

Cesar Augusto de Freitas Lima

**CORREÇÕES GEOMÉTRICAS PARA A UTILIZAÇÃO DE
IMAGENS EM PERÍCIAS CRIMINAIS AMBIENTAIS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Perícias Criminais
Ambientais da Universidade Federal
de Santa Catarina para a obtenção do
Grau de mestre em Perícias Criminais
Ambientais
Orientador: Prof. Dr. Carlos Loch

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Lima, Cesar Augusto de Freitas
CORREÇÕES GEOMÉTRICAS PARA A UTILIZAÇÃO DE IMAGENS
EM PERÍCIAS CRIMINAIS AMBIENTAIS / Cesar Augusto de
Freitas Lima ; orientador, Carlos Loch -
Florianópolis, SC, 2013.
144 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Biológicas.
Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais
Ambientais.

Inclui referências

1. Perícias Criminais Ambientais. 2. Perícias Criminais Ambientais. 3. Ecologia. I. Loch, Carlos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais. III. Título.

À Marilaine, Nicole e Louise.

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, por permitir que passemos por aqui.

A minha esposa Marilaine, parceira amorosa e dedicada de toda uma vida.

As minhas filhas, Nicole e Louise: vocês são o maior presente que Deus me deu!

A meus pais, pelo exemplo de honestidade, integridade e dignidade. A meus irmãos e demais parentes, que mesmo à distância, vivem no meu coração.

Ao professor Carlos Loch, pela paciência e incentivo durante a orientação. À professora Cristina Nunes, pelo precioso auxílio com a análise estatística.

Aos participantes da banca examinadora, professores doutores Álvaro José Back e Francisco Henrique de Oliveira, e ao PCF doutor Régis Signor, por compartilharem seus conhecimentos e experiências.

Aos demais professores do Curso, em especial, Danilo Willhelm Filho, Paula Brügger, Cátia Carvalho e Daniel Falkenberg, e aos colegas da pioneira turma do Mestrado Profissional em Perícias Criminais Ambientais.

Aos PCFs Alexandre Raupp pelo auxílio inestimável nos trabalhos de campo, Marcos Kleber R. Félix e Romão Trauczynski, pela grande ajuda no laboratório. Ao primo Luciano, pelo apoio no “terceiro retorno à Imbituba”.

Aos colegas do Departamento de Polícia Federal, em especial aos PCFs do Grupo de Perícias em Engenharia e Meio Ambiente, Régis, Estevão e Laybauer, pelo companheirismo na lida diária.

Ao chefe do Setor Técnico-Científico da Polícia Federal em Santa Catarina, PCF Belarmino, e ao DPF Ademar Stocker, ex-Superintendente Regional, que incentivaram e apoiaram nosso projeto pioneiro.

Ao Gerente Regional de Recursos Minerais da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina, José Emídio Trilha Ribeiro Júnior, e ao Coordenador de Dados Geoespaciais da Diretoria de Recursos Hídricos da mesma Secretaria, Thobias Furlanetti, por disponibilizarem a base cartográfica virtual (Dados Geoespaciais de Referência) do estado.

Algumas pessoas estão mais certas de tudo do que eu de qualquer coisa.

(Robert Rubin, 2003)

RESUMO

A atuação do Departamento de Polícia Federal no combate aos crimes contra o meio ambiente é relativamente recente, mas vem ganhando importância crescente nos últimos anos. Como a grande maioria desses crimes deixa vestígios, a participação da Perícia Criminal Federal é elemento indispensável na persecução penal. Entre as ferramentas e tecnologias mais utilizadas pela perícia para desincumbir-se desse mister, destacam-se hoje o Geoprocessamento e geotecnologias associadas, como Sensoriamento Remoto, Cartografia e Sistemas de Posicionamento Global. Nesse contexto, o uso de imagens orbitais de alta e muito alta resolução se destaca, uma vez que a casuística da perícia federal ambiental em Santa Catarina mostra que a maioria dos crimes concentra-se em locais com estrutura fundiária característica (pequenas áreas, quase sempre de alto valor imobiliário). Além disso, imagens orbitais apresentam custo quase sempre competitivo em relação a outras fontes de informação geoespacial e a possibilidade de atualização constante. No entanto, o uso indiscriminado dessas tecnologias deve ser evitado, pois imagens sem o tratamento adequado possuem distorções que podem inviabilizar sua utilização cartográfica e pericial. Assim sendo, o presente estudo exemplifica o potencial de extração de informações de produtos gerados após processamento de imagens orbitais para realização das perícias. Avalia também a qualidade posicional de imagem orbital GeoEye-1 submetida a dois níveis de correção geométrica (Georreferenciamento Expedito – 2D e Ortorectificação – 3D), bem como de ortofoto gerada a partir do levantamento aerofotogramétrico realizado sob demanda do estado de Santa Catarina entre os anos de 2010-2011, usada como base para comparação por sua maior resolução espacial. Conforme avaliação por proporção amostral simples, o Georreferenciamento Expedito gerou um produto que atende os critérios da Classe C na escala 1:35.000 do PEC, enquanto a Ortorectificação, Classe A na escala 1:5.000. A ortofoto foi enquadrada na Classe A para a escala 1:2.000, segundo o mesmo Padrão de Exatidão Cartográfica.

Palavras-chave: Perícia criminal. Sensoriamento remoto. Correção geométrica.

ABSTRACT

The performance of the Federal Police Department fighting environmental crimes is relatively recent, but its importance has been increased in the last years. As most of these crimes leave vestiges behind, the participation of Federal Forensics of Criminal Cases is an indispensable element at the criminal persecution. Among the most used by Forensics or Criminal Cases tools and technologies to do that job, nowadays the Geo-processing and associated geo-technologies, as Remote Sensing, Cartography and Global Positioning Systems, stand out. In this context, the use of orbital images, with high or very-high-resolution stands out, as the case basis of the federal forensics of environment in Santa Catarina shows that most of the crimes happen in places with a characteristic land structure (small areas, almost always with a high estate value). Furthermore, orbital images have competitive costs, comparing to other sources of geospatial information and the possibility of constant actualization. Although, the indiscriminate use of these technologies must be avoided, because images without the adequate treatment have distortions that may make its forensic and cartographic use impossible. Therefore, the present study exemplifies the potential of information extraction of products generated after the processing of orbital images of forensics accomplishment. It also evaluates the positional quality of Geoeye-1 orbital image submitted to two geometric correction levels (Georeferencing 2D and Orthorectification 3D), as well as orthopicture generated by the aerophotogrametric made by a State of Santa Catarina's demand between the years of 2010-2011, used as basis for the comparison because of its bigger spatial resolution. According to evaluation by simple sampling proportion, the Georeferencing generated a product that satisfies the criterions of the C Class at the 1:35.000 scale of the PEC, while the Orthorectification, A Class at the 1:5.000 scale. The ortho-picture was framed in the A Class for the 1:2.000 scale, according to the same Pattern of Cartographic Accuracy.

Keywords: Forensics for Criminal Cases. Remote Sensing. Geometric Correction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação do efeito visual em imagem com diferentes níveis de cinza (e resoluções radiométricas).....	35
Figura 2: Efeito visual em imagens com diferentes resoluções espaciais.....	36
Figura 3: Reprodução esquemática do satélite GeoEye-1.....	39
Figura 4: Distorção panorâmica (variação do tamanho do pixel em imagens inclinadas em relação ao nadir).....	42
Figura 5: Distorção geométrica devida ao efeito de rotação da Terra (<i>Skew</i>).....	43
Figura 6: Distorções geométricas no imageamento causadas por variações de altitude, velocidade e atitude do satélite.....	43
Figura 7: Distorção devida ao relevo. O ponto “P” da imagem bruta deveria estar em “c”. A diferença entre “P” e “c” é a distorção.....	44
Figura 8: Solução independente do terreno para geração dos coeficientes no Modelo Funcional Racional (RFM).....	52
Figura 9: A ortorretificação transforma a perspectiva central, oriunda da visada cônica do sensor, em perspectiva ortogonal.....	56
Figura 10: Resultado da ortorretificação de uma imagem bruta (visada cônica) pela projeção ortogonal sobre um plano cartográfico definido.....	57
Figura 11: Representação esquemática da geração de ortoimagens com o uso de um Modelo Digital de Elevação.....	58
Figura 12: Componentes básicos do processamento digital de imagens.....	60
Figura 13: Estrutura de dados do tipo grade regular.....	64
Figura 14: Estrutura de dados do tipo malha triangular.....	65
Figura 15: Precisão para diferentes técnicas de posicionamento conforme o comprimento das linhas de base.....	67
Figura 16: Ilustração dos conceitos de acurácia e precisão.....	69
Figura 17: Equema com as etapas desta pesquisa.....	82
Figura 18: Área objeto de estudo, no contexto do estado de Santa Catarina (sem escala).....	84
Figura 19: Exemplo de ponto coletado na ortofoto (“Morro antenas NE”).....	86
Figura 20: Mesmo ponto da Figura 14, no momento da coleta a campo.....	86
Figura 21: Atribuição de sistema de projeção e datum ao arquivo referente ao MDE (procedimentos iniciais).....	87

Figura 22: Atribuição de sistema de projeção e datum ao arquivo referente ao MDE (procedimentos finais).....	88
Figura 23: Comparação entre imagem após a fusão de bandas, sem uso de filtro (esquerda), após uso de filtro linear 2% (centro) e filtro gaussiano (direita).....	89
Figura 24: Pontos utilizados para o Georreferenciamento expedito (transformação polinomial 2D) da banda pancromática da imagem GeoEye-1.....	90
Figura 25: Procedimentos iniciais de ortorretificação no ENVI 4.6.....	91
Figura 26: Procedimentos intermediários de ortorretificação no ENVI 4.6.....	92
Figura 27: Procedimentos intermediários de ortorretificação no ENVI 4.6.....	92
Figura 28: Procedimentos intermediários de ortorretificação no ENVI 4.6.....	93
Figura 29: Procedimentos finais de ortorretificação no ENVI 4.6.....	94
Figura 30: Distribuição dos 23 Pontos de Teste na região estudada (Imbituba/SC), sobre ortofoto digital, cedida pelo estado de Santa Catarina.....	97
Figura 31: Diferenças entre coordenadas de dois Pontos de Teste e seus Homólogos na imagem GeoEye-1 (banda pancromática) sem correção.....	100
Figura 32: Distribuição dos 22 Pontos de Teste na região estudada (Imbituba/SC), sobre imagem corrigida por Georreferenciamento expedito.....	101
Figura 33: Distribuição dos 22 Pontos de Teste na região estudada (Imbituba/SC), sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada, adquirida em out/2011.....	104
Figura 34: Locais de comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada.....	106
Figura 35: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada (local “SUL” na Figura 34).....	107
Figura 36: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada (local “MORRO ANTENAS” na Fig. 34).....	107
Figura 37: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada (local “REPRESA”, na Fig. 34).....	108

Figura 38: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada (local “MINERAÇÃO” na Fig. 34).....	108
Figura 39: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada (local “CASAS NORTE” na Fig. 34).....	109
Figura 40: APP da Lagoa da Bomba (delimitada em SIG sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011) e local examinado.....	112
Figura 41: Detalhe do muro em APP da lagoa, medido a campo e remotamente, sobre ortofoto proveniente do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011.....	112
Figura 42: APP de Restinga (delimitada em SIG sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011) e local examinado.....	113
Figura 43: Detalhe da pista leste do loteamento, medida a campo e remotamente, sobre ortofoto (levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011).....	114
Figura 44: APP de curso d’água (delimitada em SIG sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011) e local examinado.....	115
Figura 45: Detalhe do muro em APP de curso d’água, medido a campo e remotamente, sobre ortofoto do levantamento aerofotogramétrico 2010-2011.....	115
Figura 46: Edificações no canto da Praia da Vila, em ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011.....	116
Figura 47: Detalhe de dois barracos, medidos apenas a campo, em ortofoto do levantamento aerofotogramétrico 2010-2011.....	117
Figura 48: LTM e LPM-1831, em diferentes sistemas de referência, sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico do estado.....	118
Figura 49: APP de curso d’água (delimitada em SIG sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011) e estrutura medida.....	119
Figura 50: Locais onde foram efetuadas medições <i>in loco</i> com trena eletrônica, sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico 2010-2011.	120
Figura 51: Análise exploratória de MR e MI (tela do Pro UCL 4.0)...	122
Figura 52: Testes de normalidade dados MR (tela do Pro UCL 4.0)...	123
Figura 53: Testes de normalidade dados MI (tela do Pro UCL 4.0)...	124
Figura 54: Teste Wilcoxon-Mann-Whitney (tela do Pro UCL 4.0)....	125

Figura 55: Teste t - Student (tela do Pro UCL 4.0).	126
Figura 56: APP da Lagoa da Bomba (delimitada em SIG sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada) e local examinado.....	127
Figura 57: Detalhe do muro em APP da lagoa, medido a campo e remotamente, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada.....	128
Figura 58: APP de Restinga (delimitada em SIG sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada) e local examinado.....	129
Figura 59: Detalhe da pista leste, medida a campo e remotamente, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada.1.....	129
Figura 60: APP de curso d'água (delimitada em SIG sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada) e local examinado.....	130
Figura 61: Detalhe do muro em APP de curso d'água, medido a campo e remotamente, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada.....	131
Figura 62: Edificações no canto da Praia da Vila, sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada.....	132
Figura 63: Detalhe dos barracos medidos apenas a campo, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada.....	132
Figura 64: APP de curso d'água (sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada) e detalhe do muro.....	133
Figura 65: Locais onde foram efetuadas medições <i>in loco</i> com trena eletrônica, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada, adquirida em out/2011.....	134
Figura 66: Análise exploratória de MR e MI (tela do Pro UCL 4.0)...	136
Figura 67: Testes de normalidade dados MR (tela do Pro UCL 4.0)...	137
Figura 68: Testes de normalidade dados MI (tela do Pro UCL 4.0)...	138
Figura 69: Teste Wilcoxon-Mann-Whitney (tela do Pro UCL 4.0).....	134
Figura 70: Teste t - Student (tela do Pro UCL 4.0).....	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Especificações técnicas do satélite GeoEye-1.....	39
Quadro 2: Comparação entre métodos de fusão de imagens.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Satélites de alta e muito alta resolução espacial.....	37
Tabela 2: Fontes de distorção geométrica na aquisição de imagens.....	41
Tabela 3: Distorção teórica (em metros) devida ao relevo/elevação do sensor.....	45
Tabela 4: PEC e EP (Decreto 89817/84).....	71
Tabela 5: PEC e EP planimétrico para algumas escalas (Decreto 89.817/84).....	71
Tabela 6: Especificações da imagem GeoEye-1 usada nesta pesquisa.	80
Tabela 7: Resolução espectral (nm) das bandas do satélite GeoEye - 1.....	80
Tabela 8: Coordenadas dos Pontos de Controle e Pontos de Teste (sistema de projeção UTM, datum SIRGAS 2000).....	85
Tabela 9: Resultantes de erros planimétricos para a ortofoto (a numeração dos pontos é a mesma da Tabela 8).....	98
Tabela 10: Resultantes de erros planimétricos (a numeração dos pontos é a mesma da Tabela 8).....	99
Tabela 11: Resultantes de erros planimétricos na imagem georreferenciada (a numeração dos pontos é a mesma da Tabela 8).....	102
Tabela 12: Resultantes de erros planimétricos na imagem ortorretificada (a numeração dos pontos é a mesma da Tabela 8)..	105
Tabela 13: Diferenças entre as dimensões medidas remotamente (MR) sobre a ortofoto e <i>in loco</i> (MI), para os locais examinados.....	121
Tabela 14: Diferenças entre as dimensões medidas remotamente (MR) sobre a imagem orbital ortorretificada e <i>in loco</i> (MI), para os locais examinados.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D - Bidimensional
3D - Tridimensional
ACP - Análise de Componentes Principais
APM - Affine Projection Model
APP - Área de Preservação Permanente
CCD - Charge Coupled Device
CE 90 - Circular Error of 90%
COMAP - Coordenação de Prevenção e Repressão aos Crimes contra o Meio Ambiente e Patrimônio Histórico
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEM - Digital Elevation Model
DGPS - Differential Global Positioning System
DLT - Direct Linear Transformation
DMAPH - Divisão de repressão a Crimes contra o Meio Ambiente e o Patrimônio Histórico
DPF - Departamento de Polícia Federal
DTM - Digital Terrain Model
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EP - Erro Padrão
ETM - Enhanced Thematic Mapper
GCP - Ground Control Points
GNSS - Global Navigation Satellite System
GPS - Global Positioning System
GSD - Ground Sample Distance
HR - High Resolution
HRC - High Resolution Camera
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFOV - Instantaneous Field of View
IHS - Intensity, Hue, Saturation
LPM - Linha de Preamar Média de 1831
LTM - Linhas Limite dos Terrenos de Marinha
MDE - Modelo Digital de Elevação
MDT - Modelo Digital do Terreno
MI - Medição *in loco*
MNT - Modelo Numérico de Terreno
MR - Medição remota
MS - Multiespectral
PEC - Padrão de Exatidão Cartográfica
RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RFC - Rational Functional Coefficients
RFM - Rational Function Model
RMS - Root Mean Square
RPC - Rational Polynomial Coefficients
RTK - Real Time Kinematic
SAAPI - (Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento)
SAD-69 - South American Datum 69
SETEC - Setor Técnico-Científico
SIG - Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS 2000 - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
TBC - Trimble Business Center
TIN -Triangular Irregular Network
UTM - Universal Transversa de Mercator
VHR - Very High Resolution
WGS 84 - World Geodetic System 1984

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVOS	28
1.1.1 Objetivo Geral.....	28
1.1.2 Objetivos Específicos	28
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1 GEOPROCESSAMENTO, SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E SENSORIAMENTO REMOTO	32
2.1.1 Sensoriamento remoto e perícias ambientais no DPF.....	33
2.1.2 Satélites de alta e muito alta resolução espacial.....	34
2.1.3 O satélite GeoEye - 1.....	38
2.1.4 Geometria de aquisição de imagens e fontes de deformação.....	40
2.2 PROCESSAMENTO DE IMAGENS ORBITAIS.....	45
2.2.1 Modelos para correção geométrica.....	46
2.2.1.1 Modelos empíricos (ou não paramétricos).....	47
2.2.1.1.1 Funções Polinomiais 2D.....	48
2.2.1.1.2 Funções Polinomiais 3D.....	49
2.2.1.1.3 Funções Polinomiais Racionais.....	49
2.2.1.2 Modelos físicos (ou rigorosos, ou paramétricos).....	53
2.2.1.3 Outras abordagens.....	54
2.2.2 Reamostragem de pixels.....	55
2.2.3 Ortorretificação.....	55
2.2.4 Técnicas de Realce.....	59
2.2.4.1 Fusão de imagens.....	61
2.2.4.2 Ampliação de contraste.....	63
2.3 MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO.....	63
2.4 AQUISIÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE (GCPs) E DE TESTE.....	65
2.5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE POSICIONAL.....	68
2.6 ERRO GRÁFICO, RESOLUÇÃO ESPACIAL E ESCALA.....	73
2.7 RESULTADOS DE TRABALHOS SEMELHANTES.....	74
2.8 POSSIBILIDADES DE USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA PERÍCIA CRIMINAL FEDERAL.....	77
3 MATERIAIS E MÉTODOS	79
3.1 RECURSOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	79
3.1.1 Base cartográfica.....	79
3.1.2 Imagem orbital GeoEye-1.....	79
3.1.3 Equipamentos.....	80
3.2 METODOLOGIA.....	81
3.2.1 Descrição geral.....	81
3.2.2 Área de estudo.....	83
3.2.3 Aquisição de Pontos de Controle e Pontos de Teste.....	84
3.2.4 Processamento do MDE.....	87
3.2.5 Processamento da imagem.....	88
3.2.5.1 Fusão de bandas e ampliação de contraste.....	88

3.2.5.2 Georreferenciamento expedito (transformação polinomial 2D).....	89
3.2.5.3 Correção geométrica com RPCs, MDE e refinamento com Pontos de Controle (ortorretificação).....	91
3.2.6 Avaliação da qualidade posicional planimétrica.....	95
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
4.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA CADA PRODUTO.....	96
4.1.1 Base cartográfica cedida pelo estado de Santa Catarina.....	96
4.1.2 Imagem sem correção pelo usuário.....	99
4.1.3 Georreferenciamento expedito (2D).....	100
4.1.4 Imagem corrigida com RPCs, MDE e Pontos de Controle (Ortorretificação).....	103
4.1.5 Comparação visual entre restituição vetorial e imagem ortorretificada.....	106
4.2 EXEMPLOS DE USO DOS PRODUTOS EM PERÍCIAS CRIMINAIS AMBIENTAIS.....	109
4.2.1 Ortofoto cedida pelo estado de Santa Catarina.....	111
4.2.1.1 APP da Lagoa da Bomba.....	111
4.2.1.2 APP de Restinga (sul).....	113
4.2.1.3 APP de curso d'água.....	114
4.2.1.4 Barracos de pesca (Praia da Vila).....	116
4.2.1.5 APP do curso d'água (mineração).....	118
4.2.1.6 Avaliação estatística das discrepâncias.....	119
4.2.2 Ortorretificação.....	127
4.2.2.1 APP da Lagoa da Bomba.....	127
4.2.2.2 APP de Restinga (sul).....	128
4.2.2.3 APP do curso d'água (oeste).....	130
4.2.2.5 APP d curso d'água (mineração).....	133
4.2.3 Considerações sobre possibilidades de uso dos produtos analisados nas perícias criminais ambientais.....	141
5 CONCLUSÕES.....	143
REFERÊNCIAS.....	145

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com tudo que se refere à conservação da natureza vem ganhando espaço cada vez maior na sociedade contemporânea. Modismos à parte, a conscientização crescente a respeito da necessidade de repensar nossa relação com o planeta tem se refletido na elaboração de ordenamentos jurídicos cada vez mais complexos, que buscam não só reparar erros passados, mas prevenir futuros, com destaque no Brasil para o artigo 225 da Constituição Federal e para Lei Federal nº 9605/1998 (Lei dos Crimes Ambientais).

O combate a crimes ambientais, bem como crimes contra bens, interesses e serviços da União (incluindo aqui recursos naturais) previstos neste arcabouço legal é uma das missões constitucionais do Departamento de Polícia Federal. Nesse contexto a perícia criminal assume papel central, uma vez que a prova científica de materialidade e autoria do delito ambiental é fundamental para o bom andamento do processo de persecução penal, desde a fase de inquérito policial até a sentença judicial (CRUZ, 2006).

A atuação na esfera criminal reveste-se de particularidades que a diferencia das áreas administrativa e cível. Quando o assunto é perícia criminal, suposições e inferências em geral não são bem recebidas (TRAUCZYNSKI, 2013). Assim sendo, todos os esforços no sentido de capacitar o corpo técnico e avaliar métodos e procedimentos comumente utilizados na criminalística são importantes para que a prova pericial seja cada vez mais robusta.

O geoprocessamento é hoje recurso fundamental para embasar a maioria das perícias criminais ambientais no âmbito da Polícia Federal. A materialização dos delitos contra o meio ambiente tem importante aliado no uso de Sistemas de Informação Geográfica para extrair informações a partir de dados oriundos de produtos de sensoriamento remoto, de cartografia, de sistemas de posicionamento global por satélite e de topografia.

O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto tem oferecido aos usuários produtos cada vez mais sofisticados, que por um lado ampliam as possibilidades de extração de informações remotamente, mas por outro, exigem o domínio de técnicas de processamento digital de imagens para explorar todo o seu potencial. Nesse contexto, a correção geométrica de imagens de satélite de alta resolução espacial pelo uso de modelos matemáticos com base em transformações polinomiais racionais apresenta-se atualmente como uma das ferramentas mais largamente utilizadas, com destaque para a

ortorretificação de imagens em áreas de relevo movimentado. Trata-se de método relativamente simples, genérico, e de aplicação amplamente difundida em *softwares* comerciais, para estabelecer um relacionamento preciso entre as coordenadas dos espaços imagem e objeto.

No entanto, o uso prático destes recursos demanda certos cuidados, tanto pelas suas limitações inerentes, como pela possibilidade de aplicação de tratamento inadequado aos dados, que pode gerar distorções e comprometer a qualidade do produto cartográfico final. Assim, julga-se importante avaliar o resultado da aplicação de diferentes modelos de correção geométrica de imagens orbitais de alta resolução na geração de um produto que deverá ser confiável, tanto em termos de qualidade posicional como de capacidade para extração de informações, pois servirá muitas vezes de base para a realização de perícias em locais de crime contra o meio ambiente.

Além das imagens orbitais, o uso de fotos aéreas e de produtos derivados é outra fonte clássica de informações geoespaciais. Uma vez que o estado de Santa Catarina contratou recentemente a realização de levantamento aerofotogramétrico, aproveitou-se a oportunidade para avaliar também neste estudo um produto cartográfico dele oriundo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta investigação é a avaliação da qualidade posicional de imagem orbital do sensor GeoEye-1 da linha Geo, submetida a diferentes modelos de correção geométrica, e seu potencial de aplicação em perícias criminais ambientais.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos seguem listados:

- Comparar, em relação à qualidade posicional, os produtos resultantes do processamento de imagem orbital de muito alta resolução espacial com diferentes modelos matemáticos e técnicas de correção geométrica: Função Polinomial 2D (Georreferenciamento Expedito) e Função Polinomial Racional 3D (Modelo RPC), com Modelo Digital de Elevação do terreno e refinamento com Pontos de Controle;

- Avaliar a qualidade posicional dos produtos obtidos a partir do tratamento da imagem orbital GeoEye – 1 com base no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) brasileiro, de acordo com o disposto no Decreto 89.817 de 20 junho de 1984;

- Avaliar a qualidade posicional de ortofoto gerada a partir do levantamento aerofotogramétrico realizado sob demanda do estado de Santa Catarina entre os anos de 2010-2011, com base no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) brasileiro, de acordo com o disposto no Decreto 89.817 de 20 junho de 1984;

- Delimitar a Área de Preservação Permanente (APP) de corpos hídricos naturais e de Restinga com o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando os produtos gerados e a ortofoto;

- Detectar e mensurar remotamente, sobre a imagem GeoEye – 1 ortorretificada, as dimensões de estruturas antrópicas em APPs de corpos hídricos e de Restinga, também em ambiente SIG, comparando os resultados com medições *in loco* e efetuadas sobre a ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico do estado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GEOPROCESSAMENTO, SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E SENSORIAMENTO REMOTO

Geoprocessamento pode ser entendido, segundo Silva, J. (2009, p. 42), como

um conjunto de conceitos, métodos e técnicas que, atuando sobre bases de dados georreferenciados, por computação eletrônica, propicia a geração de análises e sínteses que consideram, conjugadamente, as propriedades intrínsecas e geotopológicas dos eventos e entidades identificados, criando informação relevante para apoio à decisão quanto aos recursos ambientais.

O mesmo autor sustenta que não se devem confundir as finalidades principais do geoprocessamento com as das diversas geotecnologias, tais como cartografia, sensoriamento remoto ou Sistemas de Posicionamento Global (GPS), pois a criação e controle da qualidade dos dados, através destas geotecnologias, não é necessariamente sinônimo de extração de informação georreferenciada, objetivo primeiro do geoprocessamento.

Atualmente o geoprocessamento é instrumento primordial em qualquer procedimento que envolva a realização de análises ambientais abrangentes (CALDAS, 2006). O alto potencial de informações que pode ser extraído após a coleta, análise e eventual recombinação de dados brutos em um Sistema de Informações Geográficas, presta-se para os mais variados estudos, permitindo acompanhar as transformações ocorridas em cenários geográficos ao longo do tempo, bem como projetar possibilidades futuras. Conforme ensinam Câmara e Davis (2001), “Se *onde* é importante para seu negócio, então Geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho”. Ainda conforme os mesmos autores, quando o *onde* aparecer entre as questões que precisam ser respondidas em ambiente computacional, surge a possibilidade do uso de um Sistema de Informações Geográficas.

Delazari (2011) conceitua SIG como

um conjunto de ferramentas computacionais composto de equipamentos e programas que por meio de técnicas, integra dados (das mais

diversas fontes), pessoas e instituições, de forma a tornar possível a *coleta*, o *armazenamento*, a *análise* e a *disponibilização*, a partir de dados georreferenciados, de informações produzidas por meio de aplicações, visando maior facilidade, segurança e agilidade nas atividades humanas referentes ao monitoramento, planejamento e tomada de decisão relativas ao espaço geográfico.

Segundo a mesma autora, os processos analíticos de um SIG permitem elaborar informação a partir da integração de diferentes dados, criando subsídios para tomadas de decisões. Para a plena utilização da tecnologia, no entanto, é fundamental que as organizações invistam no treinamento de pessoal, usuários e dirigentes, e não apenas em equipamentos e programas computacionais. Além disso, é imprescindível a integração adequada dessa ferramenta aos processos de trabalho.

Conforme Gripp Jr (2009b) a obtenção de informações espaciais georreferenciadas pode ser feita a partir de métodos diretos (topografia/geodésia) ou indiretos (sensoriamento remoto), devendo-se incluir aqui ainda as técnicas relacionadas aos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GNSS*). Através de sensores embarcados em plataformas orbitais (satélites) ou suborbitais (aeronaves), o sensoriamento remoto obtém informações de objetos à distância, por meio da detecção e análise das interações entre objetos terrestres e a radiação eletromagnética (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Muitas vezes a escolha entre utilizar dados orbitais (imagens aéreas) ou suborbitais (aerofotos) é uma questão meramente econômica. Loch (1988) ensina que fotografias aéreas são indispensáveis para o mapeamento de grandes áreas, mas o elevado custo dos recobrimentos aerofotogramétricos periódicos dificulta a atualização dos dados. O autor demonstra que o sensoriamento remoto orbital pode preencher esta lacuna, fornecendo dados confiáveis para atualizações cadastrais.

Magliano (2006) sustenta que a observação remota de fenômenos naturais e atividades humanas, com o conseqüente registro de imagens terrestres com diferentes resoluções temporais, espaciais e espectrais, é de interesse frequente para a Criminalística. A perícia criminal federal conta atualmente com um sistema de inteligência geográfica próprio, o *Inteligeo*, com mais de três terabytes de dados armazenados. Entre os

temas disponíveis estão a localização e informações sobre todos os laudos periciais georreferenciados pelos Peritos Criminais Federais no país; localização, informações e disponibilidade para *download* de aproximadamente onze mil imagens de satélite; limites políticos do Brasil, estados e municípios, mar territorial; limites e informações de unidades de conservação ambiental, terras indígenas e processos minerários; traçado de vias terrestres oficiais e não oficiais; e outros (MIRANDA, 2012).

O lançamento em 1999 do Ikonos II, primeiro satélite de alta resolução espacial com imagens disponíveis comercialmente para o mercado civil, ampliou consideravelmente a gama de possibilidades de aplicações para o sensoriamento remoto orbital.

2.1.1 Sensoriamento remoto e perícias ambientais no DPF

O Departamento de Polícia Federal (DPF) tem um histórico relativamente recente de atuação contra crimes ambientais. A Lei de Crimes Ambientais (Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1988), que regulamenta o Art. 225 da Constituição Federal, favoreceu a aplicação da norma constitucional aos casos concretos. O marco legal para a prevenção e repressão especializada a esses delitos, na esfera da União, é o Decreto 4.053, de 13 de dezembro de 2001. Esse diploma deu início ao processo que culminou na criação da Coordenação de Prevenção e Repressão aos Crimes contra o Meio Ambiente e Patrimônio Histórico (COMAP, atual DMAPH – Divisão de repressão a Crimes contra o Meio Ambiente e o Patrimônio Histórico), no âmbito do DPF.

A criação dessa Divisão seguiu uma tendência global, qual seja, dotar uma polícia com atuação em nível nacional de um braço especializado na repressão aos delitos ambientais, em virtude da crescente complexidade e grau de organização que vem acompanhando esse tipo de crime (DPF, 2004).

O passo seguinte foi a implantação das delegacias especializadas nas Superintendências Regionais do DPF, com a consequente aceleração da demanda para a realização de perícias criminais ambientais. Conforme Cruz (2006), o desenvolvimento acelerado da perícia criminal no DPF, com a realização de concursos públicos que permitiram o ingresso de pessoal especializado, foi ainda mais significativo na área ambiental.

Dentro desse contexto de expansão e qualificação da perícia ambiental, a Polícia Federal atualmente realiza vários tipos de exames periciais, procurando utilizar conhecimento, equipamentos e

metodologia técnico-científica atualizados. Dentre as tecnologias com uso já consolidado na perícia criminal federal, o sensoriamento remoto ocupa lugar de destaque, auxiliando a comprovar, dentre outros, os seguintes crimes (BARROS; DIAS, 2011):

- Extração e comercialização de bens da União de forma ilegal, com destaque para extração ilegal de madeiras, extração mineral irregular e exploração irregular de sítios paleontológicos;
- Crimes contra a flora (e, em consequência, contra a fauna), ocupação e uso do solo em áreas protegidas, com destaque para desmatamentos e incêndios florestais criminosos;
- Poluição.

Além dos usos citados, o sensoriamento remoto tem sido importante ferramenta também em perícias de engenharia (avaliação de imóveis rurais, valoração ambiental, perícias em estradas), na detecção de padrões comuns a cultivos irregulares (especialmente maconha) e como subsídio para o planejamento tático e tomada de decisões.

2.1.2 Satélites de alta e muito alta resolução espacial

Inicialmente deve-se destacar que resolução, em sensoriamento remoto, é um termo referente, segundo Meneses e Almeida (2012), a quatro diferentes tipos de medição:

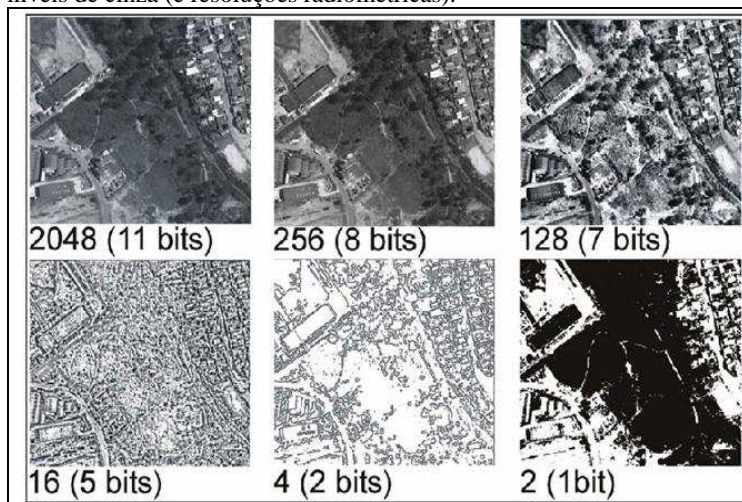
Resolução temporal: diz respeito à medida de tempo (em dias) que um satélite leva para repetir o imageamento de uma mesma área na superfície terrestre. A aplicação prática mais importante de uma alta resolução temporal (tempo menor de revisita) é permitir o monitoramento eficiente de alterações significativas nas áreas imageadas, permitindo, por exemplo, que a perícia materialize um crime contra a flora antes da regeneração natural da vegetação. A possibilidade que alguns satélites têm de obter visadas fora do nadir, obedecendo a comandos de terra, permite diminuir o tempo de revisita, aumentando assim a resolução espacial.

Resolução espectral: o termo envolve no mínimo três parâmetros de medida, quais sejam, o número de bandas que o sensor possui, a largura em comprimento de onda das bandas e a posição das bandas no espectro eletromagnético. Uma vez que as diferenças de reflectância entre alvos na superfície terrestre costumam ser sutis, uma alta resolução espectral está relacionada a um maior número de bandas em diferentes regiões espectrais e com larguras estreitas de comprimentos

de onda, para que seja possível detectar contrastes de reflectância em faixas estreitas e específicas de comprimentos de onda. Atualmente, o uso de sensores hiperespectrais, que dão origem a classificações detalhadas de alvos terrestres, tem permitido uma variedade enorme de aplicações em diversas áreas, tais como agricultura, geologia e monitoramento ambiental.

Resolução radiométrica: refere-se à capacidade do sensor em medir diferentes níveis da radiação emitida ou refletida pelos alvos. Na prática, mede-se a resolução radiométrica pela quantidade de dígitos binários (*bits*) usados para armazenar os dados referentes aos valores da radiação medida. Quanto maior a quantidade, maior a riqueza visual da imagem. Assim, uma imagem de 2 *bits* possui 4 níveis de cinza, enquanto que uma de 11 *bits* pode apresentar 2048 tonalidades diferentes de cinza ($2^{11} = 2048$). A figura 1 ilustra as diferenças visuais entre imagens com resoluções radiométricas distintas:

Figura 1: Comparação do efeito visual em imagem com diferentes níveis de cinza (e resoluções radiométricas).



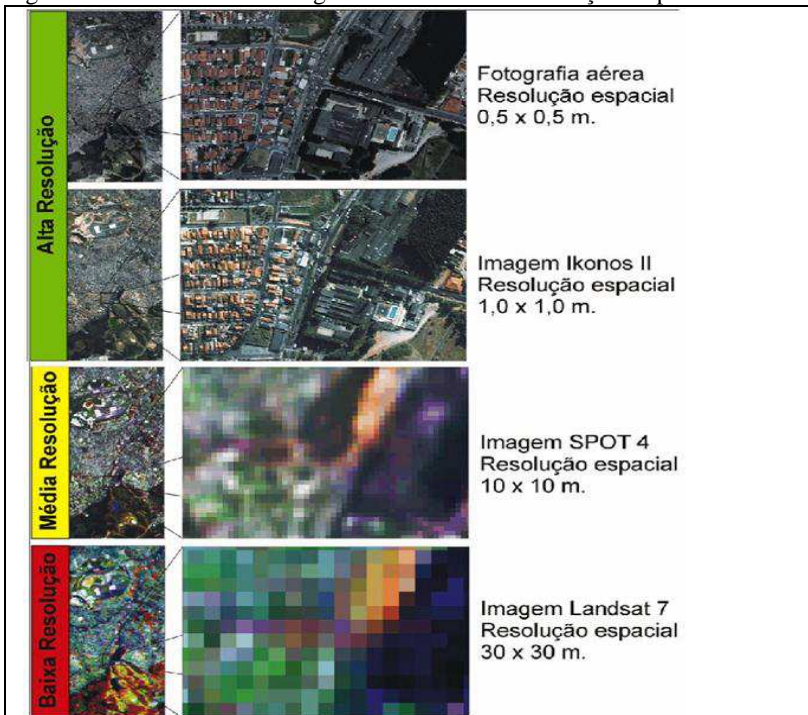
Fonte: Melo, 2002.

Resolução espacial: é um parâmetro muito importante, pois define o tamanho do menor objeto que pode ser individualizado pelo sensor. Assim, em tese, um objeto será identificado quando seu tamanho for igual ou maior do que a resolução espacial do instrumento. Como exemplo, é praticamente impossível individualizar um prédio medindo

20 m x 20 m em um conglomerado urbano se o sensor tiver resolução espacial de 30 metros (por exemplo, o sensor ETM do satélite Landsat 7).

A projeção geométrica do sensor na superfície define a área do seu campo de visada a uma dada altitude e num determinado instante de tempo. O ângulo dessa projeção é uma medida usada para representar a resolução espacial e é conhecido como campo de visada instantâneo (IFOV, *Instantaneous Field of View*). Para determinar a resolução espacial basta multiplicar o ângulo IFOV (em miliradianos) pela altura (em quilômetros) da plataforma. Por exemplo, para um sensor com ângulo IFOV de 0,043 mrad e altura da plataforma de 700 km, a resolução espacial aproximada será de 30,1 metros, como é o caso do ETM a bordo do satélite Landsat 7 (MENESES; ALMEIDA, 2012). A Figura 2, abaixo, mostra uma mesma área, alvo de diversos produtos de sensoriamento remoto, com resoluções espaciais decrescentes:

Figura 2: Efeito visual em imagens com diferentes resoluções espaciais.



Fonte: Melo(2002).

Ensina Gripp Jr (2009b) que imagens de alta resolução espacial oferecem uma vantagem adicional, além da profusão de subsídios para interpretação: após o devido processamento, também oferecem informações de natureza geométrica (ângulos, distâncias e áreas).

Poli e Toutin (2012) classificam os sensores óticos usados em aplicações de fotogrametria e sensoriamento remoto com resolução entre 1 e 10 metros como sensores de alta resolução (*High Resolution – HR*) e com resolução abaixo de 1 metro como sensores de muito alta resolução (*Very High Resolution –VHR*). A Tabela 1, a seguir, adaptada de Toth, Oh e Grejner-Brzezinska (2010), resume as características dos satélites que fornecem imagens de alta e muito alta resolução em operação até o ano de 2010, no que diz respeito ao ano de lançamento, resolução espacial (em metros), tempo de revisita (em dias) e largura da faixa imageada (em quilômetros):

Tabela 1: Satélites de alta e muito alta resolução espacial.

Satélite (ano)	Resolução (m)	Revisita (dias)	Largura faixa (km)
Ikonos (1999)	0,82	3~5	11,3
Eros-A (2000)	1,8	3~4	14
QuickBird (2001)	0,61	1~3,5	16,5
Spot – 5 (2002)	2,5	2~3	60
OrbView – 3 (2003)	1	~3	8
Formosat – 2 (2004)	2	1	24
Cartosat – 1 (2005)	2,5	5	30
Alos Prism (2006)	2,5	2~46	35
Kompsat – 2 (2006)	1	4	15
Eros – B (2006)	0,70	3~4	7
World View -1 (2007)	0,50	4,6 (60 cm)	17,6
Cartosat – 2 (2008)	0,80	4~5	9,6
GeoEye – 1 (2008)	0,41	2,8 (50 cm)	15,2
WorldView – 2 (2009)	0,46	3,7 (52 cm)	17,6

Fonte: Toth; Oh; Grejner-Brzezinska (2010).

Além dos citados, pode-se mencionar ainda o sensor HRC (High Resolution Camera – Câmera Pancromática de Alta Resolução), a bordo do satélite sino-brasileiro Cbers 2B, que operou até o começo de 2010, com resolução espacial de 2,7 metros, tempo de revisita de 130 dias e largura da faixa imageada de 27 km (INPE, 2013); o sensor KVR –

1000, com resolução espacial de aproximadamente 2,5 metros, instalado nos satélites russos Kosmos, cujo último lançamento foi em setembro de 2000 (Gupta, 2003); e a constelação Pleiades (1-A, lançado em dezembro de 2011 e 1-B, em dezembro de 2012), com resolução espacial de 0,7 metros, tempo de revisita de um dia e largura da faixa imageada de 20 km (GLEYZES; PERRET; KUBIK, 2012).

Com resolução espacial de 34 centímetros e CE 90 esperada de 3 a 4 metros, o sensor GeoEye-2, inicialmente com lançamento previsto para 2013 (mas adiado para 2014/2015), promete alcançar níveis inéditos de qualidade posicional e de resolução para imagens orbitais (SATELLITE IMAGING CORPORATION, 2013).

2.1.3 O satélite GeoEye - 1

Lançado em setembro de 2008 pela empresa norte-americana GeoEye, Inc., a partir da base aérea de Vandenberg, na Califórnia (EUA), o GeoEye-1 tem como especificações resolução espacial de 0,41 metros no modo pancromático, 1,65 metros no multiespectral (nadir) e exatidão posicional CE90 de 5 metros sem Pontos de Controle Terrestres (por restrições legais norte-americanas, as imagens para uso civil são reamostradas para 0,5 metros no modo pancromático e 2,0 metros no multiespectral). Tem resolução radiométrica de 11 bits, largura nominal da faixa imageada de 15,2 km, pode fazer visadas laterais (resolução temporal de no máximo três dias) e obter imagens com estereoscopia. Tem órbita heliossíncrona com duração de 98 minutos, altitude de 684 km e horário aproximado de passagem 10h30min (EMBRAPA, 2012).

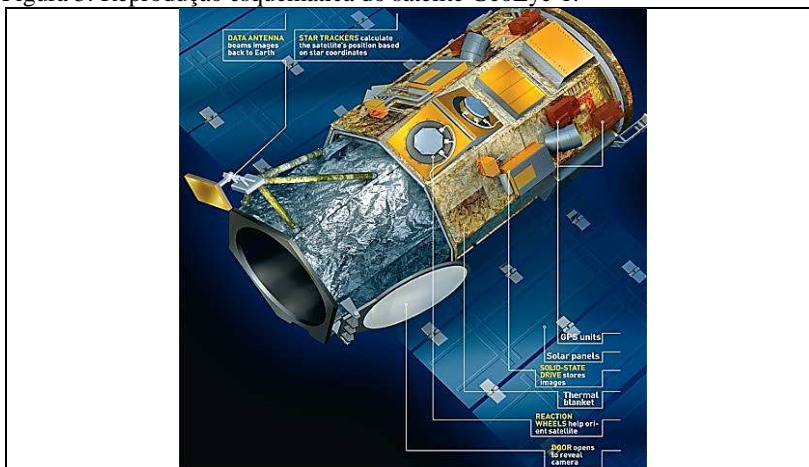
O sistema eletro-óptico de aquisição de imagens conta com um telescópio (distância focal nominal de 13,3 metros) integrado a sensores do tipo CCD (*Charge Coupled Device*), com varredura eletrônica (*Pushbroom*). Possui a chamada configuração ágil, que permite o imageamento em diferentes direções (POLI; TOUTIN, 2012). O Quadro 1 resume as especificações e a Figura 3 ilustra esquematicamente o satélite:

Quadro 1- Especificações técnicas do satélite GeoEye-1.

Resolução Espacial	0,41m no Pancromático (P&B) 1,64m no Multispectral (colorido)
Sensibilidade Espectral no Pancromático	450-900 nm
Sensibilidade Espectral no Multispectral	Azul: 450-520 nm Verde: 520-600 nm Vermelho: 625-695 nm Infra Vermelho:760-900 nm
Faixa imageada	15,2 km
Capacidade de Visada Lateral	Até 60 Graus
Quantificação	11 bits por pixel
Vida Útil	Concebido para operar por mais de 10 anos
Capacidade de Revisita	A cada 3 dias ou menos
Altitude	684 km
Hora de passagem	10:30 A.M.

Fonte: Space Imaging Brasil (2013).

Figura 3: Reprodução esquemática do satélite GeoEye-1.



Fonte: Ilustração de Kevin Hand (2008).

A Digital Globe, Inc., empresa atualmente responsável pela operação do satélite, fornece produtos das linhas Geo (com Coeficientes Polinomiais Racionais - RPCs, correção radiométrica, registro para *datum* e sistema de projeção específicos), GeoProfessional ou GeoStereo, bem como produtos derivados (tais como mosaicos e MDEs). As imagens podem ser multiespectrais, pancromáticas ou resultado de fusão dos dois modos (*pan-sharpened*). Podem ser capturadas em ângulos de elevação acima do horizonte entre 60 e 90°. Para aumentar a acurácia posicional em produtos ortorretificados feitos a partir destas imagens, é possível solicitar ângulos de elevação acima de 72° (SPACE IMAGING BRASIL, 2013).

2.1.4 Geometria de aquisição de imagens e fontes de deformação

Dados brutos oriundos de sensoriamento remoto apresentam distorções geométricas tão significativas que impossibilitam seu uso direto em conjunto com outros dados (topográficos, cartográficos, de sensoriamento remoto, etc.) em SIGs (TOUTIN, 2011).

Conforme Gripp Jr (2009b), imagens remotas brutas, obtidas de plataformas orbitais ou sub-orbitais, possuem um sistema de coordenadas próprias, referentes à linha e coluna de cada pixel, sem vínculo com a superfície terrestre, embora representem a superfície imageada. As distorções geométricas presentes nestas imagens impossibilitam seu uso direto em aplicações cartográficas.

Ainda segundo o mesmo autor, pode-se dividir estas distorções em sistemáticas (por exemplo, as inerentes ao sensor) ou não sistemáticas (oriundas, por exemplo, de variações na altitude ou atitude do satélite).

Na mesma linha, Toutin (2011) afirma que cada sistema de aquisição produz distorções geométricas únicas em suas imagens brutas, que assim não correspondem geometricamente ao terreno, a outras imagens ou a algum sistema de projeção específico. O autor agrupa as fontes de distorção em duas categorias principais: o observador (plataforma, sensor e outros instrumentos auxiliares de medição) e o observado (atmosfera e Terra, incluídas aqui deformações referentes a sistemas de projeção). A Tabela 2 resume essa classificação:

Tabela 2: Fontes de distorção geométrica na aquisição de imagens.

Categoria	Sub-categoria	Descrição da fonte de erro
Observador ou Sistema de Aquisição	Plataforma	Variação no movimento Variação na atitude da plataforma
	Sensor	Variação nos mecanismos do sensor (taxa e velocidade de escaneamento) Distorções das lentes/Ângulo de visada Efeito panorâmico
	Instrumentos de medição	Medidas do tempo, sincronicidade do relógio
	Observado	Atmosfera
Observado	Terra	Rotação, curvatura, relevo
	Mapa	Geóide para elipsoide e Elipsóide para o plano

Fonte: Toutin (2011).

O autor afirma ainda que as deformações relacionadas à projeção de mapa utilizada também devem ser consideradas, pois tanto os terrenos como as aplicações para usuários finais de SIGs são representados e realizadas, respectivamente, em projeções sobre superfícies planas e não sobre um elipsoide.

Debiasi et al. (2007) ensinam que as distorções sistemáticas nas imagens orbitais brutas estão relacionadas principalmente aos seguintes fatores:

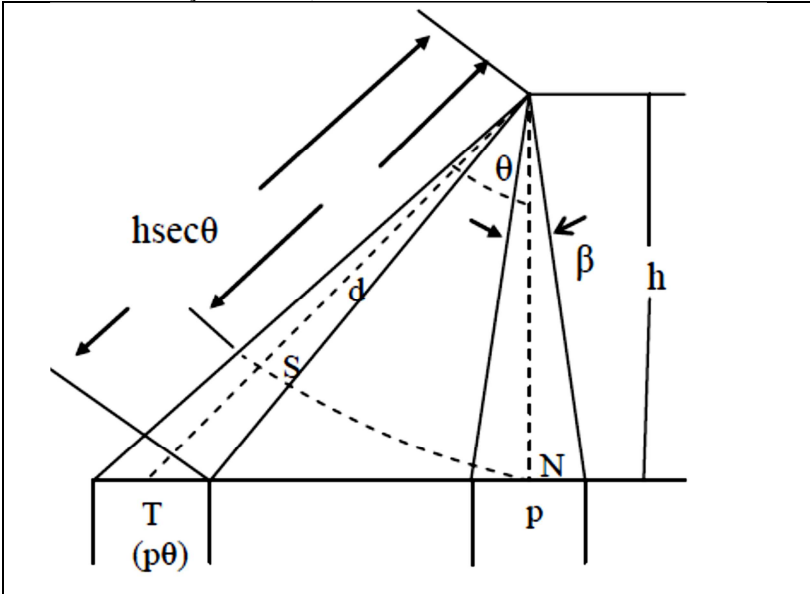
- Curvatura da Terra;
- Efeito panorâmico;
- *Skew*, ou efeito da rotação da Terra;
- Variações na altitude, velocidade e atitude da plataforma;
- Distorções devidas ao relevo.

Conforme Matsuoka (2006), as distorções ocasionadas pela curvatura terrestre são insignificantes para sensores orbitais com campo de visão estreito, como é o caso do Quickbird (16,5 km) e Ikonos (11,3 km). A mesma premissa vale para o sensor GeoEye – 1 (faixa de varredura com 15,2 km), usado neste estudo.

Para D'alge (2001), a distorção panorâmica deve-se à variação do IFOV (que é um ângulo fixo) dentro do campo de visada, pois o sensor cobre diferentes dimensões do terreno conforme a inclinação em relação ao nadir. Ocorre assim uma compressão dos dados nas regiões distantes do nadir (bordas da imagem), uma vez que a dimensão do terreno

coberta é maior. Além disso, os sensores mais modernos são direcionáveis, aumentando a capacidade de imageamento de uma dada região fora do nadir. A figura 4 ilustra esse efeito:

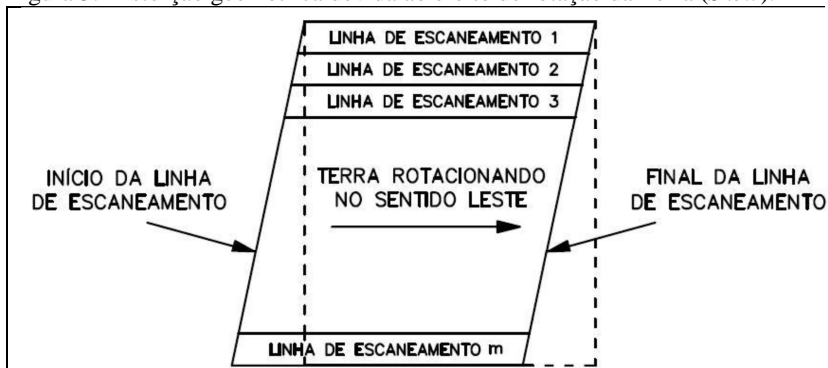
Figura 4: Distorção panorâmica (variação do tamanho do pixel em imagens inclinadas em relação ao nadir).



Fonte: Meneses e Almeida (2012).

Ainda segundo o mesmo autor, a distorção ocasionada pela rotação da terra dá-se pelo movimento relativo entre esta e o satélite, ou seja, enquanto o planeta gira sobre seu eixo de oeste para leste, a plataforma orbita do norte para o sul. Assim sendo, um ponto imageado na superfície estará deslocado para oeste no momento da aquisição da imagem. Surge assim a necessidade de deslocar as varreduras para leste a fim de compensar seu posicionamento. Essa distorção pode ser visualizada na figura 5:

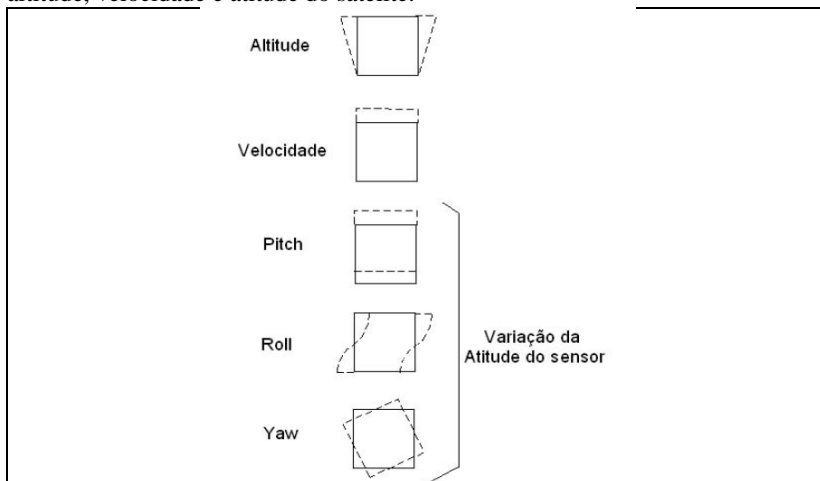
Figura 5: Distorção geométrica devida ao efeito de rotação da Terra (*Skew*).



Fonte: Oliveira (2009).

A variação de altitude provoca distorção de escala da imagem (e assim, do tamanho do pixel), enquanto que instabilidades (variações dos eixos) na atitude da plataforma (*pitch*, *roll*, *yaw*), causam rotações transversais e longitudinais à linha de voo. Além disso, ocorrerá mudança de escala (com deformação do pixel longitudinalmente à varredura) quando a velocidade do satélite variar (MENESES; ALMEIDA, 2012). A figura 6 demonstra os efeitos das variações descritas sobre o mapeamento obtido por um sensor orbital:

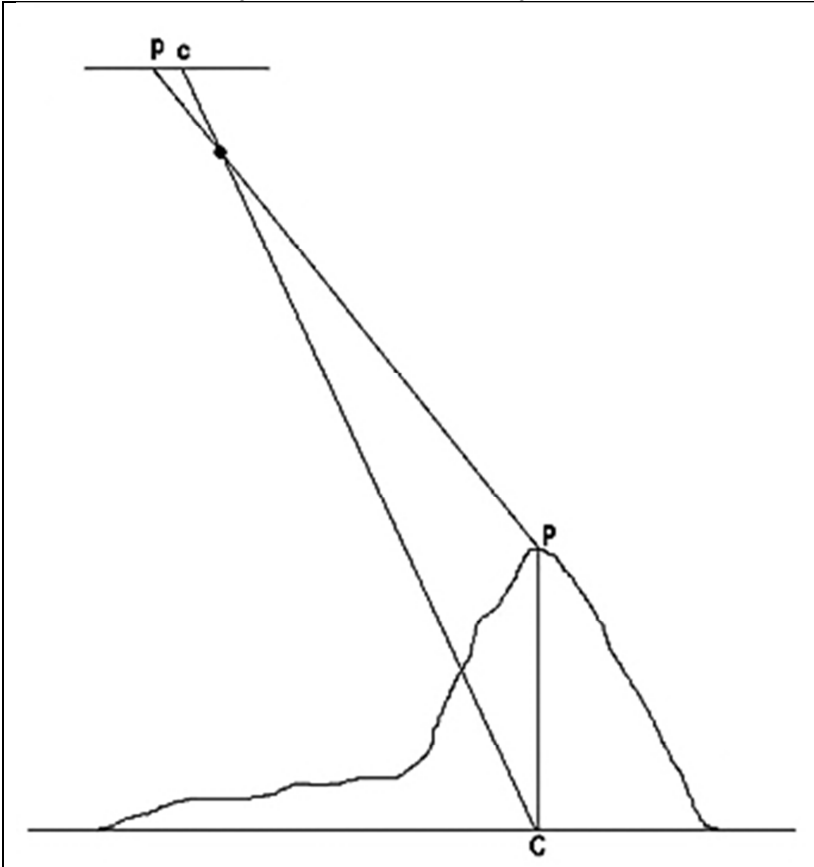
Figura 6: Distorções geométricas no imageamento causadas por variações de altitude, velocidade e atitude do satélite.



Fonte: Pedro (2005).

Silva (2005) ensina que todos os feixes de luz refletidos pelo terreno e capturados por um sensor orbital de varredura ou de quadros (*frame*) convergem para um centro de perspectiva que não está no infinito, o que acarreta na imagem bruta uma distorção devida ao relevo. Assim, dois pontos do terreno na mesma posição planimétrica, mas em altitudes diferentes, aparecerão na imagem em diferentes posições. A figura 7 explica a distorção devida ao relevo:

Figura 7: Distorção devida ao relevo. O ponto “P” da imagem bruta deveria estar em “c”. A diferença entre “P” e “c” é a distorção.



Fonte: Silva (2005).

Gripp (2009b) demonstra de maneira teórica a magnitude da deformação devida ao relevo em várias diferenças de nível (entre o

plano de referência para a geração da imagem e a superfície do terreno) e ângulos de elevação da plataforma orbital. Fica claro que quanto mais movimentado o relevo, maior a distorção (Tabela 3):

Tabela 3: Distorção teórica (em metros) devida ao relevo/elevação do sensor.

Elevação da plataforma/ Desnível do terreno	90°	75°	60°
50 metros	0	13,4	28,9
200 metros	0	53,6	115,5
400 metros	0	107,2	230,9
600 metros	0	160,8	346,4
1000 metros	0	267,9	577,3

Fonte: Adaptado de Gripp Jr (2009b, p. 35).

2.2 PROCESSAMENTO DE IMAGENS ORBITAIS

Para Meneses e Almeida (2012), as imagens de sensoriamento remoto representam a superfície terrestre sobre um plano de duas dimensões, em escala, mas não referenciadas a um sistema de projeção cartográfica. A informação chega ao sensor de forma analógica, através da energia da radiação eletromagnética, e é convertida ali em informação digital, que pode assim ser processada em computadores.

Ainda segundo os autores, a unidade da informação digital é codificada no pixel e a representação de um objeto da superfície terrestre pode assim ser medida por dois atributos: a posição espacial e o valor da radiância do pixel. Definem desse modo imagem como uma função $f(x,y)$, onde x,y indicam a posição do pixel (linha e coluna em uma matriz) e f representa a medida da energia refletida ou emitida naquele ponto.

A utilização prática dessas imagens para fins cartográficos requer um processamento, que pode ser genericamente entendido como um conjunto de operações matemáticas efetuadas sobre os dados brutos com a finalidade de corrigir erros e distorções, além de ampliar o contraste visual entre as feições da cena, facilitando assim a extração das informações nela contidas (MENESES; ALMEIDA, 2012). Entre as diversas técnicas de processamento existentes, serão aqui abordadas algumas referentes à correção geométrica e ao realce de imagens.

2.2.1 Modelos para correção geométrica

Segundo Pinheiro (2003), qualidade posicional de uma imagem passa pela avaliação de sua geometria interna (similaridade entre a imagem e o terreno) e externa (exatidão das coordenadas da imagem, quando comparadas a um referencial específico). O uso de modelos matemáticos para correção geométrica pode reduzir os efeitos das distorções anteriormente mencionadas. Meneses e Almeida (2012) afirmam que a maneira mais comum de corrigir geometricamente uma imagem é estabelecer relações matemáticas entre as posições dos pixels nesta imagem e suas coordenadas correspondentes no terreno, em duas etapas: determinação da posição correta do pixel na imagem bruta e cálculo do novo valor de brilho deste pixel na imagem corrigida.

As técnicas fotogramétricas têm sido muito utilizadas na correção geométrica de imagens de satélite de alta resolução (OLIVEIRA, 2009). Xu (2004) ensina que a tarefa fundamental da fotogrametria é estabelecer rigorosamente a relação geométrica entre o espaço imagem e o espaço objeto, da maneira em que ela ocorreu no instante do imageamento, para que se possam obter informações do objeto estritamente a partir de sua imagem. No mesmo sentido, para Poli e Toutin (2012), o objetivo principal da modelagem geométrica é descrever a relação entre a imagem e as coordenadas da superfície, para um dado sensor. Os autores destacam a importância dessa modelagem, uma vez que as imagens de satélite de alta e muito alta resolução espacial têm sido utilizadas em mapeamento com escalas de até 1:10000 e atualização de mapas em escalas até 1:5000.

A terminologia usada para descrever os diferentes modelos de correção geométrica varia ligeiramente conforme o autor consultado, mas, de maneira geral, pode-se afirmar que os modelos dividem-se em físicos (ou determinísticos, ou rigorosos, ou paramétricos) e empíricos (ou não paramétricos), ambos com versões em duas (2D) ou três (3D) dimensões. Conforme Toutin (2004), a maior vantagem dos modelos físicos sobre os empíricos é que a matemática dos primeiros corresponde à realidade física da geometria da visada e leva em consideração todas as distorções, enquanto os parâmetros dos modelos empíricos não têm significado físico. Quando os parâmetros têm significado físico, resultados errôneos são mais fáceis de achar e interpretar.

O mesmo autor afirma que os modelos rigorosos são a opção preferida pelos fornecedores de imagens, pois permitem que se use uma solução passo a passo, com uma função matemática para cada etapa,

permitindo assim a oferta de produtos com maior valor comercial agregado. Já para os usuários finais, a solução mais comumente empregada é do tipo “combinada”, em que uma função matemática permite o processamento simultâneo de todas as etapas da correção.

Assim sendo, conforme a divisão estabelecida por Toutin (2004), os modelos para correção geométrica são:

2.2.1.1 Modelos empíricos (ou não paramétricos)

Os modelos empíricos 2D/3D podem ser usados quando não estão disponíveis as informações do sistema de aquisição das imagens ou um modelo 3D rigoroso. Como não há relação física com as fontes de distorção anteriormente citadas, estes modelos não requerem *a priori* dados sobre o sistema observador-observado (plataforma, sensor, Terra e projeção do plano cartográfico). Estes modelos estão baseados em funções matemáticas como as que seguem:

- Funções Polinomiais 2D, tais como

$$P_{2D}(XY) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} X^i Y^j \quad (1)$$

- Funções Polinomiais 3D, tais como

$$P_{3D}(XYZ) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k \quad (2)$$

- Funções Polinomiais Racionais 3D, tais como

$$R_{3D}(XYZ) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p b_{ijk} X^i Y^j Z^k} \quad (3)$$

Em que X, Y, Z são as coordenadas no espaço objeto; i, j, k são incrementos inteiros; m, n, p são valores inteiros, com m + n (+ p) sendo a ordem das funções polinomiais, geralmente de terceira ordem. As funções polinomiais 2D/3D de primeira ordem são também chamadas transformações afim (*Affine Projection Model* - APM). Entre os modelos genéricos ou empíricos também se incluem o modelo da transformação linear direta (DLT) e o modelo de transformação projetiva (HU; TAO; CROITURU, 2004).

2.2.1.1.1 Funções Polinomiais 2D

Uma vez que as funções polinomiais 2D não refletem as fontes de distorção durante a aquisição e não corrigem as distorções devidas ao relevo, seu uso deveria ficar limitado a imagens com poucas ou pequenas distorções, tais como aquelas obtidas no nadir, com correções sistemáticas e/ou pequenas cenas de um terreno plano. Embora essas funções 2D não possam ser aplicadas indiscriminadamente para qualquer tipo e tamanho de imagem, ou condições de relevo, alguns usuários ainda as utilizam em qualquer condição, aparentemente sem saber as consequências sobre os produtos finais resultantes (TOUTIN, 2004). No mesmo sentido, Gripp (2009b) afirma que o Método Polinomial Simples deve ser limitado a pequenas áreas planas, pois não leva em conta o relevo nem dados sobre a posição do sensor. O modelo estima coeficientes de transformação com base em pontos de controle (*Ground Control Points* - GCPs) da imagem que tenham localização geodésica conhecida. Uma vez que esta formulação é muito sensível a erros induzidos pelos pontos de controle, estes devem ser numerosos, de

fácil identificação e regularmente distribuídos. Segundo Oliveira (2009), os resultados apresentados com este processo de georreferenciamento são grosseiros, mas podem ser aceitáveis, por exemplo, em locais com variações mínimas no relevo.

2.2.1.1.2 Funções Polinomiais 3D

As funções polinomiais 3D podem ser consideradas uma extensão das 2D, com a adição dos termos Z relacionados à terceira dimensão do terreno. Com exceção da influência do relevo, estas funções estão sujeitas aos mesmos problemas de quaisquer outros modelos empíricos, ou seja, são aplicáveis a imagens pequenas, precisam de muitos GCPs bem distribuídos, podem não apresentar bons resultados em regiões distantes dos GCPs, são muito sensíveis a erros e apresentam falta de consistência e robustez em ambiente operacional. Seu uso também deveria se limitar a imagens pequenas ou já submetidas a correção sistemática de todas as distorções, com exceção do relevo (TOUTIN, 2004).

2.2.1.1.3 Funções Polinomiais Racionais

De maneira geral, as empresas que distribuem imagens de alta e muito alta resolução não disponibilizam aos usuários finais informações técnicas detalhadas sobre a plataforma ou o sensor que seriam indispensáveis para a modelagem rigorosa. Este é o principal motivo para a introdução dos modelos empíricos, com destaque para as Funções Polinomiais Racionais 3D, mencionadas na literatura como Modelos Funcionais Racionais (RFM), Coeficientes Polinomiais Racionais (RPC) ou Coeficientes Funcionais Racionais (RFC). A maioria dos *software* para processamento digital de imagens de satélite usa RFMs para a correção geométrica, permitindo esta abordagem que o usuário final elabore produtos com maior valor agregado (por exemplo, ortoprojeções), sem a necessidade de usar modelos físicos do sensor (BOCCARDO et al., 2004).

Segundo Poli e Toutin (2012), nos últimos anos as Funções Polinomiais Racionais 3D tornaram-se a forma padrão de aproximação dos modelos rigorosos de sensores de muito alta resolução espacial. Elas descrevem a relação entre as coordenadas da imagem normalizada (r , c) e dos objetos (X , Y , Z) ou vice-versa através de razões de polinômios, usualmente de terceira ordem. Os coeficientes polinomiais correspondentes, em conjunto com coeficientes de escala e

deslocamento para a normalização das coordenadas, formam os chamados Coeficientes Polinomiais Racionais (*Rational Polynomial Coefficients* ou *Rational Polynomial Camera* - RPC) também conhecidos como Coeficientes Racionais Funcionais (*Rational Function Coefficients* – RFCs). Os RPCs são calculados e fornecidos por algumas das empresas fornecedoras das imagens com base nos dados da câmara do sensor e da órbita do satélite (PINHEIRO, 2003), e permitem o processamento fotogramétrico das imagens na ausência do modelo físico do sensor (XU, 2004).

De acordo com Oliveira (2009), as equações a seguir podem ser usadas para representar o Modelo Funcional Racional:

$$r_n = \frac{p1(X_n, Y_n, Z_n)}{p2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad (4)$$

$$c_n = \frac{p3(X_n, Y_n, Z_n)}{p4(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} c_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} d_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k} \quad (5)$$

Em que r_n, c_n são linhas e colunas normalizadas do espaço imagem; X_n, Y_n, Z_n são as coordenadas normalizadas do espaço objeto e $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}$ e d_{ijk} são os coeficientes de transformação, chamados RPCs ou RFCs.

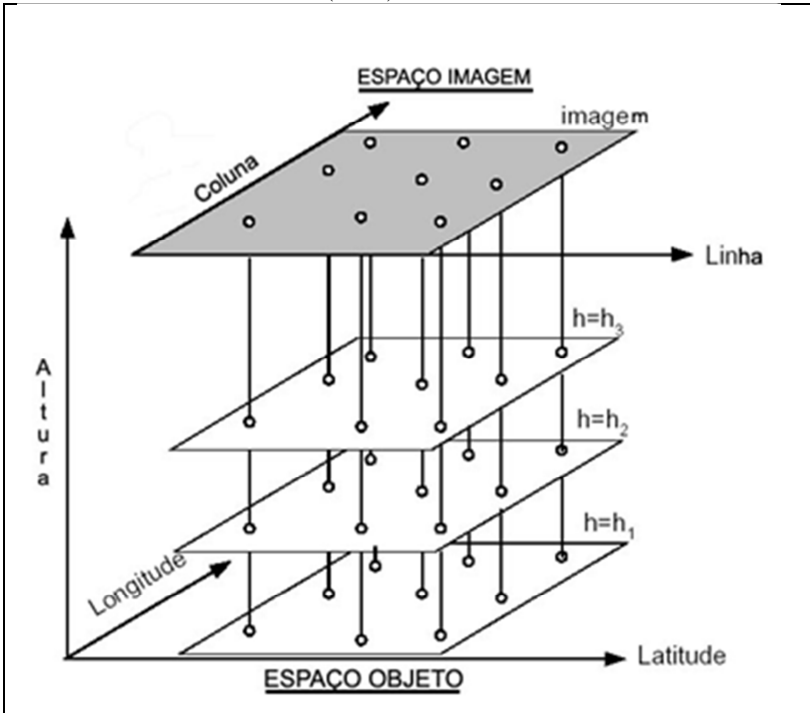
Xu (2004) ensina que as razões entre termos de primeira ordem podem corrigir distorções causadas pela projeção ótica, enquanto correções como a curvatura da terra, refração atmosférica e distorções das lentes podem ser corrigidas pelos termos de segunda ordem. Outras distorções desconhecidas ou mais complexas podem ser absorvidas pelos termos cúbicos.

Segundo o mesmo autor, um modelo de sensor (que descreve a relação geométrica entre espaço imagem e espaço objeto) pode ser físico ou genérico, este definido a partir dos RPCs. Duas das maiores produtoras de imagens orbitais, a Space Imaging e a Digital Globe, usam um modelo de sensor definido a partir de 78 RPCs. Quando a potência máxima de cada coordenada terrestre é igual a 3 e a potência total em cada termo dos polinômios é menor ou igual a três, tem-se o caso de razão entre polinômios cúbicos com 20 termos, sendo este um padrão que vem sendo empregado pela indústria. Resumindo, os coeficientes RPCs são usados nas equações do Modelo Funcional Racional para calcular uma coordenada na imagem (linha, coluna) a partir de uma coordenada de um objeto (latitude, longitude, altitude) na superfície terrestre (DIAL; GRODECKI, 2004).

Toutin (2011) afirma que existem duas formas para estimar os coeficientes das Funções Polinomiais Racionais: (1) a partir de uma grade regular tridimensional de pontos, gerada com o uso de um modelo físico já existente (solução independente do terreno). Esta é a abordagem adotada por diferentes fornecedores de imagens, inclusive para produtos GeoEye-1; (2) cálculo dos coeficientes a partir de pontos de controle no terreno – GCPs (solução dependente do terreno). A segunda abordagem não tem sido mais usada, pois é altamente dependente do número, acurácia e distribuição dos GCPs, bem como do relevo do terreno.

Silva (2005) descreve a solução independente do terreno: cria-se uma grade bidimensional de pontos sobre o espaço imagem e uma grade tridimensional correspondente no espaço objeto, com várias camadas de pontos fatiando o intervalo de elevação (quatro ou mais camadas para polinômios de terceira ordem). Para cada camada de elevação “Z”, as coordenadas horizontais (X,Y) são calculadas pelo modelo físico do sensor com base em um ponto de coordenadas (linha, coluna) do espaço imagem. A partir daí, com o uso do método dos mínimos quadrados, as coordenadas estabelecidas (espaço imagem) e calculadas (espaço objeto) são usadas para a estimação dos coeficientes das Funções Polinomiais Racionais. A figura 8 ilustra o processo:

Figura 8: Solução independente do terreno para geração dos coeficientes no Modelo Funcional Racional (RFM).



Fonte: Silva (2005).

A solução independente do terreno necessita dos parâmetros do imageamento, normalmente não disponibilizados pelos fornecedores. Estes fornecem então modelos de imageamento substitutos (com base em RPCs), apresentando em geral bons resultados (que podem ser refinados com o uso de Pontos de Controle no Terreno – *Points - GCPs*). De modo geral, a terminologia “modelo RPC” refere-se a este caso particular de RFM, com polinômios de terceira ordem e coeficientes determinados a partir da solução independente do terreno.

Apesar dos bons resultados obtidos com a aplicação do RPC, é possível refinar o modelo utilizando GCPs, por métodos diretos ou indiretos (HU; TAO; CROITURU, 2004).

Quando, além dos GCPs originais (aqueles usados pela empresa fornecedora para calcular os RPCs existentes) existem outros adicionais (coletados independentemente), pode-se usar o método de refinamento direto, com a atualização dos próprios coeficientes de transformação (de

modo geral este caminho só pode ser utilizado pela indústria, que conhece os GCPs originais).

Já os métodos indiretos não alteram os coeficientes originais, refinando os resultados com transformações no espaço imagem ou objeto. Se os coeficientes RPC são determinados apenas com base nas efemérides e atitude do satélite, sem o uso de GCPs, ocorrem principalmente erros lineares sistemáticos, que podem ser compensados com uma transformação complementar simples já no espaço imagem. O *software* ENVI 4.6, que será utilizado nesta investigação, corrige a geometria de imagens Ikonos, QuickBird e GeoEye-1 somente com o modelo RPC fornecido ou refinando por métodos indiretos com o uso de GCPs, conforme Silva, W. (2007). O refinamento é importante porque, conforme Pinheiro (2003), os modelos polinomiais possuem tendências (*bias*) de variação, que diminuem a acurácia e podem levar a erros não aceitáveis.

Entre as vantagens do uso da formulação RPC estão sua universalidade, ou seja, aplica-se, em tese, a qualquer sensor; sua eficiência; seu uso em vários *softwares* comerciais fotogramétricos e de sensoriamento remoto; e sua facilidade de uso pelos usuários finais. Entre as desvantagens pode-se mencionar a falta de significado físico dos parâmetros; a instabilidade numérica da solução e as falhas para definir funções e número de GCPs em caso de imagens complexas e altamente distorcidas. Assim sendo, diferentes revendedores de imagens orbitais fornecem atualmente RPCs em conjunto com suas imagens de alta e muito alta resolução espacial: Digital Globe com Ikonos, GeoEye-1, QuickBird-2 e WorldView-2; ISRO com Cartosat-1; JAXA com ALOS-PRISM (POLI;TOUTIN, 2012).

Já na solução dependente do terreno, os coeficientes dos polinômios são calculados pelo método dos mínimos quadrados a partir dos GCPs, sendo necessário um grande número de pontos (mais de 40) bem distribuídos na imagem, segundo Silva, W. (2007). Jacobsen (2007) alerta para o fato de que alguns programas computacionais comerciais oferecem este método sem controle estatístico adequado, tornando seu manuseio temerário.

2.2.1.2 Modelos físicos (ou rigorosos, ou paramétricos)

Conforme Pedro e Antunes (2007), os modelos físicos procuram descrever rigorosamente a geometria da varredura, usando dados conhecidos referentes à calibração do sensor, à trajetória e efemérides do satélite e ao modelo de câmera. Para Toutin (2004), modelos físicos

3D, quando disponíveis, devem ser a primeira escolha para correção geométrica. No entanto, conforme anteriormente discutido, a disponibilização dos diversos parâmetros necessários ao uso da modelagem física não é prática comum entre as empresas fornecedoras.

Boccardo et al. (2004) sustentam que os modelos rigorosos são baseados em equações colineares (adaptadas para a técnica de aquisição *pushbroom*, típica dos sensores de alta resolução), que irão fazer a relação entre as coordenadas do terreno (provenientes de um Modelo Digital de Elevação) e as da imagem. A modelagem matemática deve considerar quatro características dos sensores *pushbroom* (POLI; TOUTIN, 2012): Orientação exterior (posição, velocidade, atitude), desenho do sistema ótico (lentes e ângulo de visada), distorções das lentes e distorções nas linhas CCD.

De maneira geral, os modelos rigorosos são específicos, ou seja, diferem conforme a geometria do sensor. Segundo Poli e Toutin (2012), as principais dificuldades para a criação de modelos rigorosos genéricos são a falta de padronização e informações dos arquivos de metadados, bem como dificuldades na interpretação e conversão desses arquivos para um sistema de uso comum.

2.2.1.3 Outras abordagens

Os modelos até aqui discutidos não esgotam as possibilidades de correção geométrica de imagens de satélite. Na ausência de modelos físicos ou de RPCs podem ser usadas outras abordagens, entre as quais se podem mencionar o modelo APM (*Affine Projection Model*), também conhecido como Equação de Projeção Paralela (que na verdade é um método polinomial simples) e as equações DLT (*Direct Linear Transformation*), que são, segundo Poli e Toutin (2012), uma versão simplificada do modelo APM. Conforme Pedro e Antunes (2007), o uso generalizado do modelo alternativo APM deve ser feito com cautela, mas tem a vantagem de permitir o processamento de imagens em áreas menores do que aquelas normalmente comercializadas em conjunto com os RPCs, reduzindo assim o custo final. Além disso, a facilidade de implementação computacional do modelo APM dispensa o uso dos programas específicos que processam a solução RPC.

2.2.2 Reamostragem de pixels

Uma vez escolhido o procedimento matemático para correção geométrica da imagem de entrada (operação geométrica), a etapa seguinte no processo é calcular o novo valor de brilho para o pixel na imagem corrigida, através da reamostragem (*resampling*) dos pixels da imagem original (operação radiométrica). As três técnicas usadas para interpolar os valores de brilho são (MENESES; ALMEIDA, 2012):

✓ Vizinheiro mais próximo: Usa o valor do pixel mais próximo para o valor do pixel da imagem reamostrada. Conserva valores extremos e detalhes da imagem original, uma vez que não calcula médias dos dados originais, como nos outros dois métodos. No entanto, pode originar falhas em temas lineares (estradas, por exemplo);

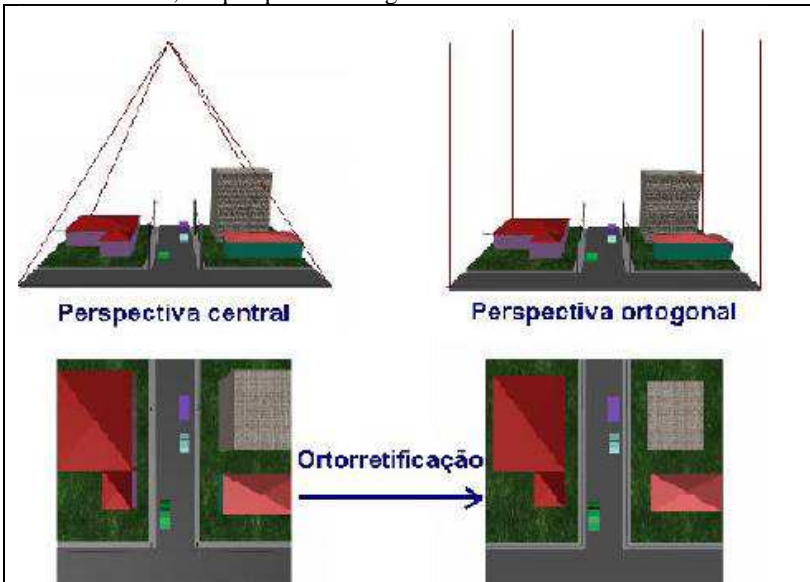
✓ Interpolação bilinear: Usa os valores de 4 pixels (numa janela 2×2) para o valor do pixel da imagem reamostrada, calculando através de uma função linear. Tem maior precisão espacial e origina contornos mais suaves do que a técnica do vizinho mais próximo, mas como calcula médias, alguns valores extremos são perdidos;

✓ Convolução cúbica: Semelhante à interpolação bilinear, com as diferenças de que o cálculo é realizado por uma função cúbica em um conjunto de 16 pixels (janela 4×4). Pode alterar drasticamente os dados radiométricos e é recomendada em fusão de imagens oriundas de sensores com significativa diferença entre suas resoluções espaciais.

2.2.3 Ortorretificação

As deformações existentes em imagens orbitais brutas inviabilizam sua utilização cartográfica a partir de simples transformações de rotação e translação, exigindo, conforme já discutido, correções geométricas que podem ser mais simples ou complexas, dependendo do modelo adotado (GRIPP JR, 2009a). O processo de ortorretificação, que transforma a visada cônica do sensor em imagens com perspectiva ortogonal, pode originar produtos utilizáveis cartograficamente, permitindo medições confiáveis de ângulos e distâncias (Figura 9).

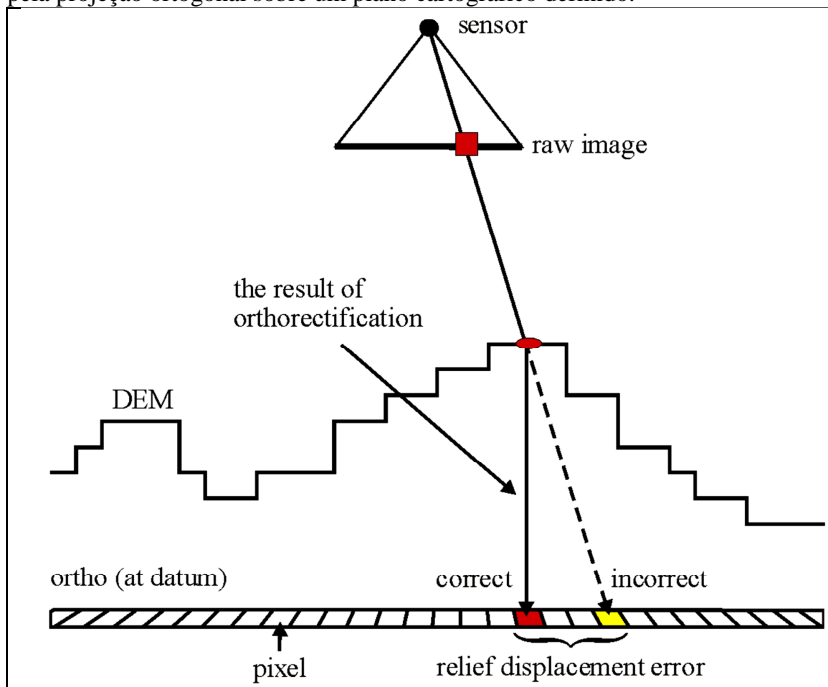
Figura 9: A ortorretificação transforma a perspectiva central, oriunda da visada cônica do sensor, em perspectiva ortogonal.



Fonte: Coelho e Brito (2007).

A ortorretificação é um dos métodos mais importantes na preparação de dados brutos para aplicações cartográficas de mapeamento. O processo transforma a projeção central da imagem numa vista ortogonal da superfície com escala uniforme, removendo assim as distorções oriundas da projeção cônica e do relevo (HU; TAO; CROITURU, 2004). Conforme Oliveira (2009), as ortoimagens são obtidas pela projeção ortogonal de cada pixel da imagem orbital sobre um plano cartográfico, conforme se pode observar na Figura 10:

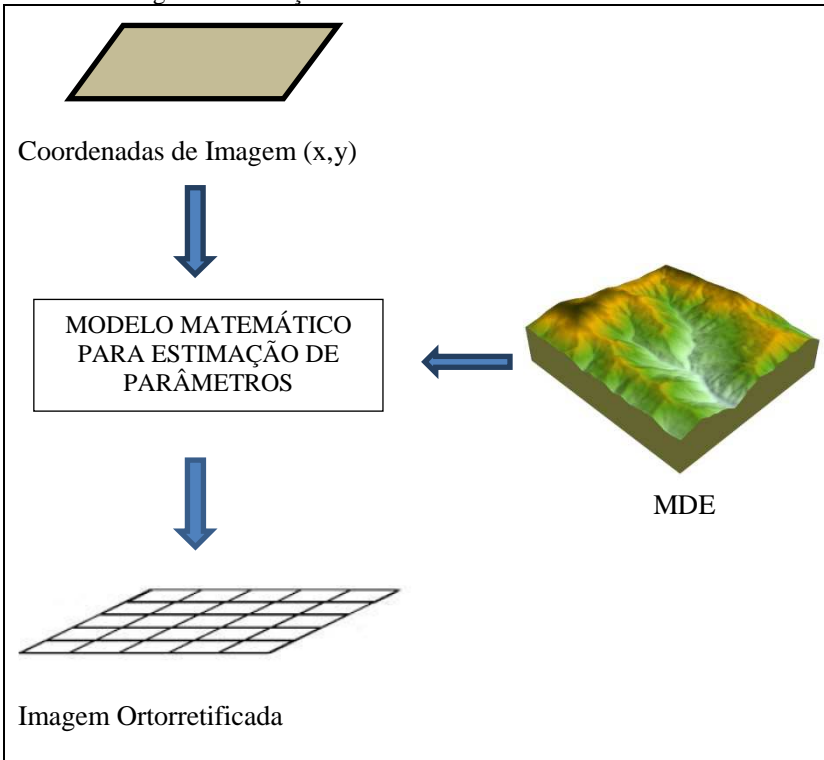
Figura 10: Resultado da ortoretificação de uma imagem bruta (visada cônica) pela projeção ortogonal sobre um plano cartográfico definido.



Fonte: PCI Geomatics (2003).

Para Ouverneyet al (2007) o processo de ortoretificação necessita de informações sobre o relevo da área imageada, que podem ser fornecidas pelo seu Modelo Digital de Elevação (MDE). A imagem bruta é assim projetada numa superfície de projeção cartográfica, usando um modelo matemático de representação para a Terra e um sistema de coordenadas. A Figura 11 esquematiza o processo de geração de ortoimagens:

Figura 11: Representação esquemática da geração de ortoimagens com o uso de um Modelo Digital de Elevação.



Fonte: Adaptado de Pedro (2005).

Dial e Grodecki (2004) apresentam um algoritmo para a geração de ortoimagens com o uso de RPCs e MDE. Para cada pixel P na imagem ortoretificada:

- 1- Calcular a coordenada (X, Y) de P no espaço objeto;
- 2- Converter (X, Y) em (λ, ϕ) ;
- 3- Interpolar o MDE em (λ, ϕ) para obter H ;
- 4- Adicionar a altura geoidal: $h = H + N$;
- 5- Calcular, usando as equações RPCs, as coordenadas no espaço imagem: $(L, S) = \text{RPC}(\lambda, \phi, h)$;
- 6- Interpolar a imagem de entrada em (L, S) para determinar o valor DN (nível de cinza) de P .
- 7- Próximo pixel P .

Onde P é o pixel de saída, na imagem ortorretificada; (X, Y) as coordenadas do espaço objeto Leste e Norte; λ a longitude; ϕ a latitude; H a altitude ortométrica; N a altitude geoidal; h , a altitude elipsoidal. As letras (L, S) simbolizam Linha e Coluna de cada pixel da imagem de entrada. Uma vez que os MDEs normalmente utilizam a altitude geoidal N , adiciona-se esta à altitude ortométrica para se obter a altitude elipsoidal h (etapa 4 do algoritmo anteriormente descrito).

No mesmo sentido, Silva (2005) sustenta que, com um modelo físico do sensor e um modelo digital do terreno, a ortorretificação é a única operação que elimina deslocamentos devidos ao relevo, melhorando significativamente a exatidão posicional da imagem final. O mesmo autor recomenda a escolha de uma área com relevo movimentado para a avaliação dos produtos da ortorretificação.

Embora se tenha até agora mencionado a necessidade de usar MDEs no processo de ortorretificação, deve-se destacar que o *software* comercial ENVI 4.6, que será utilizado neste trabalho, possui a capacidade de ortorretificar imagens de alguns satélites com o modelo RPC sem o uso de MDE, embora sua utilização aumente a acurácia do produto final. Outro fato importante a destacar é a possibilidade de ortorretificar recortes de uma cena completa do satélite, economizando assim ao adquirir esse material, uma vez que o preço normalmente é estipulado por km^2 de área comercializada.

Do que foi visto até aqui, pode-se então dizer que uma imagem é *retificada* quando a ela foi atribuído algum sistema de coordenadas (cartográfico ou não); é *georreferenciada* quando foi atribuído um sistema de coordenadas cartográfico; e é *ortorretificada* quando sofreu correções das distorções geométricas oriundas do relevo, e os elementos visualizados estão conforme linhas de visada perpendiculares ao plano da imagem (GRIPP JR, 2009b).

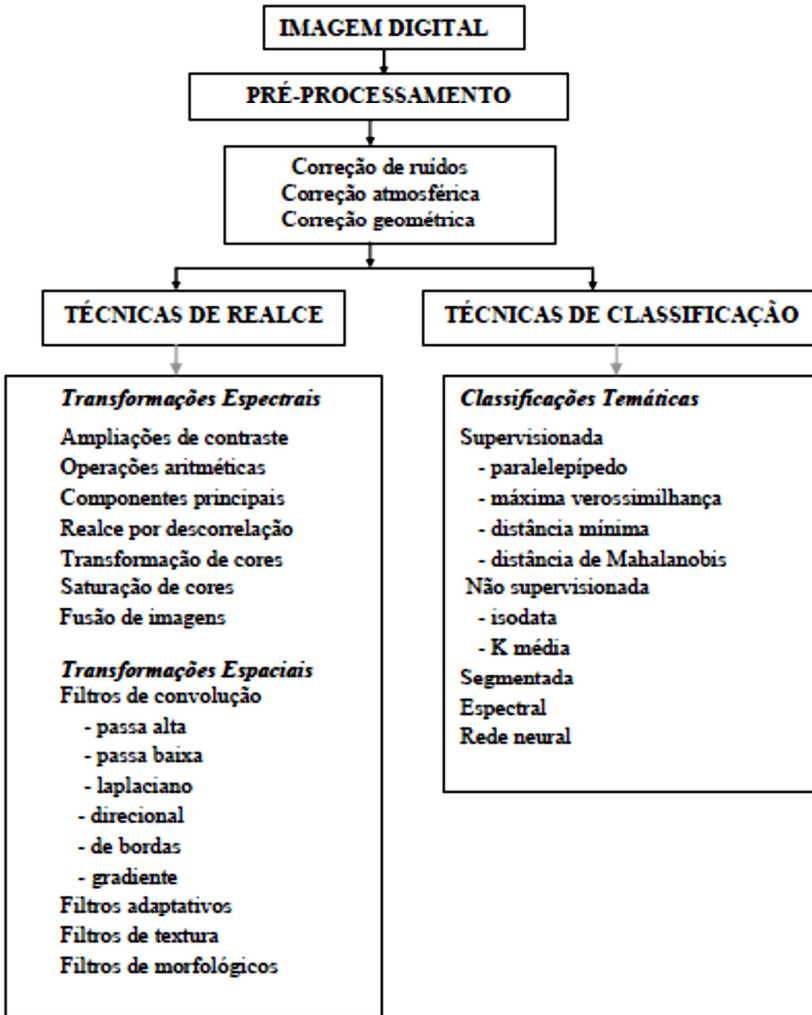
2.2.4 Técnicas de Realce

O formato digital das imagens orbitais permite o uso de uma ampla gama de técnicas para processamento matemático e análise dos dados, que podem dar origem a classificações destes dados ou mesmo a novas imagens de maior qualidade espacial e espectral, com a finalidade de facilitar o trabalho do analista e aumentar sua precisão. Quase todos os *softwares* utilizados para processamento de imagens remotas possibilitam uma fase de pré-processamento digital (para corrigir erros dos dados originais), que pode ser seguido por técnicas que se dividem em dois tipos básicos, realce e classificação. Esse processamento é

orientado para as necessidades do usuário, ou seja, não existe um fluxo obrigatório para todos os casos (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A Figura 12 resume os componentes principais de um sistema básico de processamento digital de imagens:

Figura 12: Componentes básicos do processamento digital de imagens.



Fonte: Meneses e Almeida (2012).

Como pode se observar na figura acima, as técnicas de realce dividem-se em transformações espectrais (a maioria), objetivando que cada pixel da imagem aumente seu contraste em relação ao pixel vizinho (independente do valor deste), e transformações espaciais, em que o realce irá depender do valor do pixel em relação aos seus vizinhos. O conjunto de técnicas de realce busca melhorar as características visuais da imagem, ficando a escolha do procedimento a cargo do analista, com base na sua capacidade de interpretação, nas características da área imageada e no objetivo do trabalho (MENESES; ALMEIDA, 2012).

2.2.4.1 Fusão de imagens

Entre as técnicas de realce, a fusão de imagens é uma transformação espectral comumente usada para melhorar a qualidade do produto final, através, por exemplo, da combinação de imagens de menor com maior resolução espacial (OLIVEIRA, 2009). Para diversos satélites, a fusão da banda pancromática (maior resolução espacial) com as bandas do espectro visível dá origem a um produto de maior qualidade espacial e espectral.

Toutin (2011) destaca, no entanto, que imagens resultantes de fusão, com acurácia de um pixel (ou melhor), podem apresentar falsas feições coloridas, podendo levar à extração de informações errôneas devido aos pixels mistos. Em outras palavras, preservar a integridade espacial pode degradar a integridade espectral de imagens de muito alta resolução, sendo necessário procurar um equilíbrio entre acurácia geométrica e preservação das informações radiométricas.

Polizel et al. (2011) afirmam que a escolha entre os diversos métodos de fusão de imagens (com seus respectivos algoritmos) depende da natureza dos dados a processar e do fim a que se destina o produto. Salientam também que é necessário o registro entre as imagens das bandas multiespectrais e pancromática antes da aplicação destes métodos (com o objetivo de reamostrar o tamanho do pixel para o da imagem de maior resolução espacial).

As mesmas autoras compararam (quanto à capacidade de conservação de conteúdo espectral e transferência de detalhes) as técnicas IHS, *Brovvey*, Análise de Componentes Principais (ACP) e *Gram-Schmidt* para o processamento de imagens Ikonos e GeoEye-1, com o uso do *software* Envi 4.7, realizando a fusão da banda pancromática com as multiespectrais do mesmo sensor. Como resultado, recomendam o uso de ACP e *Gram-Schmidt* para Ikonos e

Gram-Schmidt para GeoEye-1, por operarem com mais de três bandas e manterem a resolução radiométrica original. O Quadro 2, a seguir, resume as vantagens e desvantagens de cada um destes métodos:

Quadro 2: Comparação entre métodos de fusão de imagens.

MÉTODOS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
IHS	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Método considerado bastante eficiente; ✓ Melhoria significativa da resolução espacial na imagem gerada; ✓ Facilidade de implementação; ✓ Amplamente difundido e utilizado. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Número de bandas que podem ser utilizadas limita-se a três; ✓ A imagem gerada possui resolução radiométrica de apenas oito bits; ✓ Distorção das cores pela variação que ocorre no matiz (hue).
BROVEY	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gera imagens que apresentam maior contraste; ✓ Preserva a contribuição espectral de cada pixel. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Número de bandas que podem ser utilizadas limita-se a três; ✓ A imagem gerada possui resolução radiométrica de apenas oito bits;
PRINCIPAIS COMPONENTES	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Não possui limitação no número de bandas que pode ser utilizado; ✓ Adequado no tratamento de imagens de sensores que possui um alto número de bandas; ✓ Mantém a resolução radiométrica original. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A cobertura da banda pancromática sobre as demais bandas interfere significativamente no resultado final.
GRAM – SCHMIDT	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Não possui limitação no número de bandas que pode ser utilizado; ✓ Mantém a resolução radiométrica original; ✓ É um método mais preciso, pois usa a resposta espectral de um sensor para estimar o que os dados da pancromática aparentam. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A cobertura da banda pancromática sobre as demais bandas interfere significativamente no resultado final.

Fonte: Polizel et al. (2011).

Lourenço, Sanches e Furtado (2012) alertam para a importância de preservar as informações da imagem original quando se incorpora a qualidade espacial da banda pancromática às imagens das bandas multiespectrais na geração de uma nova imagem híbrida. Para as mesmas autoras, o principal problema observado durante a fusão de imagens pancromáticas de resolução espacial maior com multiespectrais de resolução espacial inferior é a chamada *distorção de cor*, desvios na aparência visual e nos valores espectrais da imagem híbrida, quando comparada com as imagens originais.

Entre os procedimentos usados para a avaliação da qualidade do produto obtido pela fusão de imagens podem-se citar (LOURENÇO; SANCHES; FURTADO, 2012):

- ✓ Avaliação visual (por variáveis ou por atributos). Na avaliação por atributos, usam-se critérios de nitidez, cores, ruído, textura e borda do objeto para compor uma matriz de qualidade onde são comparadas as feições água, área urbana, solo exposto e vegetação entre as imagens originais e a imagem sintética. Uma escala de números

inteiros entre 1 (qualidade visual baixa) e 5 (qualidade visual alta) é então empregada para avaliar o produto resultante da fusão;

✓ Avaliação quantitativa, utilizando o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson ou a Distância Euclidiana Média, que objetiva medir a variação de cor quando se aplica a técnica de fusão. Quanto menor a distância calculada, maior a fidelidade espectral do produto final.

2.2.4.2 Ampliação de contraste

Outra técnica de realce comumente usada é a ampliação de contraste, transformação espectral que, segundo Meneses e Almeida (2012), procura ampliar o contraste de reflectância para uma banda espectral específica, uma vez que na natureza os alvos distribuídos em uma área normalmente ocupam apenas uma pequena proporção dos valores de brilho possíveis em uma imagem. A regra básica para a ampliação linear de contraste é atribuir para a imagem realçada o mesmo número de pixels da imagem original, expandindo, porém, o valor para o intervalo de 0 a 255 níveis de cinza (para uma imagem de 8 bits). Assim, se a imagem original tem valores de brilho entre 10 e 60, a função de transformação atribui, na imagem de saída, valor 0 para o 10 da entrada, 255 para o 60 da entrada e valores entre 0 e 255 para os valores entre 10 e 60 da entrada. O resultado é uma escala mais diferenciada para os valores de brilho de saída, com ampliação visual do contraste.

2.3 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

Várias terminologias são usadas para denominar modelos matemáticos que representam graficamente o relevo da superfície do planeta. Felgueiras e Câmara (2001) conceituam Modelo Numérico de Terreno (MNT) como “uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre”. Conforme Médice (2008), o termo Modelo Digital do Terreno (MDT) é uma tradução do inglês *Digital Terrain Model* (DTM) e remete, de maneira geral, a uma representação digital de uma fração da superfície. Para Gripp Jr (2009b), Modelo Digital de Elevação (MDE) é “a representação da superfície da Terra, no modo digital, cuja característica principal é descrever a morfologia de uma área qualquer de forma contínua”. Resumindo, o MDE refere-se a uma representação tridimensional do relevo do terreno, e será com este sentido e terminologia empregado doravante.

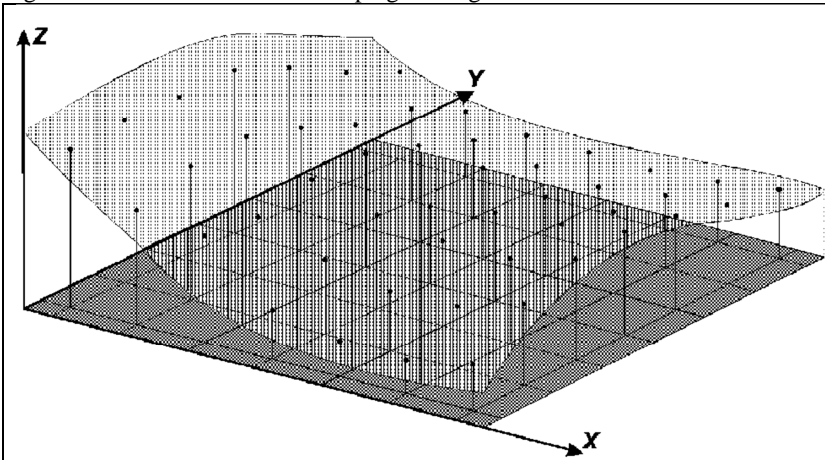
A geração de um MDE ocorre em duas etapas (FELGUEIRAS; CÂMARA, 2001):

✓ Amostragem, que deve coletar pontos representativos do comportamento altimétrico do terreno. A coleta de poucos pontos em uma região de relevo movimentado resulta em escassez de informação, enquanto muitos pontos em áreas planas acarreta redundância. Para a coleta de pontos podem ser empregadas várias técnicas, tais como topografia, perfilamento por radar ou laser e restituição estéreo-fotogramétrica (a partir de fotos aéreas ou imagens orbitais);

✓ Geração do modelo propriamente dito, com o uso de funções matemáticas de interpolação. Segundo Maia, Gripp Jr. e Souza (2011), o uso de interpoladores permite que se construa um novo conjunto de dados a partir das amostras, a fim de representar de maneira contínua um fenômeno caracterizado pelo conjunto discreto dos dados pontuais coletados.

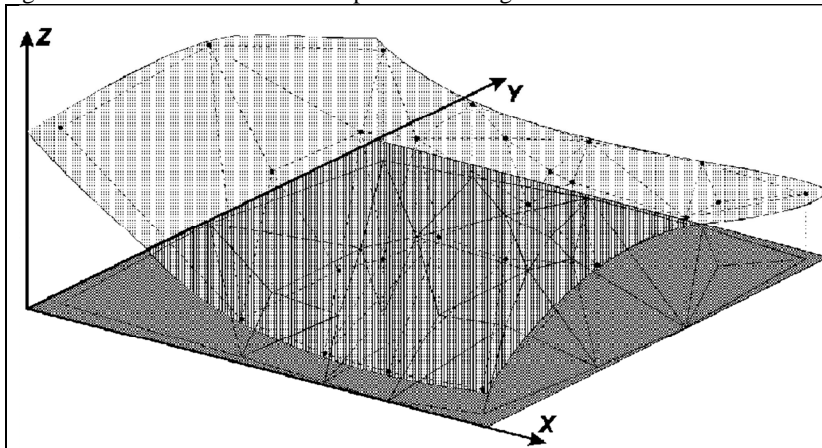
Conforme Felgueiras e Câmara (2001), as estruturas de dados mais usadas para armazenar um MDE são os modelos de grade regular, que “aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares” e os modelos de malha triangular (*Triangular Irregular Network – TIN*), “conjunto de poliedros cujas faces são triângulos”. As Figuras 13 e 14 ilustram os dois modelos:

Figura 13: Estrutura de dados do tipo grade regular.



Fonte: Felgueiras e Câmara (2001).

Figura 14: Estrutura de dados do tipo malha triangular.



Fonte: Felgueiras e Câmara (2001).

Os mesmos autores apresentam algumas das principais aplicações para um Modelo Digital de Elevação:

- ✓ Visualização tridimensional da área em estudo;
- ✓ Gerar mapas de curvas de nível, declividade, drenagem, exposição;
- ✓ Obter perfis gráficos do relevo ao longo de determinadas trajetórias;
- ✓ Calcular volumes de corte e aterro;
- ✓ Gerar imagens de nível de cinza. Esta aplicação é de especial interesse para o processo de ortorretificação de imagens orbitais, pois é a forma de representação do MDE usada para processamento em *softwares* comerciais.

2.4 AQUISIÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE (GCPs) E DE TESTE

Conforme visto anteriormente, o uso de pontos de controle, que podem ser obtidos a campo com sistemas de posicionamento global por satélites, é etapa importante no registro de imagens orbitais. Embora alguns métodos de correção geométrica não exijam a utilização de GCPs, mesmo nesses casos seu uso pode refinar os resultados do processo, melhorando a qualidade do produto final. Além disso, para a posterior avaliação da qualidade posicional, é importante uma

quantidade adequada de pontos bem distribuídos. Merchant (1982) sugere um mínimo de 20 pontos para a realização destas análises.

Para imagens de alta e muito alta resolução espacial, a precisão exigida na coleta de GCPs é da ordem de centímetros. Conforme Santos (2010), os pontos de teste devem ter precisão de pelo menos 1/3 do erro-padrão esperado para a escala de teste (por exemplo, para uma Escala 1:5000, classe A, 1/3 do EP (1,5 m) é 0,5 metro). Além disso, também deve ser precisa sua definição na imagem, o que pode ser conseguido com a escolha de alvos facilmente identificáveis, como cantos de construções, quinas de cercas e intersecção de vias.

Uma vez que modelos empíricos de correção geométrica podem ser sensíveis à distribuição, número e acurácia dos GCPs, Toutin (2011) afirma que eles devem ser distribuídos por toda a imagem, representando também as diferenças altimétricas. Somente com pontos de controle de qualidade (e pontos de teste para conferir o procedimento) é que se podem obter imagens ortorretificadas com alto nível de precisão (OLIVEIRA, 2009).

Segundo Gripp Jr (2009b), o Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*), desenvolvido a partir da década de 1970 pelos Estados Unidos, é um sistema de radionavegação por satélite capaz de determinar, em tempo real, o posicionamento tridimensional de um ponto qualquer na superfície terrestre através de medições da pseudodistância entre o usuário e no mínimo quatro satélites da constelação. O mesmo autor afirma que, conforme a metodologia e equipamentos GPS empregados, podem-se obter dados para elaborar mapas em grandes escalas, até 1:1 (desenhos digitais), ou referenciais cadastrais.

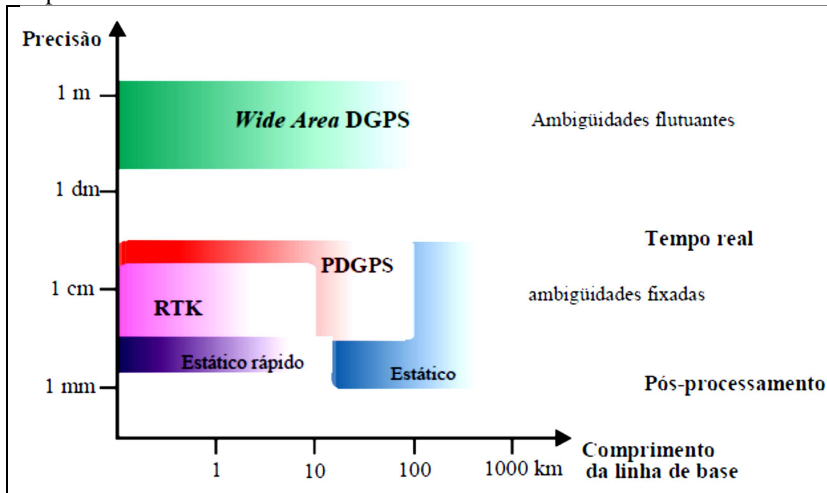
Os métodos de levantamento empregados podem ser divididos, conforme Oliveira (2011), entre aqueles de posicionamento absoluto (uso de um receptor, código C/A, menor precisão) ou relativo (uso de dois receptores, sendo um deles uma base de coordenadas conhecidas, código C/A e portadoras L1/L2, maior precisão). A técnica de posicionamento Estático Rápido (*Fast Static*), que se enquadra no segundo caso, permite obter precisão milimétrica para linhas de base com até 10 km de comprimento (FREIBERGER JR, 2002).

Em linhas gerais, a técnica Estático Rápido baseia-se no uso de um receptor de referência (ou base, com coordenadas conhecidas), e de um ou mais receptores *rover* que ocuparão de maneira estacionária os pontos cujas coordenadas se pretende determinar. É necessário que a estação base e o receptor *rover* colem dados de alguns satélites simultaneamente, minimizando as fontes de erro pelo pós-

processamento da diferença entre as observações coletadas. O tempo de ocupação varia conforme o comprimento das linhas de base e a quantidade de satélites visíveis, sendo de modo geral menor do que aqueles observados em levantamentos do tipo Estático.

Como tendência geral, o aumento das linhas de base tende a aumentar a degradação posicional a uma taxa aproximada de 10 ppm, ou seja, 1 centímetro por quilômetro (FERNANDES et al, 2012), pois para distâncias entre receptores de até 10 km, a constelação de satélites rastreada pelas estações base e móvel é a mesma e os erros (oriundos dos relógios dos satélites, da propagação do sinal na atmosfera e das efemérides) estão correlacionados (BEPPLER; DIAS; CARVALHO, 2008). A Figura 15, adaptada por Freiberger Jr (2002), ilustra as precisões esperadas para diversas técnicas de posicionamento e linhas de base:

Figura 15: Precisão para diferentes técnicas de posicionamento conforme o comprimento das linhas de base.



Fonte: Freiberger Jr (2002).

Ainda conforme Freiberger Jr (2002), a minimização ou eliminação dos erros sistemáticos e ruídos que ocorrem durante a medição das pseudodistâncias influi diretamente na precisão dos posicionamentos obtidos com GPS. Entre os erros (que podem estar relacionados ao satélite, à atmosfera e ao receptor) merece destaque aquele devido ao multicaminho, no qual o sinal que chega ao receptor é proveniente não apenas diretamente do satélite, mas também de

reflexões causadas por objetos mais ou menos próximos. Assim, deve-se evitar coletar pontos muito próximos de materiais reflexivos ou que possam causar perda ou degradação do sinal do GPS ou do rádio transmissor.

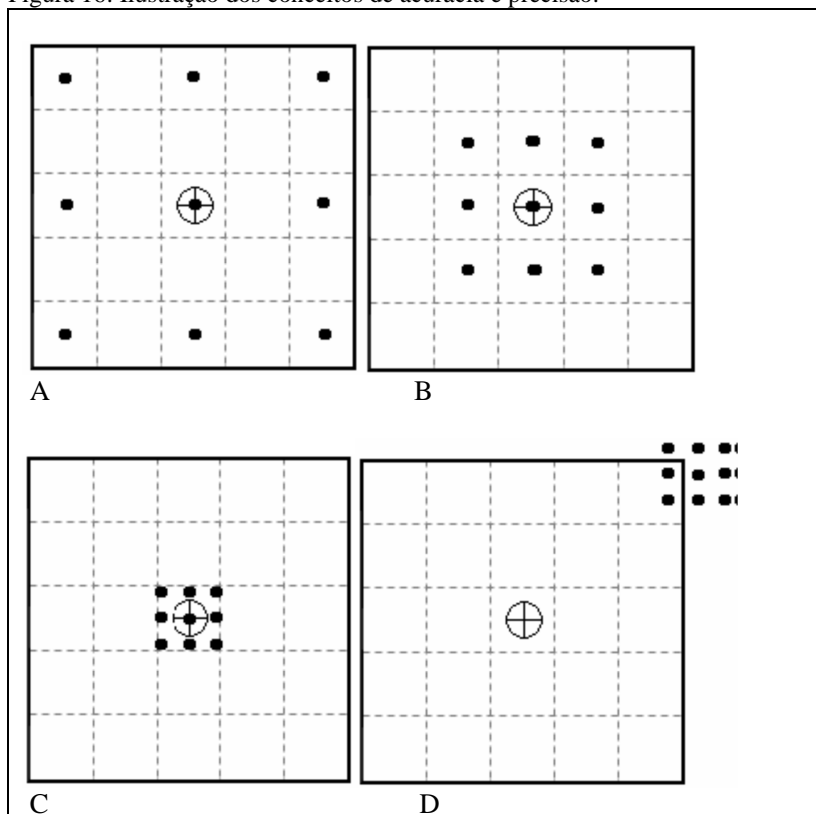
2.5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE POSICIONAL

Apesar da importância de que se reveste o controle de qualidade dos produtos cartográficos, esta é uma prática pouco comum no Brasil. Uma das maneiras de avaliar a qualidade geométrica de um produto cartográfico é verificar as discrepâncias existentes entre as coordenadas de pontos no produto e as coordenadas de pontos homólogos no campo, obtidas por observações *in loco* ou de outra carta de maior confiabilidade (GRIPP JR, 2009b). Medidas estas diferenças, realizam-se tratamentos estatísticos para a avaliação da qualidade do produto examinado em termos de acurácia e precisão.

Andrade (*apud* Gripp Jr, 2009b) define *exatidão* cartográfica como sinônimo de *acurácia*, que é o afastamento da realidade topográfica que a carta tem como um todo. Já *precisão* refere-se à dispersão dos valores observados, ou seja, é uma medida de espalhamento dos erros em torno da sua média. Segundo o mesmo autor, a média dos erros obtidos testando-se n pontos em uma carta indica sua exatidão (acurácia), enquanto o desvio-padrão representa a precisão. Em outras palavras, precisão refere-se à coerência interna entre as feições, enquanto que acurácia diz respeito à correspondência com os valores reais a campo (DALMOLIN; LEAL, 2004).

Monico et al. (2009) utilizam a clássica ilustração de tiro ao alvo para rever e explicar os conceitos de acurácia e precisão. Assim, na Figura 16, a média dos resultados de “A” e “B” está exatamente no centro dos alvos, caracterizando tendência nula. No entanto, a precisão no alvo “B” é maior (menor dispersão), bem como a acurácia. Já nos alvos “C” e “D” a precisão é semelhante, mas a acurácia em “C” é maior, devido à tendência (viés ou *bias*) que se observa nos resultados em “D”.

Figura 16: Ilustração dos conceitos de acurácia e precisão.



Fonte: Monico et al. (2009)

Conforme Santos (2010), uma das formas de avaliar a qualidade posicional de um produto cartográfico é através do Decreto-lei 89.817/1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, embora Gripp Jr (2009b) ressalve que estas normas foram elaboradas numa época em que pouco se utilizava a tecnologia digital. Pela sua relevância, transcreve-se a seguir os artigos 8º e 9º do Capítulo II daquele diploma legal (BRASIL, 1984):

Art. 8º - As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, segundo o critério abaixo indicado:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico - estabelecido.

§1º Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

§2º A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão – $PEC = 1,6449 \times EP$.

§3º O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§4º Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes às expressões Erro Padrão, Desvio Padrão e Erro Médio Quadrático.

Art9º - As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios seguintes:

a) Classe A

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

b) Classe B

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm, na escala da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

c) Classe C

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm, na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

A Tabela 4, a seguir, resume os valores do PEC e do EP, segundo o preconizado pela legislação mencionada:

Tabela 4: PEC e EP (Decreto 89817/84).

Classe	Planimetria		Altimetria	
	PEC	EP	PEC	EP
A	0,5 mm .escala	0,3 mm .escala	$\frac{1}{2}$ equidistância	$\frac{1}{2}$ equidistância
B	0,8 mm .escala	0,5 mm .escala	$\frac{3}{5}$ equidistância	$\frac{1}{2}$ equidistância
C	1,0 mm .escala	0,6 mm .escala	$\frac{3}{4}$ equidistância	$\frac{1}{2}$ equidistância

Fonte: Adaptado de Gripp Jr (2009b).

Já a Tabela 5 resume os valores de exatidão e erro padrão planimétrico, ainda conforme o Decreto 89.817/84, para algumas das escalas mais utilizadas:

Tabela 5: PEC e EP planimétrico para algumas escalas (Decreto 89.817/84).

Escala	Classe	PEC		Erro - padrão	
		Carta (mm)	Terreno (m)	Carta (mm)	Terreno (m)
1:1000	A	0,5	0,5	0,3	0,3
	B	0,8	0,8	0,5	0,5
	C	1,0	1,0	0,6	0,6
1:2000	A	0,5	1,0	0,3	0,6
	B	0,8	1,6	0,5	1,0
	C	1,0	2,0	0,6	1,2
1:5000	A	0,5	2,5	0,3	1,5
	B	0,8	4,0	0,5	2,5
	C	1,0	5,0	0,6	3,0
1:10000	A	0,5	5,0	0,3	3,0
	B	0,8	8,0	0,5	5,0
	C	1,0	10,0	0,6	6,0

Fonte: Leal (*apud* Gripp Jr, 2009b).

Para Dalmolin e Leal (2004), está implícito no Decreto 89.817/84 o critério da proporção amostral simples para avaliar os produtos cartográficos quanto a sua qualidade posicional. As discrepâncias planimétricas das componentes podem ser representadas pela Resultante do Erro, calculada segundo a fórmula que segue:

$$RE = \sqrt{\text{Erro Leste}^2 + \text{Erro Norte}^2} \quad (6)$$

No entanto, os autores alertam para o fato de que essa amostragem pode não ser representativa para o produto cartográfico como um todo, e sugerem testes estatísticos mais flexíveis, porém igualmente válidos, para a avaliação. No mesmo sentido, Santos e Vieira (2009) usaram três métodos diferentes (desvio padrão da amostra, porcentagem da amostra e testes de hipóteses) para avaliar o PEC de imagens orbitais Ikonos e CBERS 2-B, uma vez que o Decreto 89.817/84 não determina uma metodologia específica de avaliação. Obtiveram classificações homogêneas para altimetria e ligeiramente discordantes para planimetria da imagem Ikonos (com o método da porcentagem da amostra, a classificação foi pior). Para a imagem CBERS 2B, as classificações foram as mesmas nos três métodos.

Diversos outros autores (MERCHANT, 1982; OLIVEIRA, 1996; GRIPP JR, 2009b; SANTOS, 2010) também sugerem metodologias estatisticamente mais sofisticadas (incluindo análise de tendências, de precisão e testes de hipóteses sobre média e desvio padrão amostral) para este tipo de avaliação.

Outra maneira de estimar qualidade posicional planimétrica, usada pela comunidade cartográfica em nível internacional, é o erro circular com intervalos probabilísticos de confiança. O CE90 (*Circular Error of 90%*) de um produto cartográfico é definido como o raio circular (em metros) que engloba 90% dos erros planimétricos em relação à posição real no terreno e pode ser determinado a partir do RMS (Erro Médio Quadrático ou *Root Mean Square*) da seguinte forma (LUIZ; OLIVEIRA; OKIDA, 2003):

$$RMS = \sqrt{\frac{(X_F - X_{DGPS})^2 + (Y_F - Y_{DGPS})^2}{N - 1}} \quad (7)$$

onde:

X_F e Y_F são as coordenadas dos pontos notáveis na imagem;

X_{DGPS} e Y_{DGPS} são coordenadas dos pontos notáveis determinadas a campo por DGPS;

N é o número de pontos notáveis utilizados.

$$\text{Assim, CE90} = 2,15 \times \text{RMS} \quad (8)$$

Essa é uma estimativa bastante utilizada por fornecedores de imagens de sensores orbitais para caracterizar seus produtos. Assim, se o distribuidor de imagens GeoEye - 1 informa uma $\text{CE90} = 5$ (sem pontos de controle nem correção das distorções do terreno), pode-se entender que a posição de um objeto, obtida na imagem, estará deslocada em no máximo 5 metros da posição real do objeto no terreno, em 90% das vezes.

Além das análises já discutidas, alguns autores (PINHEIRO, 2003; SILVA, E. 2005; OLIVEIRA, 2009) sugerem a sobreposição de arquivos vetoriais mais acurados (se disponíveis) sobre a imagem corrigida, como forma de comparar e avaliar visualmente a qualidade posicional dos produtos gerados.

2.6 ERRO GRÁFICO, RESOLUÇÃO ESPACIAL E ESCALA

Oliveira (2009) considera que a primeira restrição para a definição da escala de um produto cartográfico gerado a partir de uma imagem orbital seja a resolução espacial desta imagem. Assim, uma imagem GeoEye-1 com resolução espacial de 0,5 metros poderia, em tese, gerar um produto na escala 1:2000, considerando-se apenas o erro gráfico de 0,25 mm ($\text{Escala} = \text{Resolução}/0,00025$). O autor esclarece, no entanto, que fatores como o potencial de extração de informações e a acurácia resultante da correção geométrica também influenciam na determinação da maior escala possível.

Tavares Jr et al. (2006) descrevem uma metodologia para calcular, *a priori*, a escala máxima para geração de produtos cartográficos a partir de imagens orbitais conforme suas resoluções espaciais. Partem do princípio de que, embora seja possível detectar objetos menores do que a resolução espacial, isso não garante necessariamente seu reconhecimento. Para um alvo ser discernível, seu tamanho deve ser de pelo menos dois pixels da imagem (valor determinado pela frequência de Nyquist, que equivale à metade da frequência de amostragem do sensor).

Os autores relacionam o erro gráfico com o número de pixels determinado pela frequência de Nyquist para obter a escala máxima de produtos cartográficos obtidos a partir de uma imagem orbital:

$$\text{Eg} = 0,0002 \times \text{Fe} \quad (9)$$

$$E_g = 2 \times R_e \quad (10)$$

Igualando (9) e (10), temos

$$F_e = 10000 \times R_e \quad (11)$$

Onde:

F_e = Fator de escala

R_e = Resolução espacial

Assim, usando a equação (11), podemos prever, para um produto gerado a partir de imagem GeoEye-1, uma escala máxima de 1:5000.

2.7 RESULTADOS DE TRABALHOS SEMELHANTES

Diversos trabalhos têm investigado, desde o início da década passada, a correção geométrica de imagens orbitais de alta e muito alta resolução espaciais, tanto no Brasil quanto no exterior.

Toutin e Cheng (2000) testaram três diferentes métodos de correção geométrica (polinomiais simples, proporcional e modelo rigoroso) em um produto Ikonos da linha *Geo*, cuja acurácia relativamente baixa limita o potencial de uso cartográfico dado por sua alta resolução. Os autores concluíram que o modelo rigoroso apresentou os melhores resultados, gerando imagens ortorretificadas de qualidade posicional comparável aos produtos da linha *Precision*, de custo muito mais alto.

Pinheiro (2003) corrigiu imagem Quickbird usando RFMs com RPCs, MDE e pontos de controle, como parte do processo para gerar um mapa de geomorfologia e uso/cobertura de solo em quatro municípios gaúchos, na região do Planalto das Araucárias (relevo movimentado). O produto final foi classificado como PEC Classe A para escala 1:15000.

Xu (2004), em estudo sobre os Modelos Funcionais Racionais (RFMs), obteve um CE90 igual a 1,46 metros para imagem Ikonos da linha *Orto Kit Level*, e 1,98 metros para Quickbird *Basic Level*, concluindo que ortorretificar utilizando RPCs, refinados com ao menos um GCP, pode melhorar muito a acurácia do produto final.

Silva (2005) ortorretificou imagem Ikonos (linha *GeoOrtho Kit*) da cidade do Rio de Janeiro (diferenças de altitude de até 780 metros), usando RFMs com RPCs e MDEs (três escalas diferentes), obtendo nos

melhores casos ortoimagens classificadas como PEC Classe A para escala 1:5000.

Pons e Pejon (2006) compararam o uso de imagens Ikonos ortorretificadas (2004) e ortofotos (feitas a partir de fotos aéreas de 1998, na escala 1:8000) no estudo da degradação do solo em áreas urbanas no município de São Carlos (SP). Nos dois casos foi possível obter informações de qualidade quanto a tamanho e localização das áreas de degradação observadas.

Silva, A. (2007) avaliou o uso de RPCs na ortorretificação de imagens Ikonos em diferentes cenários, com variações do ângulo de elevação do satélite e das condições do relevo. Os resultados demonstraram a viabilidade do emprego de RPCs para imagens tomadas com ângulo de elevação do satélite superior a 70° (para Ikonos, elevações superiores a 72° permitem ortorretificar, com RPCs, terrenos com até 1200 metros de desnível).

Silva, W. (2007) comparou os resultados da ortorretificação de imagens Ikonos e Quickbird da cidade do Rio de Janeiro realizada com ou sem o uso de pontos de controle para refinar o Modelo Funcional Racional, buscando melhor acurácia. O autor concluiu que houve melhoria significativa da exatidão posicional (acurácia) das ortoimagens produzidas com o uso dos pontos de controle para refinar o modelo funcional racional. Na imagem Quickbird ortorretificada sem refinamento a média dos erros foi de 4 metros, enquanto que no modelo refinado por quatro pontos de controle essa média baixou para 1,6 metros; para a imagem Ikonos, a média de erro sem refinamento foi de 7,6 metros e com refinamento (quatro pontos de controle), 1,8 metros.

Jacobsen (2007) relatou estudos com diferentes métodos para orientação de imagens Ikonos *Geo* e Quickbird *Standard OR* em regiões montanhosas da Turquia que obtiveram acurácia em nível de sub-pixel com o uso de bons pontos de controle.

Pedro e Antunes (2007) compararam os modelos APM e Polinomial Racional (com RPCs) na ortorretificação de imagem Quickbird *Standard* (modo de varredura *Reverse*) do município de Araucária (PR). Os melhores resultados foram obtidos com o modelo APM, pois com uso de RPCs sem pontos de controle houve identificação de uma tendência sistemática e menor qualidade posicional.

Gripp Jr (2009b) avaliou a qualidade posicional e o potencial de uso cartográfico de imagens Ikonos linha *Geo* de região montanhosa em Minas Gerais, ortorretificadas através dos métodos polinomial simples, racional e paramétrico. O estudo avaliou também a influência da

resolução do MDE e do número de pontos de controle no processo de ortorretificação, e dos sistemas geodésicos e de coordenadas geográficas nos mapeamentos cartográficos oriundos de imagens orbitais. A maioria das ortoimagens produzidas foi classificada como PEC Classe A para escala 1:5000, tendo sido posteriormente utilizadas para elaboração de cadastro técnico rural, com mapeamento de áreas de preservação permanente e de reservas legais em 151 imóveis.

Oliveira (2009) estudou a aplicação de uma imagem Quickbird de Florianópolis à cartografia urbana, utilizando quatro métodos de correção geométrica (polinomiais 2D e RFMs com RPCs e MDEs) para gerar cartas em escalas superiores a 1:10000. Os melhores resultados foram das imagens ortorretificadas, classificadas como PEC Classe A para escala 1:4000.

Fraser e Ravanbakhsh (2009) avaliaram a qualidade posicional de um par de imagens GeoEye-1 no campo de testes de Hobart, Austrália, com área aproximada de 120 km² e altitudes que vão do nível do mar ao topo de uma montanha com 1200 metros de elevação. Obtiveram uma acurácia planimétrica de 0,1 metros e altimétrica de 0,25 metros utilizando GCPs para refinar os RPCs originais, resultados até então sem precedentes em termo de qualidade posicional de imagens orbitais.

Em trabalho semelhante, Meguro e Fraser (2010) investigaram a acurácia de imagens GeoEye-1 da linha *Basic Stereopair* geometricamente corrigidas no campo de testes de Tsukuba, Japão, que possui mais de cem GCPs com alta qualidade posicional e perfeitamente identificáveis nas imagens. A cena imageada tinha 260 km² de área e diferença de nível de até 410 metros. As imagens foram corrigidas usando RPCs, com ou sem refinamento via GCPs. O melhor resultado foi obtido com o uso de um GCP (embora os autores recomendem de três a quatro), média de erro de 0,4 metros (planimetria) e 0,8 metros (altimetria).

Anjos et al. (2011) avaliaram a qualidade posicional de uma imagem do sensor HRC do satélite CBERS-2B (resolução espacial nominal de 2,7 metros) que engloba parte do município de São José dos Campos/SP. Os autores encontraram um resultado posicional considerado inesperado tendo em vista a alta resolução espacial e tratar-se de uma cena que recebeu correção radiométrica e geométrica de sistema, com erros de posicionamento em torno de 1000 metros. O produto obtido foi classificado como PEC Classe C para a escala de 1:100.000. O estudo sugere aos usuários de imagens HRC/CBERS-2B a realização de uma correção geométrica antes de seu uso em aplicações cartográficas.

2.8 POSSIBILIDADES DE USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA PERÍCIA CRIMINAL FEDERAL

Existem vários campos de aplicação de produtos de sensoriamento remoto dentro de SIGs na análise pericial de danos ao meio ambiente. Um dos mais comuns, no âmbito da perícia ambiental do DPF, é a análise à distância do histórico de um local em que ocorreram desflorestamentos, ocupação humana em áreas protegidas, mineração, incêndios florestais, erosão, poluição, etc. Procura-se nesta análise, entre outros parâmetros, mensurar as áreas impactadas e determinar as datas de ocorrência dos danos ao meio ambiente.

Entre trabalhos já publicados relativos ao tema pode-se citar o de Caldas et al. (2009), que descreve três exemplos do uso de sensoriamento remoto na perícia criminal federal no estado do Paraná: determinação da época de ocorrência de desmatamento, incêndios florestais no Parque Nacional da Ilha Grande e constatação de cumprimento de Termo de Ajustamento de Conduta. Da mesma forma, Alves e Russo (2011) relatam uma análise multitemporal de imagens LANDSAT 5 como ferramenta para a elaboração de laudo pericial em desflorestamento, incêndio florestal e implantação de pastagens próximo à divisa entre os estados de Rondônia, Amazonas e Mato Grosso, no Parque Nacional dos Campos Amazônicos.

Com relação ao estado de Santa Catarina, Trauczinsky (2013) afirma que a maioria dos exames periciais relativos a crimes ambientais utiliza produtos óticos de sensoriamento remoto (fotografias aéreas e imagens orbitais) como ferramenta para ilustrar, qualificar, mensurar e situar o dano dentro de um contexto histórico. A experiência da perícia criminal ambiental no estado tem demonstrado um importante potencial para o uso de imagens de alta resolução espacial e da ortorretificação nos exames, devido às particularidades de relevo (movimentado) e da estrutura fundiária (predomínio de pequenas áreas, em geral de alto valor imobiliário) dos locais de ocorrência da maioria dos crimes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 RECURSOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os recursos materiais, programas computacionais e equipamentos utilizados durante a realização dos estudos foram a base cartográfica digital da região, uma imagem orbital com quatro bandas do satélite GeoEye-1, um receptor GNSS geodésico, um receptor GPS de navegação, uma trena eletrônica, uma câmara fotográfica digital, computadores e *softwares*, conforme descrito a seguir:

3.1.1 Base cartográfica

Os produtos cartográficos digitais (Dados Geoespaciais de Referência) utilizados neste estudo foram elaborados pela empresa Engemap (a partir de levantamento pelo Sistema Aerofotogramétrico SAAPI, executado entre maio de 2010 e outubro de 2011), e cedidos pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (responsabilidade técnica: Diretoria de Recursos Hídricos).

Trata-se de ortofoto colorida com elemento de resolução no terreno (*Ground Sample Distance – GSD*) de 0,39 metros em formato geoTIFF, com estrutura de recuperação imediata, considerando o recorte do mapeamento sistemático 1:10.000 e/ou o número da faixa e foto, e Modelo Digital de Terreno correspondente, com resolução de 1,0 metro, em formatos geoTIFF e ASCII (X,Y,Z), com estrutura de recuperação para cada recorte do mapeamento sistemático 1:10.000.

3.1.2 Imagem orbital GeoEye-1

Imagem GeoEye-1, adquirida da empresa Space Imaging do Brasil através da Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (com recursos oriundos de convênio firmado com o DPF) em 14/11/2013, acompanhada de dois arquivos com os coeficientes do modelo polinomial racional (um para a banda Pancromática e outro para as bandas Multiespectrais - MS). As especificações técnicas da imagem estão relacionadas nas Tabelas 6 e 7:

Tabela 6: Especificações da imagem GeoEye-1 usada nesta pesquisa.

Tipo de imagem	Bundle – 1 PAN + 4 MS (bandas 1, 2, 3 e 4)
Linha	Geo
Resolução	PAN: 0,50 metros /MS: 2,0 metros
Ângulo de Elevação	68.65382
Projeção cartográfica	UTM
Datum	WGS 84
Fuso:	22 Sul
Resolução radiométrica	11 bits
Formato:	GeoTIFF
Porcentagem de nuvens	2%
Data de aquisição	27/10/2011
Identificação	2011102713134141603031608761 (1104118)

Fonte: Space Imaging Brasil (2013).

Tabela 7 : Resolução espectral (nm) das bandas do satélite GeoEye -1.

Banda	Comprimento de onda
Azul	450-520
Verde	520-600
Vermelho	625-695
Infravermelho próximo	760-900
Pancromática	450-900

Fonte: Space Imaging Brasil (2013).

3.1.3 Equipamentos

✓ Sistema GPS/GNSS Trimble R6 geodésico, que consiste de um par (Base/Rover) de receptores GPS/GNSS Trimble RTK R6 de 72 canais, código C/A em L1, código P em L2, portadora completa em L1/L2 (com antena, rádio e bateria na mesma unidade), um controlador Trimble TSC2 com sistema operacional Windows Mobile, comunicação via Bluetooth com o receptor e Software de campo Trimble Survey Controller. Os equipamentos pertencem ao DPF;

✓ GPS de navegação da marca GARMIN, modelo 60 CSx, com altímetro barométrico, pertencente ao DPF;

✓ Trena eletrônica da marca LEICA, modelo Disto A6, pertencente ao DPF.

✓ Câmara fotográfica digital marca NIKON, modelo D 70S, pertencente ao DPF;

✓ Computador: estação de trabalho do laboratório de geoprocessamento do Setor Técnico-Científico do DPF/SC, com sistema operacional MS Windows Server 2008 R2 64 Bits, processador Intel® Core™ i7-3930K, CPU 3,20 Ghz, memória RAM 24,0 GB, pertencente ao DPF; *Notebook* com sistema operacional MS Windows Vista 32 Bits, processador Intel® Celeron™, CPU 2,13Ghz, memória RAM 2,0 GB, propriedade do autor;

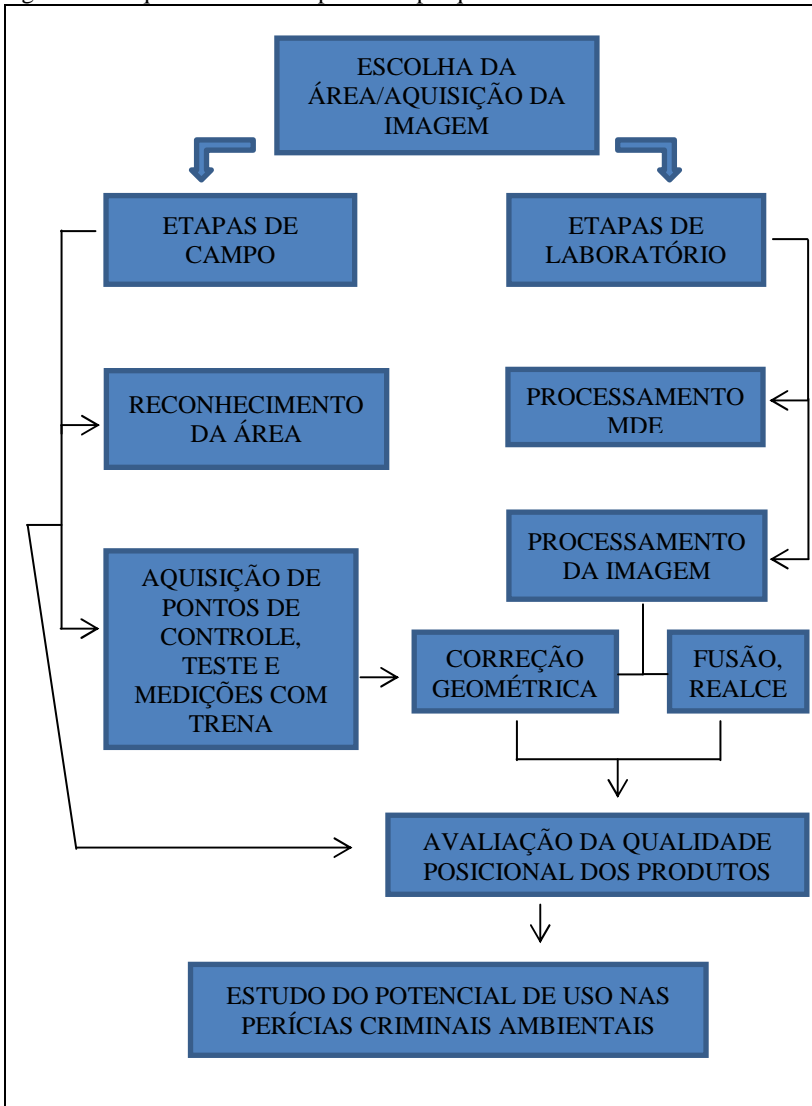
✓ *Softwares*: ArcGis10.1, ENVI 4.6, GPS TrackMaker PRO, Trimble Business Center (TBC), MS Excel 2010 e MS Word 2010 (todos licenciados para o DPF), e ProUCL 4.0 (*freeware*).

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Descrição geral

A metodologia utilizada neste estudo tem como base o que foi proposto em investigações semelhantes por diversos autores (MEGURO & FRASER, 2010; GRIPP JR, 2009b; OLIVEIRA, 2009; SILVA, 2005; PEDRO, 2005). O esquema a seguir (Figura 17) ilustra o roteiro metodológico e as etapas da pesquisa:

Figura 17: Esquema com as etapas desta pesquisa.



Fonte: O autor.

3.2.2 Área de estudo

A escolha da área de estudo deu-se com base nas seguintes premissas:

- ✓ Relevo movimentado, com presença de áreas planas e montanhosas na mesma cena da imagem orbital escolhida;
- ✓ Existência de base cartográfica de qualidade, com MDE confiável;
- ✓ Existência de dano ambiental observável remotamente, para avaliar o uso da imagem orbital na caracterização e quantificação deste dano, ou de intervenção antrópica em área protegida (no caso, Áreas de Preservação Permanente de corpos hídricos naturais e de ecossistema de Restinga);
- ✓ Ser representativa da casuística das perícias criminais ambientais realizadas pelo DPF no estado de Santa Catarina;
- ✓ Facilidade de acesso aos pontos de controle e teste de campo, bem como proximidade de uma estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE.

No local escolhido fica a sede do município de Imbituba, litoral sul de Santa Catarina. A área tem aproximadamente 53 km², está compreendida entre os meridianos 48° 42' 49" W e 48° 38' 35" W e entre os paralelos 28° 12' 15" S e 28° 16' 32" S, é predominantemente plana, mas com morros em sua área central. Apresenta áreas urbanizadas e acidentes geográficos que são objeto de preservação pela legislação ambiental, tais como dunas, lagoas e cursos d'água. A Figura 18 ilustra a área onde se desenvolveram os trabalhos:

Figura 18: Área objeto de estudo, no estado de Santa Catarina (sem escala).



Fonte: <http://www.imbituba.sc.gov.br/f/saneamento/17991-17999.pdf>
(adaptado pelo autor).

3.2.3 Aquisição de Pontos de Controle e Pontos de Teste

Os pontos de controle e de teste foram selecionados inicialmente sobre imagem orbital disponível no *software* de uso livre *Google Earth* e posteriormente confirmados ou descartados a campo. Após a escolha, as coordenadas aproximadas foram inseridas em GPS de navegação, para facilitar a localização. Buscaram-se pontos facilmente identificáveis na imagem, com boas condições de recepção de sinal e distribuídos de maneira uniforme ao longo da área examinada. Os pontos foram fotografados e algumas medidas significativas de estruturas existentes foram tomadas com trena eletrônica para posterior comparação com avaliações remotas.

A coleta das coordenadas deu-se em outubro de 2013, com um receptor GNSS, utilizando a técnica de posicionamento Estático Rápido. Os diversos pontos de controle e teste foram ocupados pelo receptor, e o equipamento foi programado para um tempo de permanência de 20 a 25 minutos em cada ponto (para seis ou mais satélites visíveis), com intervalo de 15 segundos entre cada medida. Este tempo de permanência foi determinado com base em testes prévios realizados na região estudada.

Após a coleta de campo, os pontos foram pós-processados com o uso do *software* TBC, usando como referência dados obtidos pela

internet da Estação Imbituba da RBMC do IBGE (<http://www.ibge.gov.br>), que utiliza o *datum* sirgas 2000. O projeto no TBC foi configurado para utilizar o sistema de projeção UTM e *datum* WGS 84, uma vez que a versão utilizada do *software* não contém os parâmetros de transformação para o *datum* SIRGAS 2000 e não há necessidade de transformação entre estes *data* (IBGE, 2013). O maior comprimento da linha de base foi de aproximadamente 5 km e a precisão obtida foi sempre melhor do que 0,05 metros. As coordenadas dos pontos de controle e teste obtidas a campo estão relacionadas na Tabela 8:

Tabela 8: Coordenadas dos Pontos de Controle e Pontos de Teste (sistema de projeção UTM, *datum* SIRGAS 2000).

Ponto	E	N	Observação
01	728983,924	6876480,522	Galpão na praia
02	728925,172	6875752,091	Igreja NE
03	727933,542	6874600,276	Estrada Lasca Mineração
04	730029,462	6874555,729	BASE RBMC IMBT
05	730180,400	6874157,291	Porto
06	728199,721	6873476,973	Lagoa ETE Casan
07	728211,477	6873344,324	Lagoa final Rua A. Paes
08	728427,962	6873187,58	Lagoa estrada de ferro
09	726869,201	6873259,177	Morro Rampa
10	726834,092	6872825,738	Morro antenas NE
11	726805,541	6872792,330	Morro antenas SO
12	727225,717	6871123,992	Praia Sul
13	726056,853	6871548,254	Canto campo futebol
14	724801,925	6871190,508	Pier lagoa SÓ
15	725700,328	6873189,051	Igreja BR 101 Oeste
16	725128,734	6874834,980	Muro APP rio Oeste
17	725111,648	6874877,819	Canto Rua APP rio Oeste
18	725767,722	6876809,232	Trevo BR 101 Norte
19	727371,258	6876938,597	Votorantim
20	725122,946	6876882,838	Igreja NO
21	724630,895	6875792,491	Cemitério Oeste
22	728184,051	6876821,99	Igreja2 NE
23	729140,955	6873974,039	Praça Centro
24	728866,482	6873232,952	Beira-mar Sul
25	726151,028	6870430,974	Escola Sul
26	726919,385	6875029,848	Torre Leste
27	726475,461	6875312,202	Torre Oeste

Fonte: o autor

As Figuras 19 e 20 ilustram exemplos de coleta de pontos a campo:

Figura 19: Exemplo de ponto coletado na ortofoto (“Morro antenas NE”).



Fonte: o autor

Figura 20: Mesmo ponto da Figura 19, no momento da coleta a campo.



Fonte: o autor

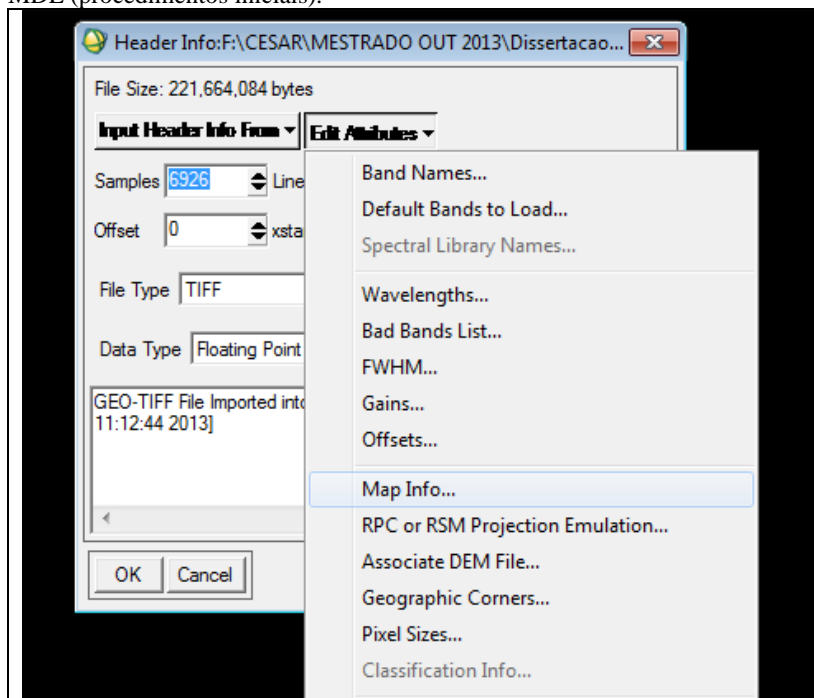
3.2.4 Processamento do MDE

Antes da utilização do Modelo Digital de Elevação oriundo do levantamento aerofotogramétrico disponibilizado pelo estado de Santa Catarina, foi necessário editar, com o uso do ENVI 4.6, alguns dos atributos dos arquivos digitais recebidos (estes inicialmente copiados por questão de segurança). Os procedimentos realizados para editar as informações referentes ao sistema de projeção cartográfica (UTM) e datum (WGS 84) estão listados a seguir:

- No menu Arquivo, clicar em "Editar Cabeçalho de Arquivo ENVI" e selecionar o arquivo desejado ("mdt_ImbitubaCopy.tif") na janela seguinte;

- Na janela "Header Info" que segue, clicar no botão "Edit Attributes". Na lista suspensa, escolher "Map Info" (Figura 21):

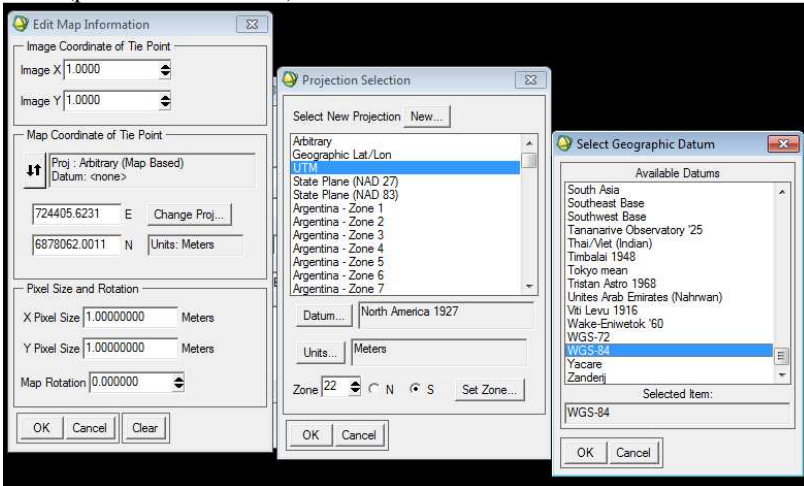
Figura 21: Atribuição de sistema de projeção e datum ao arquivo referente ao MDE (procedimentos iniciais).



Fonte: O autor.

- Na janela "Edit Map Information", clicar no botão "Change Proj..." e escolher UTM;
- Clicar no botão "datum", escolher WGS-84 (SIRGAS 2000 não estava disponível), preencher o campo "Zone" (22) e marcar "S" (sul); clicar em OK para finalizar a edição (Figura 22):

Figura 22: Atribuição de sistema de projeção e datum ao arquivo referente ao MDE (procedimentos finais).



Fonte: O autor.

3.2.5 Processamento da imagem

3.2.5.1 Fusão de bandas e ampliação de contraste

Optou-se por efetuar a fusão de bandas e as operações de ampliação de contraste apenas na imagem que será submetida à ortorretificação, ficando assim o produto final submetido a uma sequência de operações de processamento julgada adequada ao fim a que se destina. Para a fusão de bandas escolheu-se o método *Gram-Schmidt* no software ENVI 4.6 e as bandas utilizadas foram 3 (R), 2 (G) e 1 (B). Após o processo de fusão, foram testados filtros para ampliar o contraste entre os alvos e seus arredores. A Figura 23 ilustra três opções, a primeira sem o uso de filtros, a segunda com “filtro linear 2%” e a terceira com “filtro gaussiano”, conforme terminologia utilizada no *software*:

Figura 23: Comparação entre imagem após a fusão de bandas, sem uso de filtro (esquerda), após uso de filtro linear 2% (centro) e filtro gaussiano (direita).



Fonte: o autor

Devido a uma questão de preferência pessoal para fotointerpretação (facilidade para resolver alvos), optou-se por utilizar a imagem obtida após a aplicação do filtro linear 2% para o procedimento posterior de ortorretificação.

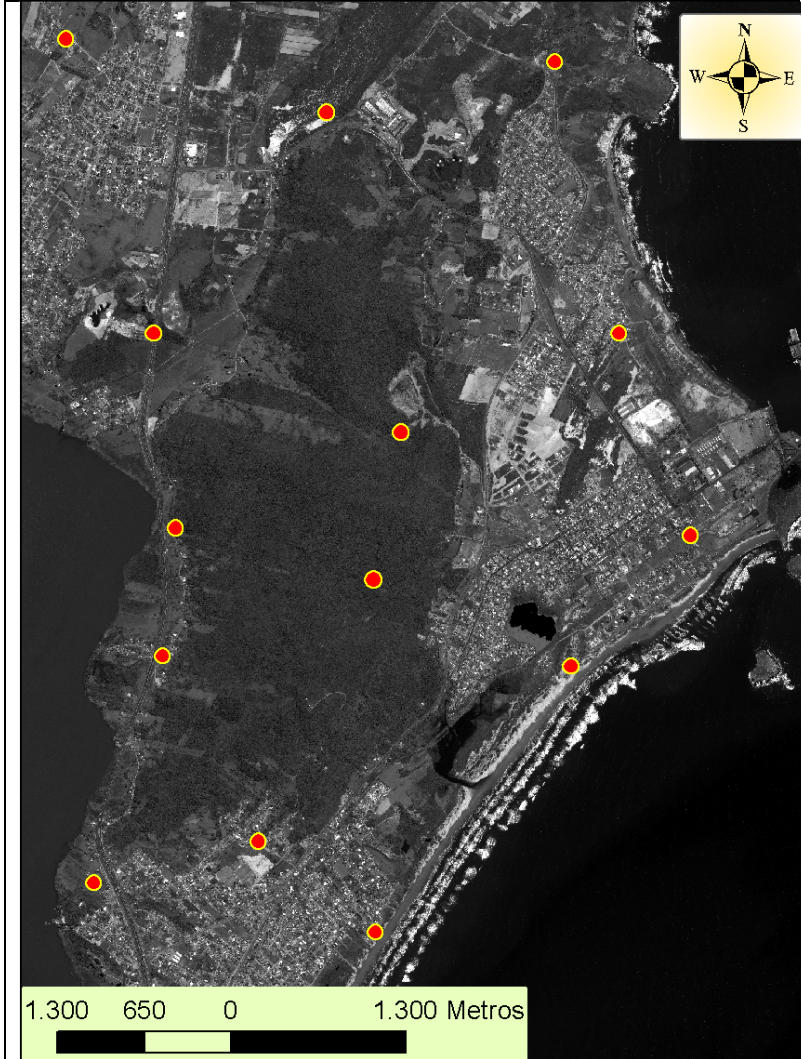
3.2.5.2 Georreferenciamento expedito (transformação polinomial 2D)

Os modelos de correção geométrica por transformação polinomial simples utilizam duas dimensões do terreno, não levando em conta, portanto, as variações de altimetria. No *software* ArcGis, com o uso da barra de ferramentas *Georeferencing* (botão *Add Control Points*), seleciona-se pontos da imagem a corrigir e seus correspondentes cujas coordenadas são conhecidas (pontos de controle levantados a campo). Foram selecionados seis pontos bem distribuídos na banda pancromática da imagem e a correção foi realizada com polinômios de segunda ordem.

No entanto, os resultados foram insatisfatórios (a imagem resultante ficou com qualidade posicional pior do que a imagem sem correção pelo usuário). Assim, fez-se nova tentativa, aumentando o número de pontos de controle. Como os pontos coletados a campo seriam em número insuficiente para o procedimento e posterior avaliação da qualidade posicional, optou-se por georreferenciar a imagem a partir de 14 pontos homólogos da ortofoto (Figura 24),

utilizando um procedimento *image to image*, no ArcGis, reservando-se os pontos de campo para a avaliação.

Figura 24: Pontos utilizados para o Georreferenciamento expedito (transformação polinomial 2D) da banda pancromática da imagem GeoEye-1.



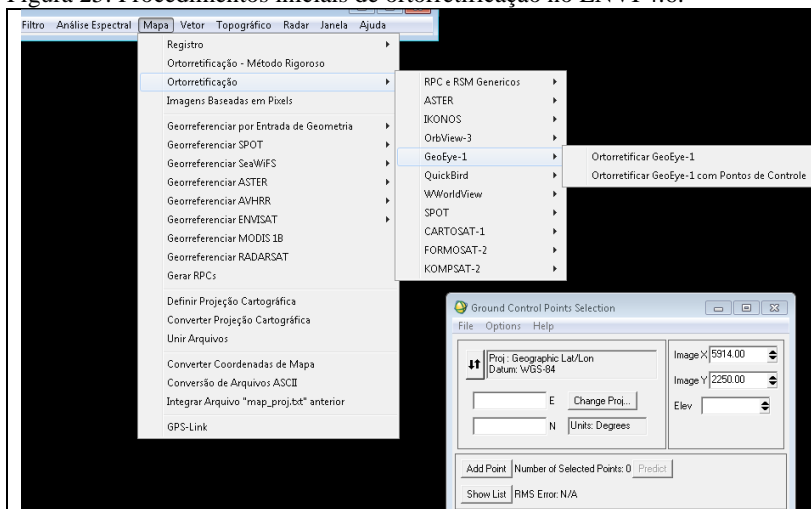
Fonte: O autor.

3.2.5.3 Correção geométrica com RPCs, MDE e refinamento com Pontos de Controle (ortorretificação)

A ortorretificação da imagem orbital foi realizada com o *software* ENVI 4.6, utilizando-se os RPCs enviados com a imagem, o MDE e os Pontos de Controle obtidos pelo usuário, conforme a sequência de procedimentos relatada abaixo:

- Inicialmente, deve-se carregar a imagem que será processada. A seguir, no menu “Mapa”, selecionar Ortorectificação/GeoEye-1/Ortorectificar GeoEye-1 com Pontos de Controle. Será aberta a janela Points Selection (Figura 25):

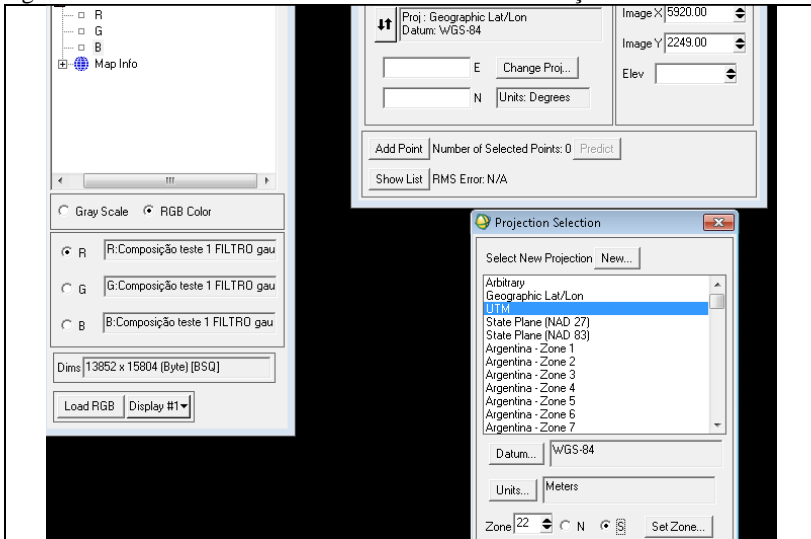
Figura 25: Procedimentos iniciais de ortorretificação no ENVI 4.6.



Fonte: o autor

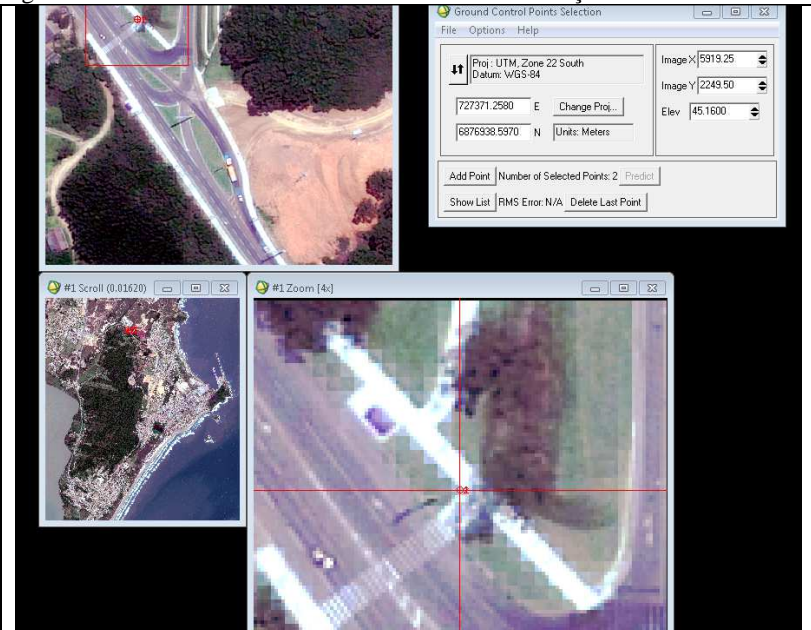
No botão “Change Projection”, escolher o sistema de projeção (UTM) e no botão “Datum”, escolher WGS-84. Deve-se ainda informar a zona (22) e hemisfério (Sul – Figura 26). Na sequência, abre-se a janela “Points Selection”. Deve-se então escolher o ponto com o mouse (cursor), digitar as coordenadas nas caixas E, N, Elev e clicar no botão “Add Point” (Figura 27):

Figura 26: Procedimentos intermediários de ortorretificação no ENVI 4.6.



Fonte: o autor

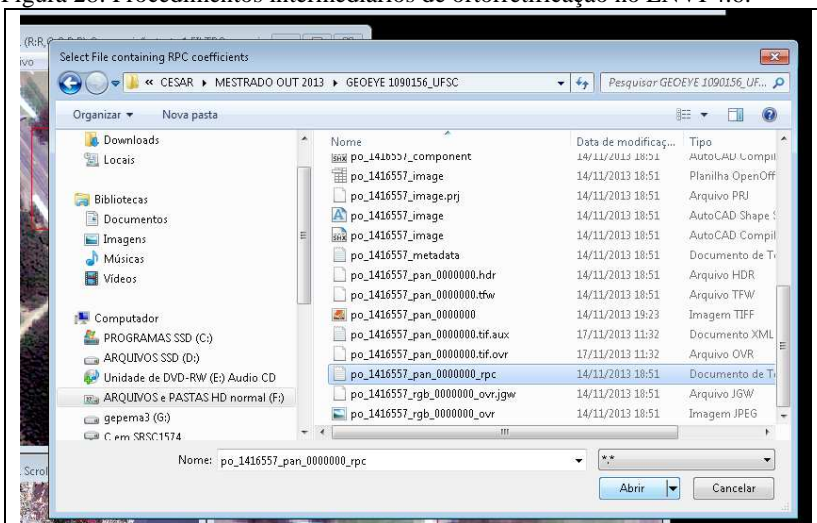
Figura 27: Procedimentos intermediários de ortorretificação no ENVI 4.6.



Fonte: o autor

Após essa etapa, na janela “Ground Control Points Selection”, clicar na aba Options/ Orthorectify File/ Select Input File. A seguir, abre-se a janela “Select File containing RPC coefficients”. Nos arquivos enviados pela empresa, existe um com RPCs para a banda Pan e outro com RPCs para os 4 arquivos MS. Utilizar os da banda Pan (Figura 28):

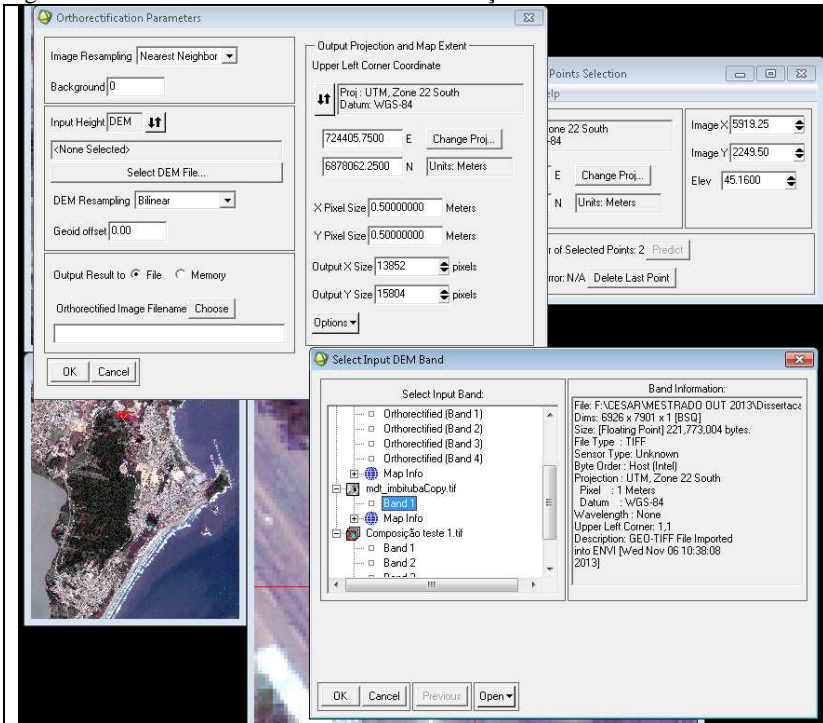
Figura 28: Procedimentos intermediários de ortoretificação no ENVI 4.6.



Fonte: o autor

Finalmente, a janela “Orthorectification Parameters” é aberta. Escolher o Image Resampling, Select DEM File (no presente estudo, o MDE gerado a partir do levantamento aerofotogramétrico), escolher o DEM Resampling e escolher a pasta de destino/nome do arquivo de saída. Clicar em OK (Figura 29):

Figura 29: Procedimentos finais de ortoretificação no ENVI 4.6.



Fonte: o autor

Ao final do processo, é necessário selecionar o arquivo gerado na janela “Available Bands List”, depois entrar no menu Arquivo, Salvar Arquivo Como e escolher um formato aceito pelo ArcGIS (no caso, TIFF/GeoTIFF).

Ao longo dos procedimentos foram geradas imagens ortoretificadas utilizando um a cinco Pontos de Controle, bem como foram experimentados vários métodos de reamostragem dos pixels da imagem e do MDE. As imagens foram carregadas no ArcGIS, onde verificou-se a qualidade posicional de cada uma. O melhor resultado foi obtido pelo refinamento do modelo com um Ponto de Controle (ponto “Morro Antenas SO”, número 11 da Tabela 8). A reamostragem da imagem foi pelo método do vizinho mais próximo e a do MDE, pelo método bilinear.

3.2.6 Avaliação da qualidade posicional planimétrica

Optou-se neste estudo por utilizar o critério de proporção amostral simples (comparação do Desvio Padrão da amostra sobre a resultante com o EP, e cálculo da percentagem de pontos da amostra dentro do valor estipulado pelo PEC) para avaliar a qualidade planimétrica.

A avaliação da qualidade posicional planimétrica da ortofoto e dos tratamentos estudados foi feita com o auxílio do *software* ArcGis 10.1, utilizando-se os procedimentos a seguir:

- Criação de um projeto no ArcMap para cada tratamento analisado, com a adição da imagem correspondente a cada tratamento. Assim, cada projeto tem uma imagem, conforme os tratamentos: imagem sem correção, imagem corrigida por georreferenciamento expedito (2D) e imagem ortoretificada (corrigida por RPCs mais MDE e Pontos de Controle). O último produto foi gerado no *software* ENVI 4.6 e exportado para o ArcGis);

- Criação de arquivo *shapefile* no ArcCatalog para agrupar os Pontos de Controle e Pontos de Teste (PC_PT.shp);

- Adição deste arquivo ao projeto do ArcMap correspondente ao tratamento analisado;

- Edição do arquivo PC_PT no ArcMap, com a criação dos pontos de Controle e Teste (digitação das coordenadas de cada ponto, segundo os dados resumidos na Tabela 8);

- Criação de arquivo *shapefile* no Arc Catalog para agrupar os Pontos Homólogos observados na imagem (PH.shp);

- Adição deste arquivo ao projeto do ArcMap correspondente ao tratamento analisado;

- Edição do arquivo Pontos Homólogos no ArcMap, com a criação dos pontos conforme visualizados na imagem, sem visualizar os Pontos de Controle e Teste neste momento.

- Medição da distância entre os Pontos de Teste e sua posição correspondente na imagem (Pontos Homólogos), para cada projeto e tratamento;

- Cálculo da resultante do erro para cada ponto em planilha eletrônica MS Excel2010, segundo a fórmula vista em (6), e utilizando a ferramenta *Measure* com *Snapping* no ArcMap (para conferência);

- Verificação da qualidade posicional de acordo com o PEC (Decreto-lei 89.817/1984).

A metodologia descrita foi utilizada também com a ortofoto fornecida pelo estado de Santa Catarina, para avaliar sua qualidade

posicional. Depois de comprovada sua qualidade (ver seção 4.1.1, adiante), foi criado no ArcGis um arquivo vetorial com uma restituição parcial das zonas mais altas do relevo. Tal arquivo foi posteriormente sobreposto à imagem orbital ortorretificada, como forma de comparar e avaliar visualmente sua qualidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA CADA PRODUTO

Os resultados obtidos em cada avaliação serão a seguir apresentados e discutidos, começando pela ortofoto cedida pelo estado de Santa Catarina, passando pela imagem orbital GeoEye- 1 sem correção pelo usuário, após pela mesma imagem corrigida por Georreferenciamento Expedito (2D) e concluindo com a imagem orbital ortorretificada.

4.1.1 Base cartográfica cedida pelo estado de Santa Catarina

Na avaliação da qualidade posicional da base cartográfica foram utilizados 23 Pontos de Teste, distribuídos conforme a Figura 30 (a numeração dos pontos é a mesma da Tabela 8). As resultantes de erros planimétricos para cada ponto, bem como a média e o desvio-padrão para o conjunto de dados estão resumidas na Tabela 9.

Figura 30: Distribuição dos 23 Pontos de Teste na região estudada (Ibituba/SC), sobre ortofoto digital, cedida pelo estado de Santa Catarina.



Fonte: O autor.

Tabela 9: Resultantes de erros planimétricos para a ortofoto (a numeração dos pontos é a mesma da Tabela 8).

Ponto	Erro E (m)	Erro N (m)	Erro Planimétrico (m)
01	-0,17	0,67	0,69
02	-0,47	-0,66	0,80
03	0,87	-0,04	0,87
05	-0,17	0,13	0,22
06	0,32	-0,22	0,39
07	0,66	-0,40	0,78
10	-0,43	0,21	0,48
11	-0,06	-0,26	0,27
12	0,63	0,92	1,11
13	-0,28	0,03	0,29
14	0,47	0,32	0,57
15	-0,01	0,38	0,38
16	-0,40	0,07	0,40
17	0,44	-0,05	0,45
18	-0,51	-0,44	0,67
20	0,29	-0,09	0,30
21	0,31	0,77	0,83
22	-0,13	-0,57	0,58
23	-0,25	-0,08	0,26
24	0,32	0,24	0,40
25	0,45	-0,39	0,60
26	-0,28	1,13	1,16
27	-0,43	0,64	0,77
MÉDIA			0,58
DESVIO-PADRÃO			0,27

Fonte: o autor

Avaliando-se o produto pelo método de percentagem da amostra, observa-se que pode ser classificado como Classe A para a escala 1:2000, conforme definido no Decreto-lei 89.817/1984, pois o número de pontos fora do PEC para a resultante foi dois (8,69%). Ou seja, 91,31% dos pontos bem definidos na amostra, quando testados no terreno, não apresentaram erro superior ao PEC (no caso, 1,0 metro, com Desvio-Padrão de 0,6 metros). É importante ressaltar que se trata de uma área pequena, e que é interessante a realização de novos testes em outras regiões do estado para convalidar esse resultado.

4.1.2 Imagem sem correção pelo usuário

Na avaliação da qualidade posicional da imagem GeoEye-1 sem correção pelo usuário (conforme adquirida) foram utilizados 20 Pontos de Teste. As resultantes de erros planimétricos para cada ponto, bem como a média e o desvio-padrão para o conjunto de dados estão resumidas na Tabela 10.

Tabela 10: Resultantes de erros planimétricos (a numeração dos pontos é a mesma da Tabela 8).

Ponto	Erro E (m)	Erro N (m)	Erro Planimétrico (m)
01	6,27	1,11	6,37
02	6,09	-0,29	6,10
03	6,44	0,01	6,44
05	6,76	0,63	6,79
06	9,34	0,18	9,34
07	9,08	-0,01	9,08
10	-89,21	-4,94	89,35
11	-89,21	-5,36	89,37
12	10,23	1,86	10,40
13	6,32	0,75	6,37
14	10,66	0,29	10,66
16	9,63	0,18	9,63
17	10,44	0,13	10,44
18	-0,27	-1,27	1,30
19	-5,99	-0,63	6,02
20	2,57	-0,47	2,61
21	5,37	-0,04	5,37
22	-24,92	-2,03	25,01
25	6,80	0,22	6,81
26	-40,30	-1,96	40,34
MÉDIA			17,89
DESVIO-PADRÃO			25,90

Fonte: o autor

Avaliando-se o produto pelo método de percentagem da amostra, observa-se que os erros de grande magnitude observados nos pontos 10, 11 (no topo de um morro, Figura 31) e 26 fazem com que sua classificação seja Classe C para a escala 1:50.000, conforme definido no Decreto-lei 89.817/1984, pois o número de pontos fora do PEC para a resultante foi dois (10%) e o Desvio Padrão foi de 25,90 metros. Ou seja, 90% dos pontos bem definidos na amostra, quando testados no

terreno, não apresentaram erro superior ao PEC (no caso, 50 metros, com Desvio Padrão de 30 metros). Observa-se, no entanto, que para os demais pontos (locais planos) os erros são bem inferiores, conforme esperado (os maiores deslocamentos são devidos ao relevo).

Figura 31: Diferenças entre coordenadas de dois Pontos de Teste (10 e 11) e seus Homólogos na imagem GeoEye-1 (banda pancromática) sem correção.



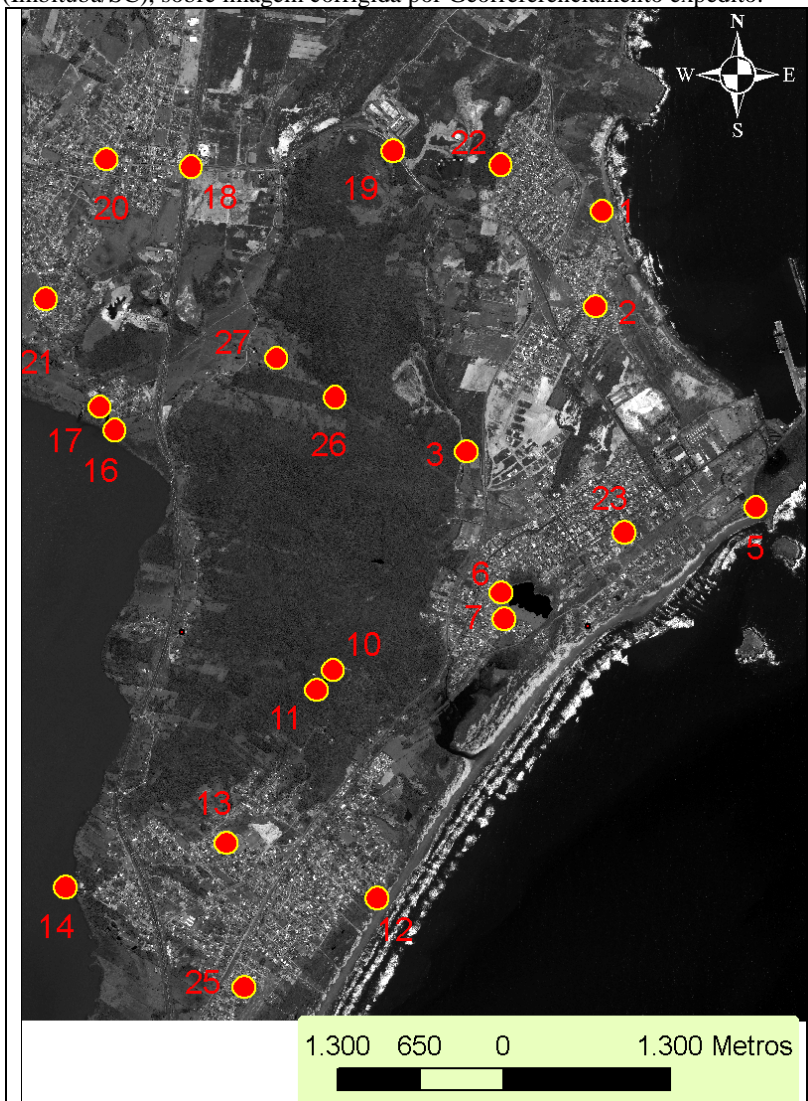
Fonte: O autor.

4.1.3 Georreferenciamento expedito (2D)

Na avaliação da qualidade posicional da imagem GeoEye-1 corrigida por transformação polinomial simples (Georreferenciamento expedito) foram utilizados 22 Pontos de Teste. Os pontos estão distribuídos conforme a Figura 32.

As resultantes de erros planimétricos para cada ponto, bem como a média e o desvio-padrão para o conjunto de dados estão resumidas na Tabela 11.

Figura 32: Distribuição dos 22 Pontos de Teste na região estudada (Imbituba/SC), sobre imagem corrigida por Georreferenciamento expedito.



Fonte: O autor.

Tabela 11: Resultantes de erros planimétricos na imagem georreferenciada (a numeração dos pontos é a mesma da Tabela 8).

Ponto	Erro E (m)	Erro N (m)	Erro Planimétrico (m)
01	24,99	3,21	25,20
02	22,15	1,12	22,18
03	15,80	0,75	15,81
05	-5,19	-0,18	5,19
06	29,02	1,74	29,07
07	25,88	1,20	25,91
10	-49,61	-2,24	49,66
11	-52,09	-2,52	52,15
12	13,28	1,60	13,37
13	4,91	0,93	4,99
14	-10,82	0,91	10,86
16	7,90	0,98	7,97
17	8,31	1,31	8,42
18	13,78	0,26	13,78
19	19,83	0,89	19,85
20	6,71	0,90	6,77
21	0,71	1,40	1,57
22	-0,84	0,02	0,84
23	3,44	0,17	3,44
25	-1,94	-0,07	1,94
26	-30,67	-1,88	30,73
27	6,38	1,94	6,66
MÉDIA			16,20
DESVIO-PADRÃO			14,52

Fonte: o autor

Avaliando-se o produto pelo método de percentagem da amostra, observa-se que deve ser classificado como Classe C para a escala 1: 35.000, conforme definido no Decreto-lei 89.817/1984, pois o número de pontos fora do PEC para a resultante foi dois (9%) e o Desvio Padrão foi de 14,52 metros. Ou seja, 91% dos pontos bem definidos na amostra, quando testados no terreno, não apresentaram erro superior ao PEC (no caso, 35 metros, com Desvio Padrão de 21 metros).

Este é um resultado pouco satisfatório, considerando-se o potencial para correção geométrica da imagem original. Comprova-se assim, com os resultados dos dois testes de georreferenciamento expedito realizados, que as transformações polinomiais 2D devem ser

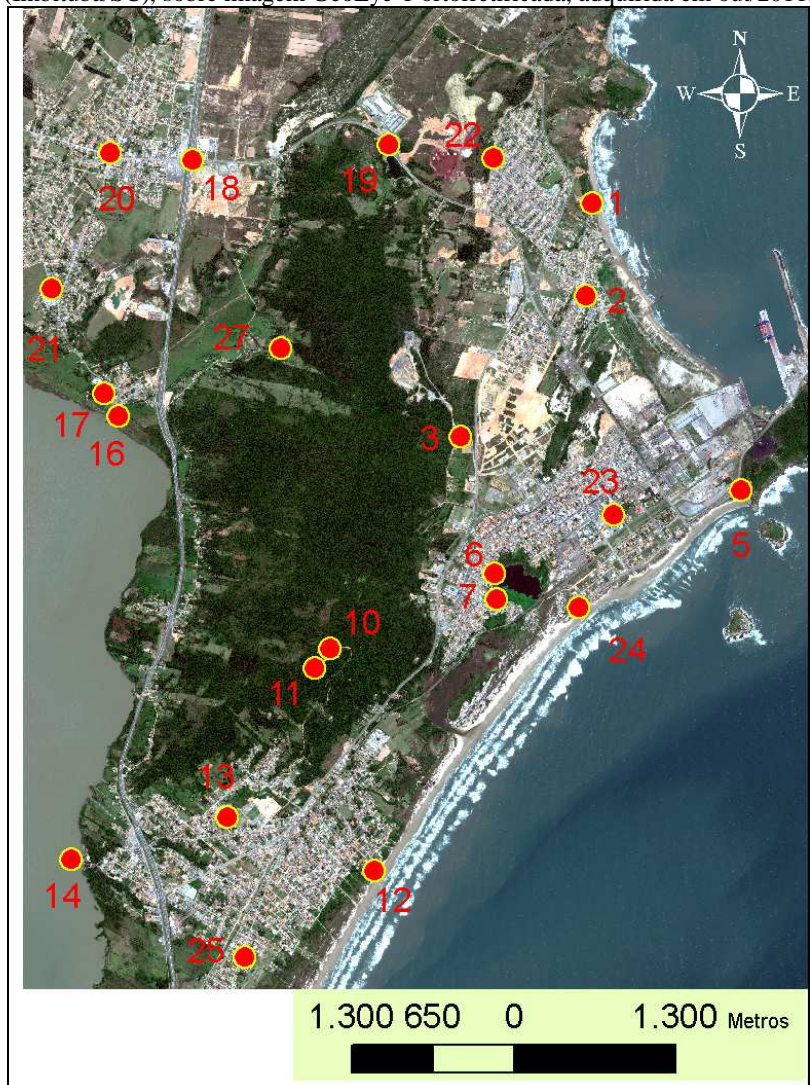
utilizadas com cautela, pois podem até introduzir distorções que não existiam na imagem original.

É interessante observar também que os menores erros foram constatados nas proximidades dos pontos de controle escolhidos para a transformação polinomial. Conforme registrado na literatura, tal metodologia tem aplicação mais segura em áreas menores, com relevo plano e utilizando maior número de pontos de controle, regularmente distribuídos.

4.1.4 Imagem corrigida com RPCs, MDE e Pontos de Controle (Ortorretificação)

Na avaliação da qualidade posicional da imagem ortorretificada foram utilizados 22 Pontos de Teste, distribuídos conforme a Figura 33. As resultantes de erros planimétricos para cada ponto, bem como a média e o desvio-padrão para o conjunto de dados estão resumidas na Tabela 12.

Figura 33: Distribuição dos 22 Pontos de Teste na região estudada (Imbituba/SC), sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada, adquirida em out/2011.



Fonte: O autor.

Tabela 12: Resultantes de erros planimétricos na imagem ortorretificada (a numeração dos pontos é a mesma da Tabela 8).

Ponto	Erro E (m)	Erro N (m)	Erro Planimétrico (m)
01	-2,72	1,03	2,90
02	-0,39	-0,29	0,48
03	-0,30	0,03	0,31
05	-0,49	-0,06	0,49
06	-0,26	-0,44	0,51
07	-0,85	-0,06	0,85
10	-0,20	0,09	0,22
11	0,17	0,01	0,17
12	0,77	0,90	1,18
13	-0,30	0,61	0,68
14	0,06	0,23	0,23
16	-1,13	0,77	1,37
17	0,63	-0,24	0,67
18	-0,38	-0,49	0,62
19	0,52	0,13	0,53
20	-0,54	-0,26	0,59
21	-0,17	0,25	0,30
22	0,12	-0,57	0,58
23	-0,77	0,28	0,82
24	-0,42	0,12	0,43
25	-0,12	0,50	0,51
27	-2,74	0,02	2,74
MÉDIA			0,78
DESVIO-PADRÃO			0,72

Fonte: o autor

Avaliando-se o produto pelo método de percentagem da amostra, observa-se que deve ser classificado como Classe A para a escala 1: 5.000, conforme definido no Decreto-lei 89.817/1984, pois o número de pontos fora do PEC para a resultante foi dois (10%) e o Desvio Padrão foi de 0,72 metros. Ou seja, 90% dos pontos bem definidos na amostra, quando testados no terreno, não apresentaram erro superior ao PEC (no caso, 2,5 metros, com Desvio Padrão de 1,5 metros).

4.1.5 Comparação visual entre restituição vetorial e imagem ortorretificada

Criou-se no ArcGis um arquivo vetorial com uma restituição parcial das zonas mais altas do relevo, feita a partir da ortofoto. Tal arquivo foi posteriormente sobreposto à imagem orbital ortorretificada, como forma de comparar e avaliar visualmente sua qualidade posicional. Os resultados estão ilustrados a seguir:

Figura 34: Locais de comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada.



Fonte: O autor.

Figura 35: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada (local “SUL” na Figura 34).



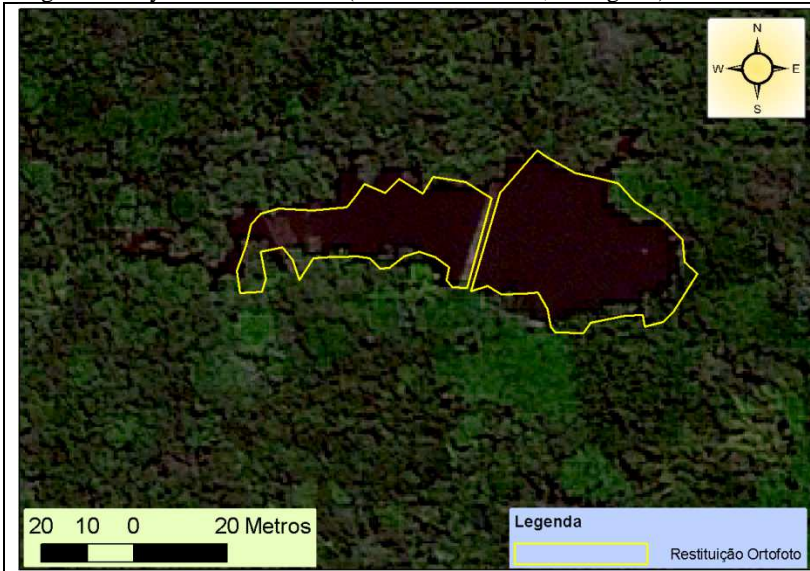
Fonte: O autor.

Figura 36: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada (local “MORRO ANTENAS” na Fig. 34).



Fonte: O autor.

Figura 37: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada(local “REPRESA”, na Fig. 34).



Fonte: O autor.

Figura 38: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada(local “MINERAÇÃO” na Fig. 34).



Fonte: O autor.

Figura 39: Comparação entre restituição parcial criada a partir da ortofoto e imagem GeoEye-1 ortorretificada (local “CASAS NORTE” na Fig. 34).



Fonte: O autor.

Como se pode observar, as feições ficaram visualmente concordantes. No entanto, em alguns pontos das regiões mais elevadas, como nas proximidades da represa (Figura 37), constatou-se um deslocamento da imagem ortorretificada (que pode ser um viés) de aproximadamente 1,3 metros na direção oeste.

4.2 EXEMPLOS DE USO DOS PRODUTOS EM PERÍCIAS CRIMINAIS AMBIENTAIS

A área examinada apresenta diversas situações que poderiam ser objeto de exame pericial para comprovação da ocorrência de crime ambiental. Assim, foram escolhidos alguns locais representativos da casuística atendida pelo Setor Técnico-Científico (SETEC) do DPF em Santa Catarina para a realização deste estudo. Ressalta-se que se trata de casos hipotéticos, abordados apenas para exemplificar o uso da metodologia, uma vez que não foram feitas análises de eventuais licenças ambientais ou do histórico de ocupação dessas áreas, o que poderia legitimar as situações encontradas perante a legislação vigente.

Para cada local foram realizados exames *in loco*, típicos daqueles normalmente empregados quando da realização das perícias ambientais.

Entre estes, pode-se destacar caracterização de estruturas de origem antrópica, medições com trena eletrônica, registros fotográficos e caracterização dos ecossistemas envolvidos.

Complementando os estudos de campo, foram realizadas análises remotas utilizando o levantamento aerofotogramétrico (2010-2011) e a imagem ortoretificada (2011), todos utilizando sistema de projeção UTM e *datum* SIRGAS 2000 (o produto oriundo do Georreferenciamento Expedito 2D não foi utilizado, devido a sua baixa qualidade posicional). Estas análises também são rotineiras nas perícias ambientais realizadas por este SETEC, e servem, por exemplo, para determinar o posicionamento de uma área alterada (edificação, desflorestamento, incêndio florestal, extração mineral, poluição, etc.) em relação a áreas protegidas e/ou de interesse da União Federal (Unidades de Conservação, APPs, Terrenos de Marinha). Outra aplicação prática das medições remotas é determinar a área aproximada de um local onde ocorreu desflorestamento, pela comparação entre imagens pretéritas e a situação atual, pois muitas vezes é possível identificar remotamente espécies vegetais com base nos padrões de reflectância, brilho e textura apresentados pela imagem orbital ou foto aérea.

Para efetuar as medições remotas, inicialmente foi criado um arquivo *shapefile* no ArcCatalog; este arquivo foi adicionado ao ArcMap e lá editado, com a criação de *polylines* sobrepondo as estruturas medidas. A seguir, utilizando a ferramenta *Measure* com *Snapping*, as medições remotas foram realizadas.

Finalmente, os resultados das medições realizadas *in loco* foram comparados com aqueles obtidos remotamente, para avaliar de maneira preliminar a possibilidade de extração de informações confiáveis dos produtos cartográficos gerados em cada tratamento. Para tanto, foi utilizada a fórmula que segue:

$$D = MR - MI \quad (12)$$

Onde:

D= Diferença entre as medidas

MR = Medição remota

MI= Medição *in loco*

A seguir, imagens que ilustram exemplos dos estudos realizados, para cada produto cartográfico e local examinado:

4.2.1 Ortofoto cedida pelo estado de Santa Catarina

4.2.1.1 APP da Lagoa da Bomba

Delimitou-se remotamente a APP da Lagoa da Bomba (também conhecida como Lagoa da Usina, no bairro Paes Leme), considerada para fins deste estudo como a área ao redor de lagos e lagoas naturais, em faixa com metragem mínima de 30 metros, para os que estejam situados em áreas urbanas consolidadas (segundo dispõe a Resolução CONAMA 303, de 20 de março de 2002). Os procedimentos, realizados no *software* ArcGis, foram os seguintes:

- Criação de arquivo *shapefile* (“APP Lagoa”) no Arc Catalog para delimitar a APP da lagoa;
- Adição deste arquivo ao projeto do ArcMap correspondente;
- Edição do arquivo APP Lagoa no ArcMap, com a criação do polígono referente à margem do corpo hídrico e posterior criação de *buffer* distante 30 metros do polígono original, que foi posteriormente apagado.

A seguir, uma estrutura inserida nesta APP (comprimento do muro externo do lado leste do pátio de uma residência, próximo ao ponto de coordenadas UTM 728211,477 E; 6873344,324 N) foi medida remotamente, e o resultado foi comparado com medição realizada *in loco*, usando trena eletrônica. As Figuras 40 e 41 ilustram o que foi descrito:

Figura 40: APP da Lagoa da Bomba (delimitada em SIG sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011) e local examinado.



Fonte: O autor.

Figura 41: Detalhe do muro em APP da lagoa, medido a campo e remotamente, sobre ortofoto proveniente do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011.



Fonte: O autor.

4.2.1.2 APP de Restinga (sul)

Delimitou-se remotamente um trecho da APP de Restinga (litoral sul), considerada para fins deste estudo como a área situada nas restingas, em faixa mínima de trezentos metros, a partir da linha de preamar máxima (segundo dispõe a Resolução CONAMA 303, de 20 de março de 2002), seguindo os mesmos procedimentos realizados na análise anteriormente descrita, com exceção do último passo (Edição do arquivo APP Restinga) criando-se agora uma *polyline* referente à linha de início de vegetação da praia (que substitui, para efeitos práticos, a linha de preamar máxima) e posterior criação de *buffer* distante 300 metros da *polyline* original, que foi posteriormente apagado.

A seguir, parte da estrutura viária de um loteamento inserido nesta APP (próximo ao ponto de coordenadas UTM 727226,336 E; 6871125,798 N) foi medida remotamente, e o resultado foi comparado com medição realizada *in loco*, usando trena eletrônica. As Figuras 42 e 43 ilustram o que foi descrito:

Figura 42: APP de Restinga (delimitada em SIG sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011) e local examinado.



Fonte: O autor.

Figura 43: Detalhe da pista leste do loteamento, medida a campo e remotamente, sobre ortofoto(levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011).



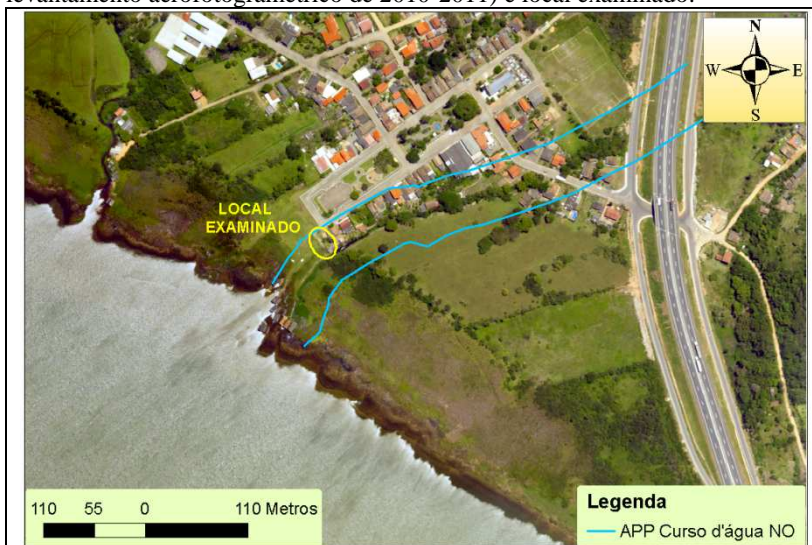
Fonte: O autor.

4.2.1.3 APP de curso d'água

Delimitou-se remotamente parte da APP de um curso d'água (a oeste da sede do município, com foz na Lagoa do Mirim), considerada para fins deste estudo como a área situada em faixa marginal, medida a partir do nível mais alto, em projeção horizontal, com largura mínima de trinta metros para o curso d'água com menos de dez metros de largura, (segundo dispõe a Resolução CONAMA 303, de 20 de março de 2002). Seguiram-se os mesmos procedimentos realizados nas análises anteriormente descritas, com exceção do último passo (Edição do arquivo APP Curso d'água NO), criando-se agora uma *polyline* referente às margens do curso d'água e posterior criação de *buffers* distantes 30 metros da *polyline* original, que foi posteriormente apagada.

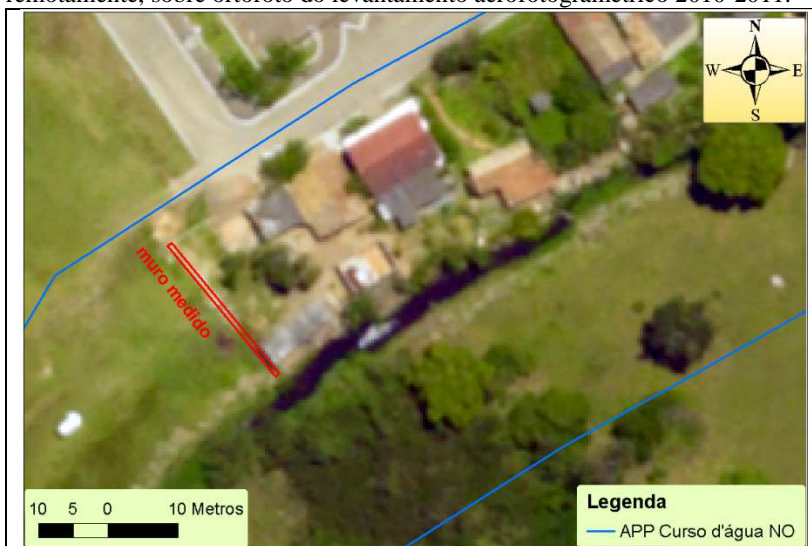
A seguir, uma estrutura inserida nesta APP (comprimento do muro externo do lado sudoeste do pátio de uma residência, próximo ao ponto de coordenadas UTM 725128,650 E; 6874835,061 N) foi medida remotamente, e o resultado foi comparado com medição realizada *in loco*, usando trena eletrônica. As Figuras 44 e 45 ilustram o que foi descrito:

Figura 44: APP de curso d'água (delimitada em SIG sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011) e local examinado.



Fonte: O autor.

Figura 45: Detalhe do muro em APP de curso d'água, medido a campo e remotamente, sobre ortofoto do levantamento aerofotogramétrico 2010-2011.



Fonte: O autor.

4.2.1.4 Barracos de pesca (Praia da Vila)

As praias são bem de uso comum do povo e bens de domínio da União na Zona Costeira, sendo o livre acesso assegurado a elas e ao mar. A degradação das praias acarreta dano ambiental e seu uso está sujeito a condições especiais. Assim sendo, foram realizados estudos em edificações rudimentares (barracos para a guarda de embarcações) existentes no canto da Praia da Vila, próximo ao porto de Imbituba. Cabe salientar mais uma vez que a intenção não é discutir a adequação dessas edificações em particular à legislação vigente, apenas exemplificar o uso da metodologia a casos semelhantes.

Foram medidas *in loco* as dimensões (largura e comprimento) de barracos (próximos ao ponto de coordenadas UTM 730217,335 E; 6874116,061 N). No entanto, como não foi possível delimitar remotamente estas estruturas, a medição remota não foi neste caso realizada. As Figuras 46 e 47 ilustram o que foi descrito:

Figura 46: Edificações no canto da Praia da Vila, em ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011.



Fonte: O autor.

Figura 47: Detalhe de dois barracos, medidos apenas a campo, em ortofoto do levantamento aerofotogramétrico 2010-2011.



Fonte: O autor.

Aproveitou-se o mesmo local para demonstrar também a necessidade de uniformizar elipsoides de referência das diferentes fontes de dados como etapa preliminar dos trabalhos. Os arquivos temáticos virtuais (no formato dgn) contendo as Linhas Limite dos Terrenos de Marinha (LTM) e Linhas de Preamar Média de 1831 (LPM), que delimitam os Terrenos de Marinha da União, foram disponibilizados pela Gerência Regional do Patrimônio da União para este SETEC no elipsóide SAD-69. Uma vez que a ortofoto está em SIRGAS-2000, foi necessário converter os arquivos originais, usando o ArcGis e os seguintes parâmetros de transformação, sugeridos por Oliveira (2009):

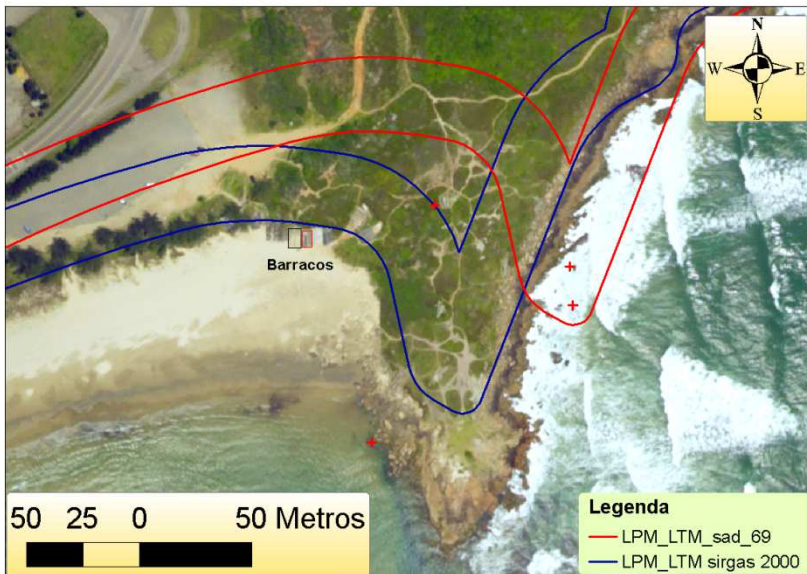
$$\Delta x = -62,00 \text{ m}$$

$$\Delta y = -1,00 \text{ m}$$

$$\Delta z = -37,00 \text{ m}$$

A Figura 48, a seguir, ilustra a posição das Linhas Limite dos Terrenos de Marinha (LTM) e Linhas de Preamar Média de 1831 (LPM) nos dois elipsóides de referência, SAD-69 (em vermelho) e SIRGAS-2000 (em azul), sobre ortofoto em SIRGAS-2000.

Figura 48: LTM e LPM-1831, em diferentes sistemas de referência, sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico do estado.



Fonte: O autor.

4.2.1.5 APP do curso d'água (mineração)

Delimitou-se remotamente parte da APP de um curso d'água (a oeste Av. 21 de Junho, no bairro Ribanceira), considerada para fins deste estudo como a área situada em faixa marginal, medida a partir do nível mais alto, em projeção horizontal, com largura mínima de trinta metros para o curso d'água com menos de dez metros de largura, (segundo dispõe a Resolução CONAMA 303, de 20 de março de 2002). Seguiram-se os mesmos procedimentos realizados nas análises anteriormente descritas, com exceção do último passo (Edição do arquivo APP Curso d'água), criando-se agora uma *polyline* referente às margens do curso d'água e posterior criação de *buffers* distantes 30 metros da *polyline* original, que foi posteriormente apagada.

A seguir, uma estrutura inserida nesta APP (comprimento do muro externo do lado sul do pátio de uma residência, próximo ao ponto de coordenadas UTM 727933,542 E; 6874600,276 N) foi medida remotamente, e o resultado foi comparado com medição realizada *in loco*, usando trena eletrônica. A Figura 49 ilustra o que foi descrito:

Figura 49: APP de curso d'água (delimitada em SIG sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011) e estrutura medida.



Fonte: O autor.

4.2.1.6 Avaliação estatística das discrepâncias

Além das medições já descritas, foram realizadas outras, num total de cinquenta, priorizando estruturas ocupando áreas de interesse para a preservação ambiental, agrupadas em cinco locais distribuídos na cena estudada (Lagoa da Bomba, curso d'água oeste, Praia da Vila, curso d'água mineração e píer da Lagoa do Mirim sudoeste). Das cinquenta medições de campo, trinta e quatro foram medidas também remotamente, sendo as outras descartadas, pois as estruturas a que se referem não puderam ser delimitadas remotamente com clareza. A Figura 50 mostra a distribuição das regiões onde foram feitas as medições de campo:

Figura 50: Locais onde foram efetuadas medições *in loco* com trena eletrônica, sobre ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico 2010-2011.



Fonte: O autor.

As diferenças encontradas entre as medições efetuadas remotamente (MR) e *in loco* (MI) foram calculadas em planilha eletrônica MS Excel 2010, segundo a fórmula vista em (12) e estão resumidas na tabela 13, a seguir:

Tabela 13: Diferenças entre as dimensões medidas remotamente (MR) sobre a ortofotoe *in loco* (MI), para os locais examinados.

Nº	Local	MR (m)	MI (m)	Diferença(m)
01	Muro Lagoa da Bomba (N)	12,11	11,9	0,21
02	Entre canteiros centrais (Restinga)	16,91	18,82	-1,91
03	Muro Lagoa da Bomba (S)	14,04	14,65	-0,61
04	Pista de loteamento Restinga (sul)	6,82	6,9	-0,08
05	Praia da Vila bar (lateral)	8,5	8,6	-0,1
06	Praia da Vila bar (fundos)	14,87	14,77	0,1
07	MuroLeste mineração	25,21	22,8	2,41
08	Muro sul mineração	19,37	18,2	1,17
09	Barraco Praia Vila nº 5 (frente)	5,33	5,340	-0,01
11	Barraco Praia Vila nº 6 (frente)	4,95	4,43	0,52
11	Barraco Praia Vila nº 6 (lateral)	6,44	6,73	-0,29
12	Deck Praia da Vila sul (frente)	6,46	7,5	-1,04
13	Deck Praia da Vila sul (lateral)	4,65	4,92	-0,27
14	Deck Praia da Vila centro (frente)	6,5	7,46	-0,96
15	Deck Praia da Vila centro (lateral)	4,73	4,98	-0,25
16	Deck Praia da Vila norte (frente)	6,45	7,4	-0,95
17	Deck Praia da Vila norte (lateral)	4,77	5	-0,23
18	Restaurante Praia da Vila (frente)	30,42	29,76	0,66
19	Restaurante Praia da Vila (lateral)	7,38	7,83	-0,45
20	Restaurante Praia da Vila (lateral)	9,94	10,25	-0,31
21	Pier Lagoa Mirim (frente)	24,62	24,92	-0,3
22	Pier Lagoa Mirim (lateral)	10,49	10,14	0,35
23	Barraco 1 Lagoa Mirim (lateral)	12,22	11,9	0,32
24	Barracão LagoaMirim (frente)	9,6	9	0,6
25	Barracão Lagoa Mirim (lateral)	48,97	48,86	0,11
26	Barraco 1 curso d'água oeste	4,81	4,3	0,51
27	Barraco 2 curso d'água oeste (f)	5,14	5,2	-0,06
28	Barraco 2 curso d'água oeste (l)	9,28	9,1	0,18
29	Barraco 3 curso d'água oeste (f)	4,09	3,8	0,29
30	Barraco 3 curso d'água oeste (l)	10,49	10,48	0,01
31	Praça Igreja oeste (meio-fio)	21,32	21,12	0,2
32	Cemitério oeste (frente)	8,99	8,9	0,09
33	Cemitério oeste (lateral)	16,67	16,55	0,12
34	Estac. Canto da Vila (largura)	32,01	33,09	-1,08
	MÉDIA (\bar{x})			0,0
	DESVIO - PADRÃO (S)			0,73

Fonte: o autor.

De posse destes resultados, com o auxílio do software Pro UCL 4.0, realizou-se uma análise exploratória dos dados (Figura 51, adaptada

da tela do software). As médias das MRs (12,78 metros) e MIs (12,81 metros) são equivalentes, mas os desvios-padrão (MR=9,92 e MI=9,83) são elevados, o que indica que as distribuições possivelmente não são normais. As medianas de ambas as distribuições são equivalentes (9,05 metros e 9,44 metros).

Figura 51: Análise exploratória de MR e MI (tela do Pro UCL 4.0).

Análise exploratória		
	MI	MR
Numberofvalidobservations	34	34
NumberofDistinctObservations	33	33
Minimum	3,8	4,09
Maximum	48,86	48,97
Mean	12,81	12,78
Median	9,05	9,44
SD	9,827	9,921

Fonte: o autor.

A seguir foram realizados testes de normalidade para avaliar o tipo de distribuição que mais se aproxima dos dados estudados (Figura 52, tela do Pro UCL 4.0). As hipóteses consideradas foram:

H_0 = A amostra provém de uma população normal;

H_1 = A amostra não provém de uma população normal.

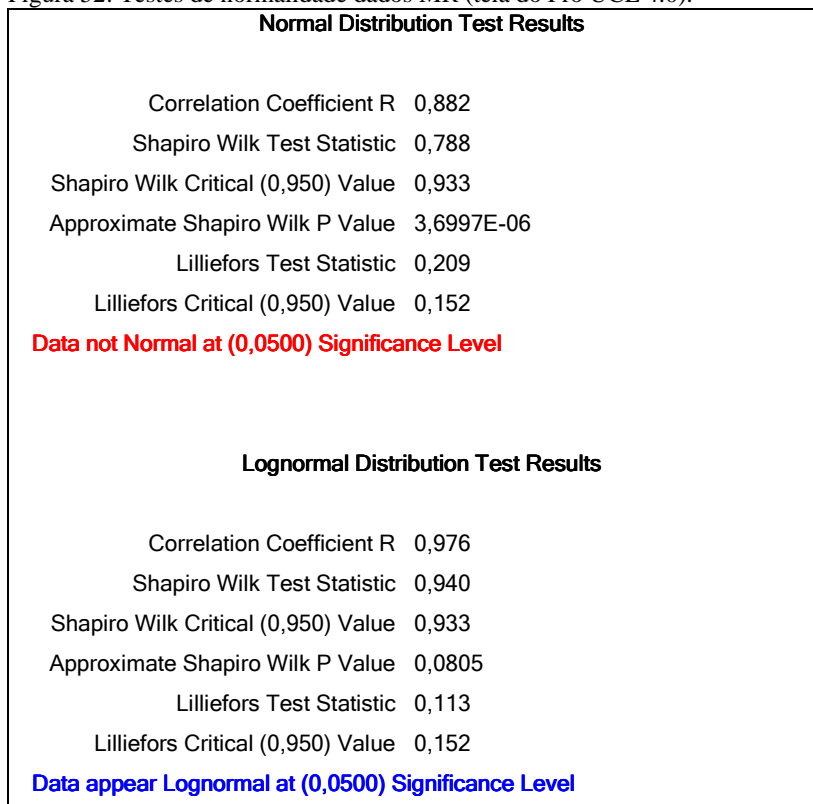
Para o teste de normalidade de MR, verificou-se que $W_{\text{calculado}}$ (0,788) é inferior ao $W_{\text{crítico}(0,05)}$ (0,933), portanto a hipótese nula é rejeitada e não se pode considerar a amostra proveniente de uma distribuição normal. Por outro lado, para o teste de uma distribuição log normal, as hipóteses são:

H_0 = A amostra provém de uma população (log) normal;

H_1 = A amostra não provém de uma população (log) normal.

Obteve-se $W_{\text{calculado}}$ (0,940) superior ao $W_{\text{crítico}(0,05)}$ (0,933), não se podendo rejeitar a hipótese nula, isto é, a distribuição aparenta ser log normal.

Figura 52: Testes de normalidade dados MR (tela do Pro UCL 4.0).



Fonte: o autor.

O mesmo procedimento foi realizado para os dados MI (Figura 53, tela do Pro UCL 4.0). As hipóteses consideradas foram:

H_0 = A amostra provém de uma população normal;

H_1 = A amostra não provém de uma população normal.

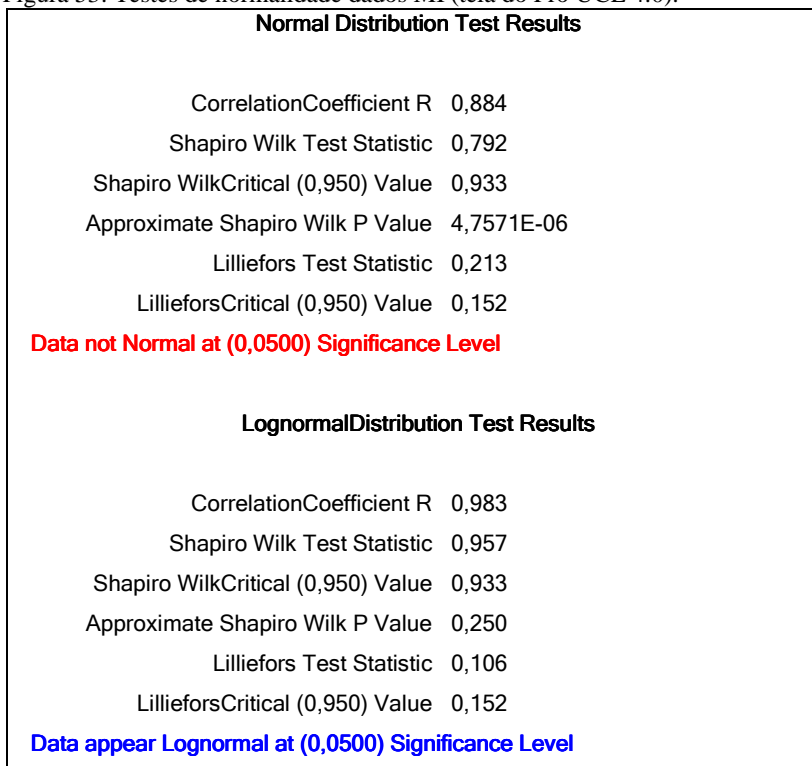
Para o teste de normalidade de MI, verificou-se que $W_{\text{calculado}}$ (0,792) é inferior ao $W_{\text{crítico (0,05)}}$ (0,933), portanto a hipótese nula é rejeitada e não se pode considerar a amostra proveniente de uma distribuição normal. Por outro lado, para o teste de uma distribuição lognormal, as hipóteses são:

H_0 = A amostra provém de uma população (log)normal;

H_1 = A amostra não provém de uma população (log)normal.

Obteve-se $W_{\text{calculado}}$ (0,957) superior ao $W_{\text{crítico}(0,05)}$ (0,933), não se podendo rejeitar a hipótese nula, isto é, a distribuição aparenta ser lognormal.

Figura 53: Testes de normalidade dados MI (tela do Pro UCL 4.0).



Fonte: o autor

Uma vez que as distribuições não foram consideradas como normais, realizou-se o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney (não paramétrico), considerando as seguintes hipóteses:

H_0 : Média/ Mediana de MR = Média/Mediana de MI (bilateral)

H_1 : Média/Mediana de MR \neq Média/Mediana de MI (bilateral)

Como resultado, concluiu-se que média e mediana de MR são equivalentes a média e mediana de MI, para um $\alpha=0,05$. A Figura 54 resume os resultados do teste, conforme tela do Pro UCL 4.0:

Figura 54: Teste Wilcoxon-Mann-Whitney(tela do Pro UCL 4.0).

Teste Wilcoxon-Mann-Whitney		
ConfidenceCoefficient	95%	
SubstantialDifference	0	
SelectedNullHypothesis	Mediana MR=Mediana MI (bilateral)	
AlternativeHypothesis	Mediana MR \neq Mediana MI (bilateral)	
Area of Concern Data: MR		
Background Data: MI		
Análise exploratória		
	MI	MR
NumberOfValidObservations	34	34
NumberOfDistinctObservations	33	33
Minimum	3,8	4,09
Maximum	48,86	48,97
Mean	12,81	12,78
Median	9,05	9,44
SD	9,827	9,921
SE ofMean	1,685	1,701
Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) Test		
H0: Mean/Median de MR = Mean/Median de MI		
Site Rank Sum W-Stat	1164	
WMW Test U-Stat	0,104	
LowerCriticalValue (0,025)	-1,96	
UpperCriticalValue (0,975)	1,96	
P-Value	0,907	
Conclusionwith Alpha = 0,05		
Do Not Reject H0, Conclude MR = MI		
P-Value>= alpha (0,0500)		

Fonte: o autor.

Foi realizado ainda um teste t de Student (paramétrico), ainda que as distribuições não tenham sido consideradas normais, confrontando as seguintes hipóteses:

H_0 : Média de MR = Média de MI (bilateral)

H_1 : Média de MR \neq Média de MI (bilateral)

Novamente concluiu-se pela não rejeição da hipótese de nulidade para um $\alpha=0,05$, ou seja, as médias de MI e MR aparentam ser equivalentes. A Figura 55 resume os resultados do teste, conforme tela do Pro UCL 4.0:

Figura 55: Teste t - Student (tela do Pro UCL 4.0).

Teste t				
Confidence Coefficient	95%			
Selected Null Hypothesis	Média MR = Média MI			
Alternative Hypothesis	Média MR \neq Média MI			
Area of Concern Data: MR				
Background Data: MI				
		t-Test	Critical	
Method	DF	Value	t (0,050)	P-Value
Pooled (EqualVariance)	66	-0,013	1,997	0,990
Satterthwaite (UnequalVariance)	66	-0,013	1,997	0,990
Conclusion with Alpha = 0,050				
* Student t (Pooled): Do Not Reject H0, Conclude MR = MI				

Fonte: o autor.

Outra abordagem para a avaliação seria o uso do teste t- Student com amostras pareadas, pois se trata do mesmo grupo de alvos, com dimensões medidas de duas maneiras diferentes. Utilizou-se o MS Excel para a análise, e o resultado para P calculado (bicaudal) foi $P=0,80$, portanto $P>0,05$ (nível de significância), ou seja, não foi possível rejeitar H_0 .

Assim sendo, com base nos testes estatísticos realizados, pode-se concluir que as medições remotas realizadas sobre a ortofoto oriunda do levantamento aerofotogramétrico são equivalentes aos resultados de campo, para as condições deste estudo.

4.2.2 Ortorretificação da imagem GeoEye-1

Os procedimentos descritos na seção 4.2.1 foram repetidos para cada um dos locais estudados, desta feita sobre a imagem resultante da correção geométrica por Ortorretificação (3D). As medições efetuadas remotamente e *in loco* foram mais uma vez comparadas. Os resultados estão relacionados a seguir:

4.2.2.1 APP da Lagoa da Bomba

Delimitou-se remotamente a APP da Lagoa da Bomba, conforme definição legal e metodologia anteriormente relatadas. Novamente, o muro inserido em APP foi medido remotamente. As Figuras 56 e 57 ilustram o que foi descrito:

Figura 56: APP da Lagoa da Bomba (delimitada em SIG sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada) e local examinado.



Fonte: O autor.

Figura 57: Detalhe do muro em APP da lagoa, medido a campo e remotamente, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada.



Fonte: O autor.

4.2.2.2 APP de Restinga (sul)

Delimitou-se remotamente um trecho da APP de Restinga (litoral sul), conforme definição legal e metodologia já descritas. Foi aqui também medida remotamente parte da estrutura viária de um loteamento inserido nesta APP. As Figuras 58 e 59 ilustram o que foi descrito:

Figura 58: APP de Restinga (delimitada em SIG sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada) e local examinado.



Fonte: O autor.

Figura 59: Detalhe da pista leste, medida a campo e remotamente, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada.



Fonte: O autor.

4.2.2.3 APP do curso d'água (oeste)

Delimitou-se remotamente parte da APP de um curso d'água (a oeste da sede do município, com foz na Lagoa do Mirim), conforme anteriormente relatado. Mediu-se mais uma vez sobre a imagem o comprimento de um muro inserido na APP. As Figuras 60 e 61 ilustram o que foi descrito:

Figura 60: APP de curso d'água (delimitada em SIG sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada) e local examinado.



Fonte: O autor.

Figura 61: Detalhe do muro em APP de curso d'água, medido a campo e remotamente, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada.



Fonte: O autor.

4.2.2.4 Barracos de pesca (Praia da Vila)

Assim como na ortofoto, também sobre a imagem ortorretificada não foi possível delimitar remotamente estas estruturas, portanto, a medição remota não foi considerada. As Figuras 62 e 63 ilustram o que foi descrito:

Figura 62: Edificações no canto da Praia da Vila, sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada.



Fonte: O autor.

Figura 63: Detalhe dos barracos medidos apenas a campo, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada.



Fonte: O autor.

4.2.2.5 APP d curso d'água (mineração)

Delimitou-se remotamente parte da APP de um curso d'água (a oeste Av. 21 de Junho, no bairro Ribanceira), conforme metodologia já descrita. Mediu-se novamente à distância o comprimento de muro nesta APP. A Figura 64 ilustra o que foi descrito:

Figura 64: APP de curso d'água (sobre imagem GeoEye-1 de outubro/2011 ortorretificada) e detalhe do muro.



Fonte: O autor.

4.2.2.6 Avaliação estatística das discrepâncias

Das cinquenta medições de campo, trinta e quatro foram medidas também remotamente, sendo as outras descartadas, pois as estruturas a que se referem não puderam ser delimitadas remotamente com clareza. As diferenças encontradas entre as medições efetuadas remotamente (MR) e *in loco* (MI) foram calculadas em planilha eletrônica MS Excel 2010, segundo a fórmula vista em (12). A Figura 65 mostra a distribuição das regiões onde foram feitas as medições de campo:

Figura 65: Locais onde foram efetuadas medições *in loco* com trena eletrônica, sobre imagem GeoEye-1 ortorretificada, adquirida em out/2011.



Fonte: O autor.

As diferenças encontradas entre as medições efetuadas remotamente (MR) e *in loco* (MI) foram calculadas em planilha eletrônica MS Excel 2010, segundo a fórmula vista em (12) e estão resumidas na tabela 14, a seguir:

Tabela 14: Diferenças entre as dimensões medidas remotamente (MR) sobre a imagem orbital ortorretificada e *in loco* (MI), para os locais examinados.

Nº	Local	MR (m)	MI (m)	Diferença(m)
01	Muro Lagoa da Bomba	11,37	11,9	-0,53
02	Entre canteiros centrais (Restinga)	16,31	18,82	-2,51
03	Muro Lagoa da Bomba (2)	14,25	14,65	-0,4
04	Pista de loteamento Restinga (sul)	7	6,9	0,1
05	Praia da Vila bar (lateral)	8,34	8,6	-0,26
06	Praia da Vila bar (fundos)	15,32	14,77	0,55
07	MuroLeste mineração	24,88	22,8	2,08
08	Muro sul mineração	19,84	18,2	1,64
09	Deck Praia da Vila sul (frente)	7,84	7,5	0,34
11	Deck Praia da Vila sul (lateral)	3,88	4,92	-1,04
11	Deck Praia da Vila centro (frente)	8,62	7,46	1,16
12	Deck Praia da Vila centro (lateral)	4,19	4,98	-0,79
13	Deck Praia da Vila norte (frente)	7,83	7,4	0,43
14	Deck Praia da Vila norte (lateral)	4,59	5	-0,41
15	Restaurante Praia da Vila (frente)	30,47	29,76	0,71
16	Restaurante Praia da Vila (lateral)	6,98	7,83	-0,85
17	Restaurante Praia da Vila (lateral)	9,68	10,25	-0,57
18	Pier Lagoa Mirim (frente)	25,3	24,92	0,38
19	Pier Lagoa Mirim (lateral)	10,92	10,14	0,78
20	Barraco 1 Lagoa Mirim (lateral)	13,25	11,9	1,35
21	Barracão LagoaMirim (frente)	9,49	9	0,49
22	Barracão Lagoa Mirim (lateral)	48,15	48,86	-0,71
23	Muro APP curso d'água (oeste)	22,47	24,2	-1,73
24	Barraco 1 curso d'água oeste	4,63	4,3	0,33
25	Barraco 2 curso d'água oeste (f)	5,15	5,2	-0,05
26	Barraco 2 curso d'água oeste (l)	9,18	9,1	0,08
27	Barraco 3 curso d'água oeste (f)	3,62	3,8	-0,18
28	Barraco 3 curso d'água oeste (l)	9,92	10,48	-0,56
29	Praça Igreja oeste (meio-fio)	22,77	21,12	1,65
30	Cemitério oeste (frente)	9,23	8,9	0,33
31	Cemitério oeste (lateral)	16,82	16,55	0,27
32	Estac. Canto da Vila (largura)	32,4	33,09	-0,69
33	Votorantim 1	2,86	3,04	-0,18
34	Votorantim 2	3,44	4,12	-0,68
	MÉDIA (\bar{x})			0,0
	DESVIO - PADRÃO (S)			0,95

Fonte: o autor

De posse destes resultados, com o auxílio do software Pro UCL 4.0, realizou-se uma análise exploratória dos dados (Figura 66, adaptada

da tela do software). As médias das MRs (13,26 metros) e MIs (13,25 metros) são equivalentes, mas os desvios-padrão (MR=10,08 e MI=10,03) são elevados, o que indica que as distribuições possivelmente não são normais. As medianas de ambas as distribuições são equivalentes (9,58 metros e 9,62 metros).

Figura 66: Análise exploratória de MR e MI (tela do Pro UCL 4.0).

Análise exploratória		
	MR	MI
NumberofValidObservations	34	34
NumberofDistinctObservations	34	33
Minimum	2,86	3,04
Maximum	48,15	48,86
Mean	13,26	13,25
Median	9,585	9,62
SD	10,08	10,03
SE ofMean	1,728	1,72

Fonte: o autor.

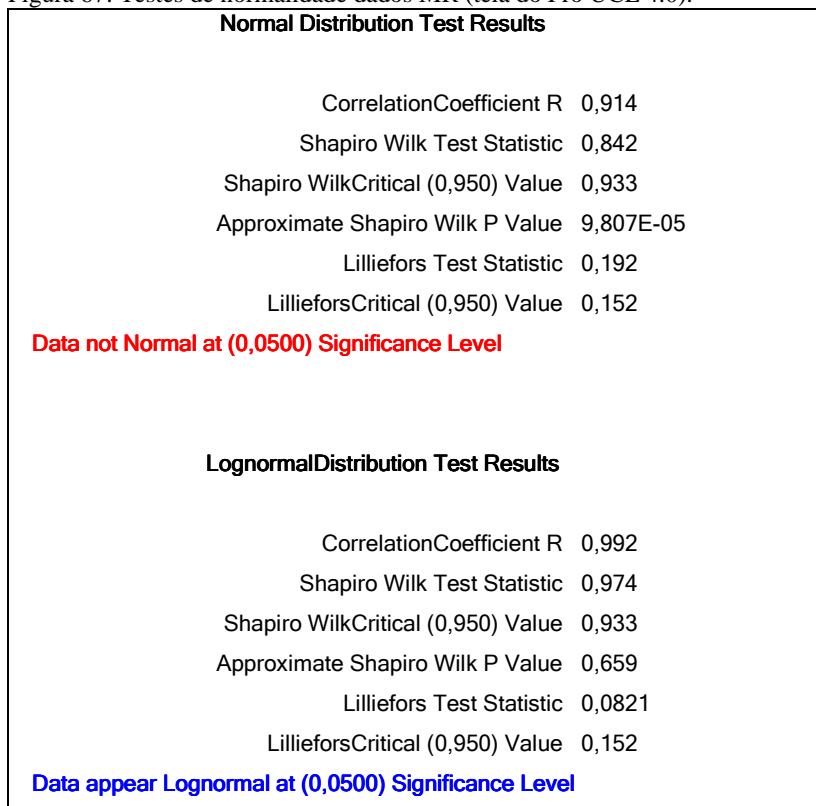
A seguir foram realizados testes de normalidade para avaliar o tipo de distribuição que mais se aproxima dos dados estudados (Figura 67, tela do Pro UCL 4.0). As hipóteses consideradas foram:

H_0 = A amostra provém de uma população normal;

H_1 = A amostra não provém de uma população normal.

Para o teste de normalidade de MR, verificou-se que $W_{\text{calculado}}$ (0,842) é inferior ao $W_{\text{crítico}(0,05)}$ (0,933), portanto a hipótese nula é rejeitada e não se pode considerar a amostra proveniente de uma distribuição normal. Por outro lado, para o teste de uma distribuição lognormal, obteve-se $W_{\text{calculado}}$ (0,974) superior ao $W_{\text{crítico}(0,05)}$ (0,933), não se podendo rejeitar a hipótese nula, isto é, a distribuição aparenta ser lognormal.

Figura 67: Testes de normalidade dados MR (tela do Pro UCL 4.0).



Fonte: o autor.

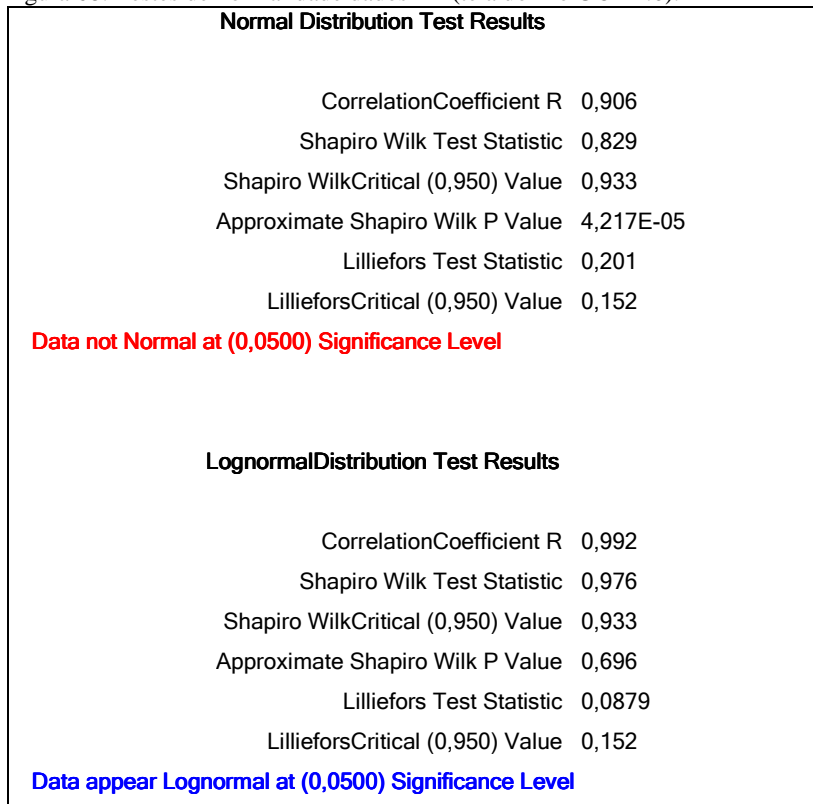
O mesmo procedimento foi realizado para os dados MI (Figura 68, tela do Pro UCL 4.0). As hipóteses consideradas foram:

H_0 = A amostra provém de uma população normal;

H_1 = A amostra não provém de uma população normal.

Para o teste de normalidade de MI, verificou-se que $W_{\text{calculado}}$ (0,829) é inferior ao $W_{\text{crítico (0,05)}}$ (0,933), portanto a hipótese nula é rejeitada e não se pode considerar a amostra proveniente de uma distribuição normal. Por outro lado, para o teste de uma distribuição lognormal, obteve-se $W_{\text{calculado}}$ (0,976) superior ao $W_{\text{crítico (0,05)}}$ (0,933), não se podendo rejeitar a hipótese nula, isto é, a distribuição aparenta ser lognormal.

Figura 68: Testes de normalidade dados MI (tela do Pro UCL 4.0).



Fonte: o autor

Uma vez que as distribuições não foram consideradas como normais, realizou-se o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney (não paramétrico), considerando as seguintes hipóteses:

H_0 : Média/Mediana de MR = Média/Mediana de MI (bilateral)

H_1 : Média/Mediana de MR \neq Média/Mediana de MI (bilateral)

Como resultado, concluiu-se que média e mediana de MR são equivalentes a média e mediana de MI, para um $\alpha=0,05$. A Figura 69 resume os resultados do teste, conforme tela do Pro UCL 4.0:

Figura 69: Teste Wilcoxon-Mann-Whitney(tela do Pro UCL 4.0).

Teste Wilcoxon-Mann-Whitney		
Confidence Coefficient	95%	
Substantial Difference	0	
Selected Null Hypothesis	Mediana de MR igual a mediana de MI (bilateral)	
Alternative Hypothesis	Mediana de MR não é igual a mediana de MI (bilateral)	
Area of Concern Data: remoto		
Background Data: campo		
Análise exploratória		
	MR	MI
Number of Valid Observations	34	34
Number of Distinct Observations	34	33
Minimum	2,86	3,04
Maximum	48,15	48,86
Mean	13,26	13,25
Median	9,585	9,62
SD	10,08	10,03
SE of Mean	1,728	1,72
Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) Test		
H0: Média/ Mediana de MR = Média/ Mediana de MI		
Site Rank Sum W-Stat	1171	
WMW Test U-Stat	0,0245	
Lower Critical Value (0,025)	-1,96	
Upper Critical Value (0,975)	1,96	
P-Value	0,971	
Conclusion with Alpha = 0,05		
Do Not Reject H0, Conclude MR = MI		
P-Value >= alpha (0,0500)		

Fonte: o autor.

Foi realizado ainda um teste t de Student (paramétrico), ainda que as distribuições não tenham sido consideradas normais, confrontando as seguintes hipóteses:

H_0 : Média de MR = Média de MI (bilateral)

H_1 : Média de MR \neq Média de MI (bilateral)

Novamente concluiu-se pela não rejeição da hipótese de nulidade para um $\alpha=0,05$, ou seja, as médias de MI e MR aparentam ser equivalentes. A Figura 70 resume os resultados do teste, conforme tela do Pro UCL 4.0:

Figura70: Testet - Student (tela do Pro UCL 4.0).

Teste t				
ConfidenceCoefficient	95%			
SubstantialDifference (S)	0			
SelectedNullHypothesis	Média MR = Média MI			
AlternativeHypothesis	Média MR \neq Média MI			
Area of Concern Data: MR				
Background Data: MI				
Site vs Background Two-Sample t-Test				
H0: Média MR = Média MI				
		t-Test	Critical	
Method	DF	Value	t (0,050)	P-Value
Pooled (EqualVariance)	66	0,006	1,997	0,995
Welch-Satterthwaite (UnequalVariance)	66	0,006	1,997	0,995
Pooled SD: 10,053				
Conclusionwith Alpha = 0,050				
* Student t (Pooled): Do Not Reject H0, Conclude Média MR = Média MI				

Fonte: o autor.

Do mesmo modo que para o teste anterior, não foi possível rejeitar a hipótese de nulidade.

Outra abordagem para a avaliação seria o uso do teste t- Student com amostras pareadas, pois se trata do mesmo grupo de alvos, com dimensões medidas de duas maneiras diferentes. Utilizou-se o MS Excel para a análise, e o resultado para P calculado (bicaudal) foi $P=0,92$, portanto $P>0,05$ (nível de significância), ou seja, não foi possível rejeitar H_0 .

Assim sendo, com base nos testes estatísticos realizados, pode-se concluir que as medições remotas realizadas sobre a imagem GeoEye-1 ortorretificada são equivalentes aos resultados de campo, para as condições deste estudo.

4.2.3 Considerações sobre possibilidades de uso dos produtos analisados nas perícias criminais ambientais

A decisão sobre o produto cartográfico mais adequado a utilizar em análises ambientais remotas envolve muitas variáveis, entre as quais se destacam custo, qualidade posicional, disponibilidade para o local e época desejados e capacidade de extração das informações essenciais (que pode variar inclusive dentro do mesmo produto). Algumas vezes a melhor escolha em potencial pode não ser capaz de fornecer os elementos necessários para provar um crime ambiental num local específico.

Com relação aos produtos aqui examinados, foi possível constatar que a qualidade posicional da ortofoto é superior à da imagem orbital ortorretificada, mas, para os exemplos citados na cena estudada, o uso de um ou outro produto seria aceitável, sob esse prisma, para a realização das perícias comumente executadas por este SETEC, uma vez que não houve diferenças significativas entre medições *in loco* e remotas (tanto para a ortofoto como para a imagem ortorretificada). Quando foram comparados os resultados de medidas tomadas remotamente com relação àquelas obtidas *in loco*, observou-se que a dispersão em torno da média aparenta ser maior para a imagem orbital ortorretificada, o que pode ser explicado pela maior dificuldade em delimitar alvos com clareza neste produto.

Cabe destacar, no entanto, que o potencial de extração de informações da imagem orbital é menor, devido a diversos fatores, entre os quais se pode citar:

- a) Menor resolução espacial. Estruturas como muretas e cercas, por exemplo, são de difícil visualização e delimitação. Estas medidas somente são possíveis quando o objeto medido tem alto contraste com o entorno;
- b) Distorções radiométricas inerentes à imagem ou oriundas do seu processamento pelo usuário. Pode ocorrer a geração de pixels de cores espúrias, que não representam as feições do terreno e dificultam o trabalho do fotointérprete;
- c) Baixo nível de contraste entre alguns alvos e as áreas vizinhas. O melhor exemplo é a dificuldade para delimitar barracos de

pesca na faixa de praia, pois a resposta espectral dos telhados e da areia é muito semelhante (alta reflectância). No extremo oposto, barracos construídos acima da lâmina d'água (como nas lagoas) são mais facilmente delimitáveis. A limitação devida à semelhança de respostas espectrais pode ser minimizada pela utilização de ferramentas de manipulação dos histogramas dos *softwares* comerciais;

d) Inclinação do sensor na tomada da cena, gerando sombras e ocultando feições. É importante uma análise detalhada da imagem antes da coleta de pontos de controle e de teste a campo, pois feições aparentemente adequadas podem ficar ocultas por prédios próximos;

e) Encobrimento de alvos pela vegetação.

De qualquer maneira, o custo relativamente menor em relação aos levantamentos aerofotogramétricos, a alta resolução temporal e a grande disponibilidade para os mais diversos locais tornam as imagens orbitais uma opção extremamente válida para subsidiar estudos ambientais desta natureza.

5 CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados e dos resultados encontrados, pode-se chegar às seguintes conclusões:

a) A imagem do sensor orbital GeoEye-1 da linha Geo, sem processamento pelo usuário, apresentou baixa qualidade posicional nas áreas mais altas do relevo, com melhores resultados nas planícies (PEC Classe C na escala 1:50.000). Assim sendo, um eventual uso deste produto, sem nenhuma correção pelo usuário, poderia ser o monitoramento ambiental em pequenas escalas. Para as condições do estado de Santa Catarina, esta aplicação não se justifica.

b) O Georreferenciamento expedito (2D), nos moldes em que foi efetuado, ficou aquém da expectativa em termos de qualidade posicional do produto gerado, especialmente levando-se em conta o potencial para correção geométrica da imagem. A baixa qualidade posicional obtida (PEC Classe C para escala 1:35000) demonstra os riscos do uso indiscriminado desta técnica, pois as distorções geradas podem até mesmo piorar a qualidade da imagem original. Para uma aplicação mais adequada desta metodologia a literatura recomenda áreas menores, com relevo plano e utilizando maior número de pontos de controle, bem distribuídos.

c) A ortorretificação com o uso dos RPCs (fornecidos em conjunto com a imagem), de um MDE e de um Ponto de Controle providenciados pelo usuário, gerou um produto Classe A na escala 1:5000, conforme os critérios do Decreto 89.817 de 20 de junho de 1984 que regulamenta o PEC.

d) A ortofoto gerada a partir do levantamento aerofotogramétrico realizado sob demanda do estado de Santa Catarina apresentou, para a área estudada, qualidade posicional compatível com a Classe A na escala 1:2000, segundo os critérios estabelecidos pelo Decreto 89.817 de 20 de junho de 1984. Sugere-se a realização de estudos semelhantes em outras regiões do estado para convalidar este resultado.

e) A imagem orbital GeoEye-1 ortorretificada é uma ferramenta válida para subsidiar perícias criminais ambientais do tipo comumente encontrado na casuística enfrentada pelo Setor Técnico-Científico da Polícia Federal em Santa Catarina.

f) Os produtos (ortofoto e MDT) derivados do levantamento aerofotogramétrico cedidos pelo estado mostraram-se válidos para as análises remotas destinadas a provar crimes ambientais, pela sua

qualidade posicional e pela facilidade de extração de informações relevantes.

g) Não obstante o potencial de uso da orto imagem e da ortofoto para perícias ambientais, existem limitações para seu uso, como demonstra o percentual de aproximadamente 30% de estruturas medidas a campo que não puderam ser dimensionadas remotamente com segurança.

h) A coleta de Pontos de Controle e de Teste a campo deve ser planejada com cuidado, com as imagens que serão processadas em mãos, pois pode ocorrer um descarte elevado destes pontos.

i) Ainda quanto à coleta de pontos a campo, devem-se escolher alvos próximos ao solo, pois telhados de edificações ou outros pontos muito acima do solo são feições que podem ser deslocadas no processo de ortorretificação, levando a informações errôneas sobre sua real posição.

j) Uma análise detalhada do crime ambiental a materializar e das opções em termos de produtos de sensoriamento remoto disponíveis deve ser realizada antes da decisão acerca de qual produto utilizar, levando em conta limitações e vantagens de cada um.

REFERÊNCIAS

- ALVES, R. A. L.; RUSSO, D. **Análise multitemporal de imagens LANDSAT 5 no apoio a confecção de laudo pericial da Polícia Federal sobre desmatamento.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 30 abril a 5 de maio de 2011, Anais, INPE, p. 2959-2966.
- ANJOS, C.S. dos.; MONTEIRO M.J.P.; ZALOTI JR., O.D.; PEREIRA, F.C.B. **Avaliação geométrica de imagens HRC/CBERS-2B .** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 25, Curitiba, 21-24 agosto 2011, Anais, SBC, p. 311-314.
- BARROS, M. G. de; DIAS, P. S. C. **Perícias de Meio Ambiente. Guia de Serviços da Perícia Criminal Federal: Uma visão panorâmica,** Brasília, p.52-57, 2011.
- BEPPLER, M.; DIAS, S.O.; CARVALHO, A. S. **A utilização do GPS com a técnica RTK no Cadastro Técnico Multifinalitário.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 8, Florianópolis, 19-23 outubro 2008, UFSC, p. 1-6.
- BOCCARDO, P. et al. **Orthorectification of high resolution satellite images.** In: ISPRS CONGRESS, 20, 2004, Istanbul, Turquia.
- BRASIL. Decreto nº 89817, de 20 de junho de 1984. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil,** Brasília, n. 120, p. 8884-8886, 22 jun.1984.
- CALDAS, A. J. F. S. **Geoprocessamento e análise ambiental para determinação de corredores de hábitat na Serra da Concórdia, Vale do Paraíba - RJ.** 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- CALDAS, A. J. F. S.; ROTTA, G. V.; GÓES, E. K.; SCHAMNE, J.A. **Sensoriamento remoto na perícia ambiental da polícia federal.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, Natal, 25-30 abril 2009, Anais, INPE, p. 3621-3628.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução ao geoprocessamento. In: (Ed.). INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPECIAIS–INPE. **Fundamentos de Geoprocessamento**. São José dos Campos, 2001. p.1-5.

COELHO, L.; BRITO, J N. **Fotogrametria Digital**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007. 196 p. Disponível em: <http://www.efoto.eng.uerj.br/images/stories/Livro/fotogrametria_digital_revisado.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2013.

CRUZ, E.L.C.A perícia criminal de meio ambiente na Polícia Federal. **Perícia Federal**, Brasília, v. 8, n. 25, p.6-8, set. 2006.

DALMOLIN, Q., LEAL, E. Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em cad. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, 7, nov. 2004. Disponível em:<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/view/1374/1128>. Acesso em: 04 Mai. 2013.

D'ALGE, J. C. L. Cartografia para geoprocessamento. In: (Ed.). **Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, AMV Introdução à Ciência da Geoinformação**, 2001.

DEBIASI, P.; SOUZA, S.F.; MITISHITA, E.A.; ROLIM, S.B.A. Correções e Avaliações Geométricas de Imagens CCD–CBERS 2. **II Seminário Anual de Pesquisas em Geodésia na UFRGS**, 2007.

DELAZARI, L. **Sistemas de Informações Geográficas**:conceitos.2011.25f.Arquivos de aulas para *download*. Disponível em: <http://people.ufpr.br/~luciene/disc/aula1_2011.pdf>. Acesso em: 23 set. 2012

DPF - Departamento de Polícia Federal. **A Serviço do Brasil: 60 anos**. Ed. New Millenium, 16 nov. 2004.

DIAL, G., GRODECKI, J. **RPC Replacement Camera Models**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol 34, Part XXX, 2004.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Satélites de Monitoramento: GeoEye**. Disponível em: <http://www.sat.cnpem.embrapa.br/conteudo/missao_geoeeye.php>. Acesso em: 15 set. 2012.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem Numérica de Terreno. In: CÂMARA, Gilberto; DAVIS JR, Clodoveu A.; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira; D'ALGE, Júlio César Lima. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: 116 INPE, 2001, cap. 7. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>> Acesso em: 12abril 2013.

FERNANDES, R. E. F.; SANTOS, A. P.; COSTA, M. F; COSTA, F.F.**Avaliação da acurácia em tempo real aplicando a técnica RTK**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 3, Presidente Prudente, 26-28 julho 2012, Anais, UNESP, v.1, p. 240-245. Disponível em: <http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2012_III_SBG/_artigos/A123.pdf> Acesso em: 21abr. 2013.

FRASER, C.S.; RAVANBAKSH, M.,**Georeferencing accuracy of GeoEye-1 Imagery**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 75(6): 634-638, 2009.

FREIBERGER JUNIOR, J. **Análise da degradação do posicionamento em tempo real com o emprego do GNRT**. 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GLEYZES, M. A; PERRET, L.; KUBIK, P. **Pleiades system architecture and main performances**. In: ISPRS CONGRESS, 22, 2012, Melbourne, Australia.

GRIPP JR, J. **Aplicação de três métodos matemáticos para georreferenciamento expedito e rigoroso (ortorretificação) de imagens Ikonos II**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, Natal, 25-30 abril 2009a, Anais, INPE, p. 1779-1786.

GRIPP JR, J. **Ortorretificação de imagens de alta resolução para aplicação em cadastro técnico rural e mapeamento de áreas de preservação permanente e reservas legais**. 2009b. 151 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GUPTA, R. P. **Remote sensing geology**. Springer, 2003. ISBN 3540431853.

HAND, Kevin. **GeoEye-1 An annotated look**. 2008. Disponível em: <<http://www.popsci.com/node/19968>>. Acesso em: 12 out. 2012.

HU, Y.; TAO, V.; CROITURU, A. **Understanding the rational function model: methods and applications**. In: International archives of photogrammetry and remote sensing, 20, 2004, Istanbul, Turquia. Disponível em <<http://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm4/papers/423.pdf>> Acesso: 10 de setembro de 2012.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **CBERS - Satélite sino-brasileiro de recursos terrestres**. Disponível em: <http://www.cbears.inpe.br/sobre_satelite/cameras_imageadoras_cbears1e2e2b.php>. Acesso em: 19 jun. 2013.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Frequently Asked Questions (Perguntas Mais Frequentes)**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrq/faq.shtm#15>. Acesso em: 05 out.2013

JACOBSEN, K. **Orientation of high resolution optical space images**. In: ASPRS annual conference, Tampa, 2007.

LOCH, C. **Monitoramento global integrado de propriedades rurais a nível municipal, utilizando técnicas de sensoriamento remoto**. 1988. 142 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LOURENÇO, F. R.; SANCHES, I. D.; FURTADO, A. L. S. **Avaliação das técnicas de fusão disponíveis nos softwares ArcGis, Erdas e ENVI**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 30 abril - 05 maio 2011, Anais, INPE, p. 7486.

LUIZ, S.; OLIVEIRA, C. G.; OKIDA, R. **Comparação entre diferentes métodos de correção geométrica em imagem Radarsat-1 na Flona Tapajós**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, Belo Horizonte, 05-10 abril 2003, Anais, INPE, p. 325-332.

MAGLIANO, M. M. Uso de imagens de satélites na criminalística. **Perícia Federal**, Brasília, v. 8, n. 25, p.18-21, set. 2006.

MAIA, L.G.; GRIPP JR, J.; SOUZA, E. **Avaliação da qualidade altimétrica de modelos digitais de terreno**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 25, Curitiba, 21-24 agosto 2011, Anais, SBC, p. 60-66.

MATSUOKA, C.T. **Atualização cartográfica urbana utilizando imagem Quickbird**. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/8477>>. Acesso em: 12 out. 2012.

MIRANDA, D. Inteligeo: o sistema de inteligência geográfica da perícia criminal federal. **Perícia Federal**, Brasília, v. 13, n. 30, p.30-33, out. 2012.

MÉDICE, P. H. V. O.. **A aplicação dos modelos digitais de terreno nos estudos urbanos: o caso do bairro Luxemburgo - Belo Horizonte (MG)**. 2008. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Pontifícia Universidade Católica - MG, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/TratInfEspacial_MedicePH_1.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2013.

MEGURO, Y.; FRASER, C. S. **Georeferencing accuracy of GeoEye-1 stereo imagery: Experiences in a Japanese test field**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, v. 38, n. Part 8, p. 1069-1072, Kyoto, 2010.

MELO, D. **Uso de dados Ikonos II na análise urbana: testes operacionais na zona leste de São Paulo**. DHCTB Melo.-São José dos Campos: INPE, 2002.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Disponível em:

<<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 05 ago. 2012.

MERCHANT, D.C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In: American Congress on Surveying and Mapping, v.1, 1982. Technical papers of the American Congress on Surveying and Mapping, 1982. p.222-231.

MONICO, J. et al. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 15, n. 3, p.469-483, set. 2009. Disponível em: <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcq/article/view/15513>. Acesso em: 26 Mai. 2013.

OLIVEIRA, D. R. A. **Utilização de imagens quickbird para a atualização do mapeamento urbano** : aplicações e restrições em diferentes níveis de correção geométrica. xv, 92 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2009.

OLIVEIRA, F.H. **Qualidade da base cartográfica para o cadastro técnico multifinalitário**. xix, 167[39]f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 1996.

OLIVEIRA, J. C. **Conceitos básicos sobre posicionamento por satélites artificiais**. XIV curso de uso escolar de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. São José dos Campos: INPE, 2011.

Disponível em:

<http://www.dsr.inpe.br/vcsr/files/Apresentacao_GPS.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2013.

OUVERNEY, Matias et al. **Avaliação da Ortoretificação de imagens do sensor Quickbird II usando modelo de orientação via RPCs**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, 21-26 abril 2007, Anais, INPE, p. 611-619.

PCI GEOMATICS. **Geomatica OrthoEngine 9.0: User Guide.** Ontário, 2003. Disponível em: <http://www.ucalgary.ca/appinst/doc/geomatica_v91/manuals/orthoeng.pdf>. Acesso em: 20 set. 2012.

PEDRO, P.C. **Ortorretificação de imagens de alta resolução Ikonos e Quickbird utilizando o modelo APM (Affine Projection Model).** 95 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PEDRO, P. C.; ANTUNES, A. F. B. **Comparação dos modelos APM (Affine Projection Model) e RPC (Rotational Coefficients Model) para ortorretificação de imagem Quickbird.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, 21-26 abril 2007, Anais, INPE, p. 629-636.

PINHEIRO, E.S. **Avaliação de imagens Quickbird na análise geográfica de um setor da mata atlântica do Rio Grande do Sul.** 2003. 183 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós -graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

POLI, D.; TOUTIN, T. State-of-the-art of geometric correction of remote sensing data: a data fusion perspective. **International Journal Of Image And Data Fusion**, [S. L.], p. 3-35. Mar. 2012.

POLIZEL, S. P.; MARQUES, M.L; COSTA, N.R.; ROSSI, E.; FERREIRA, M. V. **Aplicação e avaliação de técnicas de fusão em imagens Ikonos e GeoEye.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 30de abril a 5de maio de 2011, Anais, INPE, p. 7761-7768.

PONS, N. A. D.; PEJON, O. J. **Uso da imagem Ikonos (PSM, 1m) ortorretificada e das ortofotos no estudo de áreas degradadas em ambiente urbano.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, 21-26 abril 2007, Anais, INPE, p. 645-652.

SANTOS, A. P. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com o uso da estatística espacial.** 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado)

- Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO
SUSTENTÁVEL DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina.

Florianópolis: ENGEMAP, 2013,p. 202, Documento Digital.

SANTOS, A. P. dos; VIEIRA, C.A.O.**Avaliação do Padrão de Exatidão Cartográfico em imagens orbitais Ikonos e CBERS-2B, na bacia do Ribeirão São Bartolomeu em Viçosa-MG.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, Natal,25-30de abril2009, Anais, INPE, p. 1021-1030.

SATELLITE IMAGING CORPORATION (Eua). **Satellite sensors.**Disponível em: <<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/GeoEye-2.html>>. Acesso em: 19 jun. 2013.

SILVA, A. J. F. M. e. **O uso de polinômios racionais na ortorretificação de imagens de satélite.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, 21-26 abril 2007, Anais, INPE, p. 1289-1295.

SILVA, E. S. **Avaliação da Geometria do Produto Ikonos Geo.** 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós -graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José Dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2005/12.20.16.25/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2013.

SILVA, J. X. da. O que é Geoprocessamento? **Revista do Crea Rj**, Rio de Janeiro, n. 79, p.42-44, 30 out. 2009. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/45611982/O-Que-e-Geoprocessamento-Jorge-Xavier-Da-Silva>>. Acesso em: 15 set. 2012.

SILVA, W. B. da. **Avaliação da Geometria de Imagens Ikonos Ortoretificadas Através das Transformações Polinomiais Racionais.** 2005. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Cartográfica), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

SILVA, W. B. da. **Análise de métodos de refinamento do Modelo Polinomial Racional utilizando pontos de controle através da exatidão posicional de ortoimagens de alta resolução.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, 21-26 abril 2007, Anais, INPE, p. 671-677.

SPACE IMAGING BRASIL. **GeoEye-1.** Disponível em: <<http://www.spaceimaging.com.br/novosite11/sib.php>>. Acesso em: 23 jun. 2013.

TAVARES JR, J. B.; OUVENEY, M. I. M.; UBERTI, M. S.; ANTUNES, M. A. H. **Avaliação de imagens Ikonos II e Quickbird para obtenção de bases cartográficas para o Cadastro Técnico municipal.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 07, Florianópolis, 15-19 outubro 2006, Anais, UFSC, p. 1-6.

TRAUCZYNSKI, R.A.T. **Perícias criminais em delitos contra a flora no estado de Santa Catarina:** diagnóstico, metodologia e perspectivas. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Perícias Criminais Ambientais, Florianópolis, 2013.

TOTH, C. K.; OH, J.; GREJNER-BRZEZINSKA, D. A. **Airborne hyperspectral image georeferencing aided by high-resolution satellite images.**In: ISPRS TC VII Symposium, July, 2010, Vienna, Austria.

TOUTIN, T.; CHENG, P.. Demystification of Ikonos. **Earth Observation Magazine**, [s. L.], v. 9, n. 7, p.17-21, jul. 2000.

TOUTIN, T. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893-1924, 2004. ISSN 0143-1161.

TOUTIN, T. State-of-the-art of geometric correction of remote sensing data: a data fusion perspective. **International Journal Of Image And Data Fusion**, [S. L.], p. 3-35. Mar. 2011.

XU, Z. **The Rational Function Model in Photogrammetric Mapping: Methods and Accuracies.** 2004. 64 f. Master Thesis. North

York, Ontario, Canada. Department of Earth Science, York University.
Disponível em: <<http://www.geoict.yorku.ca/past-publications/past-publications-1>>Acesso: 15 de janeiro de 2013.