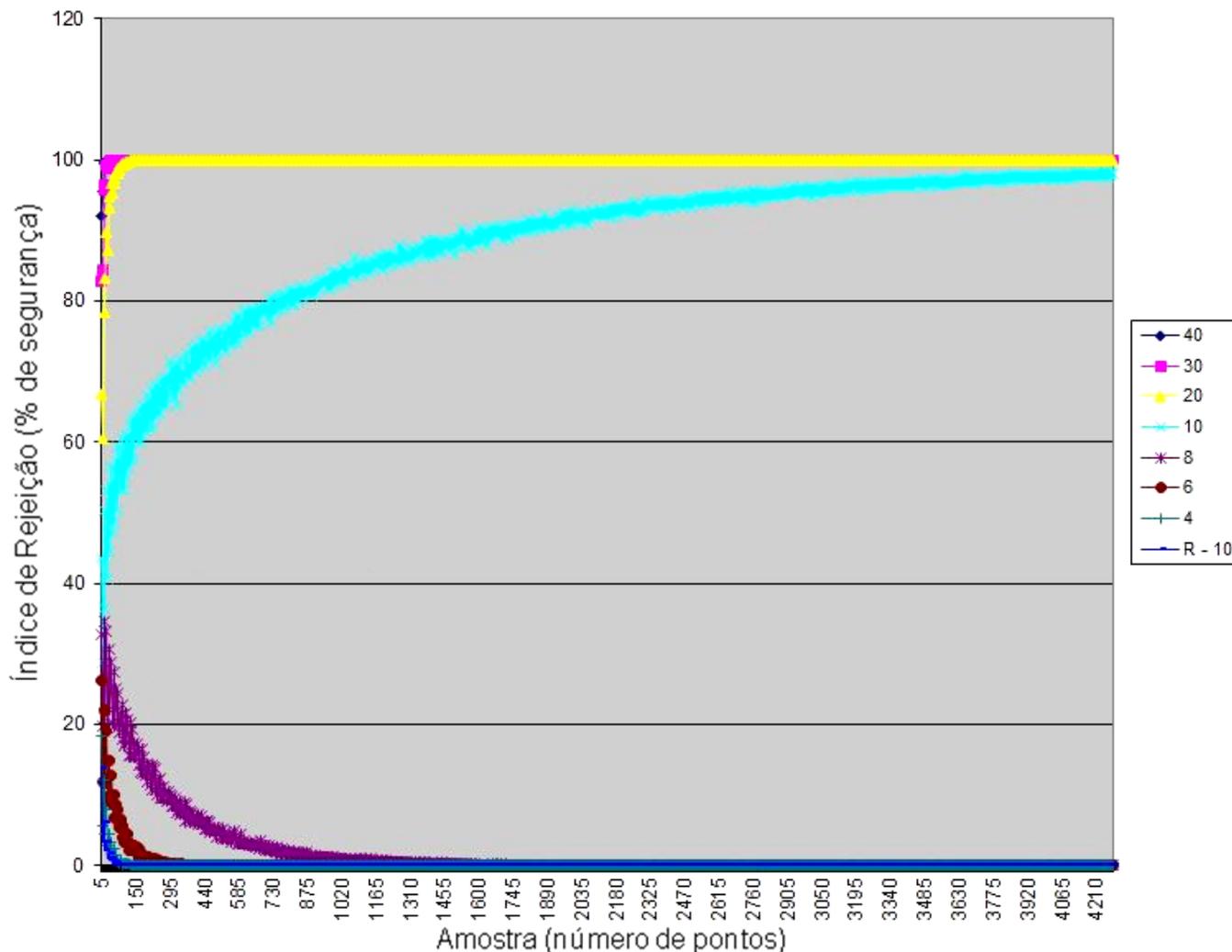


Figura 37: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos TOPODATA (7.140 pontos e PEC-PCD 10m).

A amostragem sistemática, aplicada ao MDS do TOPODATA, mostra que o risco do usuário (aceitar um produto de má qualidade) também é bem maior que o risco do produtor (rejeitar um produto de boa qualidade), considerando a quantidade de pontos (7.140 pontos) que a amostragem apresenta, o modelo digital do TOPODATA foi classificado segundo a norma ET-ADGV como classe D 1:25.000 (PEC-PCD de 7,5 metros) mostrando uma discrepância da escala real atendida pelo modelo que é de Classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros). Logo, pela análise de classificação segundo a norma brasileira, considerando como verdade o PEC-PCD alcançado com os dados da população, nota-se que, a qualidade e a quantidade dos pontos decorrentes da amostragem em questão para os dados do MDS do

TOPODATA, estatisticamente, apresenta uma grande probabilidade de que uma combinação de pontos nos dê uma falsa classificação do MDS.

No gráfico apresentado nota-se que a convergência para os 100% de aceitação para o PEC-PCD de 10 metros, se concretizará próximo ao número de 40 pontos, eliminando o risco do usuário.

#### 4.4.3.3 – Dados ASTER GDEM

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo ASTER GDEM com a amostragem sistemática no Simula PEC 1.1, a Tabela 27 apresenta os valores das curvas operacionais da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados e a Figura 38 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos amostrados.

Tabela 27: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
<b>5</b>	91,9	83,66	66,22	44,84	34,32	27,56	18,12	26,3
<b>10</b>	95,34	84,96	62,62	29,4	18,22	12,02	6,08	11,52
<b>15</b>	99,42	96,68	82,8	49,52	33,1	21,76	12,06	21,64
<b>20</b>	99,82	96,64	80,12	37,98	21,56	11,14	4,5	9,9
<b>25</b>	99,94	99,2	90,84	53,14	31,74	17,52	7,52	16,76
<b>30</b>	99,96	99,06	88,38	42,44	21,16	10,14	3,42	9,38
<b>35</b>	100	99,8	94,18	53,36	31,04	14,62	5,3	14,34
<b>40</b>	100	99,74	92,6	43,12	21,66	8,34	2,18	8,24
<b>45</b>	100	99,92	96,3	55,5	29,66	12,88	3,92	11,24
<b>50</b>	100	99,98	95,16	49,48	20,22	7,68	1,46	6,94
<b>55</b>	100	99,98	97,24	57,42	27,48	10,28	2,38	10,26
<b>60</b>	100	99,98	96,98	47,96	19,76	6,22	0,84	5,6
<b>65</b>	100	99,98	98,44	58,34	25,7	9,74	1,46	8,44
<b>70</b>	100	99,96	97,84	51,38	20,14	4,98	0,64	5,06
<b>75</b>	100	100	98,84	57,72	26,18	7,72	0,82	6,68
<b>80</b>	100	99,96	98,78	51,88	19,12	4,72	0,4	4,56
<b>85</b>	100	100	99,38	60,1	23,94	6,58	0,36	5,34
<b>90</b>	100	100	98,98	53,9	18,8	4	0,32	3,64
<b>95</b>	100	100	99,5	60,46	23,7	5,6	0,42	4,8
<b>100</b>	100	100	99,42	54,3	18,46	3,68	0,2	2,8
<b>105</b>	100	100	99,58	61,24	21,52	4,9	0,26	4,1
<b>110</b>	100	100	99,6	55,94	17,14	3,18	0,12	2,06
<b>115</b>	100	100	99,72	61,36	20,68	4,16	0,18	3,36
<b>120</b>	100	100	99,52	56,18	16	2,84	0,04	1,96

125	100	100	99,86	62,12	19,68	3,24	0,06	2,86
130	100	100	99,8	56,92	15,3	2,22	0,06	1,86
135	100	100	99,94	63,12	19,12	2,9	0,12	2,42
140	100	100	99,92	58,14	14,3	1,98	0,1	1,74
145	100	100	99,94	63,08	17,72	2,42	0,06	2,58
150	100	100	99,92	58,38	13,62	2,34	0,04	1,3
155	100	100	99,96	62,98	17,14	2,84	0,02	1,7
160	100	100	99,96	60,58	12,9	1,16	0	0,9
165	100	100	99,98	64,68	15,52	2,34	0,04	1,62
170	100	100	99,94	59,98	13,22	1,3	0,02	0,98
175	100	100	100	64,74	16,78	2	0	1,14
180	100	100	100	61,24	11,8	1,48	0,02	0,92
185	100	100	99,98	64,62	15,44	1,72	0,04	0,88
190	100	100	99,96	60,38	13,44	1,08	0,02	0,82
195	100	100	100	65,48	14,58	1,24	0	0,76
200	100	100	100	61,54	12,18	0,78	0	0,84

•  
•  
•

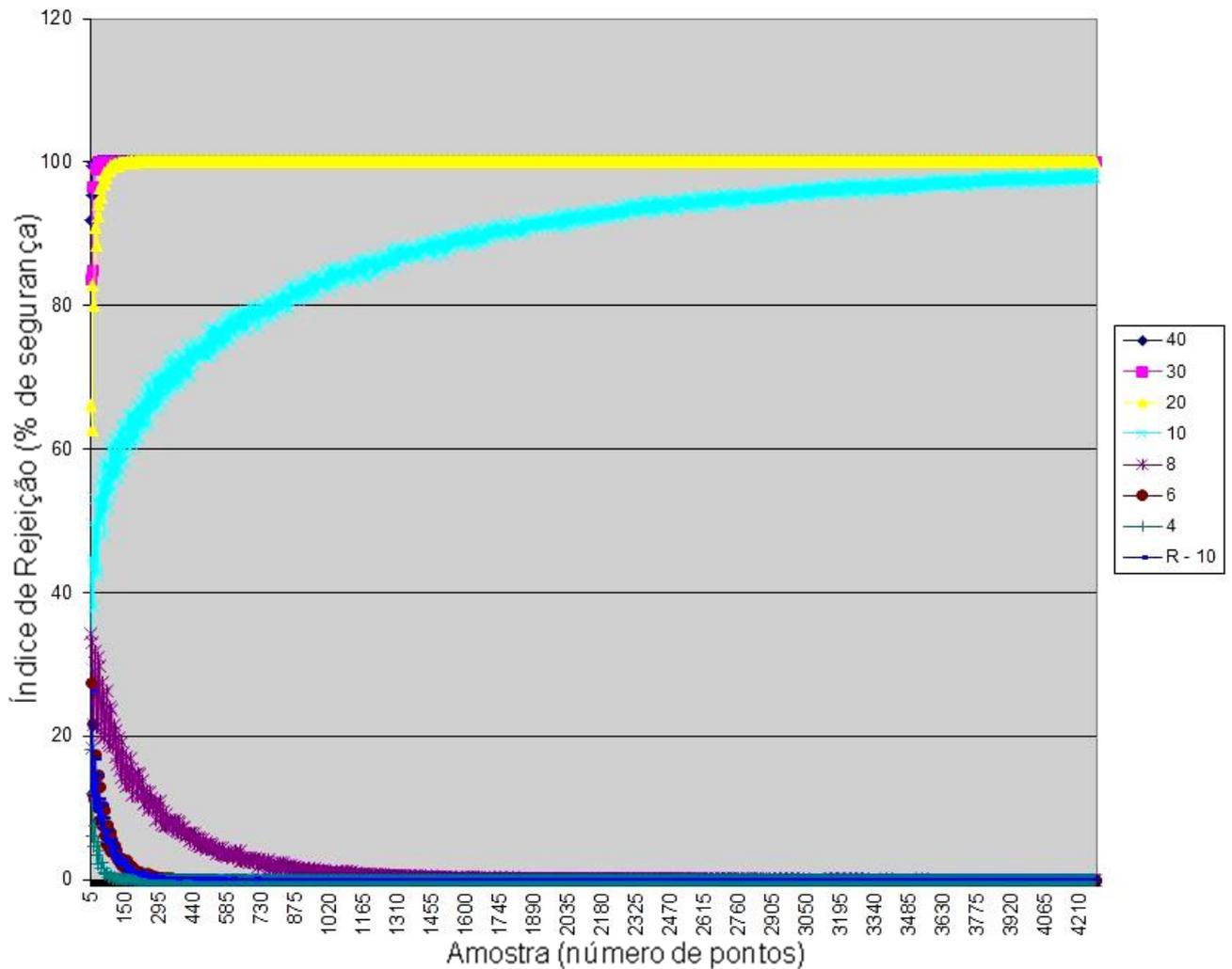


Figura 38: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos ASTER GDEM (7.140 pontos e PEC-PCD 10m).

A amostragem sistemática, aplicada aos dados do MDS do ASTER GDEM mostra que o risco do usuário (aceitar um produto de má qualidade) é menor que o risco do produtor (rejeitar um produto de boa qualidade), tendo em vista o número de pontos (7.140 pontos) que a amostragem apresenta. O modelo digital do ASTER GDEM foi classificado segundo a norma ET-ADGV como classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros), onde mostra uma coerência segundo a classificação real da escala atendida pelo modelo que também é de classe B 1:50.000 (PEC-PCD de 10 metros).

No gráfico apresentado nota-se que a convergência para os 100% de aceitação para o PEC-PCD de 10 metros, se concretizará próximo ao número de 160 pontos, eliminando o risco do usuário.

Também nota-se que, em uma quantidade abaixo de 160 pontos, ainda existirá estatisticamente uma probabilidade de uma combinação de pontos nos apresente uma falsa classificação do modelo, correspondendo ao risco do usuário.

#### **4.4.4 – Simulação pela População**

Para a simulação dos pontos referentes à população no programa Simula PEC 1.1, foi necessária a redução do número de pontos dos MDSs, pois ao processar os dados no programa (190.761 pontos), a plataforma de equipamento disponível na atual tecnologia ou para engenharia computacional do programa não possui capacidade compatível de memória. Assim, a redução do número de pontos foi realizada estrategicamente de forma a não comprometer os resultados das análises estatísticas realizadas anteriormente com os 190.761 pontos (item 4.2.4, pág. 67).

Considerando que na primeira extração de pontos a partir das curvas de nível do mapeamento de referência foi utilizado o espaçamento de 3 (três) metros, para a obtenção da nova população foram extraídos pontos das curvas de nível (mestras e

intermediárias) espaçados de 6 metros na tentativa de obter um conjunto de pontos similarmente representativo que possibilitasse o processamento dos dados.

Com a nova amostra de 99.676 pontos, foi realizada a simulação da amostragem total pela população.

Como forma de verificar a similaridade entre os dois conjuntos de pontos da população, foram aplicados o teste de tendência e o teste direto para comparação da classificação dos conjuntos de pontos da população de acordo com a norma da CONCAR (2011). As Tabelas 28, 29 e 30 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 28: Comparação de classificação do PEC-PCD entre as duas amostras, sem a correção do erro sistemático.

	Classificação CONCAR 2011		
	SRTM	TOPODATA	ASTER GDEM
População de 190.761 pontos	Classe <b>A</b> Escala 1:100.000	Classe <b>A</b> Escala 1:100.000	Classe <b>B</b> Escala 1:100.000
População de 99.676 pontos	Classe <b>A</b> Escala 1:100.000	Classe <b>A</b> Escala 1:100.000	Classe <b>B</b> Escala 1:100.000

Tabela 29: Comparação de classificação do PEC-PCD entre as duas amostras, com a correção do erro sistemático.

	Classificação CONCAR 2011		
	SRTM	TOPODATA	ASTER GDEM
População de 190.761 pontos	Classe <b>B</b> Escala 1:50.000	Classe <b>B</b> Escala 1:50.000	Classe <b>B</b> Escala 1:50.000
População de 99.676 pontos	Classe <b>B</b> Escala 1:50.000	Classe <b>B</b> Escala 1:50.000	Classe <b>B</b> Escala 1:50.000

Tabela 30: Comparação do teste de tendência entre as amostras.

	Teste de Tendência		
	SRTM	TOPODATA	ASTER GDEM
População de 190.761 pontos	-6,090 metros	-6,427 metros	-9,355 metros
População de 99.676 pontos	-6,064 metros	-6,397 metros	-9,324 metros
Valores da diferença entre os erros sistemáticos	<b>0,026</b> metros	<b>0,030</b> metros	<b>0,031</b> metros

Nas Tabelas 28, 29 e 30 observa-se que os pontos retirados da primeira amostra não provocaram nenhum efeito considerável em relação às análises estatísticas aplicadas na população inicial de 190.761 pontos, pois a maior diferença encontrada foi de 3,1 centímetros, que corresponde a um valor muito pequeno diante dos valores de erro sistemático apresentados nos MDSs estudados. Verifica-se também que não houve influência na classificação da qualidade do conjunto de dados segundo a ET-ADGV, considerando até 90% dos pontos dentro do valor do PEC-PCD abordado.

Considerando que, com a grande quantidade de pontos utilizados na simulação, os gráficos gerados pelo Simula PEC 1.1 com as curvas operacionais dos dados reais e fictícios não dão destaque às curvas geradas com dados reais, para facilitar a interpretação dos resultados, as simulações da população com dados reais e fictícios foram gerados separadamente.

A simulação da amostragem pela população com dados fictícios foi realizada no Simula PEC 1.1 utilizando como parâmetros para simulação o número de pontos de controle igual ao número de pontos da população (99.676 pontos) e o valor de PEC-PCD baseado na classificação real dos modelos obtida no item 4.2.4 (pág. 67), que tem como referência a norma brasileira vigente.

Tendo em vista o grande número de pontos e de iterações a serem analisadas, a simulação com 99.676 pontos foi executada em torno de 200 horas (oito dias) aproximadamente, para cada modelo.

Os parâmetros definidos foram:

- Número de pontos de controle: **99.676**
- Erro admissível (PEC-PCD): **10**
- Percentual de Pontos de controle (PCs) acima do PEC-PCD: **10**
- Intervalo percentual acima: **10**
- Intervalo percentual abaixo: **2**
- Número de iterações: **5.000**

A Figura 40 e a Tabela 31 apresentam respectivamente o gráfico e os valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra para os dados fictícios.

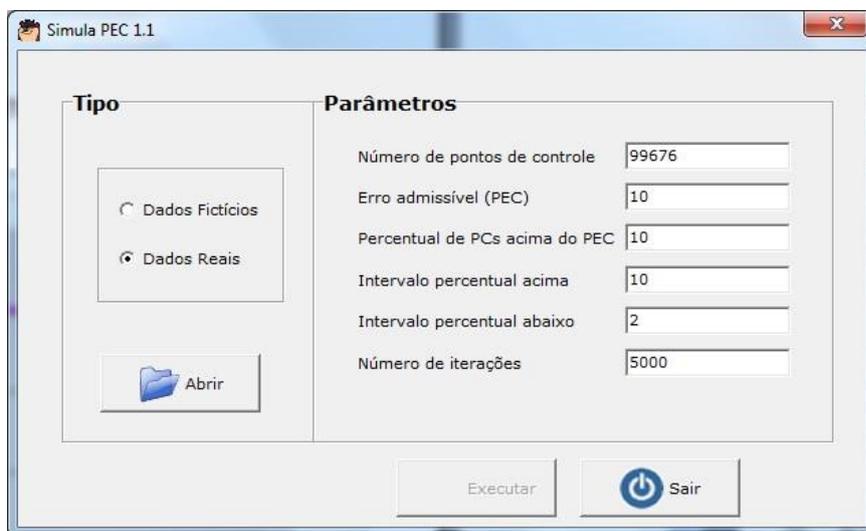


Figura 39: Parâmetros de entrada do programa Simula PEC 1.1 para os processos de simulação referentes aos dados da população (99.676 pontos)

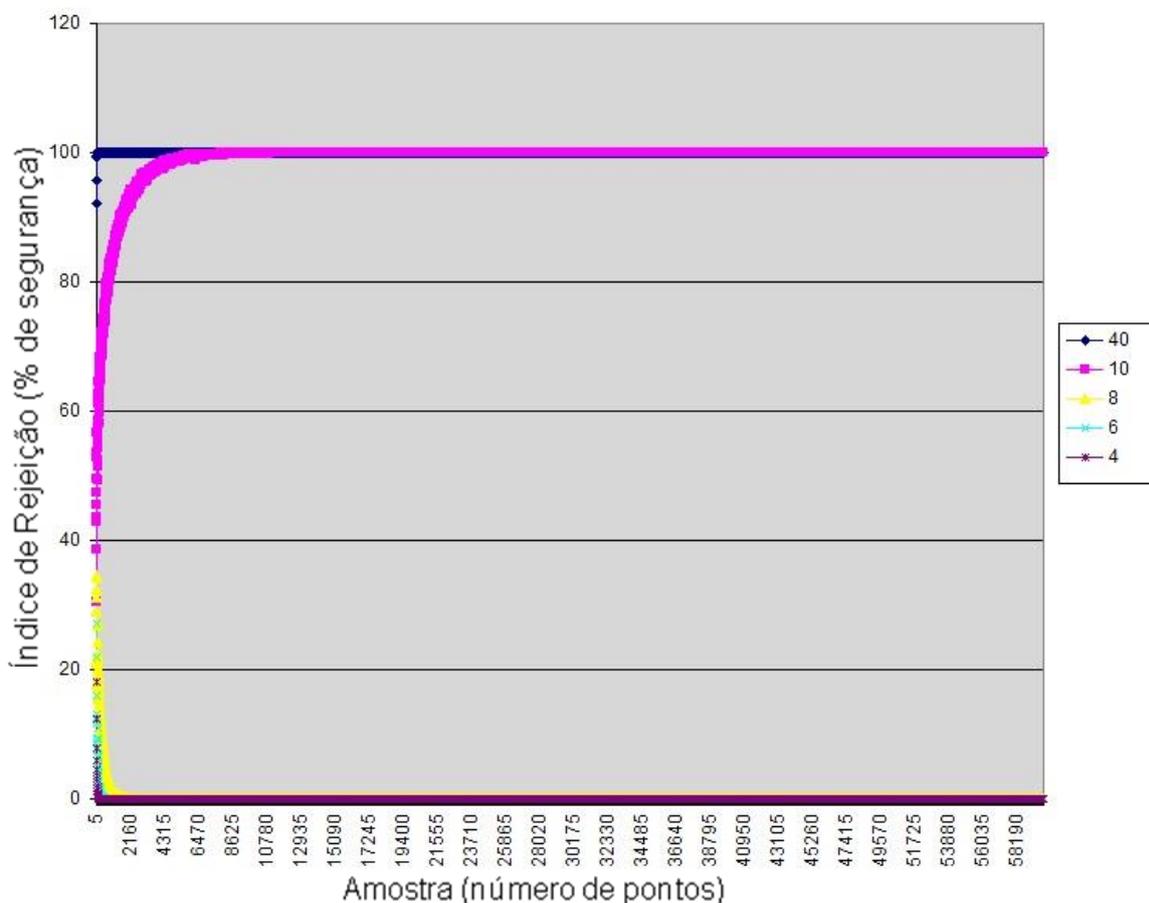


Figura 40: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos para os dados fictícios (99.676 pontos e PEC-PCD 10m).

Tabela 31: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.

	<b>40</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4 R - 10</b>
<b>5</b>	92,04	43,52	34,4	27,22	18,08
<b>10</b>	95,6	30,46	17,86	12,18	5,94
<b>15</b>	99,36	49,5	34,62	21,9	12,28
<b>20</b>	99,62	38,54	21,32	11,66	4,58
<b>25</b>	100	52,94	32,4	18,2	7,74
<b>30</b>	99,94	42,78	21,58	9,36	3,2
<b>35</b>	100	53,5	31,2	15,9	4,5
<b>40</b>	100	45,42	21,76	8,74	1,74
<b>45</b>	100	56,76	29,12	12,98	3,54
<b>50</b>	100	47,46	21,04	7,6	1,2
<b>55</b>	100	57,02	27,24	10,88	1,98
<b>60</b>	100	49,4	19,94	6,76	1,04
<b>65</b>	100	57,92	27,02	9,34	1,46
<b>70</b>	100	51,54	19,26	5,3	0,74
<b>75</b>	100	58,66	24,32	7,96	0,82
<b>80</b>	100	52,38	19,24	5,22	0,58
<b>85</b>	100	61,3	24,4	6,52	0,86
<b>90</b>	100	54,38	19,08	4,74	0,44
<b>95</b>	100	61,88	22,58	5,64	0,5
<b>100</b>	100	54,4	17,44	3,32	0,16
			•		
			•		
			•		
<b>8000</b>	100	99,18	0	0	0
<b>8005</b>	100	98,88	0	0	0
<b>8010</b>	100	98,92	0	0	0
<b>8015</b>	100	99,16	0	0	0
<b>8020</b>	100	98,74	0	0	0
<b>8025</b>	100	98,76	0	0	0
<b>8030</b>	100	98,92	0	0	0
<b>8035</b>	100	99,18	0	0	0
<b>8040</b>	100	99,06	0	0	0
<b>8045</b>	100	99,02	0	0	0
<b>8050</b>	100	99,34	0	0	0
<b>8055</b>	100	99,08	0	0	0
<b>8060</b>	100	99,18	0	0	0
<b>8065</b>	100	99,18	0	0	0
<b>8070</b>	100	99	0	0	0
<b>8075</b>	100	98,88	0	0	0
<b>8080</b>	100	98,9	0	0	0
<b>8085</b>	100	99,34	0	0	0
<b>8090</b>	100	99,06	0	0	0
<b>8095</b>	100	99,24	0	0	0
<b>8100</b>	100	98,94	0	0	0
			•		
			•		
			•		

#### 4.4.4.1 – Dados SRTM

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo SRTM com a amostragem pela população no Simula PEC 1.1, a Tabela 32 apresenta os valores da curva operacional da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados reais e a Figura 41 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos SRTM para os dados reais.

Tabela 32: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
5	-	-	-	-	-	-	-	20.35
10	-	-	-	-	-	-	-	6.85
15	-	-	-	-	-	-	-	15.3
20	-	-	-	-	-	-	-	6.65
25	-	-	-	-	-	-	-	10.4
30	-	-	-	-	-	-	-	4.05
35	-	-	-	-	-	-	-	7.35
40	-	-	-	-	-	-	-	3.7
45	-	-	-	-	-	-	-	4.9
50	-	-	-	-	-	-	-	2.75
55	-	-	-	-	-	-	-	4.1
60	-	-	-	-	-	-	-	2.35
65	-	-	-	-	-	-	-	3.2
70	-	-	-	-	-	-	-	1.7
75	-	-	-	-	-	-	-	3.2
80	-	-	-	-	-	-	-	0.8
85	-	-	-	-	-	-	-	1.55
90	-	-	-	-	-	-	-	0.75
95	-	-	-	-	-	-	-	0.85
100	-	-	-	-	-	-	-	0.65
105	-	-	-	-	-	-	-	0.75
110	-	-	-	-	-	-	-	0.55
115	-	-	-	-	-	-	-	0.85
120	-	-	-	-	-	-	-	0.2
125	-	-	-	-	-	-	-	0.25
130	-	-	-	-	-	-	-	0.25
135	-	-	-	-	-	-	-	0.2
140	-	-	-	-	-	-	-	0.25
145	-	-	-	-	-	-	-	0.35
150	-	-	-	-	-	-	-	0.1
155	-	-	-	-	-	-	-	0.2
160	-	-	-	-	-	-	-	0.1

•  
•  
•

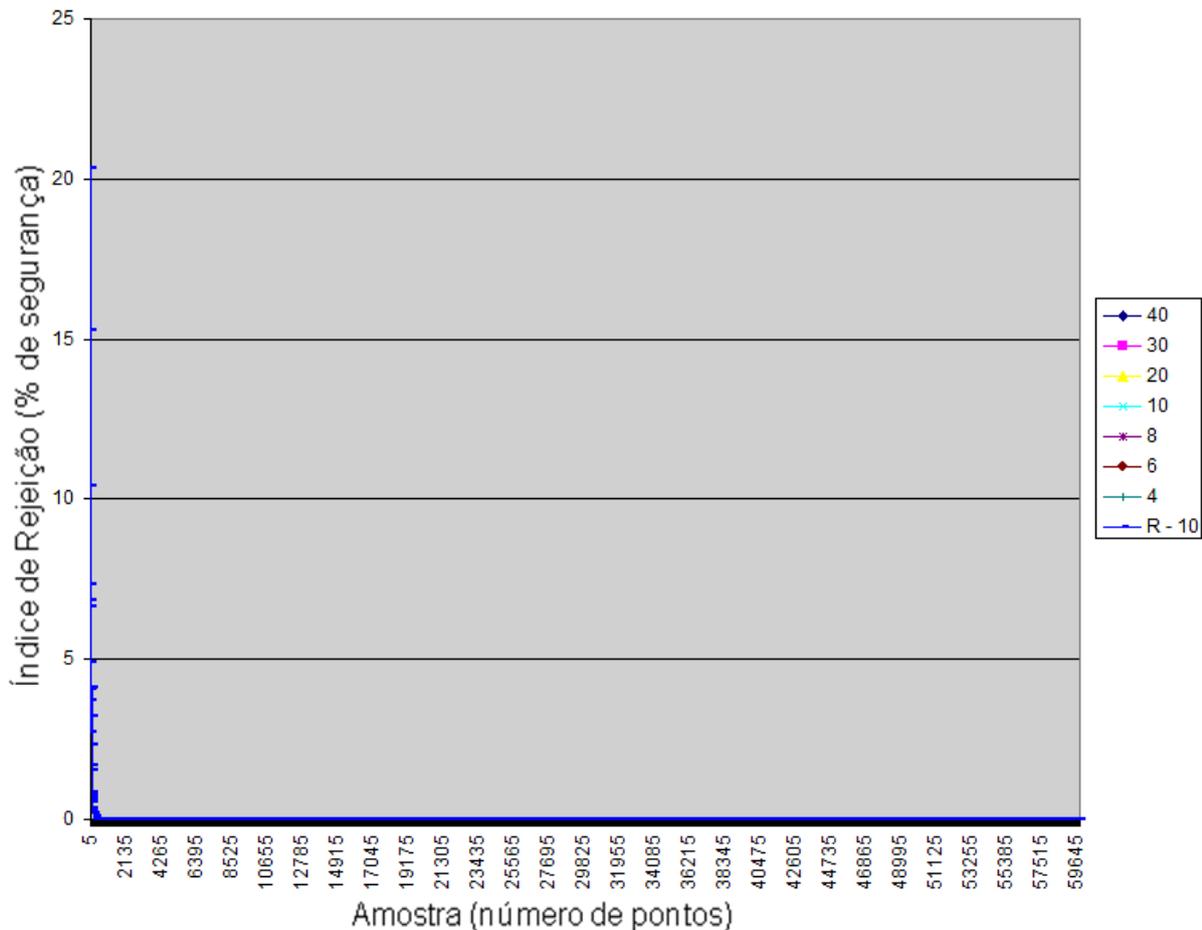


Figura 41: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos SRTM, dados reais (99676 pontos e PEC-PCD 10m).

A simulação pela população, aplicada aos dados do MDS, mostra o número de pontos necessários para avaliar o modelo com confiança de 100% na aprovação/rejeição de um determinado valor de PEC-PCD em uma determinada classificação.

Considerando que a população é uma amostragem que representa a realidade, foi verificado que, para o modelo SRTM, o número suficiente de pontos para a aprovação do PEC-PCD de 10 metros foi de 80 pontos considerando valores acima de 99% de confiança, ou seja, amostras com menos de 80 pontos podem, estatisticamente, apresentar uma falsa classificação do MDS segundo a ET-ADGV (CONCAR, 2011).

#### 4.4.4.2 – Dados TOPODATA

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo TOPODATA com a amostragem pela população no Simula PEC 1.1, a Tabela 33 apresenta os valores da curva operacional da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados reais e a Figura 42 mostra o gráfico de índice de rejeição versus número de pontos TOPODATA para os dados reais.

Tabela 33: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
5	-	-	-	-	-	-	-	20,7
10	-	-	-	-	-	-	-	7,34
15	-	-	-	-	-	-	-	15,52
20	-	-	-	-	-	-	-	5,84
25	-	-	-	-	-	-	-	10,74
30	-	-	-	-	-	-	-	5,04
35	-	-	-	-	-	-	-	8,5
40	-	-	-	-	-	-	-	3,9
45	-	-	-	-	-	-	-	4,68
50	-	-	-	-	-	-	-	2,64
55	-	-	-	-	-	-	-	3,76
60	-	-	-	-	-	-	-	1,9
65	-	-	-	-	-	-	-	2,64
70	-	-	-	-	-	-	-	1,7
75	-	-	-	-	-	-	-	1,94
80	-	-	-	-	-	-	-	1,18
85	-	-	-	-	-	-	-	1,68
90	-	-	-	-	-	-	-	0,72
95	-	-	-	-	-	-	-	1,08
100	-	-	-	-	-	-	-	0,52
105	-	-	-	-	-	-	-	1,2
110	-	-	-	-	-	-	-	0,54
115	-	-	-	-	-	-	-	0,64
120	-	-	-	-	-	-	-	0,4
125	-	-	-	-	-	-	-	0,42
130	-	-	-	-	-	-	-	0,36
135	-	-	-	-	-	-	-	0,46
140	-	-	-	-	-	-	-	0,24
145	-	-	-	-	-	-	-	0,24
150	-	-	-	-	-	-	-	0,1
155	-	-	-	-	-	-	-	0,12
160	-	-	-	-	-	-	-	0,16



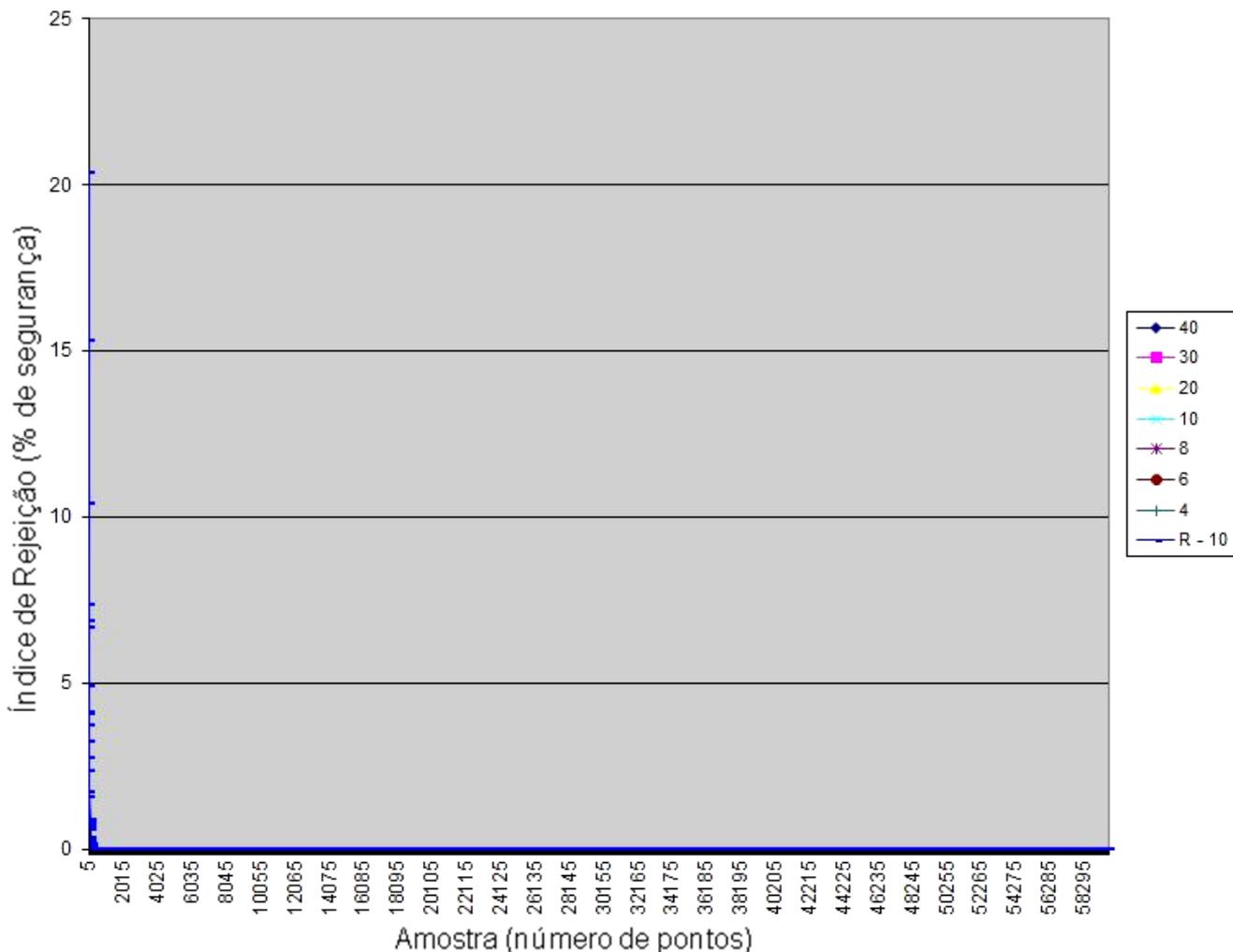


Figura 42: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos TOPODATA, dados reais (99676 pontos e PEC-PCD 10m).

Para o modelo TOPODATA, foi verificado que o número suficiente de pontos para a aprovação do PEC-PCD de 10 metros foi de 90 pontos considerando valores acima de 99% de confiança, ou seja, amostras com menos de 90 pontos podem, estatisticamente, apresentar uma falsa classificação do MDS segundo a ET-ADGV (CONCAR, 2011).

#### 4.4.4.3 – Dados ASTER GDEM

Como resultado da simulação para os dados amostrados do modelo ASTER GDEM com a amostragem pela população no Simula PEC 1.1, a Tabela 34 apresenta os valores da curva operacional da porcentagem de rejeição associada à quantidade de pontos obtidos na amostra dos dados reais e a Figura 43 mostra o

gráfico de índice de rejeição versus número de pontos ASTER GDEM para os dados reais.

Tabela 34: Valores das curvas operacionais representando a porcentagem de rejeição pela quantidade de pontos na amostra.

	40	30	20	10	8	6	4	R - 10
5	-	-	-	-	-	-	-	28.64
10	-	-	-	-	-	-	-	12.4
15	-	-	-	-	-	-	-	24.64
20	-	-	-	-	-	-	-	12.44
25	-	-	-	-	-	-	-	20.56
30	-	-	-	-	-	-	-	11.36
35	-	-	-	-	-	-	-	18.78
40	-	-	-	-	-	-	-	10.4
45	-	-	-	-	-	-	-	15
50	-	-	-	-	-	-	-	9.18
55	-	-	-	-	-	-	-	13.52
60	-	-	-	-	-	-	-	7.8
65	-	-	-	-	-	-	-	11.5
70	-	-	-	-	-	-	-	7.12
75	-	-	-	-	-	-	-	9.56
80	-	-	-	-	-	-	-	6.66
85	-	-	-	-	-	-	-	8.36
90	-	-	-	-	-	-	-	4.94
95	-	-	-	-	-	-	-	7.62
100	-	-	-	-	-	-	-	5.32
105	-	-	-	-	-	-	-	7.04
110	-	-	-	-	-	-	-	4.4
115	-	-	-	-	-	-	-	5.78
120	-	-	-	-	-	-	-	3.82
125	-	-	-	-	-	-	-	4.76
130	-	-	-	-	-	-	-	3.26
135	-	-	-	-	-	-	-	4.48
140	-	-	-	-	-	-	-	3.3
145	-	-	-	-	-	-	-	4.6
150	-	-	-	-	-	-	-	2.44
155	-	-	-	-	-	-	-	3.2
160	-	-	-	-	-	-	-	2.58
165	-	-	-	-	-	-	-	3.5
170	-	-	-	-	-	-	-	2.42
175	-	-	-	-	-	-	-	2.98
180	-	-	-	-	-	-	-	2.24
185	-	-	-	-	-	-	-	2.32
190	-	-	-	-	-	-	-	1.54
195	-	-	-	-	-	-	-	2.7
200	-	-	-	-	-	-	-	1.68
205	-	-	-	-	-	-	-	1.72
210	-	-	-	-	-	-	-	1.5
215	-	-	-	-	-	-	-	1.74

220	-	-	-	-	-	-	-	1.24
225	-	-	-	-	-	-	-	1.42
230	-	-	-	-	-	-	-	1.12
235	-	-	-	-	-	-	-	1.44
240	-	-	-	-	-	-	-	0.86
245	-	-	-	-	-	-	-	1.12
250	-	-	-	-	-	-	-	0.86
255	-	-	-	-	-	-	-	1.14
260	-	-	-	-	-	-	-	0.86
265	-	-	-	-	-	-	-	0.92
270	-	-	-	-	-	-	-	0.76
275	-	-	-	-	-	-	-	0.86
280	-	-	-	-	-	-	-	0.54
285	-	-	-	-	-	-	-	0.96
290	-	-	-	-	-	-	-	0.64
295	-	-	-	-	-	-	-	0.68
300	-	-	-	-	-	-	-	0.6

•  
•  
•

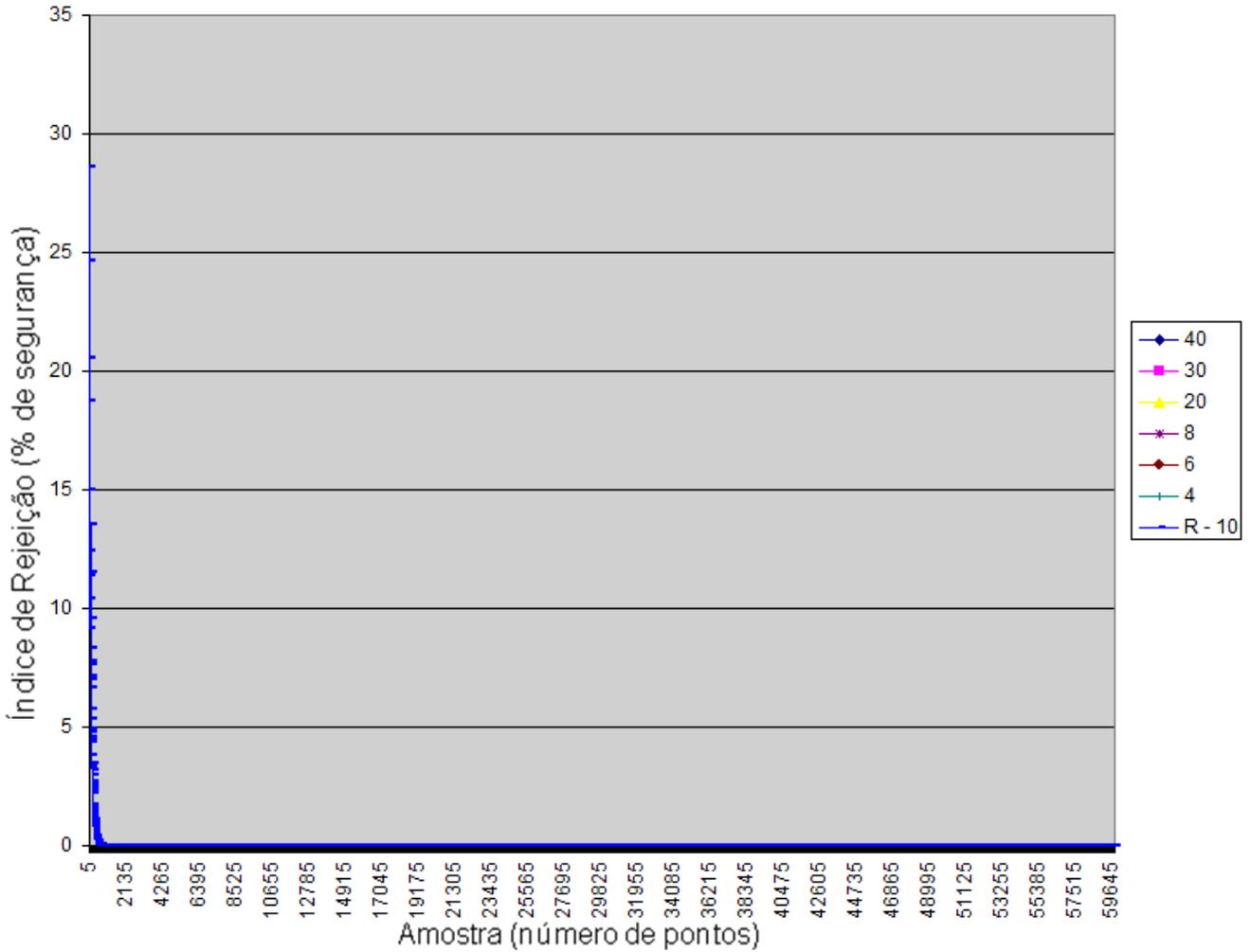


Figura 43: Gráfico de índice de rejeição vs número de pontos ASTER GDEM, dados reais (99676 pontos e PEC-PCD 10m).

Para o modelo ASTER GDEM, o número suficiente de pontos para a aprovação do PEC-PCD de 10 metros foi de 240 pontos considerando valores acima de 99% de confiança, ou seja, amostras com menos de 240 pontos podem, estatisticamente, apresentar uma falsa classificação do MDS segundo a ET-ADGV (CONCAR, 2011).

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 – Conclusões

Considerando os resultados apresentados, a pesquisa destacou a importância do tamanho e qualidade dos dados da amostra para a análise da qualidade cartográfica posicional de um MDS obtido a partir de imagens orbitais. Nos diferentes tipos de amostragens estudados foram obtidas diferentes classificações para um mesmo conjunto de dados de uma mesma região (área estudada). Ressalta-se que a ET-ADGV (CONCAR, 2011) não indica nenhum valor mínimo de tamanho de amostra por área, nem qual tipo de amostragem a ser utilizada, preconizando que ambos sejam escolhidos pelo bom senso do profissional e por fatores econômicos.

Os números representados nos resultados do teste de tendência apresentam as discrepâncias entre os planos contínuos de valores dos modelos, o que reforça a necessidade de compatibilizar os planos de informação em um mesmo referencial planimétrico e altimétrico, visto que podem estar em diferentes origens, ou seja, devem ser aplicadas as devidas conversões para compatibilizar os sistemas de referência e datums antes de qualquer análise comparativa.

Pela análise do teste de tendência, verificou-se que a amostragem sistemática apresentou resultados bem semelhantes aos da amostragem pela população, chegando à diferença de centímetros quanto ao erro sistemático entre as amostras, ou seja, pode-se concluir que o erro sistemático dos MDSs estudados pode ser calculado através da amostragem sistemática. Na prática, entretanto, ao analisar os valores dos erros sistemáticos contidos nas Tabelas 11, 12, 13 e 14 (págs. 70 e 71), pode-se afirmar que o erro sistemático pode ser corrigido por qualquer tipo de amostragem abordada na presente pesquisa, já que a maior diferença encontrada, com relação à população, foi de 1,29 metros, valor muito pequeno considerando que os MDSs provenientes de imagens orbitais, atenderiam plenamente a escala 1:50.000, classe B, com erro padrão de 6,66 metros na nova norma (CONCAR,

2011). Assim, a amostragem dirigida representa a melhor opção para a correção, já que é a mais econômica devido à redução de custos de levantamento.

Num primeiro estudo analisando as Tabelas 15, 16 e 17 (pág. 72 e 73), os dados referentes à amostragem sistemática podem ser apresentados como uma população apenas para o caso do ASTER GDEM, pois o modelo manteve a classificação do PEC-PCD de acordo com a norma Brasileira (CONCAR, 2011). Já no caso do SRTM e TOPODATA faz-se necessária a realização de mais testes, pois na amostragem sistemática, apresentaram resultados mais otimistas que os dados reais.

Com o desenvolvimento da pesquisa foi possível concluir que as tabelas apresentadas na ET-ADGV (CONCAR, 2011) apresentam valores de difícil entendimento quanto ao melhor PEC-PCD alcançado, dificultando a identificação da classe na qual se enquadra o modelo.

A pesquisa também destacou a importância do processo de simulação para a confiabilidade da classificação de MDS. A partir da simulação foi possível identificar o número necessário de pontos a serem extraídos na amostragem de forma que a análise de qualidade do modelo se concretize com confiabilidade, evitando os riscos do produtor em rejeitar um modelo de boa qualidade e do usuário em aceitar um modelo de qualidade inferior à solicitada.

No item 4.3 (pág. 73) são apresentados os resultados dos testes de simulação para quatro diferentes tipos de amostragens analisando os riscos do usuário e os riscos do produtor. Em todas as análises verificou-se que para cada tipo de amostragem, com certo número amostral, existe a probabilidade de se ter uma falsa classificação do MDS, considerando o número de pontos (tamanho amostral) que estão abaixo do necessário, ou seja, o número de pontos que garante uma confiabilidade de 100% de aceitação do PEC-PCD abordado.

Os resultados apresentados para amostragem dirigida (modelos TOPODATA e ASTER GDEM) e amostragem por perfis transversais (modelos SRTM e ASTER GDEM) mostraram que o número de pontos não foi suficiente para se obter 100% de confiança, relacionada aos índices de aceitação ou rejeição do PEC-PCD.

Considerando os dados da população como representação real dos MDS, pelo fato da superabundância de pontos que se tem em sua composição amostral, a análise do número de pontos suficientes para a aprovação de 99% do PEC-PCD de 10 metros (classificação real: classe B; 1:50.000, segundo a ET-ADGV) foi de 80 pontos para o modelo SRTM, 90 para o modelo TOPODATA e 240 pontos para o ASTER GDEM.

Os tipos de amostragem que melhor se adequou à classificação real dos modelos foram as amostragens do tipo dirigida e por perfis transversais, onde, dos três diferentes tipos de MDS abordados, dois apresentaram a classificação do PEC-PCD de acordo com a classificação referentes à população.

Os riscos do produtor e do usuário estão ligados de forma direta ao tipo de amostragem utilizada para se classificar um MDS, ou seja, um MDS pode apresentar diferentes classificações dependendo do tipo de amostragem utilizado como base na análise de qualidade, isso independente da qualidade dos pontos de controle.

## **5.2 – Recomendações**

Para uma melhor definição do tamanho da amostra ( $n$ ) e que tipo de amostragem representa uma melhor confiabilidade quanto à classificação da ET-ADGV (CONCAR, 2011), faz-se necessária a análise de uma área maior e com mais variações no terreno, onde a superfície do MDS apresente uma maior heterogeneidade altimétrica, incluindo também a análise por simulação dos dados da amostra. Isso torna-se possível com a técnica computacional de “cluster” (que exigem um conjunto de computadores processando e maior custo) ou com a evolução do processamento computacional para uma maior quantidade de dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, I.R.A. **O Uso de Técnicas de Sensoriamento Remoto na Identificação de Formas na Região de Porto Rico, Planície de Inundação do Alto Rio Paraná, MS/PR.** 73p. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, MARINGÁ, PR. 2008.

ARIZA, F.J. et. al. Uso de la simulación en Cartografía: conceptos básicos y aplicaciones. **Mapping – Revista Internacional de Ciencias de la Tierra.** Ed.: Revista Mapping S.L., Madrid (Espanha) n. 71, jul/ago. 2001.

ARIZA, F. J. **Calidad en la Producción Cartográfica.** 1. ed. Madrid, Espanha: Editora Rama, 2002a. 389p. ISBN 84-7897-524-1.

ARIZA, F.J. **Trabajo de investigación: Curva Operativa para el control de Calidad Posicional en Cartografía.** Concurso para la provisión de una plaza de Catedrático de Universidad. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Jun. 2002b, Universidad de Jáen, Jaén.

ARIZA, F. J.; GARCIA, J. L.; AMOR, P. **Casos prácticos de calidad en la producción cartográfica.** 1 ed.: La Paz, Torre donjimeno, 2004. 388p.

ARONOFF, S. **Geographics information systems: A management perspective.** WDL Publications. Otawwa – Canadá. 1995. 58p.

ASTER GDEM. Disponível em: < <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>>.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. **Normas Técnicas da Cartografia Nacional.** Brasília, 1984. Disponível em: <<http://www.concar.gov.br/detalheDocumentos.aspx?cod=8>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

CAMARGO, F.F.; FLOZENZANO, T.G.; ALMEIDA, C.M.; OLIVEIRA, C.G. Abordagens cognitivas para a identificação de unidades geomorfológicas por meio de dados ASTER/Terra. **Revista Brasileira de Geociências**, 39(2): 276-288, junho de 2009a.

CAMARGO, F.F.; FLOZENZANO, T.G.; ALMEIDA, C.M.; OLIVEIRA, C.G. Acurácia Posicional de MDE ASTER/Terra em Área Montanhosa. **Revista Geomática**, 4 (1):12 - 24, dezembro de 2009b.

CINTRA, J. P. **Modelagem Digital de Terrenos.** Tese [doutorado]. EPUSP, São Paulo, 1985.

CONCAR; EXÉRCITO BRASILEIRO – CONCAR-EB. **Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais.** Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. Brasil. 2011. 2.ed.

CRUZ, M. C.; BARROS, R.S.; RABACO, L.M.L.; FAGUNDES, F.O. **Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR.** In.: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR,

Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE, p.5463. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1096.pdf>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

CUARTERO, A. **Analísis de modelos digitales de elevaciones (MDE) generados com imágenes SPOT-HRV y Terra ASTER**. 2003. 229p. Tese (Doutorado). Universidad de Jaén. Jaén, Espanha, 2003.

DUARTE, G.G.F.; ASSAD, M.M.L. **Avaliação de MDE obtidos por meio de SRTM**. In.: Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 4849-4855. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.16.00.19?languagebutton=pt-BR>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

DUREN, R.; WONG, 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 Aquisition, Tracking and Pointing**.XII Proceedings of SPIE, Acquisition, Tracking, and Pointing XII, v. 3365, p.51-60.1998.

ECKERT, S.; KELLENBERGER, T; ITTEN, K.Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from aster data in mountainous terrain. **International Journal Of Remote Sensing**, 2005, Vol.26(9), pp.1943-1957

ENE, L. T.; NAESSET, E.; GOBAKKEN, T.; GREGOIRE, T.; STAHL, G.; NELSON, R. Assessing the accuracy of regional LiDAR-based biomass estimation using a simulation approach. **Remote Sensing of Environment**.14 de Abril de 2012, v.123, p. 579-592.

FUCKNER, M.A.; FLORENZANO, T.G.; MORAES, E.C. **Avaliação altimétrica de modelos digitais de elevação extraídos de imagens ASTER em áreas com configuração topográfica distinta**. In.: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 683-690. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.21.49/doc/683-690.pdf>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

GEMAEL,C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**, Curitiba: Ed. UFPR, 1994.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Adjustment computations: spatial data analysis**. 4ª edição, editora Jonh Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos da América. 2006. 611p.

GOUVÊA, J.R.F.; VALLADARES, G.S.; OSHIRO, O.T.; MANGABEIRA, J.A.C. **Comparação dos modelos digitais de elevação gerados com dados SRTM e cartas IBGE na escala 1:250.000 na região da bacia do Camanducaia no Estado de São Paulo**. In.: Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2191-2193. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.18.12.09/doc/2191.pdf>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

HALL, O.; FALORNI, G.; BRAS. R. L. Characterization and quantification of data voids in the shuttle radar topography mission data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing letters**, v.2, n.2, 2005. Disponível em< [http://www.geo.unizh.ch/~stgruber/teaching/eum/mod\\_srtm/ieee05\\_hall\\_srtm.pdf](http://www.geo.unizh.ch/~stgruber/teaching/eum/mod_srtm/ieee05_hall_srtm.pdf)>.Acesso em Fevereiro de 2013.

HANSEN, B. L.; GHARE, P. M. **Control de calidad: teoría y aplicaciones**. Madrid: **Diaz de Santos**, cop. 1990. 549 p. ISBN: 84-87189-31-8.

HODGSON, M.E.; JENSEN, J.R.; SCHMIDT, L.; SCHILL, S.; DAVIS, B. An evaluation of LIDAR and IFSAR derived digital elevation model sin leaf on conditions with USGS level 1 and level 2 DEMs. **Remote Sensing of Environment**, v.84, p.295-308,2003.

HÖHLE, J. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 2009,v. 64, p.398 - 406.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. R.PR.nº 01/2005 – Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro, 2005.

IDOETA, I. V. **Metodologia de elaboração automatizada de modelo digital de elevação e ortofoto em média e pequena escala**. 2007.Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,São Paulo: LTG/PTR/EPUSP, 2007.

ISO 2859-1. **Sampling procedures for inspection by attributes - Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection**. International Organization for Standardization 2859-1. Second edition. Switzerland, 15 nov. 1999. 87p.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p. ISBN 978-85-60507-06-1.2009.

JOLY, F. **A Cartografia**. 14.ed. Campinas - SP: Editora Papirus, 2011, 112 p.

JPL. **Jet Propulsion Laboratory – Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

KOCH, A.; HEIPKE, C.; LOHNANN, P. Analysis of SRTM DTM – Methodology and Practical Results. **ISPRS Commission– IV Symposium**. Ottawa. 2002. Disponível em:<<http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part4/pdfpapers/353.pdf>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. the then Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press: CRC PRESS, 2004. 344 p. ISBN: 0415324629,2004.

LI, Z. A comparative-study of the accuracy of digital terrain models (DTMS) based on various data models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 1994, v. 49 (1), p.2-11.

MADSEN,S.N.; ZEBKER,H.A.; MARTIN,J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.31, n.1, p.246 - 256,1993. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=210464&userType=inst>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

MELO, I.D.F. **Análise de Imagens ASTER como subsídio para mapeamentos na Interface Continente/Oceano**. 2003. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco - PE; Recife; 2003.

MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In: **Proceedings of the Technical Congress on Surveying and Mapping** (1), 222-231, 1982.

MEYER, W. **Concepts of mathematical modeling**. McGraw-Hill Book Company, New York, 1985. 440p.

MILLER, C. L., LAFLAMME, R. A. The Digital Terrain Model – Theory and Application. In **Photogrammetric Engineering**. v. 24, n. 3, p. 433-442. 1958.

MIL-STD-105E - **SAMPLING PROCEDURES AND TABLES FOR INSPECTION BY ATTRIBUTES**. Washington, USA. 10 de Outubro de 1989. 72p.

MONICO, J.F.M.; DAL PÓZ, A.P.; GALO, M.; SANTOS, M.C.; OLIVEIRA, L.C. Acúrcia e Precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**. séc. Comunicações, Curitiba, vol. 15, nº 3, p.469-483, Julio – setembro , 2009.

MUKHERJEE, S.; JOSHI, P.K.; MUKHERJEE, S.; GHOSH, A.; GARG, R. D.; MUKHOPADHYAY, A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. 2013, v.21 (2013): p. 205 - 217,

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. Ed. 5: John Willy & Sons, Inc, New York, 2005. 756pp. ISBN 0-471-65631-3.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ª Ed. viçosa: Editora UFV, 2005. 320p.

NERO, M. A. **Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional**. 2005. Tese (Doutorado). São Paulo: LTG/PTR/EPUSP, 2005.

NERO, M. A. **Metodologias avançadas no controle de qualidade posicional de bases cartográficas**. 2006. (Relatório de Pós-doutorado) São Paulo: PTR/POLI/EPUSP, 2006.

NERO, M. A. ; CINTRA, J.P. **Considerações sobre o tamanho da amostra no controle de qualidade em mapeamentos com diferentes níveis de qualidade**. In: Anais do XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2005, Macaé (RJ). Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2005. vol. XXII. 13p.

NERO, M. A.; MARDEGAN, D. ; PIRES, J.E. **Simula PEC 1.1**. 2006.

NEVES, A. L. N. **Avaliação de qualidade cartográfica e extração de bordas de objetos não pertencentes ao terreno em produtos gerados pelo sistema de varredura a laser aerotransportado**. 2009. Dissertação (Mestrado). São Paulo: LTG/PTR/EPUSP, 2009.

NOGUEIRA JR., J. B. **Controle de qualidade de produtos cartográficos: uma proposta metodológica**. 147p. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica) - UNESP, Campus Presidente Prudente, Presidente Prudente - SP. 2003.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 3ª Ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher, 2008. 388p.

OLIVEIRA, L. F. **Análise de Modelos Digitais de Superfície gerados a partir de imagens do sensor PRISM/ALOS**. 2011, 184 f. Dissertação (Mestrado). Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2011.

OKSANEN, J. **Digital elevation model error in terrain analysis**. 2006. 51 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Ciência, Universidade de Helsinki, Helsinki, 2006.

ÖSTMAN, A. **The Specification and Evaluation of Spatial Data Quality**, In: Proceedings of 18th International Cartographic Conference, 1997, Stokolm, Sweden, p. 836-847, 1997.

PAIVA, R.G.; SANTOS, R.M.; GOMES, M.F.; GONÇALVES JUNIOR, F.A. **A Utilização de Dados SRTM para Análises Ambientais: Elaboração de Mapas de Relevo do Município de Maringá – Paraná – Brasil**. 2009. Disponível em: <[http://egal2009.easyplanners.info/area04/4054\\_Garcia\\_Paiva\\_Raniere.pdf](http://egal2009.easyplanners.info/area04/4054_Garcia_Paiva_Raniere.pdf)>. Acesso em Fevereiro de 2013.

PARMA, G.C.P. **Processamento de imagem ASTER para obtenção do MDE e da imagem ortorretificada do Município de Palhoça, SC, Brasil**. In.: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 de abril, 2007, INPE, p. 6019-6026. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.23.57?languagebutton=pt-BR>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

PEREIRA, T. A. J.; NERO, M. A. **Análise de normas de controle de qualidade posicional em cartografia ao redor do mundo: exemplos atuais de alguns países**. In.: Anais do IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife - PE, Brasil, 06 - 09 de Maio, 2012, UFPE, p 001 - 009. Disponível em: <[http://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/artigos/Todos\\_Artigos/085\\_2.pdf](http://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/artigos/Todos_Artigos/085_2.pdf)>. Acesso em fevereiro de 2013.

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

RAO, K. S. (2004). **Validation of Digital Elevation Model Derived from Shuttle Radar Topography Mission using GPS Field measurements**. Site: <[www.gisdevelopment.net/tecnology/gps/ma03033abs.htm](http://www.gisdevelopment.net/tecnology/gps/ma03033abs.htm)>. Acesso em Fevereiro de 2013.

RIBEIRO FILHO, J.R.; CRUZ, C.B.M.; REIS, R.B. **Aplicação do Modelo Digital De Elevação do SRTM na geração de mapas fisiográficos do relevo**. In.: Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3057-3064. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.16.00.20.01/doc/3057-3064.pdf>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C.H.; BELZ, J.E. 2006. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 2006, v.72, p.249-260.

RODRIGUES, D.D. **Topografia: Planimetria para engenheiros agrimensores e cartógrafos**. Apostila. Universidade Federal de Viçosa. 2008

RODRIGUES, T. L.; DE BIASI, P.; SOUZA, R.F. **Avaliação da Adequação dos Produtos ASTER GDEM no Auxílio ao Mapeamento Sistemático Brasileiro**. In.: Anais do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, Brasil, 27-30 de Julho de 2010, UFPE, p. 001 – 005. Disponível em: <[http://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO\\_CD/artigos/CartografiaeSIG/Cartografia/A\\_17.pdf](http://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/CartografiaeSIG/Cartografia/A_17.pdf)>. Acesso em Fevereiro de 2013.

RUIZ, P.C.; LÓPEZ, R.; OCERIN, J.M.C.; ARIZA, F.J. Uso de la simulación en Cartografía: conceptos básicos y aplicaciones. **Mapping – Revista Internacional de Ciencias de la Tierra**. Ed.: Revista Mapping S.L., Madrid (Espanha) n. 71, jul/ago. 2001.

SAHOLIARILIVA, N. G. Techniques for quantifying the accuracy of gridded elevation models and for mapping uncertainty in digital terrain analysis. **Progress in Physical Geography**., v.35( 6), p.739-764, 2011.

SANTOS, A. P. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com uso da estatística espacial**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2010. 110p. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2010.

SANTOS, A. R.; PARADELA, W.R.; VENEZIANI, P.; MORAIS, M.C. A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: uma avaliação geológica na Província Mineral de Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 29, n. 4, p. 627-632, 1999.

SIMÕES, M. G. **Modeladores digitais de terreno em sistemas de informação geográfica**. 1993. 153p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ.1993.

SOUSA, C.J.S.; SILVA, M.M.; COSTA, K.S.P. **Análise do Modelo Numérico de Terreno do Radar SRTM na Área da Folha SA.23-Z-D-I, Urbano Santos – MA**. XIII Simpósio Nacional de Geografia Física Aplicada, 2009. Viçosa-MG. UFV - Universidade Federal de Viçosa, 2009. Disponível em: <[http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos\\_completos/eixo1/020.pdf](http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo1/020.pdf)>. Acesso em Fevereiro de 2013.

THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO - 2859-1: Sampling procedures for inspection by attributes Part 1 : Sampling plan indexed by acceptable quality level (AQL) for lot-by-lot inspection**. Switzerland, Ed. 2.0. 01 Novembro de 1999. 87p.

USGS - [https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access](https://lpdaac.usgs.gov/data_access). Acesso em Fevereiro de 2013.

VALERIANO, M. M. **Topodata - banco de dados geomorfométricos locais do Brasil**. 2008. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/topodata/data/grd/>>. Acesso em: Fevereiro de 2013.

VAN ZYL, J.J. **The shuttle radar topography mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography**. ActaAstronautica. v. 48 n° 5 – 12. pp. 559-564. 2001.

VEIGA, L. A. K. . **Cálculo de declividades em Modelos Digitais do Terreno**. 1996, Dissertação (Mestrado). EPUSP, São Paulo.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry**: With Applications in GIS. 3rd ed. McGraw-Hill, 608p., 2000.

WONG, D.W.S., LEE, J. **Statistical analysis of geographic information with ArcView GIS and ArcGIS**. Editora John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2005. 464p.

ZOCOLOTTI FILHO, C.A.; CENTENO, J.A.S. **Análise da Qualidade de Informações Altimétricas Geradas pelo Sistema ASTER**. In.: Anais do SIMGEO - Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, Brasil, 01-03 Setembro, 2004, UFPE. Disponível em: < <http://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriamento%20Remoto/Artigos/f004.pdf>>. Acesso em Fevereiro de 2013.

ZHOU et. al. Comparison and validation of different DEM data derived from InSAR. **Procedia Environmental Sciences**, 12(1): 590 –597, 2012.

# ANEXOS

- ANEXO 1 – Dados da amostragem dirigida.
- ANEXO 2 – Dados da amostragem por perfis transversais aleatórios.
- ANEXO 3 – Dados da amostragem sistemática.
- ANEXO 4 – Dados da população.
- ANEXO 5 – Dados da população reduzida.
- ANEXO 6 – Pontos GPS e ondulação geoidal.
- ANEXO 7 – Dados da simulação.
- ANEXO 8 – Norma técnica (ET-ADGV).
- ANEXO 9 – Tabelas estatísticas.

**Observação:** *As tabelas a seguir apresentam uma pequena parte dos dados utilizados. Os anexos listados acima com as tabelas de dados completas encontram-se no CD que segue como parte da dissertação.*