



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GLEICE PEREIRA DA SILVA

**METODOLOGIA DE QUALIDADE DE PRODUTOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO POR RADAR E SUA IMPORTÂNCIA NO
MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO**

Recife

2020

GLEICE PEREIRA DA SILVA

**METODOLOGIA DE QUALIDADE DE PRODUTOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO POR RADAR E SUA IMPORTÂNCIA NO
MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de doutorado em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Recife

2020

Catálogo na fonte

Biblioteca Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586m Silva, Gleice Pereira da.
Metodologia de qualidade de produtos de sensoriamento remoto por radar e sua importância no mapeamento geológico-geotécnico / Gleice Pereira da Silva. - 2020.
210 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Conjunto de dados InSAR. 3. Controle de qualidade posicional. 4. Geotecnia. 5. Cartografia. 6. Normas técnicas. 7. Testes estatísticos. I. Coutinho, Roberto Quental (Orientador). II. Título

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-200



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**METODOLOGIA DE QUALIDADE DE PRODUTOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO POR RADAR E SUA IMPORTÂNCIA NO
MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO**

defendida por

Gleice Pereira da Silva

Considera a candidata APROVADA

Recife, 14 de fevereiro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho (orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Rafael Antônio da Silva Rosa (Examinador externo)
Visiona Tecnologia Espacial

Prof. Dr. Ricardo Nascimento Flores Severo (Examinador externo)
Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira (Examinador externo)
Universidade Católica de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Lucilene Antunes Correia Marques de Sá (Examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esta Tese ao meu filho (Brenno), pais (Vilian e Roberto) e irmãos (Gleison, Gleizer e Yuri Roberto) pelo incentivo, amor e paciência. E a todos aqueles que acreditaram, dando-me sempre força para vencer os meus ideais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, Nossa Senhora e Jesus, que estiveram sempre presentes em toda minha vida, iluminando e mostrando os melhores caminhos que eu deveria seguir, ensinando a ter esperança, paciência e amor na vida, sempre me erguendo de cada derrota. Obrigada, por todo ensinamento durante minha jornada até aqui e por me dar força de continuar buscando meus caminhos.

Ao meu filho (Brenno) por tornar cada saída e chegada mais alegre, amorosa e pelo companheirismo de cada dia. Obrigada pelo amor, apoio, companheirismo, amizade, alegrias, conquistas, esperança, fé, por tudo Brenno. E por sempre me mostrar que estou indo no caminho certo de educar.

Aos meus pais (Vilian e Roberto) pela orientação durante toda minha vida.

Aos meus irmãos/filhos (Gleison, Gleizer e Yuri Roberto) pelos incentivos, amor, paciência e amizade.

A Jens Otten por deixar mais leve esse final da Tese.

Esta tese não teria sido concluída sem o apoio, incentivo e colaboração incondicional do Prof^ª. Dr. Roberto Coutinho e do Dr. Rafael Rosa pelas sugestões, colaborações e incentivos durante todo o doutorado.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pela a oportunidade de realizar meus sonhos de graduação, mestrado e doutorado, todos com excelente qualidade.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pela oportunidade de cursar doutorado.

À amiga Daniela Silva pela amizade, companheirismo e apoio incondicional nesta reta final.

Aos amigos Anderson Marcolino, Daniela Silva e Daniel Gomes pela amizade e disposição nas correções finais.

Aos amigos do doutorado Bruno Andrade, Marília Dantas e Thayara Barbalho.

E aos eternos amigos do mestrado (Amanda Silva, Anderson Marcolino e Vanessa Maranhão) pelo incentivo e os momentos de descontração nesta jornada.

Ao MSc. Alexandre Souza pela amizade, companheirismo de campo desde o mestrado até o doutorado.

A Bruno Morais e Manoely Oliveira pela ajuda prestada durante as correções dos artigos neste momento final.

Ao Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP), pelo conhecimento concedido ao longo desses anos.

Aos colegas de doutorado Danisete, Hugo, Claudenice, Claudinha, Claudenice, Rejane.

Aos Prof^ª. Dr. Rafael Rosa, Prof. Dr. Cristiane Duarte e Prof. Dr Lucilene Sá, pelas sugestões e contribuições prestadas na qualificação desta Tese.

Aos Prof^ª. Dr. Rafael Rosa, Prof. Dr Lucilene Sá, Prof. Dr. Joaquim Oliveira e Prof. Dr. Ricardo Severo, pelas sugestões e contribuições prestadas na defesa desta Tese.

Aos funcionários e prestadores de serviços do Departamento de Engenharia Civil, pela atenção e dedicação, em especial a Amanda, Andréa, Breno, Cleide, Claudiane e Iran.

Aos Profissionais da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo recebida durante 1 ano.

A todos que direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento desta tese, meus agradecimentos.

Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar nos sonhos que se têm, ou que os seus planos nunca vão dar certo, ou que você nunca vai ser alguém..." (Renato Russo).

RESUMO

A validação posicional do conjunto de dados é uma etapa importante para confecção de mapas, pois permite o conhecimento de sua precisão indicando a acurácia do processo dos dados. A proposta da tese é desenvolver uma metodologia para a definição de pontos de controle para validação posicional planialtimétrico que sejam alvos existentes na cena e identificáveis no conjunto de dados do sistema Radar Interferométrico de Abertura Sintética (InSAR). Esta metodologia foi desenvolvida a partir do estudo das características de reflexão e das distorções geométricas, causadas pela visada lateral do radar, propondo a escolha de alvos existentes na cena e identificáveis na ortoimagem que possam ser utilizados como pontos de controle possibilitando a validação dos insumos a serem utilizados para a geração dos produtos da Geotecnia com qualidade posicional conhecida. Pontos foram coletados em campo com receptores do Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), próximos a esses objetos citados e através destes pontos foram realizadas a validação dessas coordenadas na área de estudo que fica localizada no município do Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco - Brasil, utilizando o recorte da área da ortoimagem e o Modelo Digital do Terreno (MDT), oriundos do sistema radar interferométrico de abertura sintética (InSAR). Nestes produtos SAR foram empregados os testes do PEC-84, PEC-PCD, *National Map Accuracy Standard* (NMAS), *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), e *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA), *Engineering Map Accuracy Standard* (EMAS), e *United States Geological Survey* (USGS) juntamente com informações do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) das normatizações vigentes no Brasil. Cada teste mostrou sua particularidade em relação à validação posicional, obtendo-se nesta pesquisa resultados satisfatórios dentro do limite da classificação dos PEC's. A validação do conjunto de dados SAR, ortoimagem e MDT, permitiu que a base cartográfica tenha PEC's conhecidos, como também possíveis erros sistemáticos ou aleatórios no conjunto de dados analisados. Esta informação possibilita que os profissionais que envolvem a área de geotecnia possam planejar, delimitar, decidir e utilizar com consciência os documentos cartográficos para confecção de mapas temáticos: curvatura, relevo sombreado, declividade, Hand e MDT.

Palavras-chave: Conjunto de dados InSAR. Controle de qualidade posicional. Geotecnia. Cartografia. Normas técnicas. Testes estatísticos.

ABSTRACT

The positional validation of the data set is an important step for map production, as it allows the knowledge of its precision, indicating the accuracy of the data process. The proposal of this thesis is to develop a methodology for validating planialtimetric positional control points in the data set of the Synthetic Aperture Interferometric Radar system (InSAR). The thesis proposal is to develop a methodology for the definition of control points for planialtimetric positional validation that are existing targets in the scene and identifiable in the data set of the Synthetic Aperture Interferometric Radar system (InSAR). This methodology was developed from the study of the reflection characteristics and geometric distortions, caused by the lateral view of the radar, proposing the choice of existing targets in the scene and identifiable in the orthography that can be used as control points to enable the validation of the inputs to used to generate Geotechnical products with known positional quality. We collected points in the field with Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers near to these cited objects and through these points the validation of these coordinates was carried out in the study area located in the municipality of Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco - Brazil, using the clipping of the ortho-image and the Digital Terrain Model (DTM), from the Synthetic Aperture Interferometric Radar system (InSAR). Thus, we used the National Map Accuracy Standard (NMAS), American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), and National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) tests, along with information from the Cartographic Accuracy Standard (PEC) of the current norms in Brazil. Each test showed its particularity in relation to positional validation, obtaining in this research satisfactory results within the limit of the classification of the PEC's. The validation of the SAR, ortho-image and DTM data set, allowed the cartographic base to have known PECs, as well as possible systematic or random errors in the analyzed data set. This information allows professionals involved in the geotechnical area to decide and consciously use their cartographic document for making thematic maps: curvature, shaded relief, slope, DTM.

Keywords: InSAR dataset. Positional quality control. Geotechnics. Cartography. Cartographic technical standards. Statistical tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Tipos de Cartas Geotécnicas que consideram os processos de meio físico e suas aplicações	33
Figura 2 –	Ilustração de carta geotécnica de suscetibilidade a corrida e enxurrada	34
Figura 3 –	Representação do MDT e MDS	38
Figura 4 –	Declividade do Terreno	39
Figura 5 –	Relação da declividade e escoamento	39
Figura 6 –	Mapa de declividade expressos em graus	40
Figura 7 –	Combinação das classes de curvatura vertical e horizontal	41
Figura 8 –	Exemplos de a) MDT e b) Curvatura.....	41
Figura 9 –	Relevo Sombreado	42
Figura 10 –	Curvas de Níveis	43
Figura 11 –	Curvas de nível em planta (visão vertical) com sombra para realçar os vales	43
Figura 12 –	Hand	44
Figura 13 –	Faixa do visível	48
Figura 14 –	Esquema de funcionamento do laser scanner time-of-flight e medição do tempo por diferença de fase ou método da onda contínua	50
Figura 15 –	Perfilamento a <i>LASER</i>	50
Figura 16 –	Funcionamento do radar na chuva	51
Figura 17 –	Demonstração da tecnologia do RADAR	52
Figura 18 –	Princípios Básicos Radar	53
Figura 19 –	Produtos do radar	53
Figura 20 –	Modos de aquisição do radar	54
Figura 21 –	Faixa Eletromagnética	55
Figura 22 –	Bandas do Radar	55
Figura 23 –	Penetrabilidade das ondas eletromagnéticas na Banda P	56
Figura 24 –	Penetrabilidade das ondas eletromagnéticas na Banda X	57
Figura 25 –	Sistema InSAR	58

Figura 26 –	Ilustração do RADAR de Abertura de Sintética	59
Figura 27 –	Ilustração da obtenção dos dados com o InSAR	59
Figura 28 –	Geometria do InSAR	60
Figura 29 –	Pulso Transmitido	60
Figura 30 –	Intervalo de Abertura Sintética (ts-te)	61
Figura 31 –	<i>Multi-Look</i>	61
Figura 32 –	Representação do pixel no formato complexo	62
Figura 33 –	Interação com diferentes tipos de superfície	62
Figura 34 –	Diferentes resoluções	62
Figura 35 –	Ruído	63
Figura 36 –	Área com Filtragem	64
Figura 37 –	Comparação da variação do "range" para aeronave e satélite	65
Figura 38 –	a) Original e b) Corrigida: imagem do sistema InSAR-580 do Rio Tapajós obtida durante a missão InSAREX-1992	65
Figura 39 –	Distorções Geométricas	66
Figura 40 –	<i>Shadow</i>	66
Figura 41 –	Layover.....	67
Figura 42 –	Imagem com efeito " <i>layover</i> ", caracterizado pelas faixas de cor branca	67
Figura 43 –	<i>Foreshortening</i>	68
Figura 44 –	Interferometria	70
Figura 45 –	Faixa Eletromagnética	71
Figura 46 –	Radar	71
Figura 47 –	Aereofotogrametria	71
Figura 48 –	Deslocamento posicional de feições	82
Figura 49 –	Posicionamento relativo	84
Figura 50 –	Critério de <i>Chauvenet</i>	85
Figura 51 –	Fluxograma da metodologia projetada	99
Figura 52 –	Localização do Município do cabo Santo Agostinho	100
Figura 53 –	Área de Estudo visualizada no Google Earth	101
Figura 54 –	Domínios Morfoestruturais	102
Figura 55 –	Fluxograma dos Procedimentos realizados para definição de feições Radar-identificável no campo	103

Figura 56 –	Aeronave Turbo Commander utilizada para a aquisição do conjunto de dados do sistema InSAR	104
Figura 57 –	Equipamento usado para adquirir o conjunto de dados do sistema InSAR.	104
Figura 58 –	Fluxograma de processo do sistema InSAR	105
Figura 59 –	Esboço da Ortoimagem oriundo do sistema InSAR utilizada para a validação posicional planimétrica	107
Figura 60 –	Esboço do MDT oriundo do sistema InSAR utilizada para a validação posicional altrimétrica	108
Figura 61 –	Esboço da Ortoimagem com uma grade de 32x32cm na área de estudo	109
Figura 62 –	Exemplo da seleção das explosões de <i>pixels</i> na Ortoimagem	110
Figura 63 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> localizadas nas vias 01	111
Figura 64 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> localizadas nas vias 02	111
Figura 65 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> localizadas próximo a aglomerado urbano 03	111
Figura 66 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> localizadas próximo a aglomerado urbano 01	112
Figura 67 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> localizadas próximo a aglomerado urbano 02	112
Figura 68 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> em uma região da área de estudo	113
Figura 69 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> localizadas nas vias 03	113
Figura 70 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> localizadas nas vias 04	114
Figura 71 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> localizadas próximo a aglomerado urbano 03	114
Figura 72 –	Esboço da Ortoimagem com Explosões de <i>pixels</i> na ortoimagem 02	115

Figura 73 –	Verificação das explosões de <i>pixels</i> na área de estudo como pontos planejados 01 e 02.....	116
Figura 74 –	Verificação das explosões de <i>pixels</i> na área de estudo como pontos planejados 03 e 04	116
Figura 75 –	verificação dos pontos planejados 05 e 06	116
Figura 76 –	verificação do ponto planejado 07	117
Figura 77 –	verificação dos pontos planejados 23, 24, 25 e 27	117
Figura 78 –	verificação dos pontos planejados 28, 29, 30, 31, 32 e 33	118
Figura 79 –	verificação dos pontos planejados 34, 35, 36, 37 e 38	119
Figura 80 –	verificação dos pontos planejados 40, 41, 42, 43 e 44	120
Figura 81 –	verificação dos pontos planejados 45, 46, 47, 48, 49 e 50	121
Figura 82 –	verificação dos pontos planejados 35, 50, 51, 52 e 53	122
Figura 83 –	verificação dos pontos planejados 54, 55, 56 e 57	123
Figura 84 –	verificação dos pontos planejados 108, 109, 110 e 101	124
Figura 85 –	verificação do ponto planejado 70, 71 e 73	125
Figura 86 –	verificação do ponto planejado 83, 84 e 85	125
Figura 87 –	verificação do ponto planejado 59	126
Figura 88 –	verificação do ponto planejado 96 e 120	126
Figura 89 –	a) Feições pontuais espalhadas na ortoimagem em uma via pavimentada; b) Feições pontuais identificadas em campo eram postes de iluminação na via pavimentada	127
Figura 90 –	Formas de aquisição de ponto na superfície	128
Figura 91 –	Triângulos formados	128
Figura 92 –	Pontos planejados com utilização da imagem ótica	130
Figura 93 –	Aquisição do Ponto P08	131
Figura 94 –	Aquisição do Ponto P09	131
Figura 95 –	Aquisição do Ponto P14	132
Figura 96 –	Aquisição do Ponto P15	132
Figura 97 –	Pontos planejados na Ortoimagem	134
Figura 98 –	Aquisição do Ponto GPS03 (explosão de <i>pixel</i>)	135
Figura 99 –	Aquisição do Ponto GPS04 (explosão de <i>pixel</i>)	135
Figura 100 –	Aquisição do Ponto GPS11 (explosão de <i>pixel</i>)	135
Figura 101 –	Aquisição do Ponto GPS12 (explosão de <i>pixel</i>)	136

Figura 102 –	Aquisição do Ponto GPS13 (explosão de <i>pixel</i>)	136
Figura 103 –	Aquisição do Ponto GPS15 (explosão de <i>pixel</i>)	136
Figura 104 –	Aquisição do Ponto GPS16 (explosão de <i>pixel</i>)	137
Figura 105 –	Aquisição do Ponto GPS18 (explosão de <i>pixel</i>)	137
Figura 106 –	Aquisição do Ponto GPS19 (explosão de <i>pixel</i>)	137
Figura 107 –	Aquisição do Ponto GPS26 (explosão de <i>pixel</i>)	138
Figura 108 –	Aquisição do Ponto GPS03 (explosão de <i>pixel</i>)	138
Figura 109 –	Exemplo de Ortoimagem sem explosões na beira da Estrada	140
Figura 110 –	Os Pontos de Controle Pré-selecionados	140
Figura 111 –	Pontos do IBGE dentro da área de estudo	142
Figura 112 –	Relatório de Estação Geodésica nome 93315	143
Figura 113 –	RN 93315 com os pontos de controle	143
Figura 114 –	Base de Referência	145
Figura 115 –	Pontos Planejados na ortoreimagem e localizado na imagem ótica ...	145
Figura 116 –	Medições da altura da antena do GNSS	146
Figura 117 –	Aquisição dos pontos de controle em campo (1)	146
Figura 118 –	Aquisição dos pontos de controle em campo (2)	147
Figura 119 –	Fluxograma da Validação Posicional Planimétrica	148
Figura 120 –	Fluxograma da Validação Posicional Altimétrica	149
Figura 121 –	Ponto Planejado P7	151
Figura 122 –	Ponto Planejado P8	151
Figura 123 –	Ponto Planejado P9	152
Figura 124 –	Ponto Planejado P10	152
Figura 125 –	Ponto Planejado P12	153
Figura 126 –	Ponto Planejado P13	153
Figura 127 –	Ponto Planejado P14	154
Figura 128 –	Ponto Planejado P15	154
Figura 129 –	Ponto Planejado P18	155
Figura 130 –	Ponto Planejado P19	155
Figura 131 –	Ponto Planejado na Ortoimagem GPS5 e GPS11	158
Figura 132 –	Ponto Planejado na Ortoimagem GPS12 e GPS13	158
Figura 133 –	Ponto Planejado na Ortoimagem GPS15 e GPS16	158
Figura 134 –	Ponto Planejado na Ortoimagem GPS18 e GPS19	159

Figura 135 –	Ponto Planejado na Ortoimagem GPS26 e GPS28	159
Figura 136 –	Mapa da Declividade	185
Figura 137 –	Relevo Sombreado	186
Figura 138 –	Curvas de Níveis 1,5x1,5m	187
Figura 139 –	Curvas de Níveis com relevo sombreado com o filtro Boxcar	188
Figura 140 –	Mapa de Curvatura com o filtro Boxcar	189
Figura 141 –	<i>Hand</i>	190
Figura 142 –	Orto-imagem da Área de Estudo na banda X	191
Figura 143 –	Orto-imagem da Área de Estudo na banda P	192
Figura 144 –	Ortoimagem da Área de Estudo na banda XP	193
Figura 145 –	Ortoimagem da Área de Estudo na banda XP <i>Shade</i>	194
Figura 146 –	MDT da Área de Estudo	195
Figura 147 –	MDS da Área de Estudo	196

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Indicadores e subindicadores para a avaliação da Suscetibilidade	35
Quadro 2 –	Elementos de Qualidade	82
Quadro 3 –	Testes de Acurácia Posicional 01	87
Quadro 4 –	Testes de Acurácia Posicional 02	88
Quadro 5 –	Tamanhos de amostra recomendados com base na área do projeto	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Radiação Eletromagnética da banda do Visível	48
Tabela 2 –	Faixas eletromagnéticas	56
Tabela 3 –	Controle de Qualidade	78
Tabela 4 –	Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos para a produção de Produtos Cartográficos Digitais	80
Tabela 5 –	Características técnicas para posicionamento relativo estático	85
Tabela 6 –	Critério de Chauvenet	86
Tabela 7 –	Requisitos para Precisão do Teste ASPRS	92
Tabela 8 –	Informações da banda X e P do sistema InSAR	105
Tabela 9 –	Lista dos produtos e insumos cartográficos – Modelos Digitais ...	106
Tabela 10 –	Coordenadas planialtimétricas dos pontos teste em SIRGAS 2000 do município de Cabo de Santo Agostinho	130
Tabela 11 –	Pontos Planejados dentro da Área de Estudo	141
Tabela 12 –	Coordenadas planialtimétricas dos pontos teste (por fotogrametria) em SIRGAS2000	150
Tabela 13 –	Altitude Elipsoidal, altura Geoidal e altitude ortométrica obtida em campo e no MDT.....	156
Tabela 14 –	Análise em relação a PEC-84.....	156
Tabela 15 –	Coordenadas planialtimétricas dos pontos teste (por Radar-identificável) em SIRGAS2000 do município de Cabo de Santo Agostinho.....	157
Tabela 16 –	Coordenadas da ortoimagem e em campo com suas respectivas discrepâncias.	159
Tabela 17 –	Cálculo do PEC-84.....	160
Tabela 18 –	Altitude elipsoidal, ondulações geoidais, altitude ortométrica obtida em campo e no MDT	161
Tabela 19 –	Análise de cada Ponto PEC-84.....	161
Tabela 20 –	Coordenadas planialtimétricas dos pontos por Radar-identificável em SIRGAS2000 do município de Cabo de Santo Agostinho 01	162
Tabela 21 –	As coordenadas planimétricas nos eixos X e Y	163

Tabela 22 –	As coordenadas altimétricas MapGeo2010	164
Tabela 23 –	As coordenadas altimétricas MapGeo2015	165
Tabela 24 –	Valores encontrados no teste <i>Chauvenet</i>	166
Tabela 25 –	As coordenadas extraídas na Ortoimagem e MDT	167
Tabela 26 –	Coordenadas planimétricas obtidas na ortorectificação e em campo com suas respectivas discrepâncias	168
Tabela 27 –	Desvios-padrão obtidos pelas equações 8 e 9	168
Tabela 28 –	Erro Médio obtidos pelas Equações 5 e 6.....	169
Tabela 29 –	Coordenadas planimétricas obtidas na ortorectificação e em campo com suas respectivas discrepâncias teste NMAS	172
Tabela 30 –	Análise dos pontos de controle posicional planimétrico no eixo X de acordo com PEC-84 e PEC-PCD.....	172
Tabela 31 –	Análise dos pontos de controle posicional planimétrico no eixo Y de acordo com PEC-84 e PEC-PCD.....	173
Tabela 32 –	Coordenadas altimétricas obtidas na MDT e em campo com suas respectivas discrepâncias	175
Tabela 33 –	Desvios-Padrões obtidos pela equação 10	175
Tabela 34 –	Erro Médio obtidos pela Equação 7	177
Tabela 35 –	Coordenadas Altimétricas obtidas no MDT e em campo com suas respectivas discrepâncias teste NMAS	179
Tabela 36 –	Análise dos pontos de controle posicional altimétrico (MapGeo2010) de acordo com PEC-84 e PEC-PCD	180
Tabela 37 –	Análise dos pontos de controle posicional altimétrico (MapGeo2015) de acordo com PEC-84 e PEC-PCD	181

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAC	Agencia nacional de aviação civil
ANEA	Associação Nacional das Empresas de Aerolevantamentos –
ASPRS	Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
CDD	Dispositivo de Acoplamento de Cargas
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
CONCAR	Comissão Nacional de Cartografia
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico
EP	Erro-Padrão
ET – AQDG	Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespacial Vetorial
ET-CQDG	Especificação Técnica para o Controle de Qualidade dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais
ET-EDGV	Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais
ET-PCDG	Especificação Técnica de Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais
ET-RDG	Especificação para a Representação de Dados Geoespaciais
GEGEP	Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres
GNSS	Sistema de Navegação Global por Satélite
<i>HAND</i>	Altura acima da drenagem mais próxima
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Informações Geográficas
IMU	Unidade de medição inercial
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
InSAR	Sistema Radar Interferométrico de Abertura Sintética

IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	Organização Internacional para Padronização
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDS	Modelo Digital da Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
NMAS	Padrão Nacional de Precisão de Mapas
NSSDA	Padrão Nacional de Precisão de Dados Spatial
ONU)	Organização das Nações Unidas
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de exatidão cartográfica dos produtos cartográficos digitais
RADAR	Detecção e Variação de Rádio
RMR	Região Metropolitana de Recife
RPA	Aeronave remotamente pilotada
RTK	Posicionamento Cinemático em Tempo-Real
SAR	Synthetic Aperture Radar
SCN	Sistema Cartográfico Nacional
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGL	Sistema Geodésico Local
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLAR	Lateral de Abertura Real
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USGS	United States Geological Survey
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVO DA PESQUISA	29
1.1.1	Objetivo Geral	29
1.1.2	Objetivos Específicos	29
1.2	ESTRUTURA DA TESE	30
2	MAPEAMENTO PARA GEOTECNIA	31
2.1	CARTOGRAFIA NA ÁREA GEOTÉCNICA.....	31
2.2	MODELO DIGITAL DO TERRENO (MDT)	37
2.2.1	Carta de Declividade	38
2.2.2	Carta de Curvatura	40
2.2.3	Carta do Relevo Sombreado (<i>hillshade</i>)	42
2.2.4	Altura acima da drenagem mais próxima (<i>Height Above Nearest Drainage - Hand</i>)	44
2.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	45
3	AQUISIÇÃO DE DADOS	47
3.1	CÂMERAS AEROFOTOGRAMÉTRICAS	47
3.2	LASER, SISTEMA DE VARREDURA A LASER AEROTRANSPORTADO OU LIGHT DETECTION AND RANGING (LIDAR)	49
3.3	RADAR	51
3.3.1	Aquisição de Dados	52
3.3.2	Faixas	54
3.3.3	Radar de Abertura Sintética	58
3.3.4	Interações	62
3.3.5	Distorções	63
3.3.6	Interferometria	69

3.3.7	Comparação entre os Sensores Remotos Aerotransportados Radar X Fotogrametria.....	70
3.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	72
4	CONTROLE DE QUALIDADE POSICIONAL DOS DADOS GEOESPACIAIS	74
4.1	ÓRGÃOS QUE REGULAMENTAM AS NORMAS E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS RELACIONADAS DE DADOS GEOESPACIAIS	74
4.2	NORMAS E ESPECIFICAÇÕES EXISTENTES	76
4.2.1	Precisão de Exatidão Cartográfica (PEC) e Especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre (ET- ADGV-DefesaFT).....	78
4.2.2	Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET- ADGV).....	79
4.2.3	Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET- CQDG)	81
4.2.4	IBGE PR n° 05/1993 - Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS: versão preliminar e o planejamento de campo.....	83
4.2.5	IBGE RP n° 01/2005 - Sistema de Referência Brasileiro.....	83
4.2.6	Manual Técnico de Posicionamento (Georreferenciamento de Imóveis Rurais) produzido pelo INCRA	84
4.3	TESTE DE ELIMINAÇÃO DE PONTOS.....	85
4.4	TESTE DE VALIDAÇÃO POSICIONAL	86
4.4.1	Análise de Qualidade dos Pontos	87
4.4.2	Teste de Validação Posicional Planialtimétrica	87
4.4.2.1	Teste Engineering Map Accuracy Standard (EMAS)	88
4.4.2.2	Teste National Map Accuracy Standard (NMAP).....	91
4.4.2.3	Teste American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS).....	91
4.4.2.4	Teste National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)	92
4.4.2.5	United States Geological Survey (USGS)	94

4.5	AMOSTRA PARA AVALIAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS	94
4.5.1	Tipos de Amostras	95
4.5.2	Tamanho da Amostra.....	95
4.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	96
5	EXPERIMENTOS E ANÁLISES METODOLÓGICAS	99
5.1	SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	99
5.2	PROCEDIMENTOS PARA A ESCOLHA DOS PONTOS DE CONTROLE POSICIONAL PLANIALTIMÉTRICO NOS DADOS SAR	102
5.2.1	Dados SAR da Área de Estudo	103
5.2.1.1	Características do radar aerotransportado OrbiSAR-2	103
5.2.1.2	Insumos e produtos SAR	106
5.2.1.3	Definição dos dados SAR para a Validação Posicional Planialtimétrica	107
5.2.2	Interpretação e Análise dos dados gerados pelo o InSAR - Radar-Identificável	109
5.2.2.1	Região 01 (Grade G – 09/08)	110
5.2.2.2	Região 02 (Grade G – 09/09)	113
5.2.3	Reconhecimento de Campo das Feições Radar- Identificáveis	115
5.2.4	Radar-identificado.....	127
5.2.5	Teste realizado dentro da Área de Estudo	129
5.2.5.1	Fotogrametria.....	129
5.2.5.1.1	<i>Planejamento</i>	129
5.2.5.1.2	<i>Medições</i>	131
5.2.5.1.3	<i>Processamento</i>	132
5.2.5.1.4	<i>Validação Posicional Planialtimétrica</i>	133
5.2.5.2	Radar-identificável (Explosões de Pixels).....	133
5.2.5.2.1	<i>Planejamento</i>	133
5.2.5.2.2	<i>Medições</i>	134
5.2.5.2.3	<i>Processamento</i>	138

5.2.5.2.4	Validação Posicional Planialtimétrica	139
5.3	TAMANHO DA AMOSTRA DA ÁREA DE ESTUDO.....	139
5.3.1	Tamanho da Amostra de acordo com os Testes Estatísticos	139
5.4	DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE POSICIONAL PLANIALTIMÉTRICO	139
5.4.1	Planejamento.....	139
5.4.1.1	Seleção dos Pontos de Controle Posicional Plainialtimétrico	140
5.4.1.2	Escolha da base do Sistema Geodésico Brasileiro	141
5.4.1.3	Equipamentos	144
5.4.2	Aquisição dos Pontos de Controle Posicional Planialtimétrico - Medições.....	144
5.4.3	Processamento dos Pontos Adquiridos em Campo	147
5.4.4	Análise dos Pontos Adquiridos em Campo - Outlers	147
5.5	VALIDAÇÃO DA QUALIDADE POSICIONAL DOS PONTOS DE CONTROLE PLANIALTIMÉTRICO NOS INSUMOS ANALISADOS	148
5.5.1	Validação Posicional Planimétrica.....	148
5.5.2	Validação Posicional Altimétrica	149
5.6	PRODUTOS CARTOGRÁFICOS CONFECCIONADOS PARA GEOTECNIA..	149
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	150
6.1	OS TESTES DOS PONTOS DE CONTROLE POSICIONAL	150
6.1.1	Por fotogrametria	150
6.1.2	Por Radar-identificável.....	157
6.2	COORDENADAS PLANIALTIMÉTRICAS DEFINIDAS DA ÁREA DE ESTUDO	161
6.3	VALIDAÇÃO POSICIONAL DOS PONTOS DE CONTROLE POR FEIÇÕES RADAR-IDENTIFICÁVEL	167
6.3.1	Validação Planimétrica - Ortoimagens.....	168
6.3.1.1	Testes da Normatização Brasileira - Planimetria	168
6.3.1.2	Engineering Map Accuracy Standard (EMAS)	169

6.3.1.3	National Map Accuracy Standard (NMAS)	171
6.3.1.4	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)	173
6.3.1.5	National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)	174
6.3.2	Validação Altimétrica - MDT	174
6.3.2.1	Testes da Normatização Brasileira- Altimetria	175
6.3.2.2	Engineering Map Accuracy Standard (EMAS)	176
6.3.2.3	National Map Accuracy Standard (NMAS)	178
6.3.2.4	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)	181
6.3.2.5	National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)	182
6.3.2.6	United States Geological Survey (USGS)	182
6.4	PRODUTOS GERADOS DO MDT	183
6.4.1	Mapa de declividade.....	185
6.4.2	Relevo Sombreado (<i>hillshade</i>)	186
6.4.3	Curvas de Níveis	187
6.4.4	Mapa da curvatura.....	189
6.4.5	Height Above Nearest Drainage (Hand).....	190
6.4.6	Produtos Confeccionados com dados SAR.....	191
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	197
	REFERÊNCIAS.....	200

1 INTRODUÇÃO

Em 2014 foi iniciado um projeto de elaboração de cartas geotécnicas no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), essas cartas foram produzidas mais especificamente pelo grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP) em parceria com o Ministério das Cidades, objetivando a elaboração de bases cartográficas, na escala de 1:10.000, para os municípios de Abreu e Lima, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes. Todos esses municípios possuem em comum uma grande incidência de deslizamento em encostas ocupadas, contribuindo para que muitas dessas áreas sejam identificadas como potenciais áreas de risco.

O projeto supracitado teria um prazo inicial de dois anos para ser realizado e geraria vários produtos, tais como: mapa de curvatura, relevo sombreado, declividade, drenagem, curvatura, suscetibilidade a movimentos gravitacionais, entre outros produtos. Entretanto, diante do baixo orçamento e do tempo bastante curto para a criação de uma base cartográfica na escala de 1:10.000 para os municípios selecionados, era necessário adotar um método de aquisição de dados eficiente e robusto que atendesse todos os requisitos desse projeto.

Ao analisar o sistema radar de aquisição de dados na superfície terrestre para a utilização no projeto citado observou-se as seguintes vantagens: é economicamente viável devido as suas características (capacidades) de enxergar através de nuvens, podendo ser utilizado em qualquer hora do dia e em quaisquer condições climáticas; pode ser utilizado em áreas com vegetação, pois seu sinal atravessa toda a vegetação (folhagens, troncos, etc); e fornece os seguintes conjuntos de dados SAR: Ortoimagens na banda P e X, Ortoimagem colorida, Modelo Digital da Superfície (MDS), e Modelo Digital do Terreno (MDT).

Durante as pesquisas realizadas para a concepção do projeto, foi constatado que uma empresa, contratada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), havia mapeado os municípios beneficiados pelo projeto utilizando a tecnologia *Radio Detection And Ranging* (RADAR) em conjunto com um Sistema de Radar Interferométrico de Abertura Sintética (InSAR), visando adquirir informações com um alto nível de detalhamento, que permitissem a elaboração de produtos numa escala de 1:25.000. Foram realizadas tentativas de contato com a empresa Bradar, buscando verificar a possibilidade de a mesma fornecer os dados gerados através do InSAR numa escala de 1:10.000. A empresa contatada certificou que poderia fornecer os dados SAR reprocessados na escala requerida. O desafio, então, tornou-se a garantia que esses dados gerados para uma escala de 1:25.000 atendessem a precisão de uma escala de 1:10.000 e o padrão de exatidão cartográfica do mesmo.

Os dados SAR são bastante utilizados em diversas áreas de estudos. Nesta tese esses dados serão utilizados na confecção da base cartográfica que a partir dela serão gerados produtos na área de Geotecnia. A Geotecnia utiliza a base cartográfica que é gerada a partir de informações da ortoimagem e o MDT, para a confecção de seus mapas temáticos, por exemplo, mapas de declividade, curvatura, *Height Above Nearest Drainage* – Hand (em port. Altura acima da drenagem mais próxima), relevos sombreados, entre outros.

Esses mapas temáticos citados anteriormente são bastante utilizados para consulta e interpretação das informações em Geotecnia, como também para confecção de outros mapas temáticos, por exemplo, mapa de suscetibilidade a deslizamento e inundações, sendo que necessitam da base cartográfica. Esse mapa citado permite identificar quais as áreas poderão ser afetadas caso ocorram um desastre. Devido a isso, é necessário que a base cartográfica tenha qualidade posicional conhecida e esteja atualizada, para que na etapa do planejamento da confecção dos mapas temáticos que serão utilizados na Geotecnia permita que sejam posicionadas as análises de acordo com cada temática abordada do mapa de maneira correta e sabendo os possíveis erros que poderão encontrar na base cartográfica utilizada, por exemplo, no mapa de suscetibilidade a deslizamento e inundações, que as áreas que possam ocorrer desastres sejam posicionadas de maneira correta e sabendo os possíveis erros que podem ocorrer devido à qualidade da base cartográfica utilizada na confecção do mesmo.

As normativas ou especificações técnicas existentes, sejam internacionais ou nacionais, têm tratado da qualidade dos produtos cartográficos e seus insumos de forma generalizada. É importante destacar que normas, resoluções e especificações são necessárias para serem seguidas por entidades públicas e privadas e usuários de produtos cartográficos (Servigne et al., 2006; Ariza-Lópes, 2011; Silva, 2014; ELIAS et al., 2018). As normas internacionais estudam e desenvolvem métodos avaliativos a serem aplicados em relação à qualidade dos dados espaciais (BRAVO, 2015). A acurácia posicional é um dos elementos presente no controle de qualidade, sendo este parâmetro o mais estudado e avaliado (ARIZA, 2002; NOGUEIRA, 2003; SANTOS, 2010). Qualquer material cartográfico, deve ter prévio reconhecimento de sua acurácia para garantir a qualidade desejada do produto (BURITY, 1999).

No Brasil, os insumos e produtos cartográficos são validados posicionalmente de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC-84 que foi criado pelo decreto nº 89.817/1984 e o PEC-PCD que foi criada pela Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespacial Vetorial (ET – AQDG) em /2015.

A primeira norma brasileira em relação à classificação posicional dos insumos e produtos cartográficos adquiridos em meio analógico foi lançada pelo decreto nº 89.817/1984. Esta norma utiliza o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC-84). Com o desenvolvimento das tecnologias nos últimos anos de diversos produtos em meio digital, autores tais como Dalmolin e Leal, 2001, comentam que a PEC-84 necessitava se atualizar para esses insumos e produtos novos que surgiram no mercado. Assim, a Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) criou a Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespacial Vetorial (ET – AQDG/2015) que trata do Produto Cartográfico Digital (PCD).

A ET-AQDG apresenta valores do padrão de exatidão cartográfica dos produtos cartográficos digitais (PEC-PCD) que representam a acurácia posicional e a classificação da amostra analisada. A acurácia posicional é um dos elementos presentes no controle de qualidade posicional apresentado na Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), sendo grandemente estudada e avaliada por Ariza (2002); Pereira & Nero (2015); Maranhão (2013). Para qualquer material cartográfico, recomenda-se o prévio reconhecimento de sua acurácia para garantir a qualidade desejada do produto (Burity, 1999). Goodchild and Glennon (2010) afirmam que é importante que o controle de qualidade seja investigado para garantir seu padrão, acurácia, omissões e incertezas, entre outros. De acordo com Gemael (1994), a presença de erros – que podem ser causados por falhas humanas, imperfeições de equipamentos e influência do meio ambiente [...] - é inevitável e, por esta razão, é necessário abdicar de obter o valor verdadeiro de uma grandeza. Segundo o autor, os erros são classificados como: grosseiros, gerados pela desatenção do operador; sistemáticos, que são advindos de causas conhecidas e podem ser evitados, utilizando técnicas especiais; e aleatórios, provenientes de causas desconhecidas e que permanecem nas observações. Deste modo, no intuito de saber a precisão dos dados geográficos, é necessária a aplicação de testes estatísticos que atentem quanto à confiabilidade das informações.

Os testes estatísticos possibilitam avaliar a qualidade posicional dos insumos cartográficos e são bastante utilizados como mostram os trabalhos de Maranhão (2013); Pereira e Nero (2015); Milagros, 2018; Farias et al. (2018); Arcanjo e Anjos (2019), sendo necessário realizá-los comparando uma fonte de maior precisão como mostra os autores (Galo & Camargo, 1994; Maranhão, 2013).

Dentro desse contexto, iniciaram-se as pesquisas sobre essas tecnologias com objetivo de entender as suas características para, assim, sanar dúvidas e realizar a validação posicional planialtimétrica dos insumos e produtos cartográficos (dados SAR) oriundos delas, visando

aplicar seus resultados na elaboração de produtos com viés geológico-geotécnico. Durante as análises constatou-se que vários problemas para a validação posicional planialtimétrica, tais como, as ortoimagens geradas pelo radar são na escala do cinza. Foram identificados vários pontos com explosões de pixels, tornando quase impossível enxergar e identificar os elementos fotografados, devido às distorções em formas geométricas nas edificações, vias.

Apesar de vários processos de aperfeiçoamentos, o sistema apresenta desvantagem em relação a extrair as informações. Jakob et al., 1987 comenta que nas áreas urbanas as assinaturas apresentam respostas semelhantes às do refletor de canto diédrico [...] Já em área de oceanos apresentam baixos coeficientes de variação, tornando o retorno altamente polarizado, gerando efeitos de polarização que podem ser utilizados para suprir ou melhorar o retorno no oceano [...] Nos parques ou em áreas que apresente vegetação o coeficiente é variado, isso demonstra que existem elementos ou componentes que têm polarizações aleatórias.

Sem procedimentos adequados para realizar a validação posicional planimétrica dos dados SAR que leve em consideração as características específicas do radar, os usuários se sentem inseguros devido à falta de normativas ou diretrizes, causando receio aos usuários na utilização do InSAR. Assim, como parte do projeto citado anteriormente, foi desenvolvida uma pesquisa de Tese, com a proposta de descobrir alvos pré-existentes na cena de estudo que poderiam ser utilizados como ponto de controle posicional na validação dos dados gerados pelo sistema InSAR, visando aplicar seus resultados na elaboração da base cartográfica para a confecção de produtos a serem empregados na área de geotecnia. A pesquisa citada levou em consideração as características de reflexão e das distorções geométricas causadas pela visada lateral do radar para propor a escolha de alvos existentes na cena e identificáveis na imagem que possam ser utilizados como pontos de controle no município do Cabo Santo Agostinho, que até o momento da pesquisa não dispõe de dados do Radar de abertura sintética (ingl. *Synthetic Aperture Radar* (SAR)) validados para esta escala de aquisição. Durante a pesquisa citada foram encontradas dificuldades/desvantagens para a escolha de feições que fossem identificadas na ortoimagem e em campo em relação à planimetria dos pontos. Estas ortoimagens que estavam na escala cinza, apresentavam distorções radiométrica e geométrica, e também vários pontos com explosões de pixels dentro da área de estudo, tornando quase impossível ver e identificar os elementos contidos nelas.

Esses pontos citados foram utilizados no conjunto de dados: a Ortoimagem, gerada a partir da banda X; e o Modelo Digital do Terreno (MDT), gerado a partir da banda P, ambos pela empresa fornecedora dos produtos, adquiridos pelo Sistema aerotransportado OrbiSAR

da Embraer em 2014 na região de Cabo de Santo Agostinho – PE, Brasil. Assim, para validar esse conjunto de dados, foram utilizados os pontos escolhidos como pontos de controle posicional planialtimétrico, aplicando-se os testes NMAS, ASPRS e NSSDA nos eixos X, Y e Z. Essa validação comprovou que a escolha desses pontos de controle apresentou bons resultados e que os testes utilizados são adequados para referida análise.

1.1 OBJETIVO DA PESQUISA

Este subitem apresenta o objetivo geral e os específicos desta Tese.

1.1.1 Objetivo Geral

Definir critérios para escolha dos pontos de controle posicional planialtimétrico que sejam alvos existentes na cena e identificáveis na ortoimagem SAR a partir do estudo das características de reflexão e das distorções geométricas causadas pela visada lateral do radar para possibilitar a validação dos insumos a serem utilizados para a geração dos produtos da Geotecnica com qualidade posicional conhecida.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar as principais características das técnicas existentes de aquisição de dados para mapeamento InSAR com a finalidade de compreender e definir uma proposta sobre quais os tipos de feições poderiam ser utilizados como pontos de controle posicional planialtimétrico;
- b) Definir uma proposta sobre os pontos de controle posicional planialtimétrico para a validação dos insumos SAR;
- c) Analisar tamanhos de amostra dos pontos de controle;
- d) Comparar os testes de validação posicional planialtimétrica da amostra analisada;
- e) Validar os pontos de controle posicional planialtimétrico através de testes estatísticos;
- f) Utilizar as normatizações brasileiras em relação ao padrão de exatidão cartográfica e os padrões de precisão de cada teste aplicado;
- g) Aplicar teste de validação posicional planialtimétrica nos pontos de controle posicional;

- h) Gerar produtos cartográficos para a geotecnia com qualidade posicional como: mapa de declividade, relevo sombreado e curvatura.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está dividida em seis (6) capítulos: 1. Introdução; 2. Mapeamento para Geotecnia; 3. Aquisição de dados; 4. Controle de qualidade posicional dos dados geoespaciais; 5. Experimentos e Análises metodológicas; 6. Resultados e discussões, finalizando-se com o capítulo 7. Conclusões e Recomendações.

O primeiro capítulo apresenta na introdução um contexto geral e a importância desta Tese em relação à validação posicional planialtimétrica nos dados SAR, assim como a formulação do problema e a hipótese da pesquisa. Além disso, são descritos o objetivo geral e específicos, e finalizando-se com a estruturação do trabalho.

No segundo capítulo aborda-se o mapeamento para Geotecnia, mostrando os insumos utilizados para confecção da base cartográfica, assim como os testes utilizados para a validação posicional planialtimétrica dos pontos de controle utilizados nesta Tese.

E no terceiro capítulo serão apresentados os conceitos relacionados aos métodos de aquisição de dados na superfície terrestre.

No quarto capítulo é apresentado o controle de qualidade posicional dos dados geoespaciais. Assim como as normatizações vigentes no Brasil.

No quinto capítulo serão descritos os procedimentos metodológicos necessários para a realização da validação posicional planialtimétrica dos pontos de referência utilizados na Tese, assim como os respectivos processamentos e análises dos resultados.

No sexto capítulo apresenta-se os resultados e discussões de acordo com o que se encontrou na Tese.

Finalizando-se com o sétimo capítulo apresentando as conclusões e recomendações para futuros trabalhos.

2 MAPEAMENTO PARA GEOTECNIA

A busca por produtos cartográficos com informações sobre o comportamento da superfície de Terra é de grande interesse da Geotecnia. Este é um ramo da engenharia civil que estuda o comportamento geomecânico dos materiais envolvidos numa determinada área de estudo. Por isso, é importante o conhecimento da forma da superfície terrestre, possibilitando entender os processos que ocorrem sobre sua paisagem. A complexidade do esquema taxonômico em relação à forma do relevo incluindo provenientes de fatores endógenos (internos) e exógenos (externos), composição e função. Esses fatores são difíceis para o mapeamento e para decidir qual o método automatizado deve ser utilizado. A forma do relevo influencia o fluxo de água, poluentes, transporte de sedimentos e também distribuição de habitats (vegetais e animais) (BLASZCZYNSKI, 1997). Por isso é tão complexa a elaboração de documentos cartográficos que são utilizados na geotecnia, isto porque envolve diferentes áreas de atuação, tais como: cartografia, topografia, geologia, geomorfologia, hidrologia, entre outras.

A seguir será apresentada a Cartografia aplicada na área de Geotecnia e Modelo Digital do Terreno (MDT), que foi utilizado na geração da Carta de Declividade, Carta de Curvatura, Carta de Relevo Sombreado e Height Above Nearest Drainage *-Hand* (em port. Altura acima da drenagem mais próxima).

2.1 CARTOGRAFIA NA ÁREA GEOTÉCNICA

A cartografia é utilizada como ferramenta básica para a implantação dos dados de outras ciências ou atividades que necessitem informações sobre a superfície terrestre. A mesma contribui para diagnósticos e prognósticos das características encontradas no local de estudo. De acordo com IBGE (1998) o reconhecimento da importância da Cartografia foi obtido em 1949 pela Organização das Nações Unidas (ONU) e lavrada em Atas e Anais: "CARTOGRAFIA - no sentido lato da palavra não é apenas uma das ferramentas básicas do desenvolvimento econômico, mas é a primeira ferramenta a ser usada antes que outras ferramentas possam ser postas em trabalho".

Em 1970 se iniciou os primeiros trabalhos no Brasil envolvendo Cartografia e Geotecnia, devido ao surgimento de grandes obras de infraestrutura (Zuquette e Nakazawa,

1998; Canil et al., 2018). Essas obras possibilitaram o desenvolvimento da Cartografia Geotécnica que acontece até hoje.

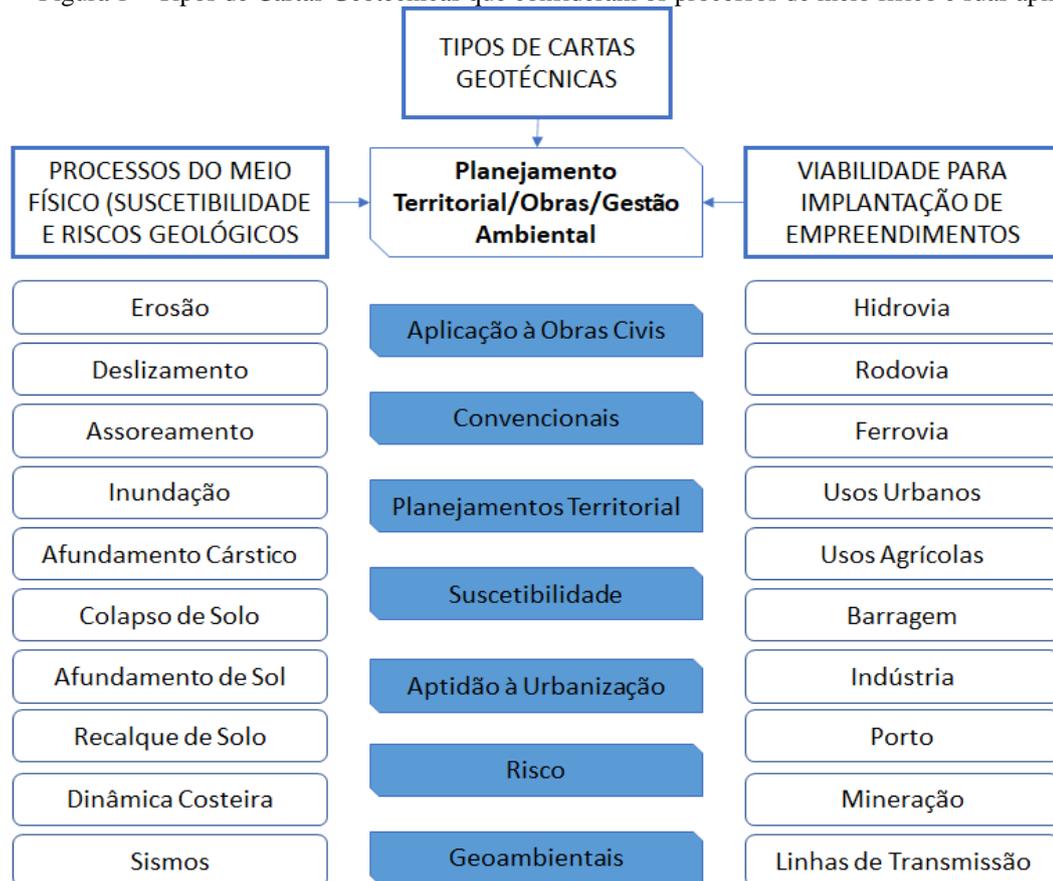
O termo Cartografia Geotécnica e Geoambiental é definido por Canil *et al.* (2018) como: “É comumente utilizado para designar, de forma genérica, a representação, em mapas, das características do meio físico e os diferentes comportamentos dos terrenos de acordo com os tipos de ocupação e uso do solo”.

Na Cartografia geotécnica, o termo Mapa é utilizado em documento que registra as informações (atributos) adquiridas de um determinado aspecto no meio físico em análise e a Carta é utilizada em documento topográfico que ilustra as informações contidas no mapa, adequadamente interpretadas e com finalidade específica (Canil et al., 2018; Zuquette, 1993). Quanto ao uso, o Mapa é utilizado para registrar dados obtidos em um determinado aspecto do ambiente, sem interpretações e Carta representa informações para serem interpretadas e associadas aos dados contidos no Mapa (Zuquette e Gandolfi, 2004). Sendo assim, a cartografia Geotécnica de acordo com Canil et al. (2018) utiliza as cartas Geotécnicas no Planejamento Territorial, Obras e Gestão Ambiental, incluindo os processos do meio físico (susceptibilidade e riscos geológicos) e os processos tecnológicos. Assim, o mesmo autor apresenta sete (7) tipos principais de finalidades que são utilizadas nas cartas:

- a) aplicação em obras de engenharia civil;
- b) convencionais;
- c) de planejamento territorial;
- d) de aptidão à urbanização;
- e) de risco;
- f) geoambiental; e
- g) de susceptibilidade.

Estes sete (7) tipos de finalidades utilizadas nas cartas geotécnicas, levando em consideração os processos no meio físico e suas aplicações, podem ser observados na Figura 1 a seguir:

Figura 1 – Tipos de Cartas Geotécnicas que consideram os processos de meio físico e suas aplicações



Fonte: Canil et al. (2018).

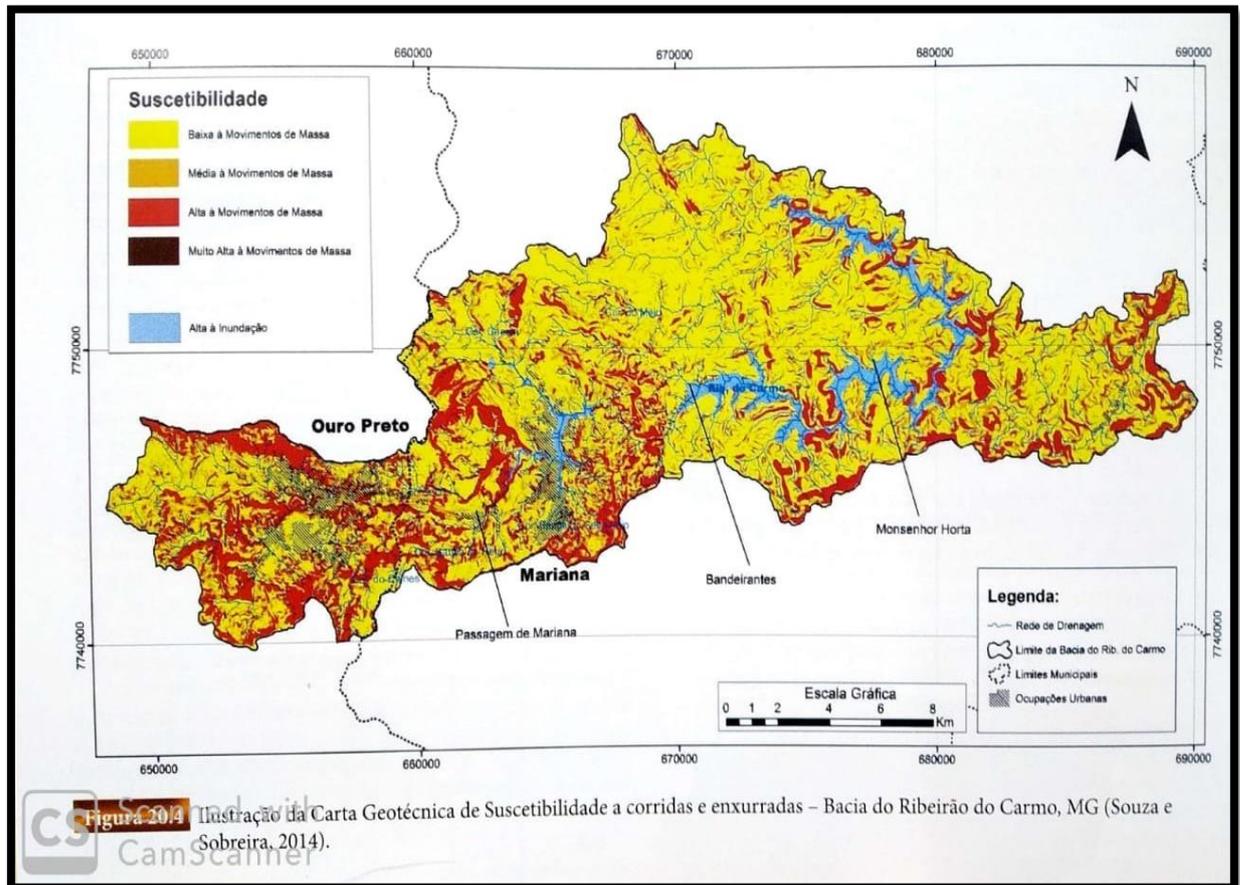
Entre as sete (7) principais finalidades citadas, a Carta Geotécnica de Suscetibilidade (Figura 2) tem sido bastante discutida nos últimos anos de acordo com Canil (2018) devido ao surgimento da Lei Federal nº 12.608/12 (Brasil, 2012) que enfoca os processos hidrológicos e geológicos. O termo suscetibilidade é quando o terreno estudado proporciona predisposição ou propensão ao desenvolvimento de um fenômeno natural ou processo do meio físico deflagrado por agentes externos e internos, tais como chuvas intensas e terremotos (FELL et al., 2008; DINIZ, 2012; COUTINHO, 2012; BITAR, 2014, CANIL ET AL., 2018).

Canil et al. (2018) apresenta os procedimentos gerais de elaboração da Carta Geotécnica de Suscetibilidade, recomendados por Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) para a execução e apresentação de resultados sobre áreas mapeadas que são susceptíveis a deslizamentos, inundação/alagamento, corrida de massa e enxurradas, que são os seguintes:

- compilação bibliográfica de mapas temáticos e estrutura da Base de Dados;
- análise, classificação e zoneamento das suscetibilidades;
- fotointerpretação de feições associadas aos processos analisados;

- d) composição do pré-mapa de áreas suscetíveis;
- e) verificação e validação do pré-mapa em campo; e
- f) revisão do pré-mapa e consolidação da carta síntese (carta de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações e da base de dados correspondentes).

Figura 2 – Ilustração de carta geotécnica de suscetibilidade a corrida e enxurrada



Fonte: Souza; Sobreira (2014).

A etapa de análise, classificação e zoneamento das suscetibilidades integram métodos estatísticos (Canil et al., 2018; Stabile et al. 2013) e também dados espaciais referentes a fatores presentes em relação às naturezas geomorfológica (declividade), geológica (densidade de lineamentos estruturais, abordando as fraturas, juntas, zonas descontinuidades), e hidrológica (curvatura de encosta) (Canil et al., 2018). Assim, o autor comenta que, de acordo com os resultados obtidos, os termos de suscetibilidade são classificados em classes baixa, média e alta e também o perfil do zoneamento do processo analisado.

A inundações e alagamentos são marcados pela elevação gradual do nível d'água de rios e córregos, também pela acumulação de água devido às deficiências e/ou insuficiências do sistema de drenagem dos terrenos em estudo, considerando dois fatores que são: o regional e

o local. O regional analisa os parâmetros das bacias de drenagem contribuintes; e o local, a delimitação de áreas suscetíveis por meio de modelo específico de análise, denominado *Hand*. O *Hand* avalia a morfologia do terreno e sua posição em relação ao curso d'água (Rennó et al. 2008).

Para a análise dos fatores de suscetibilidade, existem diversas metodologias, sendo uma delas desenvolvida pelo GEGEP / UFPE, pois a mesma vem sendo melhorada ano a ano com os aprimoramentos de Teses e Dissertações defendidas neste grupo. Essa análise, de acordo com Silva (2016), foi dividida em: geotecnia, geologia, geomorfologia, pedologia, e uso e ocupação do solo, com objetivo de uma avaliação mais profunda abordando as características da área estudada com mais detalhes. Ainda a mesma autora aborda três (3) indicadores: Geologia-geotecnia, Geomorfologia, e Uso e ocupação como apresentados no Quadro 01.

Quadro 1 – Indicadores e subindicadores para a avaliação da Suscetibilidade

Indicadores	Sub-indicadores
Geologia-geotecnia	Formação geológica
	Fácies
	Feição estrutural
	Estrutura do perfil
	Textura
	Pedologia
	Surgência de água
	Evidências de movimento
Geomorfologia	Relevo
	Topografia da encosta
	Topografia do talude
	Perfil da encosta
	Classe de curvatura
	Características do escoamento
Uso e ocupação	Cobertura superficial
	Tratamentos existentes
	Categoria de ocupação
	Fatores antrópicos

Fonte: Coutinho (2015).

O indicador geológico-geotécnico é composto pela união das características geológicas, geotécnicas, pedológicas e evidências de movimentos de massa nos setores

estudados, onde cada informação do indicador e sub-indicadores são coletadas em campo pelas equipes especializadas de cada área no grupo Gegep.

O indicador geológico-geotécnico passa por duas etapas: a primeira são as visitas de campo pela equipe responsável, observando e descrevendo o tipo do relevo e as classificações da curvatura da encosta (horizontal e vertical); e a segunda, pela união das informações com as características morfométricas (altura, extensão, declividade e curvatura), permitindo o entendimento sobre os aspectos morfológicos da topografia, da drenagem e da dinâmica evolutiva da paisagem. E o último indicador de uso e ocupação do solo é obtido por observações da maneira de ocupação da área, estágio de evolução, qualidades da vegetação local, infraestrutura e as obras de intervenção disponíveis.

Todos esses indicadores e subindicadores são importantes principalmente nos municípios que pertencem à Região Metropolitana de Recife (RMR). Duarte (2015) comenta que as dinâmicas da RMR são diferentes das regiões do Sul e Sudeste do Brasil, onde os principais motivos de escorregamentos (deslizamentos) são ocasionados pela degradação ambiental, por exemplo, a remoção da vegetação natural com objetivo de plantio da cana de açúcar, cortes para implantação de rodovias e também para ocupação desordenada das áreas dos morros. Em Alheiros (1998); LIMA (2002); Carvalho e Galvão (2006); PFALTZGRAFF (2007); Azevedo e Araújo (2012) dizem que a falta de infraestrutura devido às condições sociais e econômicas da população causam deslizamentos no Brasil e principalmente na RMR. Lembrando que os deslizamentos podem ser influenciados pelas ações antrópicas (homens) como também processos naturais que foram condicionados a evolução do relevo durante anos (FERNANDES et al., 2001). Por isso, é necessário planejar e inserir suas informações na base cartográfica atualizada.

Na base cartográfica são acrescentadas as informações da geologia, pedologia, geomorfologia, hidrografia e geotecnia, para a confecção de mapas temáticos (os mapas se tornam temáticos quando são atribuídas características específicas de estudo). Essas informações são posicionadas nos mapas para análises e tomadas de decisões sobre essas informações acrescentadas. Devido a isso, a base cartográfica necessita que seu posicionamento esteja de acordo com normatização, tal como o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). É necessário utilizar os documentos cartográficos numa escala e precisão desejada de acordo com cada mapa e/ou projeto envolvido.

Isso mostra a necessidade de gerar uma base cartográfica com controle de qualidade para um melhor reconhecimento, posicionamento, análise e detalhamento do mapa e/ou projeto que serão elaborados dentro da Geotecnia. Sendo assim, é necessário conhecer as

formas, estruturação e composição da superfície terrestre para um correto planejamento e assim, bases cartográficas elaboradas com qualidade posicional conhecida podem ser utilizadas nas engenharias e outras áreas que precisem de tais informações para produzir os produtos desejados. A base cartográfica elaborada com descrições de cada projeto possibilita estudar implicações que podem ocorrer na superfície de estudo a curto, médio e longo prazo.

2.2 MODELO DIGITAL DO TERRENO (MDT)

A procura por dados que representem a forma do terreno vem crescendo nos últimos anos no Brasil. Esses dados são adquiridos por diversos métodos de aquisição, tais como: interpolação de dados vetoriais, obtidos via cartas topográficas ou aerolevanteamento; plataformas orbitais equipadas com sensores ópticos ou de radar; sensores Light Detection and Ranging (LIDAR); estação total; receptores de sinais Global Navigation Satellite System (GNSS); e Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) (RODRIGUES, 2016). Após a aquisição são processados, interpolados, analisados e assim construídos os modelos digitais do Terreno (MDT) ou Superfície (MDS).

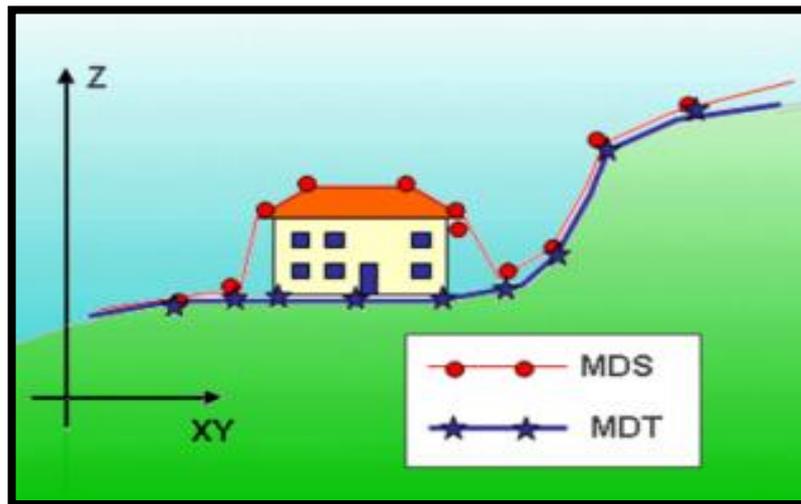
A ET-PCDG (2016) descreve MDT e MDS como:

Modelo Digital do Terreno (MDT) É um produto cartográfico obtido a partir de um modelo digital que representa o solo exposto, de forma contínua e suavizada, a partir de dados adequadamente estruturados e amostrados da superfície física da Terra.

Modelo Digital da Superfície (MDS) É um produto cartográfico obtido a partir de um modelo digital que representa o solo exposto e os acidentes encontrados acima do solo (edificações, pontes, corte e aterro do terreno, vegetação, etc), de forma contínua e suavizada, a partir de dados adequadamente estruturados e amostrados do mundo real.

A Figura 3 representa de maneira resumida a diferença entre MDS que representa tudo que estiver acima do solo, tais como: casas, edifícios, árvores, entre outros objetos e o Modelo Digital do Terreno (MDT) que trabalha com pontos sobre a superfície terrestre sem qualquer obstáculo em cima.

Figura 3 – Representação do MDT e MDS



Fonte: Rosa (2016).

Para a correta representação do terreno são levantados pontos sobre a superfície terrestre, estes pontos são:

- a) os terrenos altos, baixos ou que marcam as mudanças na declividade;
- b) linhas naturais do terreno: crista, talvegues, vales, rios, entre outros;
- c) linhas construídas, por exemplo edificações, estradas, pistas, ruas, entre outros;
- d) áreas Planas construídas ou existentes, tais como: campo de futebol, lagos e etc.

O MDT é bastante utilizado na confecção de Mapas Temáticos na área de Geotecnia, tais como, declividade, relevo sombreado, curvatura, Hand, suscetibilidade, curvatura de vertente ou, além disso, outras variáveis morfométricas essenciais à análise da suscetibilidade, risco e cartas geotécnicas.

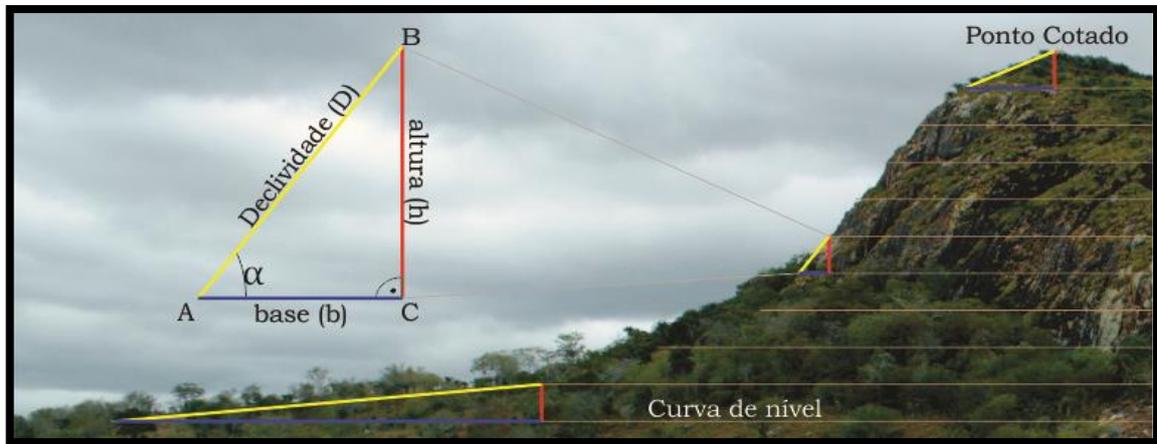
2.2.1 Carta de Declividade

A declividade é a inclinação do terreno em relação ao eixo horizontal, variando de 0° a 90° ou expresso em porcentagem (Amaral et al., 2019). Esta é definida pelo IBGE (1999) pela relação entre a diferença de altitude (ou altura) entre dois pontos localizados no terreno e a distância horizontal (ou base) entre esses pontos, como ilustrado na Figura 4. O cálculo de declividade é o diferencial altimétrico entre vizinhos, dependendo da distância considerada (Valeriano, 2008).

A declividade está associada ao processo de transporte gravitacional (escoamento, erosão, deslizamento). Sendo bastante utilizado no planejamento territorial na segmentação de

áreas (VALERIANO, 2008), considerando que os métodos de avaliação de terras ou planejamento são baseados em modelagem numérica ou decisões lógicas que trabalham com a variável declividade.

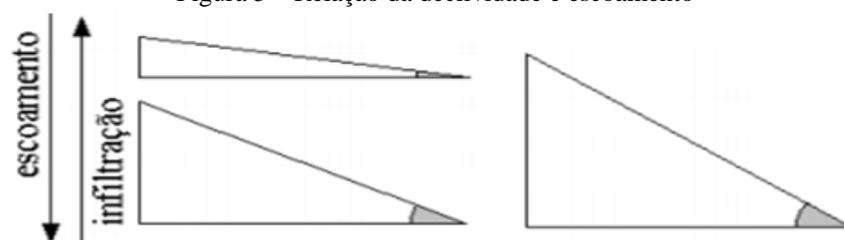
Figura 4 – Declividade do Terreno



Fonte: Santos *et al.* (2017).

Duarte (2015) aborda declividade como uma das principais variáveis morfométricas, sendo utilizadas na análise modelagem de instabilidade de encostas, podendo causar distorções na análise dos movimentos de massa em muitos casos. Bastos (1999) comenta que quanto maior a declividade maior será a velocidade de deslocamento do material (sólidos e líquidos) como ilustra a Figura 5. Assim quanto maior o ângulo da encosta, menor o fator de segurança (FERNANDES; AMARAL, 2010).

Figura 5 – Relação da declividade e escoamento

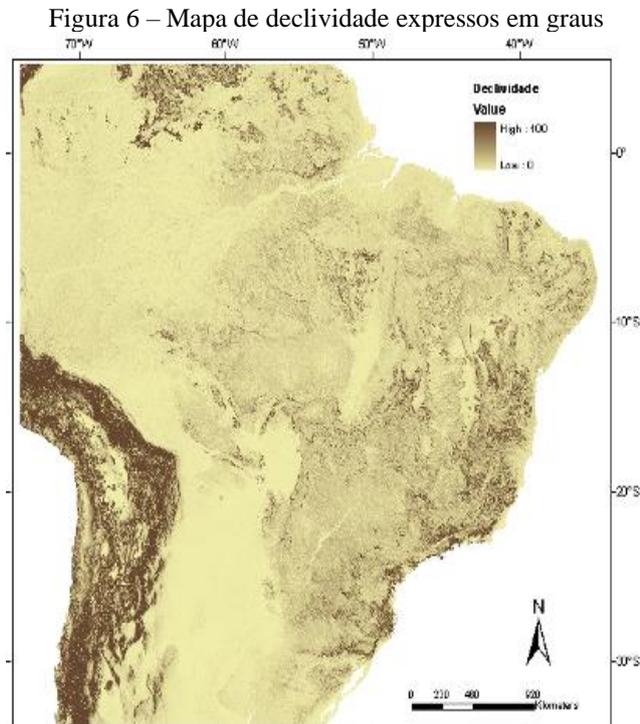


Fonte: Valeriano (2008).

A declividade pode ser obtida por medida direta e indiretamente. Valeriano (2008) comenta do clinômetro que é um equipamento que obtém diretamente a declividade em campo, utilizando visada entre dois pontos que estão no mesmo alinhamento na mesma orientação da vertente local. O mesmo autor aborda os mapas topográficos que possibilita a obtenção da declividade através da estimativa da distância entre as curvas de nível de cada área analisada. O MDE é obtido pela análise dos desníveis entre os *pixels* vizinhos, ambas são obtidos indiretamente. Ainda o autor apresenta as funções do Sistema de Informação

Geográfica (SIG) para a estimação da declividade, que são: slope; slope angle; gradiente; steepness e directional derivatives. Estas funções apresentam as metodologias para seu cálculo.

A Figura 6 apresenta o mapa de declividade gerado a partir da grade de altitude, e os valores estão expressos em graus.



Fonte: Amaral (2019).

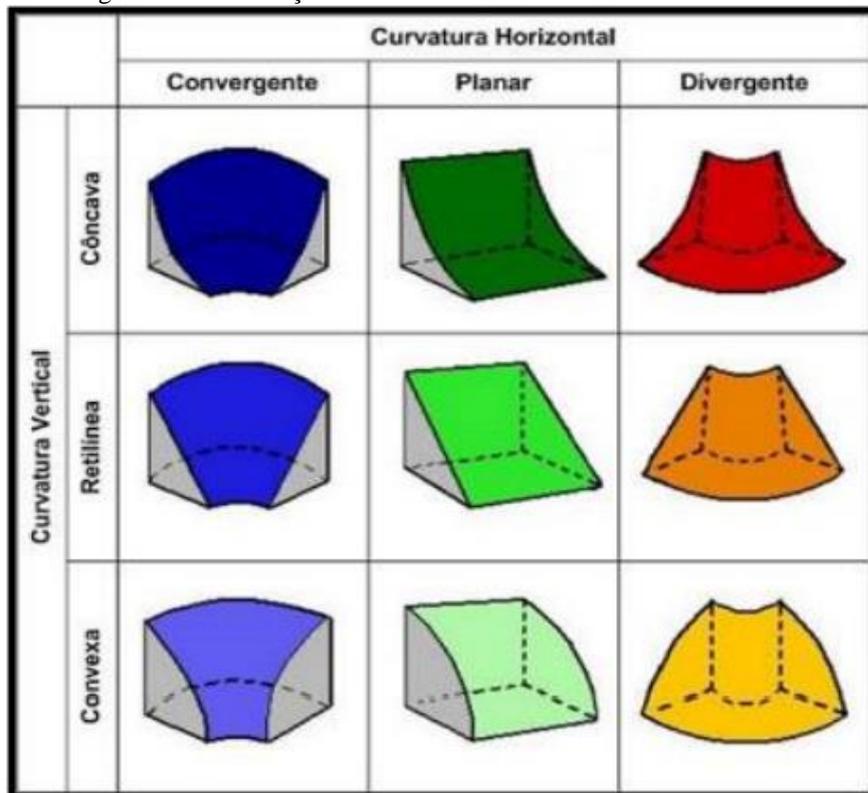
2.2.2 Carta de Curvatura

A curvatura no plano é calculada pela taxa de variação da declividade em relação ao ortogonal a orientação da vertente, podendo ser divergente ou convergente do terreno. A curvatura do perfil é calculada utilizando a taxa de variação da declividade na direção da sua orientação, podendo ser classificada em convexo ou côncavo do terreno. Essa é decisiva na aceleração ou desaceleração em relação ao fluxo de água sobre o terreno (Dos Anjos et.al, 2011).

As vertentes classificadas em relação ao perfil consideram o valor da curvatura: para vertentes retilíneas, o valor da curvatura é nulo (muito raro), vertentes côncavas, são positivas; e convexas, valores negativos (VALERIANO, 2003). A Figura 7 apresenta as combinações das classes de curvaturas mostrando curvatura vertical, que expressa na direção da declividade; e a curvatura horizontal, que expressa ao longo da curva de nível. Assim as

combinações das classes de curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e verticais (côncavo, retilíneo ou convexo) fornece a forma do terreno (VALERIANO, 2003).

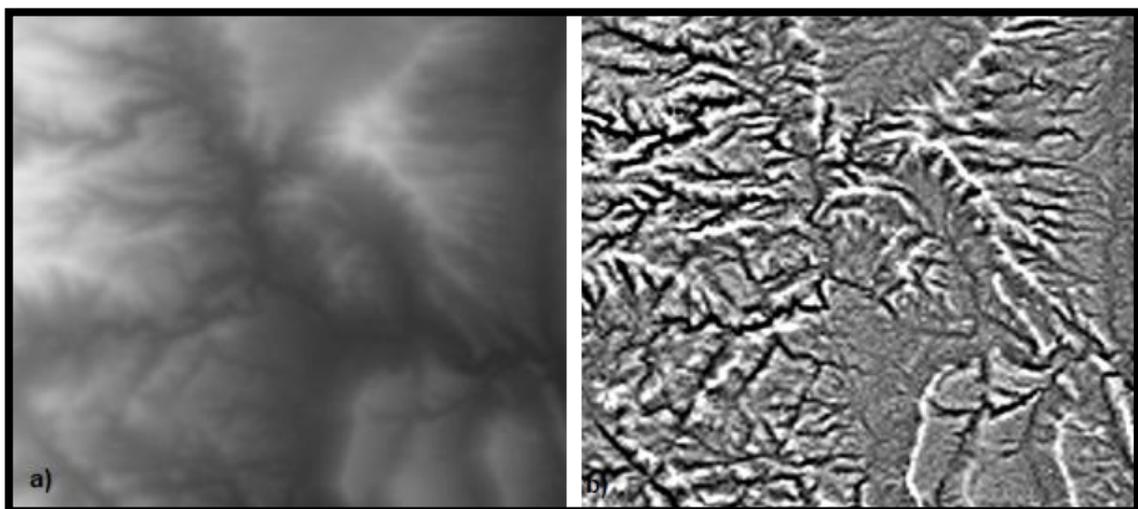
Figura 7 – Combinação das classes de curvatura vertical e horizontal



Fonte: Valeriano (2003).

A Figura 8 representa o MDT que foi transformado em curvatura.

Figura 8 - Exemplos de a) MDT e b) Curvatura



Fonte: Eris (2020).

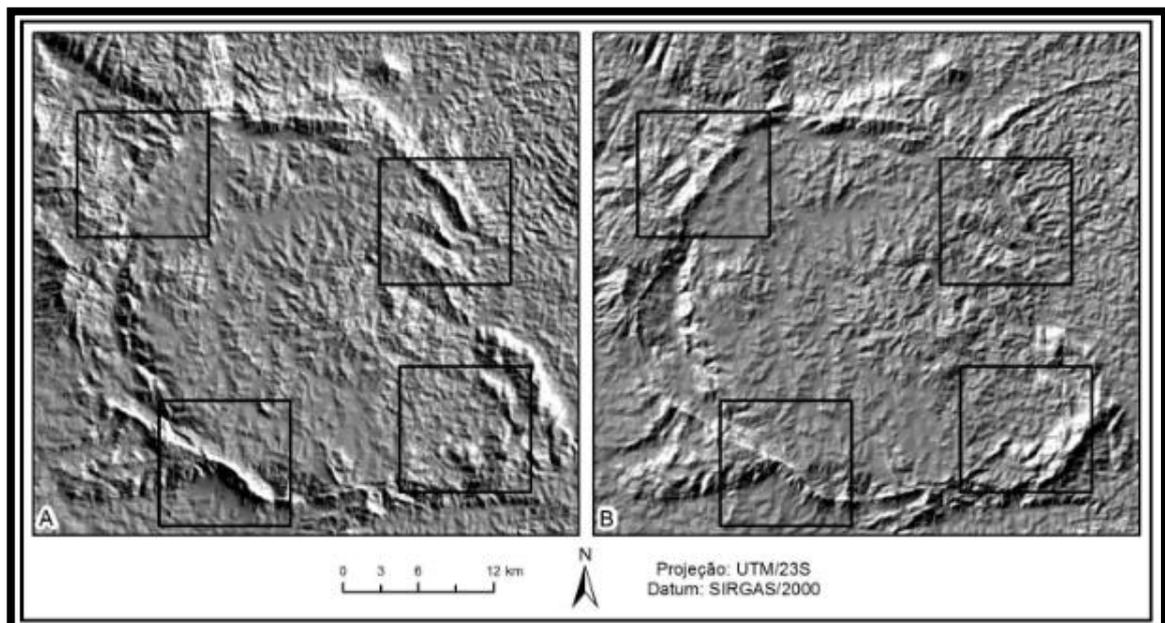
A curvatura permite descrever as características físicas da drenagem para entender o processo de erosão, escoamento e deposição. Assim, mostrando que a inclinação modifica a taxa de movimentos, podendo acelerar e desacelerar o fluxo através da superfície; e define a direção, que converge e diverge o fluxo. Os valores encontrados da curvatura podem ser usados para encontrar padrões de erosão do solo e também a distribuição de água na Terra (Eris, 2020).

As representações de superfície têm por objetivo classificar os tipos das vertentes previamente. Mostrando diferentes curvaturas verticais que são informações importantes para projetos na construção civil, aterro sanitário, agricultura, entre outros (Dos Anjos et.al, 2011).

2.2.3 Carta do Relevo Sombreado (*hillshade*)

O relevo sombreado permite identificar a forma do relevo com suas respectivas fraturas na área de estudo utilizando luz e sombra para proporcionar uma visualização em 3D. Devido à dependência de fonte de luz isso pode gerar distorções em relação às feições de relevo (Tinós et al., 2013). O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) utiliza o termo de Mapa de relevo Sombreado. Este mapa é um dos oito atributos para a caracterização geomorfométrica. O relevo sombreado possibilita destacar variações sutis da topografia, permitindo interpretação próxima do real por isso é bastante utilizado por profissionais. A Figura 9 apresenta um exemplo deste mapa.

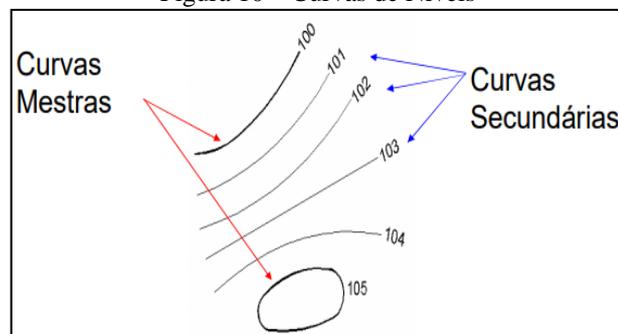
Figura 9 – Relevo Sombreado



Fonte: Tinós *et al.* (2013).

A representação do relevo através das curvas de níveis em mapas, cartas ou plantas, permite uma visualização eficaz, bem como conhecer a diferença de nível entre dois ou mais pontos. A curva de nível representa o relevo da superfície terrestre, onde esta pode ser representada por linhas que unem pontos com mesma altitude ou cota. As curvas de nível (Figura 10) são classificadas como: mestras, com traçado do desenho mais reforçado com a cota ou altitude escrita e espaçadas geralmente em 5 em 5 metros; principais, intermediárias e secundárias, geralmente não recebe o valor da sua cota ou altitude sendo necessário deduzir. Sendo que as mestras têm representações diferentes das outras. Curvas mais próximas representam altitudes mais altas enquanto curvas mais afastadas representam terreno mais plano. As curvas de nível irão depender do terreno seccionado, podendo ser: aberta ou fechada; concêntricas ou não; regulares ou irregulares.

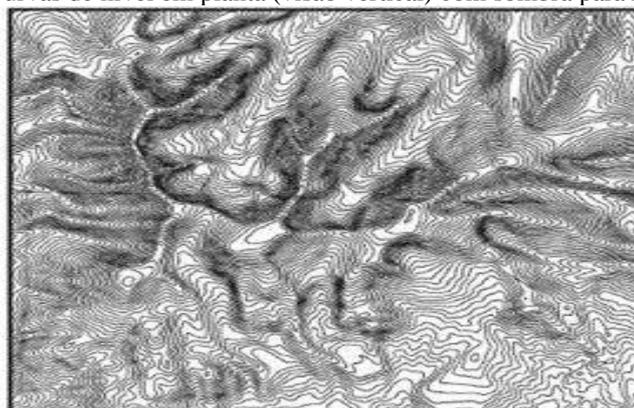
Figura 10 – Curvas de Níveis



Fonte: Veigas (2005).

O relevo sombreado juntamente com curvas de níveis possibilita uma melhor visualização do terreno como é apresentado na Figura 11. Sendo assim, é possível identificar através das curvas de níveis o relevo da área de interesse tais como: área acidentada, íngremes, plana, montanhosas, entre outras.

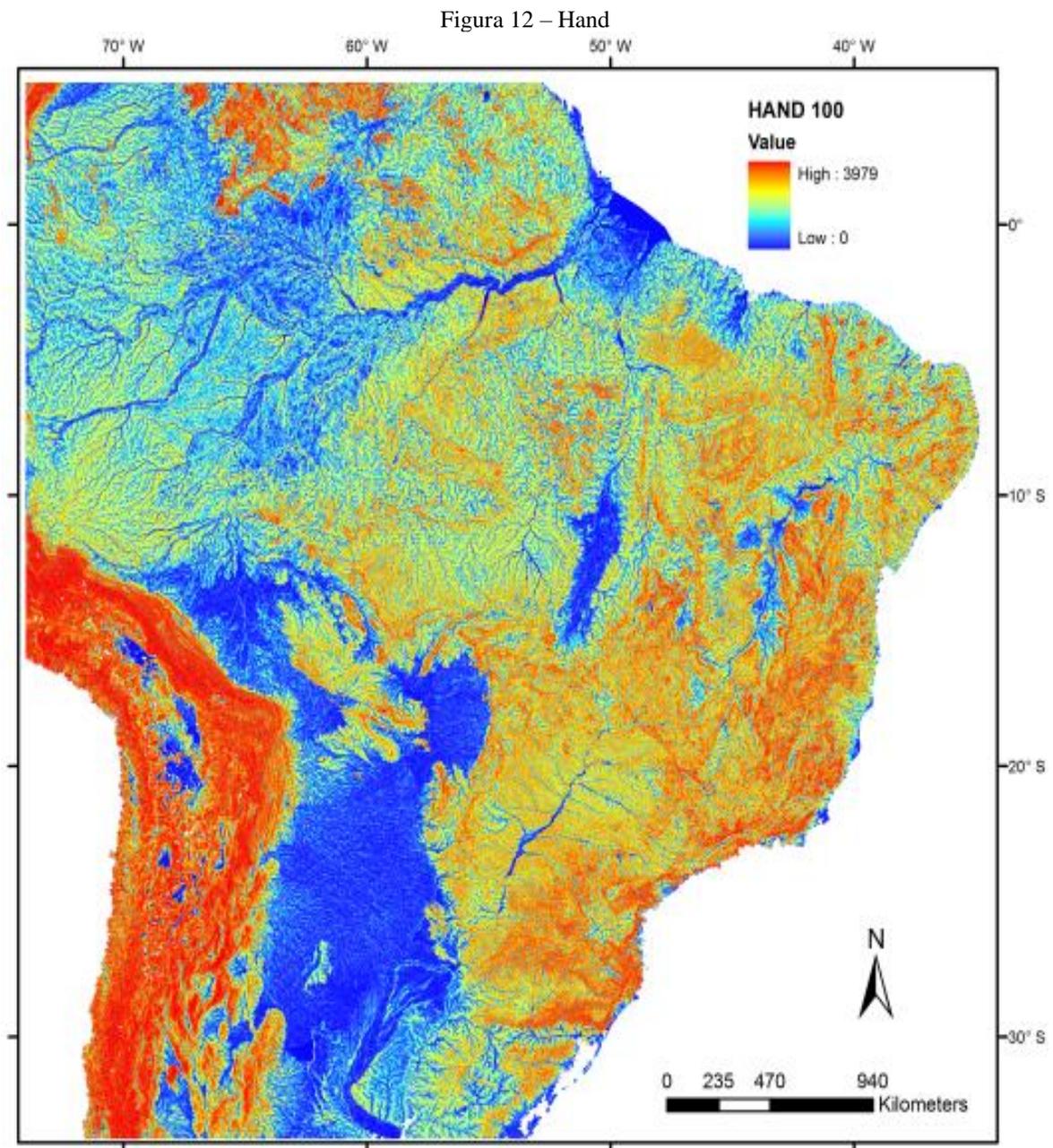
Figura 11 – Curvas de nível em planta (visão vertical) com sombra para realçar os vales



Fonte: Souza (2009).

2.2.4 Altura acima da drenagem mais próxima (*Height Above Nearest Drainage - Hand*)

A confecção do Hand utiliza como entrada o modelo digital (Figura 12). Este modelo é simplista e bastante útil quando não tem necessidade de muitos dados na execução de modelo hidrológico, possibilitando detectar áreas que estejam sob ameaça de inundação. O Hand pode ser calculado pelo software Terra que tem a função TerraHidro, isto está disponível no site: <http://www.wiki.dpi.inpe.br/doku.php?id=terrahidro>. O software ENVI pela implementação na linguagem IDL do algoritmo HAND.



Fonte: Amaral (2019).

A Hand é a distância vertical em relação a cada ponto na drenagem mais próximas (Rennó et al. 2008). Este respeita o fluxo unidirecional que a água percorre no terreno até a drenagem mais próxima (Amaral, 2013). Portanto, de acordo com Nobre et al., 2011 este modelo normaliza a topografia através das alturas relativas locais no decorrer do percurso da rede de drenagem, mostrando a topologia relativa aos potenciais gravitacionais do solo ou da drenagem locais. Sendo que a Hand está vinculada indiretamente com a profundidade do lençol freático, que mostra a disponibilidade da água no solo (Amaral, 2019). Amaral (2013) comenta que os valores próximos a zero significam distância vertical pequena, assim o lençol fica próximo à superfície, em condições próximas à saturação; e os valores altos significam distâncias verticais altas, percebendo nesta região lençol freático profundo (bem drenados).

2.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

A Cartografia Geotécnica começa a dar os primeiros passos no Brasil em 1970 devido aos surgimentos de grandes obras de infraestruturas no País. Assim foi possível a confecção de documentos cartográficos com enfoque na área de geotecnia. Um destes documentos é a carta geotécnica de suscetibilidade que ganhou força com a publicação da Lei Federal nº 12.608/12 (Brasil, 2012). Esta carta envolve a compilação de vários mapas temáticos que envolvem as áreas Geologia-geotecnia, Geomorfologia e Uso e ocupação. Esses mapas temáticos necessitam que o documento cartográfico utilizado esteja de acordo com o PEC.

O documento cartográfico, o MDT, permite a confecção de mapas temáticos, por exemplo, mapa de declividade, mapa de relevo sombreado, mapa de curvatura, que são bastante úteis para as áreas de engenharia civil, agronomia, ambiental e geológico, por exemplo. Essas informações permitem o conhecimento do relevo no local estudado, para um melhor planejamento do uso e ocupação do local em estudo.

A confecção do mapa de declividade auxilia na identificação de áreas de risco de deslizamento, erosão e inundação. Este tipo de mapa também é utilizado para auxiliar na escolha de áreas com capacidade de plantio na engenharia agrícola.

O mapa de relevo sombreado é muito utilizado para identificação de aspectos do relevo de um terreno, sendo possível identificar vales e ravinas, bem como áreas propícias à ocorrência de processos erosivos e deslizamentos. Este tipo de mapa possibilita também a análise e estudo das características de bacias hidrográficas.

O mapa de curvatura permite observar as vertentes para saber se existe possibilidade

de escorregamento na área de estudo.

O *Height Above Nearest Drainage* (Hand) permite detectar a região que pode ou não acontecer alagamento. A sua confecção é didática, não tendo necessidade de acrescentar muitos dados.

A aplicação da base cartográfica é ampla, tendo, na área de Geotecnia, destaque o estudo de superfície para análise, interpretação e confecção de mapas temáticos. A utilização de uma base cartográfica atualizada e com informações posicionais planialtimétricas sobre o padrão de exatidão cartográfica obtida nela, possibilita ao usuário o planejamento do seu projeto com precisão. Isso gera confiabilidade na base, mostrando a classificação das informações posicional, mostrando ao profissional a indicação visual da confiabilidade das informações. Assim, é possível definir os componentes necessários a ser mapeados e fixar cronogramas mais precisos, pois, o técnico não perde muito tempo procurando as coordenadas planejadas. Assim, com as informações mais precisas do posicionamento das características da área de estudo é possível tomar decisões mais sensatas em relação aos locais que devem e não devem ser evitados na área de estudo para implementação de projeto ou a classificação de áreas de riscos.

Por isso, é importante que o posicionamento seja conhecido das características para delimitar as informações geográficas, inserir nos relatórios técnicos as informações sobre os possíveis erros dos produtos e verificar em campo aquele posicionamento da característica. Isso permite que o usuário não perca muito tempo em busca das coordenadas planejadas, gerando menos custos e prazo no projeto pois, ele terá mais detalhamentos nas informações da área de estudo. Essas informações são inseridas na base cartográficas com precisão e assim os subprodutos para diversas áreas tais como, geologia, pedologia e geomorfologia, hidrologia e hidrografia, geotecnia, terão sua qualidade posicional conhecidas.

3 AQUISIÇÃO DE DADOS

A busca por vantagens ou menos esforço, faz com que o ser humano desenvolva tecnologias que facilitem seu dia a dia. Isso traz benefícios para várias áreas de atuação que utilizem de tecnologia nas suas atividades diárias. Assim, as tecnologias ganharam espaço muito rápido dentro de qualquer lugar, tanto no cotidiano das pessoas como no desenvolvimento de novas técnicas em várias ciências na área acadêmica. Algumas ciências foram atualizadas e em outras houve complementos, por exemplo, a aquisição de dados por plataforma aérea que antigamente carregavam câmeras fotogramétricas que captava imagens na faixa eletromagnética do visível (DA SILVA, 2015) e hoje existem tecnologias baseadas na faixa eletromagnética fora do visível (ROSA, 2016; INPE - SPRING, 2017).

Nenhuma ciência trabalha sozinha, uma complementa a outra, ou seja, não existe a confecção de uma base cartográfica somente utilizando as técnicas da cartografia. É necessária a entrada de outras ciências ou até a grande maioria para atingir o objetivo do trabalho desejado como é o caso do Google Earth que utiliza o sistema de informações geográficas com o objetivo de cruzar informações, as imagens de satélites para construir mosaicos das áreas e entre outras tecnologias (EREMCHENKO et al., 2015; GOOGLE EARTH, 2019).

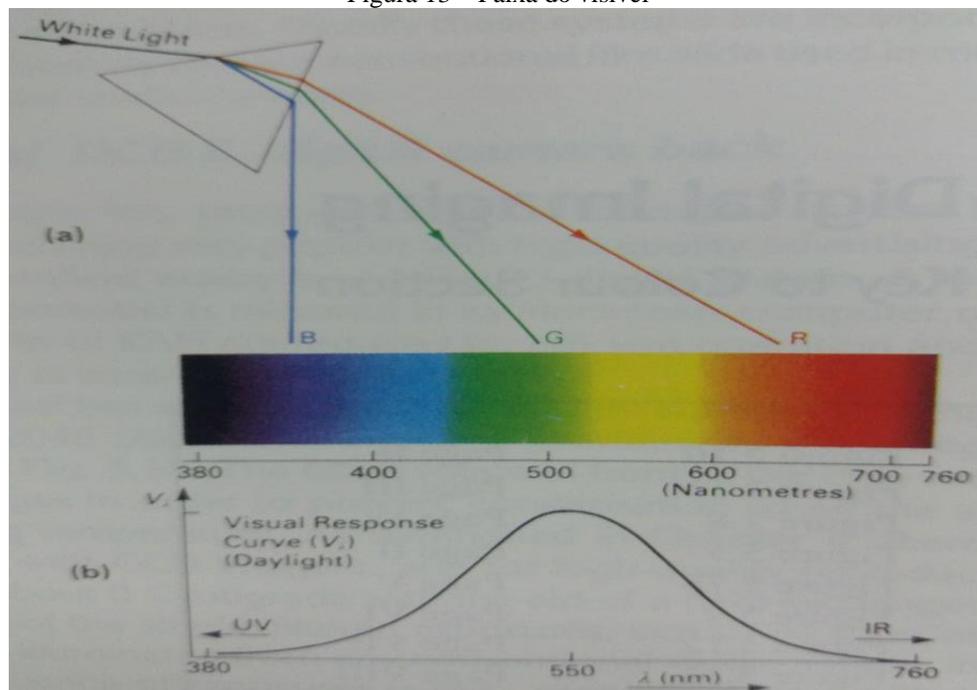
A seguir será apresentada a aquisição dos dados por plataformas aerotransportadas que pode ser realizada por diferentes tecnologias de aquisição, tais como: Aerofotogrametria, perfilhamento a laser (LiDAR) e Radar, sendo que este último será detalhado devido ao objetivo da tese. E também será apresentada a aquisição de dados utilizando o equipamento terrestre com auxílio de satélites que é a Geodésia.

3.1 CÂMERAS AEROFOTOGRAMÉTRICAS

Em 1922 foram iniciados os primeiros trabalhos com fotogrametria no Brasil pelo Exército, no mapeamento na escala 1:50.000 com a elaboração de cartas do Distrito Federal e Rio de Janeiro utilizando o esterógrafo. A partir disso, a fotogrametria passou a ser empregada como principal ferramenta para mapeamentos topográficos e cadastrais (ANDRADE, 1998). E com a evolução dos computadores e softwares, a fotogrametria analógica foi sendo substituída pela digital, mas Da Silva (2015) diz que tanto a fotogrametria analógica quanto a digital nenhuma é superior à outra.

A fotogrametria utiliza sensores fotográficos para capturar imagens de objetos ou da superfície em estudo. Os sensores imageadores podem ser de quadro (obtem a imagem da área de estudo num mesmo instante) ou de varredura (obtem as imagens de forma sequencial); sendo ativo (com flash) ou passivo, esse último é que a fotogrametria trabalha (SPRING, 2017; manual de fotogrametria). O sistema de câmeras aéreas é composto por sistema GPS de navegação, mecanismo de unidade de medição inercial (IMU), sensor CDD (Charged Couple Devices – Dispositivo de Acoplamento de Cargas) (DIAS, 2013). O sensor fotogramétrico, como sensor ótico utiliza a faixa eletromagnética do visível (0,3 a 15 μ m). Essa região é visível ao olho humano e comporta as três cores primárias que são: vermelho, verde e azul. Com a combinação das três cores, pode-se gerar as outras cores (GRAHAM, 1998) como ilustra a Figura 13.

Figura 13 – Faixa do visível



Fonte: Graham (1998).

Onde cada banda tem uma faixa de comprimento de onda que varia de 380 até 760nm como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Radiação Eletromagnética da banda do Visível

Cor	Comprimento de onda (nm)
Vermelho	789 – 625
Laranja	625 – 565
Amarelo	580 – 550
Verde	550 – 480
Azul	480 – 425
Violeta	425 – 380

Fonte: Graham (1998).

A época do voo depende das condições climáticas da região que será sobrevoada e também da cobertura da vegetação. Para que o levantamento fotogramétrico seja o mais completo possível, na região fotografada, não deverá haver nuvens e nem copas de árvores que encubram o terreno, como por exemplo, na primavera, quando as árvores ainda não têm muitas folhagens e não têm tantas nuvens no céu. Para iluminar a fotografia aérea e não gerar sombra que prejudique o processo é necessário que o Sol esteja numa determinada altura mínima durante a sessão fotográfica. A altura mínima varia com latitude média da região e também com o objetivo final do trabalho (REDWEIK, 2007).

Durante o planejamento dos pontos de controle nas imagens óticas são observados os pontos naturais (SANTOS, 2005), tais como:

- a) faixas de ruas;
- b) quinas de casa, cantos e cercas;
- c) cruzamentos, quinas, trevos e centro de vias.

3.2 LASER, SISTEMA DE VARREDURA A LASER AEROTRANSPORTADO OU LIGHT DETECTION AND RANGING (LIDAR)

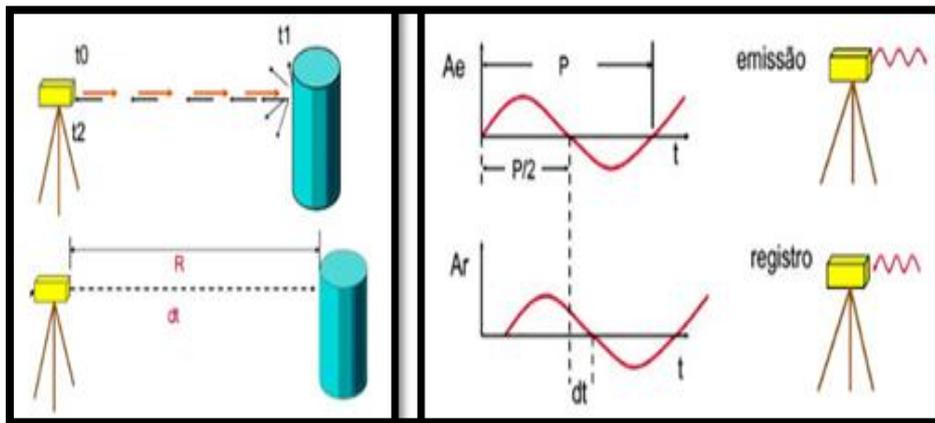
O *LiDAR* está sendo utilizada em estudos relacionados a inventário florestal e estimativa de variáveis dendrométricas da vegetação. O *LiDAR* é classificado como uma tecnologia de sensoriamento remoto ativo. Baseado na utilização de um feixe de laser, onde é emitido na direção do terreno resultando na obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície estudada (RODRIGUEZ et al., 2010). Portanto, quando o sistema *LiDAR* emite o pulso de laser, este vai até tocar os objetos ou superfície em estudo após isso o laser reflete (retorna) para o sistema, assim através das informações geradas entre o sensor e o objeto ou superfície é fornecida a distância.

A Figura 14 ilustra como é calculada a distância no sistema *LiDAR* pelo esquema de funcionamento do laser scanner time-of-flight e medição do tempo por diferença de fase ou método da onda contínua, onde existem os seguintes dados:

- t0: pulso disparado na direção do objeto;
- t1: tempo quando o pulso atinge o objeto;
- t2: tempo no instante que o pulso é captado pelo sensor;
- R: distância entre o sensor e o objeto;
- dt: diferença entre o tempo inicial e final;

t: tempo;
 Ae: pulso emitido;
 Ar: pulso refletido;
 P: período da onda; e
 P/2: metade do período de onda.

Figura 14 - Esquema de funcionamento do *laser scanner time-of-flight* e medição do tempo por diferença de fase ou método da onda contínua



Fonte: Vosselman et al. (2007).

Os componentes principais do sistema do LiDAR são dois (2): O dispositivo emissor de um feixe de raios laser, permite capturar informações sobre a superfície terrestre; e o sistema de navegação global por satélite (GNSS, em Inglês - sistema *Global Navigation Satellite System*), permite obter a posição exata dos pontos sobre a superfície terrestre em coordenadas 3D (MENG et al., 2010; REDWEIK, 2012). A Figura 15 ilustra como é realizada a aquisição de dados do sistema.

Figura 15 - Perfilamento a LASER



Fonte: MundoGeo (2018).

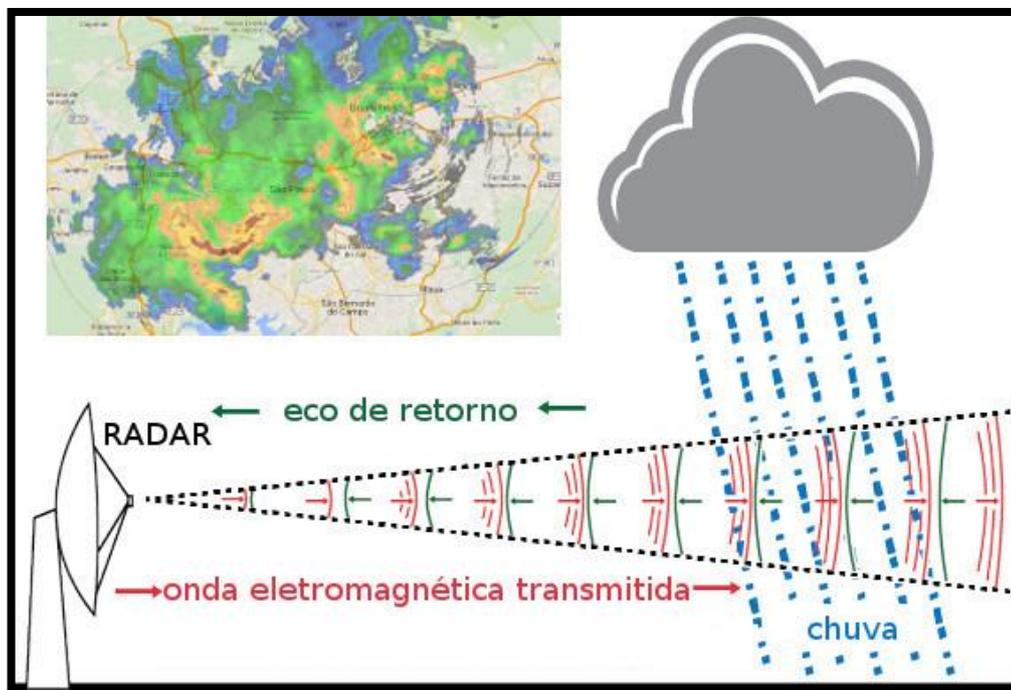
A aquisição dos dados do Lidar pode ser feita no solo como é apresentado no artigo de Biasutti et al., 2019 que gera ortoimagens de qualidade e modelo digital da superfície.

3.3 RADAR

A tecnologia com *Radio Detection And Ranging (RADAR)* não é tão nova quanto parece, teve início na Segunda Guerra Mundial com interesses militares e liberado para usos civis em 1970 (INPE - SPRING, 2017). Essa tecnologia difere das outras tecnologias, como fotogrametria, LiDAR, multi e hiperespectral, principalmente porque de acordo com os autores Henderson et al. (1998); Curlander et al., (1991); Elachi et al., (2006); Tomiyasu et al., (1978); Oliver et al., (2004); Raney, (1985); Woodhouse, (2006); Franceschetti & Lanari (1999); Cumming et al. (2005) geram imagens bidimensionais de alta resolução sem restrições da luz do dia e de condições climáticas e nuvens devido ao fato do radar ser um sensor ativo, e com capacidade de detectar e medir através de ondas de rádios. O radar é utilizado tanto em plataformas terrestres, aéreas e orbitais. Também busca suprir informações do território, que outras tecnologias possuem restrições, tais como: aplicações restritas, demora ou condições climáticas.

A Figura 16 apresenta o funcionamento do radar em condição atmosférica com chuva.

Figura 16 – Funcionamento do radar na chuva



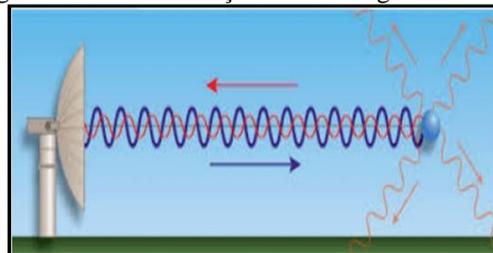
Fonte: Sferics Timing and Ranging Network (2019).

O radar é utilizado em diversas áreas de estudo tais como: na marinha, para detecção e monitoramento de navios e detecção de obstáculos; na aeronáutica, com o controle de vigilância de tráfego aéreo (DE SOUSA & DE SOUSA); no exército com diferentes finalidades, desde reconstituição da trajetória de projéteis até no controle de velocidade; na engenharia de transportes por meio de controle de velocidade dos veículos em vias públicas e privadas; meio ambiente, no monitoramento de desmatamento; óleo e gás, nos derramamentos dessas substância no mar; desastres, monitoramentos da superfície terrestre; na geotecnia com a utilização dos modelos digitais do terreno para determinar pontos de inundações; na cartografia com obtenção de ortoimagens em áreas de difícil acesso e com más condições meteorológicas como aborda os autores Garestier & Le Toan, 2007; Dehghani et al., 2009; YANG et al., 2010; Floris et al., 2010; Vasco et al., 2011; Derron et al., 2013; Chen et al., 2013; Mangla & Kumar (2014).

3.3.1 Aquisição de Dados

A Figura 17 esclarece o funcionamento da transmissão e recepção do sinal eletromagnético.

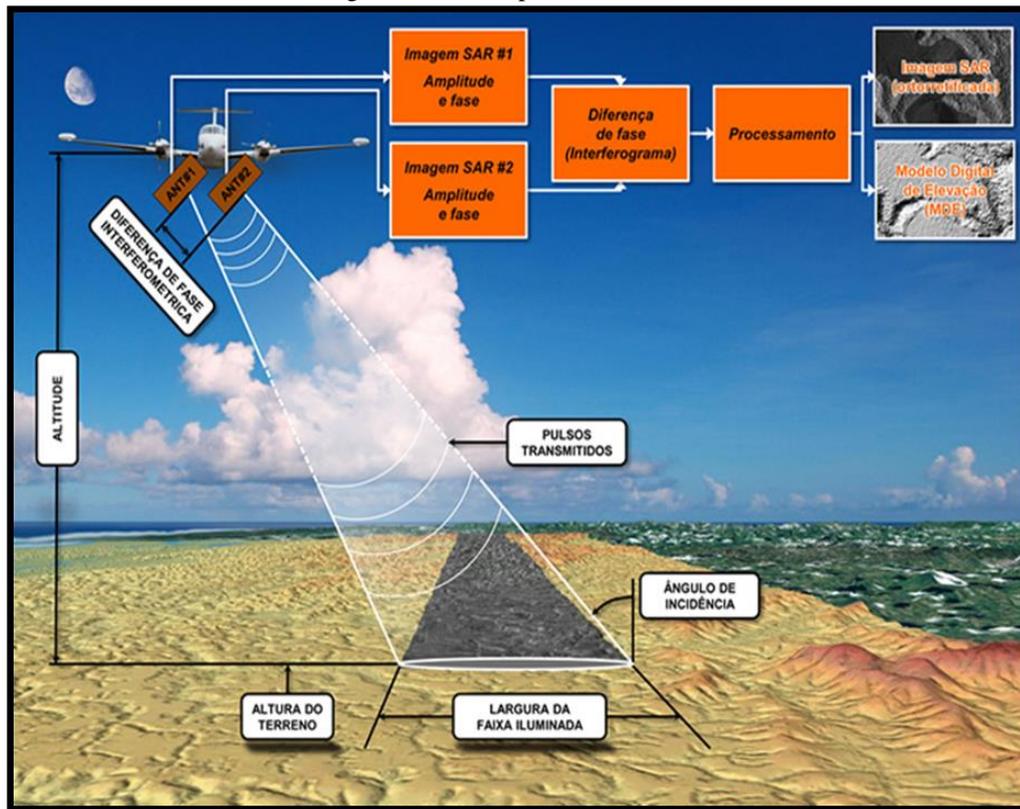
Figura 17 – Demonstração da tecnologia do RADAR



Fonte: Rosa (2016).

O radar é um sensor que transmite e recebe sinais eletromagnéticos através de sua antena. Moreira et al., (2013) comenta que o SAR funciona com visada lateral e utiliza pulsos eletromagnéticos de altas potências que se retroespalham como ilustra a Figura 18. A transmissão acontece através da emissão de pulsos eletromagnéticos de alta potência, em um curto período e feixe estreito [...] O feixe se alarga durante a propagação no espaço, formando um cone, até encontrar um obstáculo (objeto) no percurso para assim retornar (refletido) a antena [...] Com isso é possível determinar a distância do objeto e até mesmo se há deslocamento do objeto. A velocidade do feixe é a velocidade da luz tanto na transmissão quanto na recepção (Curlander & McDonough 1991; Curlander and McDonough, 1992; Henderson 1998; Rosen et al., 2000; Ferretti et al., 2007; Massonnet 2008; Rosa, 2016).

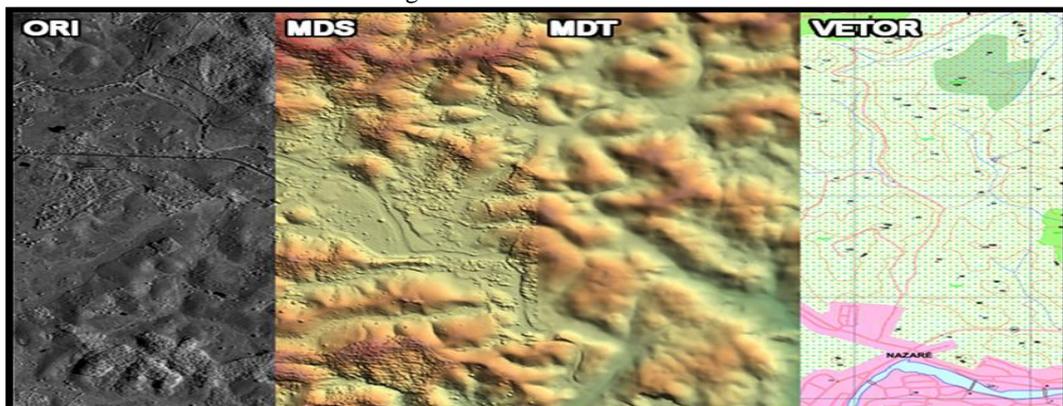
Figura 18 – Princípios Básicos Radar



Fonte: BASE Aerofotogrametria e Projetos S/A (2019).

O radar é composto por um sistema de transmissão, oscilador, modulador, transmissor, antena, sistema de recepção, comutador, receptor e visor [...] O sistema de transmissão é formado pelo oscilador, o modulador e o próprio transmissor, tendo como objetivo fornecer radiofrequência (pulsos eletromagnéticos) para a antena. Os dados adquiridos são transformados em produtos advindos do radar, ou seja, todos os produtos gerados pelo radar são adquiridos de uma vez (Figura 19). Portanto caso um produto esteja errado em relação ao seu posicionamento, todos estarão.

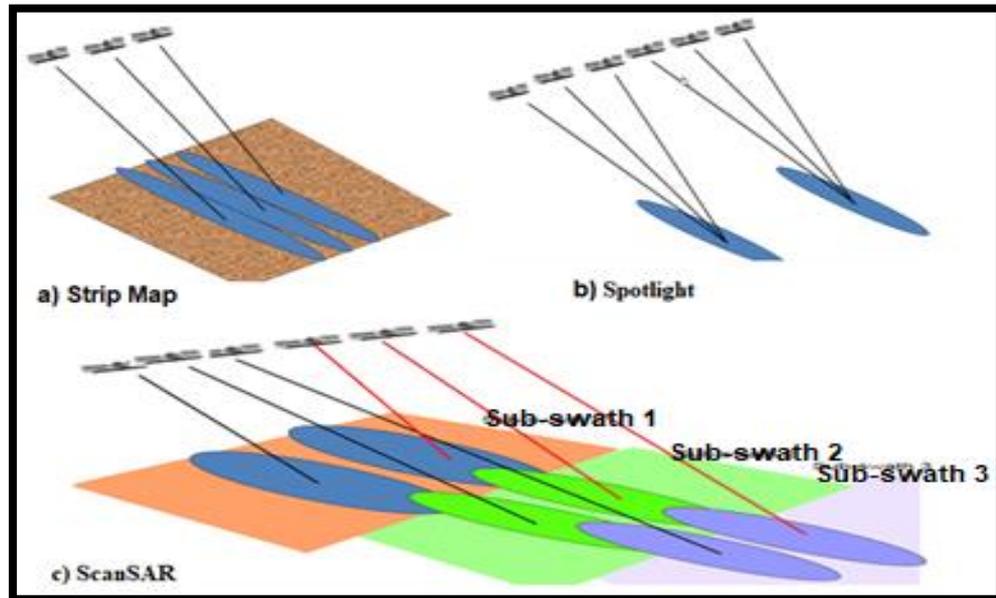
Figura 19 – Produtos do radar



Fonte: BASE Aerofotogrametria e Projetos S/A (2019).

Existem três (3) modos de aquisição do radar: *Strip Map*, *Spotlight* e *ScanSAR*. O *Strip Map* é uma linha de varredura por pulso, sem espaços vazios e são selecionados as faixas e ângulos de incidências; *Spotlight*, os fechos são estéreos, isso permite uma maior resolução espacial e as regiões entre os *spots* não são imageadas; e *ScanSAR*, existe um aumento de área de cobertura em detrimento da resolução espacial como apresenta a Figura 20 (PCI GEOMATICS, 2018).

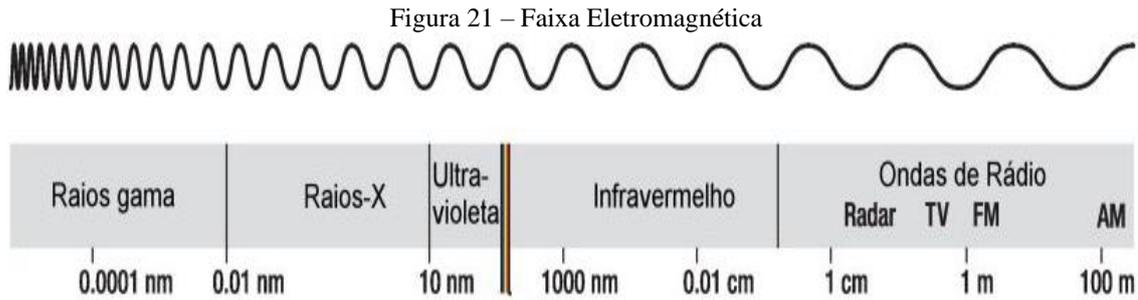
Figura 20 – Modos de aquisição do radar



Fonte: Rosa (2016).

3.3.2 Faixas

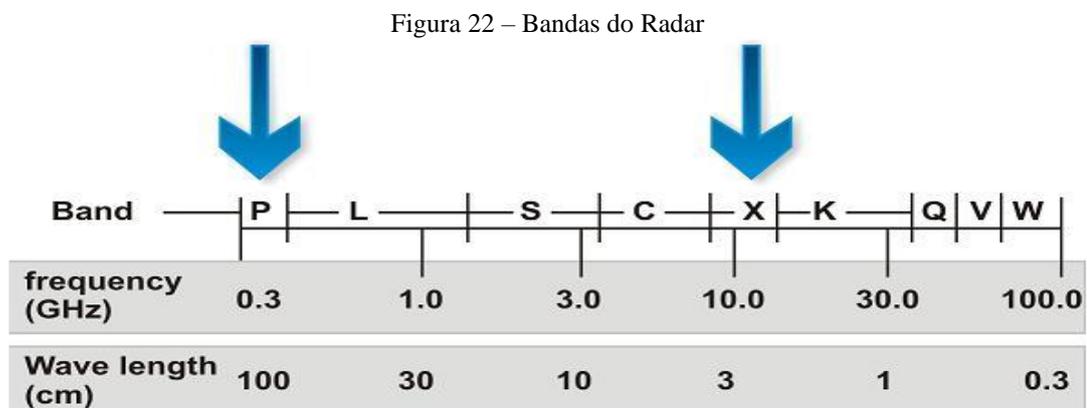
O radar trabalha em diferentes bandas e cada banda tem suas especificações, por exemplo: a combinação das bandas X ou C e bandas maiores L ou P que são utilizadas para monitoramento de floresta, barragens, agricultura, deformações de estrutura; as bandas L e P são excelentes para mapeamento de umidade e textura do solo; estudo sobre diferentes plantações requer X, C e L; Batimetria com a banda C; e para a cartografia as bandas L e P são apropriadas para modelar a informação altimétrica pois, penetram na cobertura da vegetação, é também utilizada a banda com menor comprimento de onda (X ou C) com a maior (L ou P) para mapeamento e monitoramento de cobertura vegetal (REIGBER & MOREIRA, 2000; SOUSA et al., 2016; FERRETTI et al., 2001; NANNINI et al., 2012; SOUSA et al., 2016; TEBALDINI et al., 2016; MUNDGEO, 2017; LIU et al., 2019; PEREIRA et al., 2019). O radar utiliza a faixa eletromagnética das ondas de rádio (Figura 21).



Fonte: Rosa (2016).

Na Figura 22 são apresentadas algumas bandas que o sistema radar funciona tais como:

- Banda P;
- Banda L;
- Banda S;
- Banda C;
- Banda X;
- Banda K;
- Banda Q;
- Banda V; e
- Banda W.



Fonte: Rosa (2016).

Cada uma dessas bandas tem uma faixa de comprimento de onda que varia de 0,75 até 136,00 cm como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Faixas eletromagnéticas

Banda	Comprimento de Onda (cm)	Frequência (GHz)
Q	0,75 – 1,18	40,00 – 26,50
K	1,18 – 2,40	26,50 -12,50
X	2,40 – 3,75	12,50 – 8,00
C	3,75 – 7,50	8,00 – 4,00
S	7,50 -15,00	4,00 – 2,00
L	15,00 – 30,00	2,00 – 1,00
UHF	30,00 – 100	1,00 – 0,30
P	77,00 -136,00	0,20 – 0,40

Fonte: IBGE (2012).

Existem diferentes tipos de radar e cada um utiliza uma (1) ou mais bandas para aquisição dos dados. Cada banda possibilita a obtenção de diferentes tipos de dados que irão depender das propriedades dos objetos.

As bandas do radar utilizadas nesta tese são a P e a X que serão descritas a seguir:

a) Banda P

Varia na faixa eletromagnética aproximadamente entre 300 e 500MHz. A penetrabilidade das ondas eletromagnéticas desta banda permite que estas ultrapassem as copas e caule das árvores existentes no local, chegando até a superfície (Figura 23).

Figura 23 – Penetrabilidade das ondas eletromagnéticas na Banda P



Fonte: Rosa (2016).

b) Banda X

Varia na faixa eletromagnética aproximadamente entre 9 a 12GHz. As ondas desta banda praticamente não possuem penetrabilidade (Figura 24).

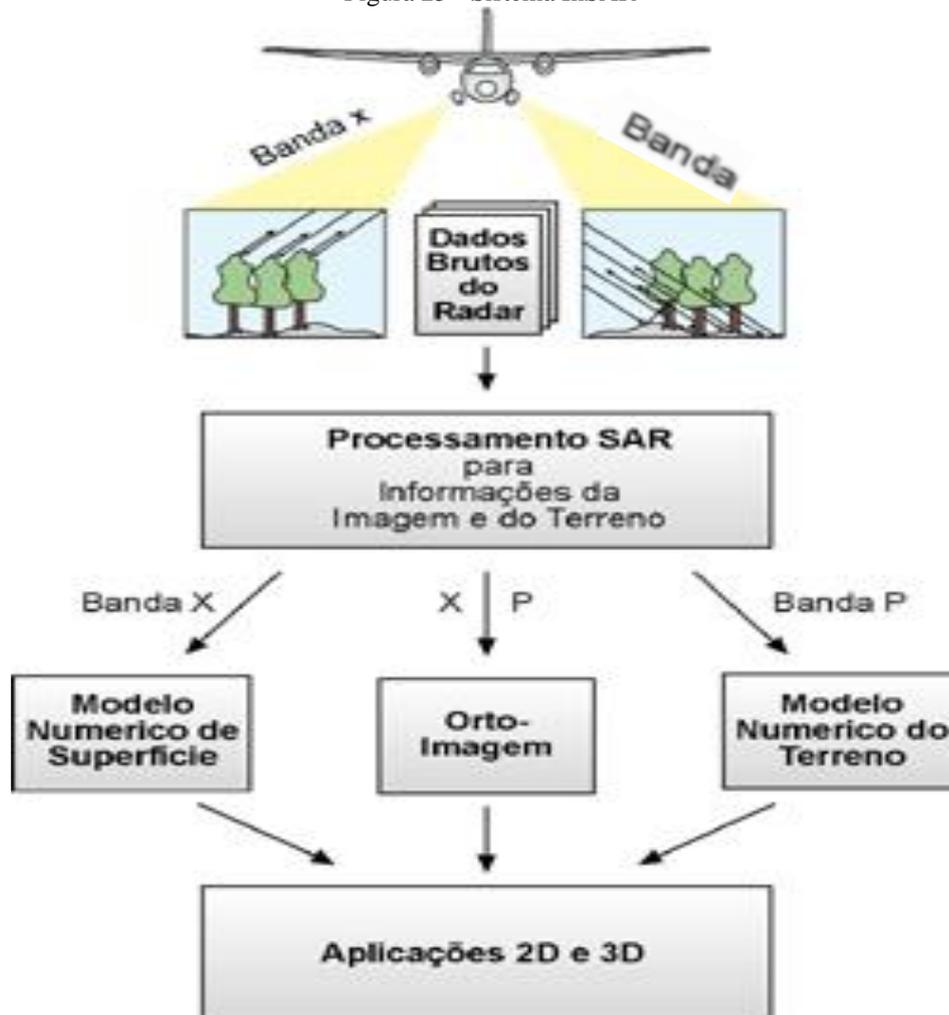
Figura 24 – Penetrabilidade das ondas eletromagnéticas na Banda X



Fonte: Rosa (2016).

A Figura 25 ilustra o processo de aquisição dos dados utilizando o sistema de radar aerotransportado, em que são adquiridos dados brutos na banda X e P que passam pelo processamento para gerar produtos que serão aplicados em diversas áreas de estudo.

Figura 25 - Sistema InSAR



Fonte: Rosa (2004).

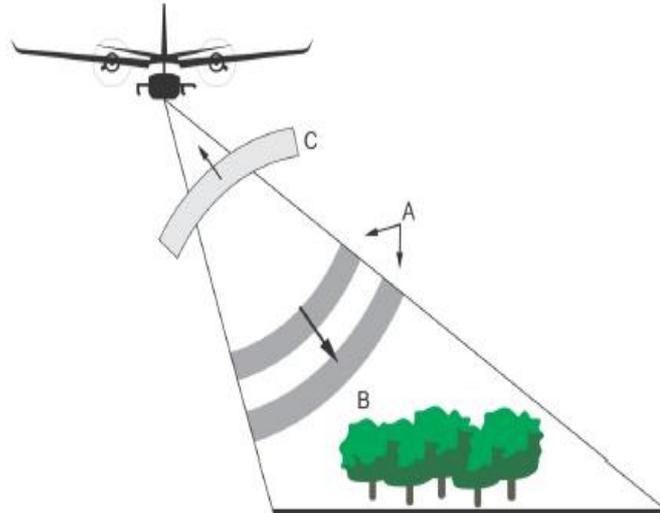
3.3.3 Radar de Abertura Sintética

Existem diferentes tipos de radar, tais como: Radar de pulso simples; Radar de pulso contínuo; *Phased-Array Radar*; Radares secundários; e Radar de abertura sintética. Este último será objeto de estudo nessa tese. O radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar*) utiliza as plataformas de aeronaves ou satélites para sensoriamento remoto.

Os sistemas de radar podem ser imageadores e não imageadores. Os imageadores são compostos por antena rotatória e os radares que podem ter visada: Lateral de Abertura Real (SLAR) e Lateral de Abertura Sintética (InSAR). O SLAR foi um dos primeiros sistemas imageadores a utilizar micro-ondas. Como a antena ilumina lateralmente os alvos, a imagem é gerada pelo próprio movimento da aeronave no percurso sobre a área estudada e a resolução azimutal pode prejudicar a obtenção dos dados, portanto para melhorar a resolução azimutal é necessário diminuir a distância entre o radar e o alvo ou aumentar o comprimento da antena.

Já o InSAR não tem esse problema da resolução azimutal (Inpe - SPRING, 2017). A Figura 26 ilustra o processo de aquisição lateral dos dados na superfície terrestre utilizando o Radar de Abertura Sintética.

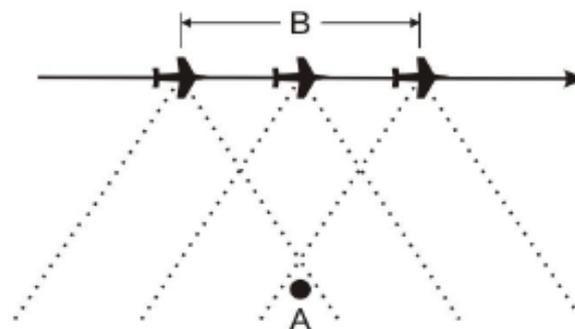
Figura 26 – Ilustração do RADAR de Abertura de Sintética



Fonte: Rosa (2016).

Para obter uma quantidade maior de dados durante o voo é utilizado a abertura sintética no sistema de RADAR. Essa abertura simula uma antena maior do que a real, isso só é possível porque no momento da obtenção dos dados o mesmo ponto é capturado várias vezes. A Figura 27 mostra o ponto A sendo capturado várias vezes de diferentes posicionamentos da aeronave.

Figura 27 – Ilustração da obtenção dos dados com o InSAR

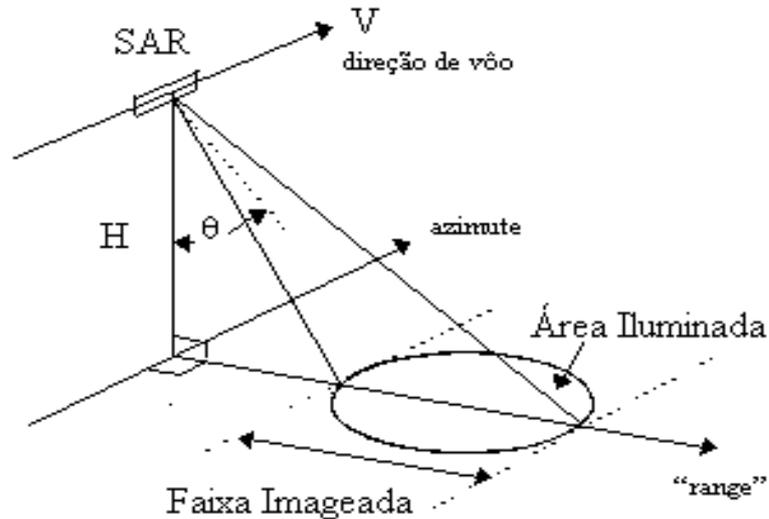


Fonte: Rosa (2016).

Na plataforma (avião ou satélite) o sistema do RADAR de Abertura Sintética – InSAR se movimenta com uma velocidade “V” em relação ao solo numa determinada altura “H”, onde a antena está na posição lateralmente a um ângulo “ θ ” em relação ao nadir (Figura 28).

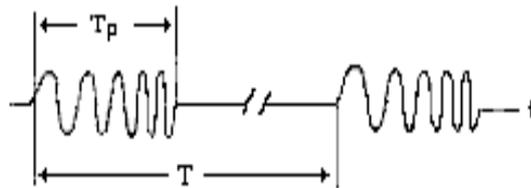
Durante o deslocamento o transmissor envia pulsos de larguras “ T_p ” em intervalos regulares de “ T ” segundos, isso é ilustrado na Figura 29 (INPE – SPRING, 2017).

Figura 28 – Geometria do InSAR



Fonte: INPE – SPRING (2017).

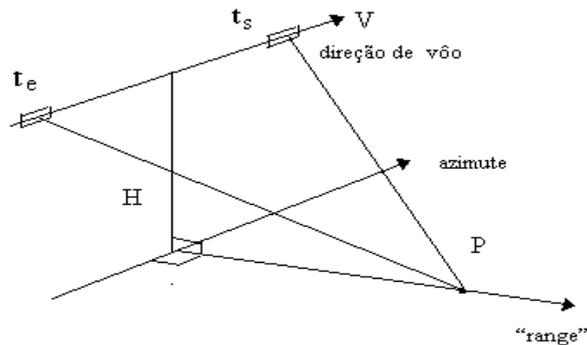
Figura 29 - Pulso Transmitido.



Fonte: INPE – SPRING (2017).

O pulso transmitido será modulado linearmente em frequência entre a variação do valor mínimo f_{\min} e um valor máximo f_{\max} . Sendo chamada essa variação de largura de banda do pulso: $B_p = f_{\max} - f_{\min}$, e também determina a resolução perpendicular ao voo (*range*). Observando a Figura 30 consegue-se entender como funciona o sistema de imageamento InSAR em relação ao alvo, desde de sua entrada (t_e) até sua saída (t_s) do campo de visão da antena. Durante o intervalo ($t_s - t_e$) o RADAR envia N pulsos e coleta $k \cdot (N - 1)$ ($k =$ indefinidos ecos) amostras do eco do ponto P neste intervalo. Durante o processo, as amostras são armazenadas no intervalo ($t_s - t_e$) da plataforma que se desloca em um $V_x (t_s - t_e)$ metros, onde é conhecido como o comprimento de “Abertura Sintética” (INPE – SPRING, 2017).

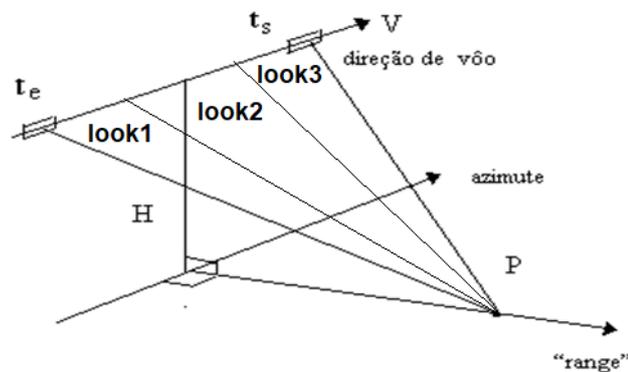
Figura 30 - Intervalo de Abertura Sintética (ts-te)



Fonte: INPE – SPRING (2017).

Durante o processo, o eco recebido de um determinado pulso enviado sofre variações de frequência devido à velocidade V da plataforma causando o efeito Doppler (BD). Sendo que BP interfere diretamente nas resoluções de “range” e BD do azimute, quanto maiores são menores serão as resoluções (Figura 31). Os ecos (dados) coletados pelo sistema InSAR necessitam ser processados para gerar a imagem correspondente a esses dados. Posteriormente, o processo “Multi-Look” divide a abertura sintética em visadas (*looks*) sendo a imagem final o resultado composto pelas imagens de cada “look”, geradas separadamente, pois admite-se que as imagens de cada “look” são estatisticamente independentes entre si [...] Utilizando essa técnica diminui-se o efeito do ruído Speckle e degradação na resolução em relação ao azimute (LEE, 1986; MOREIRA et al., 2013; INPE – SPRING, 2017).

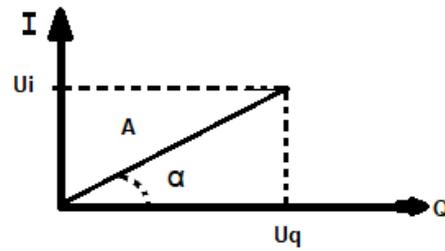
Figura 31 – Multi-Look



Fonte: INPE – SPRING (2017).

As imagens InSAR são geradas no formato “complexo” de 1 “look”, para conhecer-se a fase de cada *pixel* da imagem (U_q componente real e U_i componente imaginária) (Figura 32). Essas são codificadas em 16 *bits*, obrigando que o *pixel* complexo tenha 32*bits* para sua representação. A é a amplitude do *pixel* e α é a fase do *pixel* complexo (INPE – SPRING, 2017).

Figura 32 - Representação do *pixel* no formato complexo

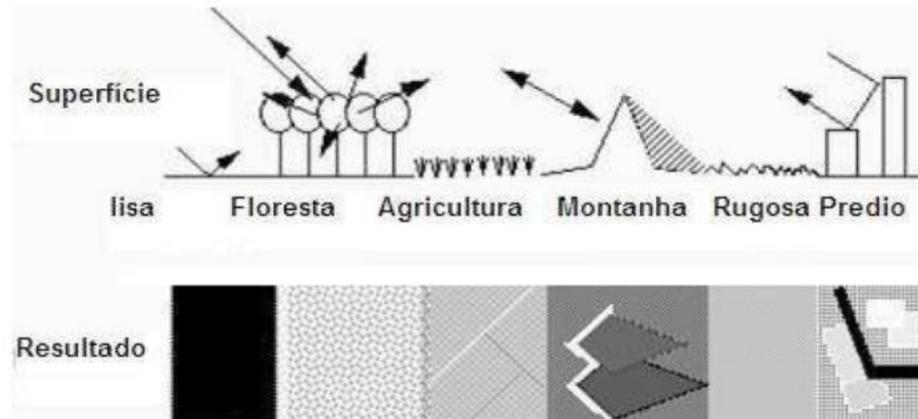


Fonte: INPE-Spring (2017).

3.3.4 Interações

Os feixes de radar ao entrar em contato com algumas superfícies apresenta interação com diferentes, como é ilustrado da Figura 33.

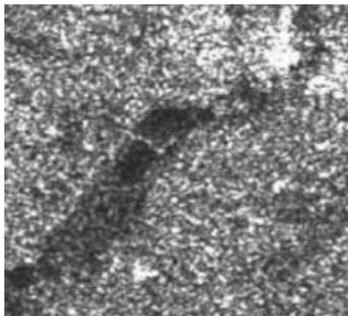
Figura 33 – Interação com diferentes tipos de superfície



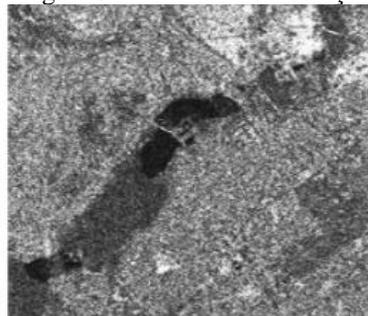
Fonte: PCI Geomatics (2018).

A Figura 34 representa as diferentes resoluções em uma mesma área de estudo. É possível observar o melhoramento da área à medida que diminui a resolução espacial.

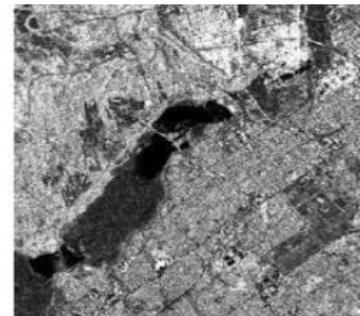
Figura 34 – Diferentes resoluções



100 m.



30 m.



10 m.

Fonte: PCI Geomatics (2018).

3.3.5 Distorções

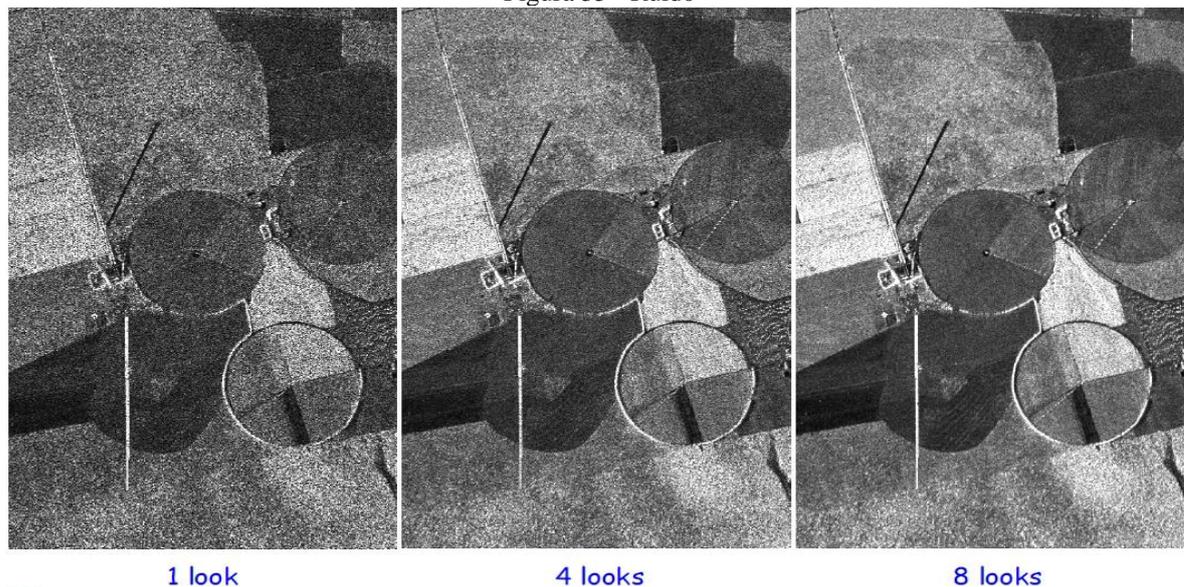
O radar gera dois (2) tipos de distorções: Radiométricas e Geométricas.

As distorções radiométricas são causadas principalmente pelo ruído e pelo padrão da antena. Essas distorções são geradas por fatores inerentes ao instrumento e pela geometria da iluminação, prejudicando a interpretação das imagens de RADAR (INPE – SPRING, 2017).

a) ruído (Speckle);

É um ruído que multiplica proporcionalmente a intensidade do sinal recebido causando um efeito visual de textura granulosa, ou seja, reduzindo a separabilidade entre os objetos da cena na imagem dificultando a interpretação das imagens de RADAR. São aplicados dois métodos para reduzir o efeito: a Filtragem e o Processamento “*Multi-look*”. A Figura 35 apresenta as modificações dos ruídos à medida que se aplicar o filtro.

Figura 35 - Ruído



Fonte: Rosa (2016).

A função dos filtros é manter o valor médio do retorno do radar (*backscatter*), preservando as bordas e informações de textura presentes na imagem. Existem muitos filtros em desenvolvimento para reduzir o ruído *speckle* e aumentar a relação sinal-ruído, com o objetivo de melhoria na separação entre os alvos da superfície com poucas perdas nas informações são exemplos de filtros: Lee (1981), Frost (1992), Kuan/Nathan (1982), entre outros. Sempre ocorre o ruído *speckle* em sistema de imageamento obtidos por micro-ondas,

laser e ultrassonografia. Em uma célula de resolução de uma cena imageada tem-se um grande número de elementos difusores, aleatoriamente distribuídos, podendo intervir uns nos outros de maneira construtiva e destrutiva, gerando variações súbitas na intensidade das imagens (INPE – SPRING, 2017).

Outro exemplo é a Figura 36, onde o processo de filtragem possibilitou melhor visualização da área.

Figura 36 – Área com Filtragem



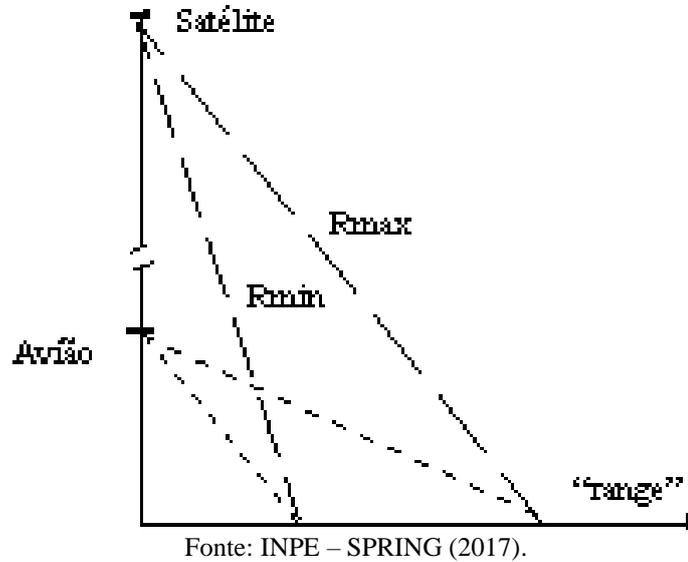
Fonte: PCI Geomatics (2018).

b) efeito Padrão da Antena.

Na direção de “*range*” (Figura 37) as variações de baixas frequências são causadas pela perda de potência ocasionada pela visada lateral, sendo que no caso de imagem do InSAR decai na proporção $1/R^3$, onde R é a distância entre a antena e um dado ponto na imagem. Quando se utiliza avião esse problema é mais acentuado, já em satélites não é tão acentuada pois a razão R_{\min} (início da faixa imageada) e R_{\max} (fim da faixa) é bem menor. Essa perda pelo decaimento da potência é corrigida no momento de aquisição dos dados através do STC (Sensitivity Time Control). O sistema STC tem imperfeições e ainda tem outras perturbações da eletrônica do RADAR (há variação no amplificador durante o tempo

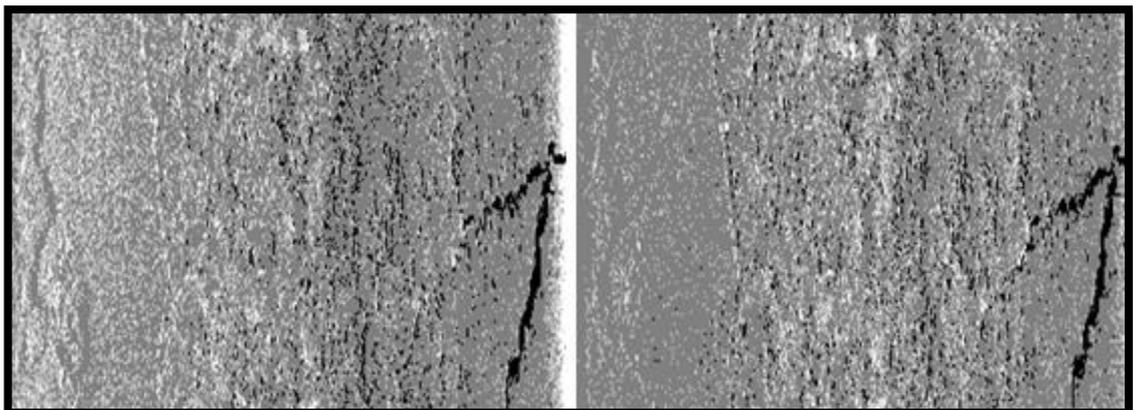
de aquisição do eco), mecânicas ou elétrica, causando a correção não perfeita, continuando alguns resíduos (INPE – SPRING, 2017).

Figura 37 - Comparação da variação do "range" para aeronave e satélite



Existem algoritmos para a correção do padrão da antena. Esse padrão é obtido através da média das colunas da imagem na direção do "range", após isso utiliza-se um filtro para obter as variações de baixa frequência. Têm-se dois métodos de filtragens: o primeiro é o da média móvel que consiste em filtrar o padrão com o filtro de média; e o segundo método é por polinômio, no qual é através da interface que se obtém o grau do polinômio. Após a filtragem a imagem pode ser corrigida. Na correção pode-se utilizar os métodos de correção, um exemplo é o multiplicativo. A Figura 38 apresenta a imagem original (a) e a corrigida (b) (INPE – SPRING, 2017).

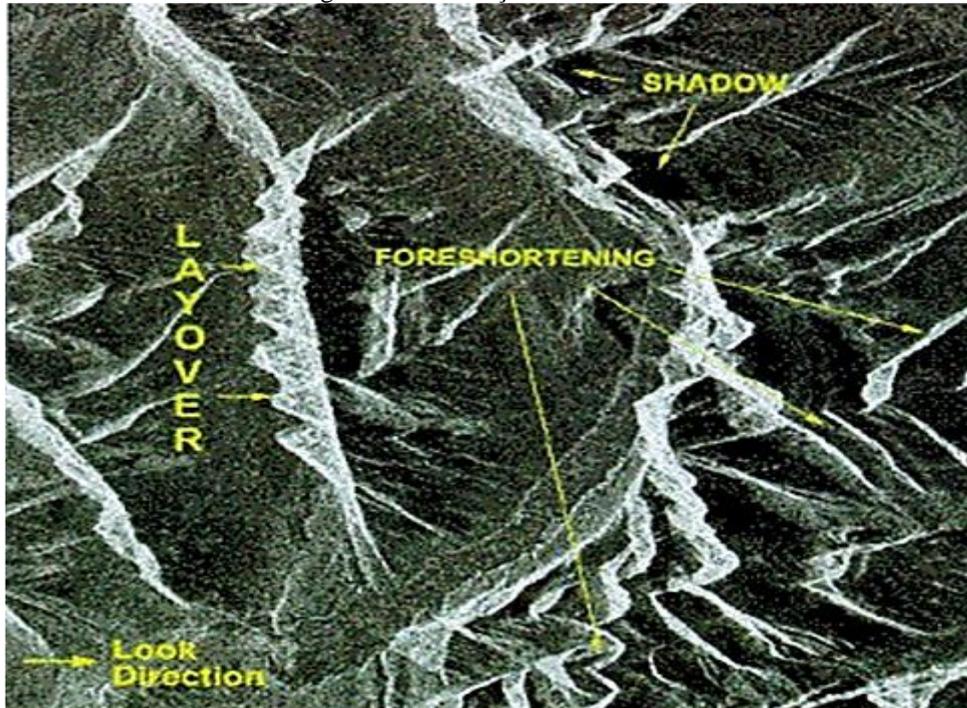
Figura 38 – a) Original e b) Corrigida: imagem do sistema InSAR-580 do Rio Tapajós obtida durante a missão InSAREX-1992



Fonte: INPE – SPRING (2017).

As distorções geométricas são causadas pela variação da elevação na superfície ou por mudança de atitude da plataforma (altura, velocidade e direção); os tipos são: sombra (*shadow*); inversão (*Layover*) e esforço (*foreshortening*) como apresentado na Figura 39.

Figura 39 – Distorções Geométricas

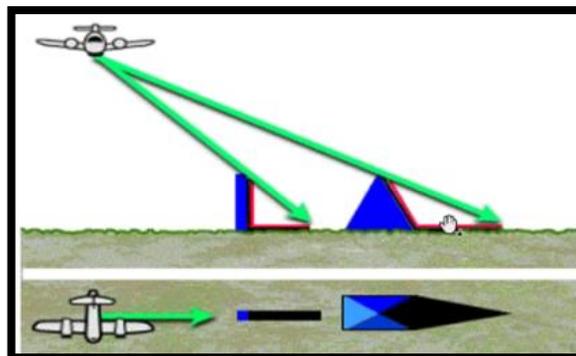


Fonte: Rosa (2016).

a) sombras (*Shadow*):

Ocorre quando não há interações do sinal emitido pelo radar. Nestas regiões não há informações, geralmente ocorre em algum objeto, tais como: montanha, prédio, árvores e outros, impedem a captura dos dados por InSAR em pontos obstruídos por esses objetos como ilustra a Figura 40. Sanado quando é aplicado o método do mosaico.

Figura 40 – *Shadow*

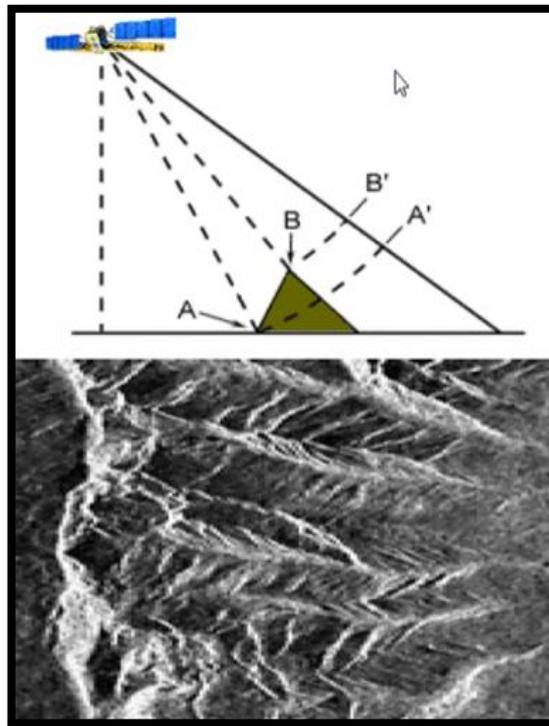


Fonte: PCI Geomatics (2018).

b) inversão (*Layover*):

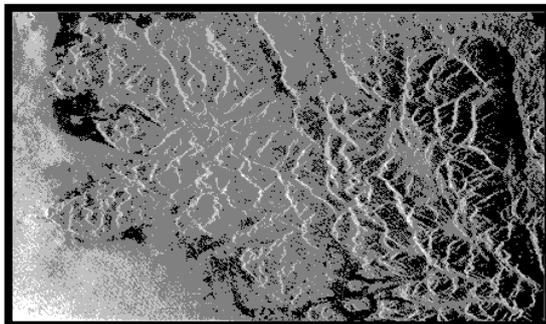
Ocorre quando o topo do alvo é imageado antes da base, gerando a inversão do terreno, ou seja, as partes altas são mapeadas como baixas ou vice-versa. Quanto menor o ângulo de incidência mais intenso é o efeito. Essa distorção não tem correção e a única maneira é a prevenção. Antes do voo é feito um planejamento observando dados SRTM para identificar possíveis locais onde haja grande elevação. Com o conhecimento desses locais é feito o planejamento para o avião passar a uma distância mínima entre a distância ortogonal do avião e o pé da parte elevada (INPE – SPRING, 2017). A Figura 41 representa que o vértice B trocou de posição com o A e a Figura 42 apresenta a imagem com efeito "*layover*".

Figura 41 – *Layover*



Fonte: CPI Geomatics (2018).

Figura 42 - Imagem com efeito "*layover*", caracterizado pelas faixas de cor branca



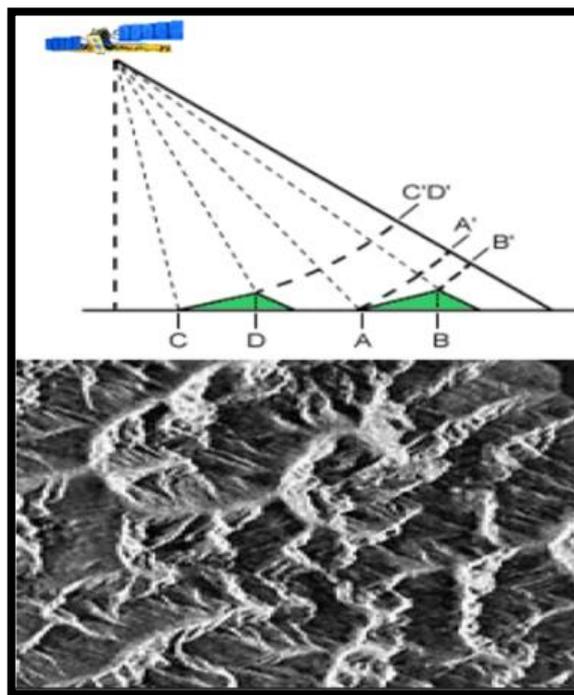
Fonte: INPE – SPRING (2017).

c) esforço (*Foreshortening*):

O efeito *foreshortening* acontece quando a área imageada tem o relevo pronunciado. Onde as encostas direcionadas para *nadir* se mostram mais curtas (INPE – SPRING, 2017).

A conversão *slant to ground range* é realizada no RADAR devido à visada lateral e isso faz com que a imagem obtida esteja inclinada em relação ao solo gerando uma compressão da imagem. Varia ao longo de sua faixa, fazendo com que os *pixels* da imagem que estejam próximos ao *nadir* sejam mais comprimidos (INPE – SPRING, 2017). A Figura 43 mostra que os pontos C e D são os mesmos.

Figura 43 – *Foreshortening*



Fonte: PCI Geomatics (2018).

A seguir são apresentadas a utilização do radar em diversas áreas.

- aplicações do Radar

O RADAR é utilizado em diversas aplicações, tais como (Inpe - SPRING, 2017):

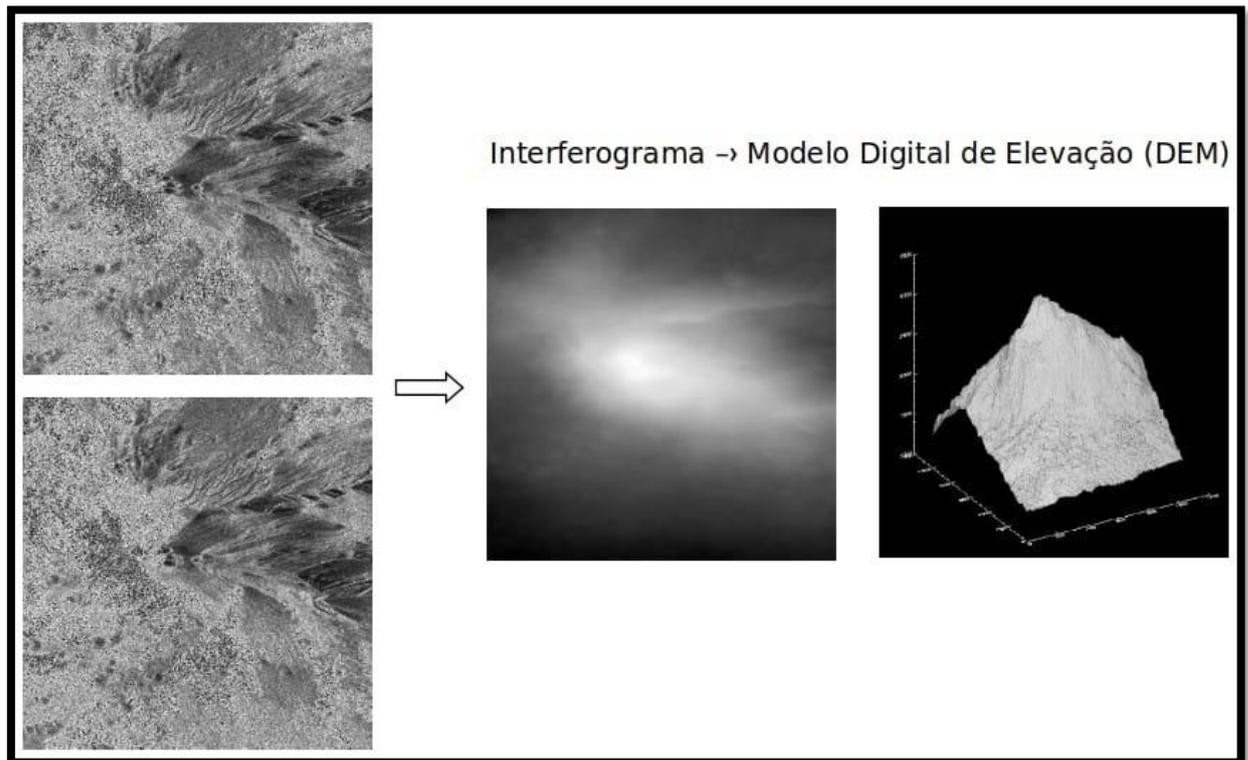
- a) Geologia: na análise de estruturas geológicas (falhas, dobras, fraturas e foliações); litotipos, geomorfologia (relevo e solos) e hidrografia para pesquisa de recursos

- minerais; Avaliação do potencial dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos; Identificação de áreas para prospecção mineral
- b) Agricultura: No planejamento e monitorização agrícola; Identificação, mapeamento e fiscalização de culturas agrícolas; Determinação relativa de umidade de solos; eficiência de sistema de irrigação.
 - c) Cartografia: No levantamento planimétrico (escala 1:5.000 a 1:50.000); Levantamento altimétrico (interferometria);
 - d) Florestas: No gerenciamento e planejamento de florestas; Determinação de grandes classes de floresta; Identificação da ação de determinadas doenças; mapeamento de desflorestamento; identificação de áreas de corte seletivo; estimativa de biomassa;
 - e) Hidrologia: No gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos; Detecção de umidade do solo; Interpretação de parâmetros hidrológicos: transmissividade, direção de fluxo, permeabilidade, vazão, etc;
 - f) Meio Ambiente: no planejamento e monitorização ambiental; Identificação, avaliação e monitorização de recursos hídricos e dos processos físicos do meio ambiente (assoreamentos, erosão, escorregamentos, etc); Identificação e análise da degradação causadas por mineração, deposição de resíduos, ação antrópica, etc; Identificação, análise e monitorização de riscos ambientais;
 - g) Oceanografia: No monitoramento do estado do mar, correntes, frentes de ventos; Espectro de ondas para modelos numéricos de previsão; Mapeamento de topografia submarina (condições específicas); Poluição marinha causada por derrames de óleo e filmes; Detecção de barcos – pesca ilegal; Apoio para estabelecimento de rotas marítimas.

3.3.6 Interferometria

Em um trabalho realizado por Rosa (2004) comenta-se sobre a interferometria InSAR que permite a coleta de informações sobre a superfície terrestre para contribuir com o mapeamento topográfico, permitindo gerar MDE's utilizando-se a diferença de fase (fase interferométrica) entre duas imagens InSAR geradas em posições geométricas com pouca diferença, mas altamente correlacionadas como ilustra a Figura 44. A tecnologia de interferometria InSAR permite a geração de uma enorme variedade de mapas com qualidade de forma rápida e econômica, independente de iluminação e/ou condições climáticas.

Figura 44 – Interferometria



Fonte: Rosa (2016)

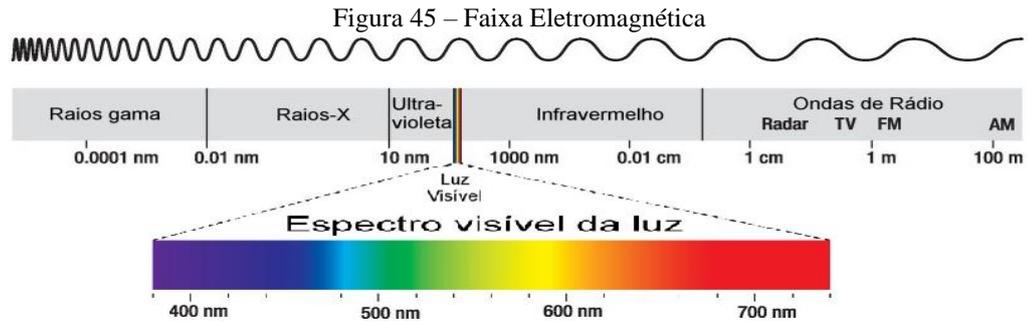
3.3.7 Comparação entre os Sensores Remotos Aerotransportados Radar X

Fotogrametria

O radar e a fotogrametria apresentam características bem distintas uma da outra, que vai desde o modo de aquisição dos dados até o processamento dos mesmos para a geração de produtos cartográficos.

a) faixa eletromagnética

Ambos usam sensores para detectar e registrar energia eletromagnética (vista também com ondas). Na energia existem dois campos perpendiculares entre si: o campo elétrico e o magnético, que variam senoidalmente, utilizando a velocidade da luz como meio de propagação ($2997924 \text{ m/s} \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). A Figura 45 mostra a faixa eletromagnética que mostra o campo de visualização do radar e fotogrametria.



Fonte: Rosa (2016).

De acordo com a Figura 45 observa-se que o radar trabalha na faixa de onda entre 0,75 até 136,00 cm; e já o sensor fotogramétrico utiliza a faixa do visível que varia entre 0,3 a 15 μ m. A visualização da imagem formada pelo sistema de radar está ilustrada na Figura 46 e já a fotogrametria na Figura 47.

Figura 46 – Radar



Fonte: Rosa (2016).

Figura 47 – Aereofotogrametria



Fonte: Graham (1998).

b) sistemas de sensores

O sistema de radar apresenta inúmeras vantagens em relação aos outros sistemas de aquisição existentes que são: adquirir dados em quaisquer condições climáticas (chuvas, nuvens); independe da luz do Sol (sensor ativo), ou seja, pode ser utilizado em qualquer horário do dia e inclusive de noite; utilizar a banda P que atravessa a vegetação, obtendo com isso informações com precisão da superfície abaixo da vegetação; utiliza antena pequena que simula ser maior, diminuindo o tempo de voo e tornando mais barato seus dados; aquisição lateral e também não necessita de pontos em campo para a calibração posicional dos dados. As desvantagens apresentadas pelo sistema que devido à aquisição lateral do mesmo, causa distorções geométricas e radiométricas. Devido a isso, gera ruídos na ortoimagem, causando dificuldades nas interpretações visuais e distorções de feições nela.

3.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Existem vários métodos de aquisição de dados sobre a superfície terrestre. Cada método tem sua particularidade em relação a tecnologia, aquisição e tempo. Esses fatores citados são decisivos na escolha do método.

O método fotogramétrico passou do analógico para o digital devido à evolução da tecnologia. A fotogrametria utiliza sensores fotográficos para capturar imagens de objetos ou da superfície em estudo, seus sensores imageadores podem ser de quadro, quando obtém a imagem da área de estudo num mesmo instante; ou de varredura, por sequência as imagens. Podendo ser ativo (com flash) ou passivo, esse último é que a fotogrametria trabalha (SPRING, 2017). O sistema de câmaras aéreas é composto por sistema GPS de navegação, mecanismo de unidade de medição inercial (IMU), sensor CDD (*Charged Couple Devices* – Dispositivo de Acoplamento de Cargas) (DIAS, 2013). O sensor fotogramétrico ótico utiliza a faixa eletromagnética do visível (0,3 a 15 μ m). Essa região é visível ao olho humano e comporta as três cores primárias que são: vermelho, verde e azul. Com a combinação das três (3) cores pode-se gerar as outras cores (GRAHAM, 1998).

O LiDAR é um sensor ativo e pode ser utilizado em quaisquer condições atmosféricas com nuvens ou neblinas. Podendo ser aerotransportado ou orbital. Funciona emitindo pulso de laser sobre objetos ou superfície, o *laser* reflete quando toca em cada ponto da superfície terrestre, assim obtendo informações sobre a superfície terrestre. Isso é possível através de

dois componentes principais do sistema LiDAR que são: o dispositivo emissor de um feixe de raios *laser*, permite captura informações sobre a superfície terrestre; e o sistema de navegação global por satélite (GNSS, em Inglês - *Global Navigation Satellite System*), permite obter a posição exata dos pontos sobre a superfície terrestre em coordenadas 3D (MENG et al., 2010; REDWEIK, 2012).

O Sistema do Radar transmite e recebe sinais eletromagnéticos através da sua antena. Quando o sistema lança um feixe, esse se alarga durante a propagação no espaço e formando um cone, sendo que irá se dispersar à medida que encontra os obstáculos (objetos) no chão. Com as informações do ponto de partida e de chegada do sinal na antena é possível determinar o posicionamento do objeto. O Radar trabalha em diferentes bandas, tais como: a combinação das bandas X ou C e bandas maiores L ou P que são utilizadas para monitoramento de floresta; as bandas L e P são excelentes para mapeamento de umidade e textura do solo; estudo sobre diferentes plantações requer X, C e L; e para a cartografia as bandas L e P são apropriadas para modelar a informação altimétrica, pois penetram na cobertura da vegetação, e também utiliza a banda menor comprimento de onda (X ou C) com a maior (L ou P) para mapeamento e monitoramento de cobertura vegetal (MUNDOGEO, 2017).

Existem distorções geométricas que são: sombra (*shadow*); inversão (*Layover*) e esforço (*foreshortening*), que prejudicam o processo de aquisição do radar.

Nesta tese foi utilizada a tecnologia de InSAR para confecção da base cartográfica que a partir dela foram confeccionados produtos para a área de geotecnia.

4 CONTROLE DE QUALIDADE POSICIONAL DOS DADOS GEOESPACIAIS

O aparecimento de novas tecnologias na área de cartografia visando o processamento das Informações Geográficas (IG) surge a necessidade de padronização dos dados, para que estas informações possam ser compartilhadas, necessitam que obedecem às normas, resoluções e especificações que vão desde a parte do planejamento até a confecção do produto final. De acordo com Silva (2014), o uso de normas e especificações técnicas traz uma série de benefícios, tais como: redução de custos e tempo em obras, confiança no produto fornecido, credibilidade e visibilidade no mercado. Não é uma tarefa fácil pois exigem profissionais qualificados e com experiência na área para garantir qualidade nos serviços e produtos gerados. A qualidade é um fator importante que diferencia os produtores (ARIZALÓPES, 2011).

Ultimamente os dados das tecnologias estão sendo utilizados indiscriminadamente sem saber se são confiáveis, desconhecendo seus elementos de qualidades, pois esses dados são fáceis de serem manipulados e compartilhados. Por isso normas internacionais e nacionais estudam e desenvolvem métodos avaliativos a serem aplicados em relação à qualidade dos dados espaciais (BRAVO, 2015). Esses dados necessitam ser validados através de testes estatísticos. Os autores Maranhão (2013); Pereira e Nero (2015); Milagros, 2018; Farias et al. (2018); Arcanjo e Anjos (2019) utilizam os testes estatísticos para avaliar a qualidade posicional dos insumos cartográficos como proposto no estudo de Merchant (1982).

A seguir serão apresentados os órgãos que regulamentam as normas e especificações técnicas no Brasil, apresentando o PEC, ET-ADGV, ET-CQDV, IBGE nº 05/1993 e nº 01/2005 e o Manual Técnico de Posicionamento (Georreferenciamento de Imóveis Rurais). Este capítulo apresenta o teste para eliminação dos pontos e o de validação posicional e também a amostra para avaliação dos produtos cartográficos.

4.1 ÓRGÃOS QUE REGULAMENTAM AS NORMAS E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS RELACIONADAS DE DADOS GEOESPACIAIS

No Brasil tem-se um único órgão regulamentador para fins cartográficos Comissão Nacional de Cartografia – CONCAR. A CONCAR (2017) é: “A Comissão Nacional de Cartografia – CONCAR é um órgão colegiado ao Ministério do Planejamento, responsável por fixar as diretrizes e bases de Cartografia brasileira”.

A qual possui atribuições de:

- a) assessorar o Ministro de Estado na supervisão do Sistema Cartográfico Nacional - SCN;
- b) coordenar a execução da Política Cartográfica Nacional; e
- c) exercer outras atribuições nos termos da legislação.

A CONCAR é composta pelo Secretário Executivo; o Presidente e Presidente substituto. Além do representante de cada um dos órgãos e entidades tais como: Casa Civil da Presidência da República; Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão; Ministério das Relações Exteriores; Ministério das Cidades ;Ministério da Educação; Diretoria de Serviço Geográfico do Comando do Exército, do Ministério da Defesa; Diretoria de Hidrografia e Navegação do Comando da Marinha, do Ministério da Defesa; Instituto de Cartografia Aeronáutica do Comando da Aeronáutica, do Ministério da Defesa; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); Associação Nacional das Empresas de Aerolevantamentos (ANEA); Gabinete de Segurança Institucional e ainda Fóruns regionais, de representação das Unidades da Federação tais como: Região Norte, Sudeste, Centro-Oeste e Sul.

A CONCAR (2011) afirma que houve uma expansão na utilização das geotecnologias sem o devido cuidado e isso gerou falta de integração ou padronização e utilização dos dados. Portanto, nesse cenário foi criado a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) pelo decreto nº 6.666/2008.

A INDE representa:

Conjunto integrado de tecnologias; políticas; mecanismos e procedimentos de coordenação e monitoramento; padrões e acordos, necessário para facilitar e ordenar a geração, o armazenamento, o acesso, o compartilhamento, a disseminação e o uso dos dados espaciais de origem federal, estadual, distrital e municipal (BRASIL, 2008).

A Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) atendendo a INDE elabora as normas relacionadas para cartografia através do decreto nº 243/1967. Sendo assim, para controle de qualidade de dados geoespaciais, tem-se a ET-CQDG; para padronizar conjuntos de produtos cartográficos tem-se a ET-PCDG e para aquisição de dados geoespaciais vetoriais é a ET-ADGV, entre outras.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é um órgão responsável por:

Assegurar informações e estudos de natureza estatística, geográfica, cartográfica e demográfica necessários ao conhecimento da realidade física, econômica e social do País, visando especificamente ao planejamento econômico e social e à segurança nacional. (BRASIL, 1973)

O Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) foi criado pelo decreto nº 1 110/1970. A sua missão prioritária de realizar a reforma agrária, manter o cadastro nacional de imóveis rurais e administrar as terras públicas da União.

4.2 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES EXISTENTES

No decorrer dos anos, as normas, decretos e especificações foram sendo aprimoradas para adaptar com as tecnologias existentes de cada época. No site da CONCAR (<http://www.concar.ibge.gov.br/>) são normas que podem ser visualizadas, tais como:

- a) Resolução PR nº 01, de 24 de fevereiro de 2015: Define a data de término do período de transição definido na RPR 01/2005 e dá outras providências sobre a transformação entre os referenciais geodésicos adotados no Brasil;
- b) Resolução PR nº 04, de 18 de fevereiro de 2012: Caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro;
- c) Resolução CONCAR 001/2009 de dezembro de 2009: Homologa o Perfil de Metadados Geoespaciais do Brasil;
- d) Manual de Padronização dos Marcos Geodésicos - 08/2008;
- e) Decreto Nº 6.666, de 27 de novembro de 2008. Institui no âmbito do Poder Executivo Federal, a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE);
- f) Resolução CONCAR 01/2006;
- g) Resolução PR nº 01, de 25 de fevereiro de 2005: Caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro;
- h) Decreto s/nº, de 10 de maio de 2000. Dispõe sobre a Comissão Nacional de Cartografia - CONCAR, e dá outras providências;
- i) Decreto s/nº, de 21 de junho de 1994. Cria a Comissão Nacional de Cartografia - CONCAR, e dá outras providências;
- j) Resolução PR nº 05, de 31 de março de 1993: Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS (preliminares);

- k) Resolução PR n° 23, de 21 de fevereiro de 1989: Parâmetros para Transformação de Sistemas Geodésicos;
- l) Decreto n° 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional;
- m) Resolução PR n° 22, de 21 de julho de 1983. Estabelece as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em território brasileiro e efetua alteração no Apêndice II da Resolução da Presidência do IBGE N° 22, de 21/07/83, relacionada a Parâmetros para Transformação;
- n) Normas Técnicas da Cartografia Nacional (Decreto n° 89.817, de 20 de junho de 1984);
- o) Especificações Gerais e Padronização para Elaboração das Normas Cartográficas Brasileiras (NCB - CC/G 0001/84);
- p) Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em Território Nacional (IBGE Resolução PR n° 22, de 21 de julho de 1983); e
- q) Decreto-Lei n° 243, de 28 de fevereiro de 1967. Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira e dá outras providências.

No site do Geoportal do Exército Brasileiro (<http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2>) pode-se encontrar comentários sobre as especificações técnicas existentes e adotadas nacionalmente para produtos relacionados e correlacionados a cartografia do Brasil.

- a) ET-EDGV - Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (define um modelo conceitual);
- b) ET-ADGV - Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (define regras de aquisição da geometria dos dados);
- c) ET-PCDG - Especificação Técnica de Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (define os padrões dos produtos vetoriais e matriciais);
- d) ET-RDG - Especificação para a Representação de Dados Geoespaciais (garante a consistência na representação das classes de objetos); e
- e) ET-CQDG - Especificação Técnica para o Controle de Qualidade dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (define os procedimentos para o controle de qualidade dos produtos).

Analisando as normas, decretos e especificações existentes para os objetivos da tese, conclui-se que este trabalho utilizará o decreto nº89.817/84 que estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia Nacional, que inclui a criação da PEC em relação ao controle posicional. A ET-CQDG que lista os elementos de qualidades que devem ser analisados para aprovação ou não do produto cartográfico. A ET-PCDG mostra quais são os produtos cartográficos e quais elementos de qualidades devem ser utilizados em cada um dos produtos em estudos. A ET-ADGV é relacionada à parte de aquisição dos dados em relação à geometria. O PEC-84 e ET-ADGV serão detalhadas nos subitens abaixo em relação à qualidade posicional planialtimétrica.

4.2.1 Precisão de Exatidão Cartográfica (PEC) e Especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre (ET-ADGV-DefesaFT)

O Decreto nº89.817/1984 cria o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para estabelecer critérios/padrões de classificação de cartas através de exatidão e indicador estatístico da qualidade posicional. O PEC foi criado para processos óptico-mecânico-manuais que eram utilizados na produção de documentos cartográficos. Neste decreto existem as classificações das cartas em categorias (ou classes) que são: A, B e C de acordo com a sua exatidão e distribuição de erros. Tendo a classificação para dados planimétricos e altimétricos que segue os seguintes requisitos: para as coordenadas planimétricas, os pontos que estão definidos em um cartão noventa por cento não devem apresentar erro superior ao PEC - Planimétrica e já para as coordenadas altimétricas os pontos de altitude interpolado, que foram gerados pelas curvas de níveis não devem ultrapassar o erro superior definido na PEC - Altimetria. A PEC é um indicador estatístico de dispersão utilizado na cartografia, onde a probabilidade de 90% equivale a 1,6449 vezes o erro-padrão – $PEC = 1,6449 EP$.

A Tabela 3 apresenta as categorias (classes) de classificação das coordenadas planimétricas e altimétricas.

Tabela 3 – Controle de Qualidade.

Classes	Planimétrico		Altimétrico	
	PEC	Erro Padrão	PEC	Erro Padrão
A	0,5 mm	0,3 mm	1/2 equidistância	1/3 equidistância
B	0,8 mm	0,5 mm	3/5 equidistâncias	2/5 equidistâncias
C	1,0 mm	0,6 mm	3/4 equidistâncias	1/2 equidistância

Fonte: PEC (84).

Observando a Tabela 3, na qual estão apresentadas resumidamente as classes de precisão, estas são definidas como:

- a) Classe A: $0,5 * Escala = \text{planimétrico}$ e $0,3 * Escala = \text{Erro-padrão}$; e $1/2$ equidistância entre as curvas de níveis e $1/3$ equidistância do erro-padrão correspondente para altimetria;
- b) Classe B: $0,8 * Escala = \text{planimétrico}$ e $0,5 * Escala = \text{Erro-padrão}$; e $3/5$ equidistâncias entre as curvas de níveis e $2/5$ equidistâncias do erro-padrão para a altimetria;
- c) Classe C: $1,0 * Escala = \text{planimétrico}$ e $0,6 * Escala = \text{Erro-padrão}$; e $3/4$ equidistâncias entre as curvas de níveis e $1/2$ equidistância do erro-padrão para a altimetria.

4.2.2 Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geospaciais Vetoriais (ET-ADGV)

A ET-ADGV (2015) contém os capítulos I a IV e os anexos A e B. No primeiro capítulo aborda os aspectos gerais, apresentando as necessidades de estabelecer um padrão para os dados para a execução do planejamento e das ações de defesa e segurança no Espaço Geográfico Brasileiro (EGB). O capítulo II desta norma aborda os critérios gerais para aquisição das feições, que deve levar em consideração a escala de aquisição do produto final, as dimensões destes objetos, entre outros. O capítulo III apresenta as orientações para a aquisição dos atributos das feições que aborda o PEC em relação à geometria, metadados e orientações das feições. O capítulo IV apresenta as informações gerais abordando que participa na elaboração desta norma. O Anexo A apresenta critérios de aquisição das feições dos MapTopoPE e MapTopoGE, em função da escala e o B construtores da geometria dos objetos do mapeamento topográfico. O Glossário apresenta as abreviaturas e siglas (ET-ADGV, 2015).

Dentro do Capítulo III, no subitem 3.1 Padrão de exatidão cartográfica do atributo “geometria” das feições, existem as tabelas que apresenta o Padrão de Exatidão Cartográfica (EP) Planimétrica e Altimétrica dos Pontos para a produção de Produtos Cartográficos Digitais (ET-ADGV, 2015).

Portanto, para que o produto seja aceito como referência SCN e INDE, os dados coletados têm que ter noventa por cento (90% ou $1,6449 * EP$) dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico, em relação às suas coordenadas levantadas em campo através da utilização de método de alta precisão, os valores apresentados devem ser iguais ou inferiores aos previstos ao PEC-PCD e também os valores de EP.

As especificações sobre os valores previstos de acordo com as classes desejadas do Modelo Digital de Terreno (MDT), de Elevação (MDE e de Superfície (MDS) e os Pontos Cotados, foram baseadas a partir de adaptações dos estudos realizados por Merchant (1982) e ASPRS (1989), nos quais o $PEC-PCD = 0,27 * \text{Equidistância do produto cartográfico}$ e o $EP = 1/6 * \text{Equidistância do produto cartográfico}$ como ilustra a Tabela. Observando que as classes “B”, “C” e “D” do PEC-PCD correspondem, em ordem, às classes “A”, “B”, “C” do PEC Altimétrico previstas no Decreto 89.817/1984. O PEC-PCD Altimétrico e o EP correspondentes as classes “A”, “B” e “C” são respectivamente, às classes “A”, “B” e “C” do PEC Altimétrico previstas no Decreto 89.817/1984.

A Tabela 4 apresenta as escalas tratada na PEC-PDC, que são: 1:1.000; 1:2.000; 1:5.000; 1:10.000; 1:25.000; 1:50.000; 1:100.000 e 1:250.000. É necessária interpolação para as escalas que não abrange o decreto obedecendo os valores previstos do PEC Planimétrico e do PEC Altimétrico e também existem alguns produtos cartográficos digitais foram determinados novos valores com base nos trabalhos de Merchant (1982), ASPRS (1989) e Ariza (2002). Observando que os produtos foram classificados em 4 classes (“A”, “B”, “C” e “D”). Sendo que “B”, “C” e “D” correspondem, nessa ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC Planimétrico previstas no Decreto nº 89.817/1984.

Tabela 4 – Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos para a produção de Produtos Cartográficos Digitais

Classes (PEC)	Classes (PEC-PCD)	Planimetria		Altimetria	
		PEC	Erro Padrão	PEC	Erro Padrão
	A	2,80 m	1,70 m	1,35 m	0,84 m
A	B	5,00 m	3,00 m	2,50 m	1,67 m
B	C	8,00 m	5,00 m	3,00 m	2,00m
C	D	10,00 m	6,00 m	3,70 m	2,50 m

Fonte: ET-ADGV (2015).

Dalmolin e Leal (2001) comenta que o PEC está atrasado em relação aos trabalhos ofertados pela cartografia digital, pois, o decreto foi em 1984. Santos (2010) que utiliza o PEC para avaliar os produtos gerados de *laser scanner* já que não há normas naquela época.

Carvalho (2018) escreve que o PEC foi atualizado para o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC – PCD), mas que ambos os PEC’s não apresentam de forma clara como são realizados os procedimentos metodológicos de avaliação sobre a qualidade.

4.2.3 Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)

A Especificação Técnica para Controle de Qualidade dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-CQPCDG) foi atualizada para Especialização Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG). A norma está organizada em cinco (5) capítulos: o primeiro (1) apresenta os objetivos, organização estrutural e as normas consultadas nacionais e internacionais para elaboração da mesma. O segundo (2) aborda sobre a avaliação da qualidade, trazendo definições que consolidam o entendimento da norma, ou seja, conceitos, princípios e componentes de qualidades, e ainda fala sobre amostragem. Já no terceiro (3) lista um conjunto de medidas de qualidade que estão tabeladas o que possibilita uma visualização geral e resumida de todo o conteúdo. As tabelas estão organizadas de acordo com indicadores, elementos correspondentes, classificados em categorias e entre outros. O quarto (4) contempla procedimentos que são utilizados para avaliar a qualidade de cada tipo de produto da ET-PCDG. E o quinto (5) e último capítulo informa o padrão de relatório da análise de qualidade (ET-CQDG, 2016).

Os princípios de qualidade considerados na ET-CQDG são baseados na ISO 19157/2013 em relação às categorias de conjunto de dados. A ISO 19157/2013 define duas classes de categorias de conjunto de dados: informação não quantitativa da qualidade é de caráter geral, tem um grande interesse de saber histórico e objetivo da informação; e informação quantitativa da qualidade é relacionada ao comportamento da informação geográfica (IG) que pode ser mensurado. A ISO trata sobre os elementos de qualidade (ou componentes da qualidade) que estão agrupados em cinco (5) categoriais e subclassificações em outras (ARIZA, 2002; NOGUEIRA JR, 2003; SANTOS, 2010) de acordo com o resumo no Quadro 2. Cada um dos elementos de qualidade citados na Tabela define critérios de análise da qualidade de dados durante a produção dos produtos cartográficos, esses podem ser vistos com maior detalhe na especificação técnica citada. Esta tese abordará a parte de acurácia posicional e também a inspeção por amostragem, no intuito de realizar o controle de qualidade posicional dos dados adquiridos em campo.

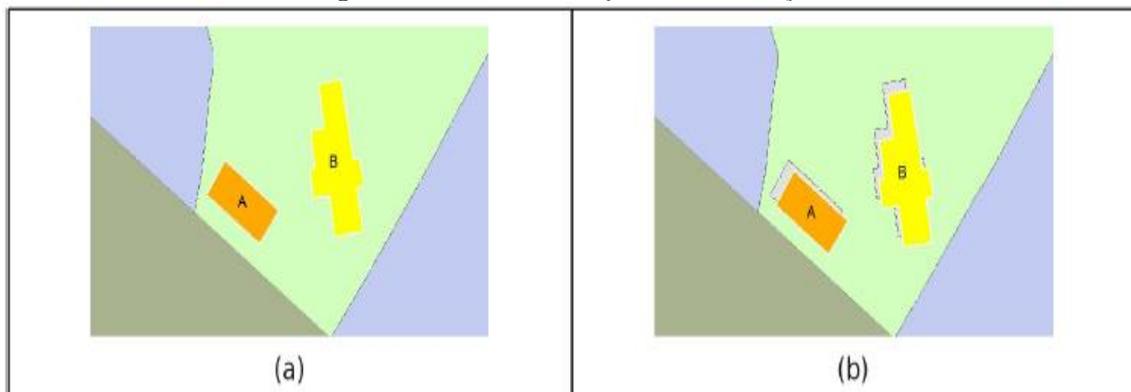
Quadro 2 – Elementos de Qualidade

Categorias	Atribuição	Classificação
Compleitude	É relacionada as feições de informações geográficas	Ausência
		Presença
Consistência Lógica	As regras lógicas da estrutura dos dados, das relações e dos atributos	Consistência Conceitual
		Consistência domínio
		Consistência formato
		Consistência topológica
Acurácia Posicional	A qualidade do posicionamento do conjunto de coordenadas geográficas dos dados geoespaciais	Absoluta ou Externa
		Relativa ou Interna
		Do Grid
Acurácia Temporal	A exatidão obtida no componente temporal dos dados geoespaciais.	Exatidão de uma medida com o tempo
		Consistência Temporal
		Validade Temporal
Acurácia Temática	A interpretação dos atributos e feições, como também seu ajuste nas classes previstas no modelo conceitual	Acurácia de Classificação
		Acurácia de Atributos não Quantitativos
		Acurácia de Atributos Quantitativos

Fonte: ISO 1915 (/2013); ET – CQDG (2016).

A especificação técnica mostra que a acurácia posicional é em relação à posição geográfica das coordenadas do conjunto de dados geoespaciais. São classificadas em: absoluta ou externa, em relação às discrepâncias entre as coordenadas da representação da feição e as coordenadas das feições na fonte de maior precisão; relativa ou interna, em relação às discrepâncias entre as posições relativas dos objetos e as posições relativas reais ou aceitadas como sendo certas; e do grid, é aplicado os conceito de acurácia posicional absoluta nos dados que estão em uma malha regular. Portanto, enquadram-se nesta classe as avaliações que forem feitas sobre malhas de pontos de Modelos Digitais de Elevação (MDE) (ET-CQDG, 2016). A Figura 48 ilustra que há deslocamento nas feições representas.

Figura 48 – Deslocamento posicional de feições



Fonte: DSG (2015).

A especificação não distingue estes dois tipos de erros (relativos e absolutos), pois García-Balboa (2011) diz que erros posicionais relativos são decorrentes dos erros posicionais absolutos. Sendo assim ET-CQDG não trata acurácia posicional relativa ou interna. Maranhão (2013) comenta que para calcular a acurácia posicional é necessário fazer as diferenças das coordenadas de feições de uma fonte de maior referência entre seus pontos homólogos no produto a ser avaliado, assim comparando o desvio padrão adquirido com a importância que deveria ser na escala e verificar se o produto em exigência mínima de acurácia posicional.

4.2.4 IBGE PR n° 05/1993 - Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS: versão preliminar e o planejamento de campo

A norma apresenta e resume os distintos métodos (ou técnicas) de posicionamento, e também as observáveis de cada uma com seus respectivos tempo e precisões. Essas técnicas apresentadas são: Ponto preciso, posicionamento relativo estático, estático-rápido, semicinemático, e cinemático e também comenta sobre a classificação de cada receptor (navegação, topográfico e geodésico). Ainda na mesma norma tem explicações sobre a Estação de Referência, efemérides, erros nas observáveis GPS e coordenadas determinadas e traz o processamento das observáveis e a integração a referencial geodésico (Silva, 2014).

Silva (2014) ressalta a importância da norma do IBGE a PR n° 5 (1993) - Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS: versão preliminar e o planejamento de campo que vai desde a escolha do local ou área de estudo para implantação dos marcos até as observáveis em campo.

4.2.5 IBGE RP n° 01/2005 - Sistema de Referência Brasileiro

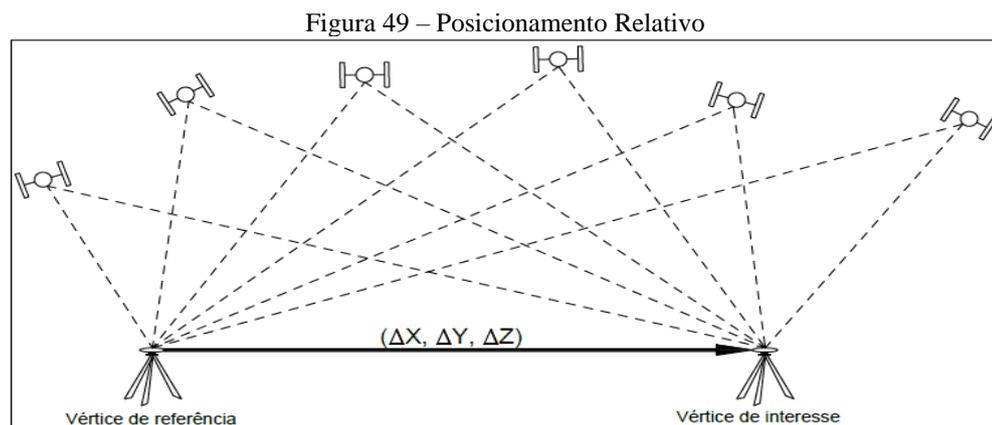
O Decreto n° 4.740/2003 – IBGE define que em 25 de fevereiro de 2015 é o prazo para transição dos produtos cartográficos para o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) cuja nomenclatura é SIRGAS2000. O decreto diz como poderá fazer transformações de coordenadas entre os sistemas geodésicos anteriores para o atual e ainda o decreto n° 5.334/2005 revoga o art. 22 do Decreto n°89.817/1984 para:

Os referenciais planimétricos e altimétricos para a Cartografia Brasileira são aqueles que definem o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), conforme estabelecido pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, em suas especificações e normas.

4.2.6 Manual Técnico de Posicionamento (Georreferenciamento de Imóveis Rurais) produzido pelo INCRA

O Manual Técnico trata de métodos de posicionamentos que são utilizados em serviços de imóveis rurais. Este manual está dividido em 10 capítulos. O primeiro capítulo é a introdução mostrando resumidamente quais as novas mudanças ocorridas na edição anterior que são: novos métodos de posicionamento; menor detalhamento de especificações técnicas (atribuindo esta tarefa ao credenciado); utilização do Sistema Geodésico Local (SGL) para o cálculo de área; apresenta a formulação matemática para cálculos utilizando topografia clássica e amplia a possibilidade de utilização de métodos de posicionamento por sensoriamento remoto.

Os capítulos de 2 ao 5 tratam de métodos de posicionamento que são utilizados em serviços relacionados aos imóveis rurais no posicionamento de vértices de referência e vértices de limites que podem ser artificiais e naturais. Os métodos de posicionamento apresentado nesta norma técnica são: 2. Posicionamento por GNSS; 3. Posicionamento por Topografia Clássica; 4. Posicionamento por Geometria Analítica e 5. Posicionamento por Sensoriamento remoto. O capítulo 2 sobre o posicionamento com *Global Navigation Satellite System* (GNSS), apresenta o posicionamento relativo, RTK, DGPS e posicionamento por ponto preciso. O método de posicionamento importante para esta tese é o posicionamento relativo estático que é baseado em obter coordenadas de vértices de interesse utilizando um ou mais vértices de coordenadas conhecidas. Neste método são utilizados dois ou mais receptores GNSS que obtenham dados simultaneamente, mas pelo menos um receptor esteja no vértice de referência como ilustra a Figura 49. O tempo de rastreamento irá depender da linha de base e das observáveis como ilustra a Tabela 5.



Fonte: INCRA (2013).

Tabela 5 – Características técnicas para posicionamento relativo estático

Linha de Base (km)	Tempo Mínimo (minutos)	Observáveis	Solução da Ambiguidade	Efemérides
0 – 10	20	L1 ou L1/L2	Fixa	Transmitidas ou Precisas
10 - 20	30	L1/L2	Fixa	Transmitidas ou Precisas
10 - 20	60	L1	Fixa	Transmitidas ou Precisas
20 – 10	120	L1/L2	Fixa ou Flutuante	Transmitidas ou Precisas
100 – 500	240	L1/L2	Fixa ou Flutuante	Precisas
500 – 1000	480	L1/L2	Fixa ou Flutuante	Precisas

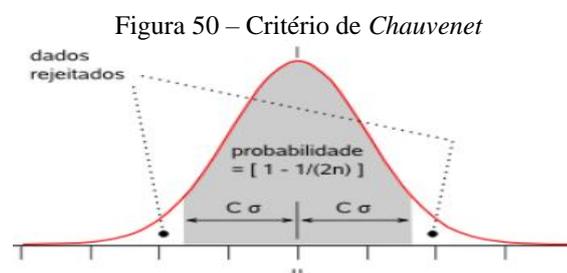
Fonte: INCRA (2013).

O capítulo 6 trata da obtenção de coordenadas a partir de bases cartográficas. Já o capítulo 7 apresenta quais os métodos de posicionamento podem ser empregados no posicionamento de vértices de apoio e limite, mostrando os tipos de métodos terrestres e espacial. O capítulo 8 trata de compatibilidade entre os métodos de posicionamento e tipos de vértices. O capítulo 9 apresenta as formulações matemáticas, tais como: cálculo de área, distâncias e azimute, também conversão de coordenadas geocêntricas para locais. E o último capítulo apresenta tais fundamentos de armazenagem de material.

4.3 TESTE DE ELIMINAÇÃO DE PONTOS

O Critério de Chauvenet permite detectar na amostra analisada os outliers, ou seja, as medidas dos pontos que estão fora da curva determinada. Essa medida é a discrepâncias sendo analisada em relação às outras encontradas dentro da amostra com distribuição normal.

O teste Chauvenet utiliza hipótese que pode ser rejeitada ou não, isso depende se a probabilidade de obter o desvio da média para este valor é menor do que o inverso do dobro do número de medições (TAYLOR, 2012). A Figura 50 apresenta a distribuição normal apresentando sucintamente o intervalo onde os dados são rejeitados e a probabilidade de maneira genérica, pois os valores dos intervalos estão apresentados na Tabela 6.



Fonte: Soares (2013).

Tabela 6 – Critério de *Chauvenet*

Tamanho da Amostra (N)	Máximo “C” (em desvio)	Tamanho da Amostra (N)	Máximo “C” (em desvio)
3	1,38	15	2,13
4	1,54	20	2,24
5	1,65	21	2,26
6	1,73	22	2,28
7	1,80	23	2,30
8	1,87	24	2,31
9	1,91	25	2,33
10	1,96	28	2,37

Fonte: Chauvenet (1863).

O teste apresentado permite determinar se um valor amostral (resultante de uma medida) é discrepante (ou, no termo em inglês, *outlier*) em relação aos demais valores restantes da amostra, supondo-se que esta amostra é retirada de uma distribuição normal.

A Equação 1 apresenta

$$Z[I] = \frac{|S[I] - \mu|}{\sigma} \quad (1)$$

Onde:

$S[I]$ = valor suspeito;

μ = média da amostra;

σ = desvio-padrão da amostra;

Sendo assim, quando o valor $Z[I]$ é maior “C” está fora da amostra, ou seja, o valor está fora do valor esperado (Figura 50). Assim, deve ser calculada novamente agora sem o valor eliminado para obter o resultado final.

4.4 TESTE DE VALIDAÇÃO POSICIONAL

Os autores Tomaselli, Monico e Camargo (1988), Galo e Camargo (1994) e Dalmolin e Leal (2001) apresentam que é necessário complementar o PEC baseada no estudo de Merchant (1982), utilizando as propostas estatísticas que envolvem a verificação de precisão e tendências nas medições das coordenadas planialtimétricas das cartas.

4.4.1 Análise de Qualidade dos Pontos

De acordo com Gemael (1994), a presença de erros – que podem ser causados por falhas humanas, imperfeições de equipamentos e influência no meio ambiente [...] – é inevitável e, por esta razão, é necessário abdicar de obter o valor verdadeiro de uma grandeza. Segundo o autor, os erros são classificados como: grosseiros, gerados pela desatenção do operador; sistemáticos, que são advindos de causas conhecidas e podem ser evitados, utilizando técnicas especiais; e aleatórios, provenientes de causas desconhecidas e que permanecem nas observações. Deste modo, no intuito de saber a precisão dos dados geográficos, é necessária a aplicação de testes estáticos que atentem quanto à confiabilidade das informações. Sendo assim, para minimizar esses erros, são utilizados normas e teste de validação, no intuito de todos os produtos que contêm o mesmo intervalo de erros possam ser classificados e métodos estatísticos que padroniza dentro do intervalo quanto em porcentagem eu admito de erros.

4.4.2 Teste de Validação Posicional Planialtimétrica

Ariza (2002) aborda seis (6) diferentes testes para a validação da acurácia posicional dos pontos, Maranhão (2013) exemplifica esses métodos através dos Quadro 3 e 4. Os testes estatísticos EMAS, NMAS e ASPRS realizam a validação posicional nos componentes horizontal e vertical, o teste NSSDA realiza a validação posicional planimétrica utilizando o conjunto de dados nos eixos X e Y; e o Teste da USGS realiza a validação posicional vertical, todos os testes citados utilizam a comparação com uma fonte de maior precisão. Esses testes necessitam de pelos menos uma amostra de 20 pontos do produto e de uma fonte de maior precisão.

Quadro 3 – Testes de Acurácia Posicional 01

Teste de Acurácia	Método de Comparação	Componente posicional	Descrição
NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy).	Fontes de maior exatidão	Horizontal e vertical.	Com a obtenção do EMQ para XY por um lado, e para Z por outro, calcula-se o erro real da amostra em função de um determinado nível de confiança imposto pelo usuário (geralmente 95 %). Este teste mostra um índice de qualidade da cartografia em unidades reais sobre o terreno.
Teste da USGS (U.S. Geological Survey) para MDE (Modelo Digital de Elevação)	Fontes de maior exatidão	Vertical.	O teste baseia-se na quantificação de níveis de precisão, que depois são utilizados para determinar a categoria de precisão do MDE.

Fonte: Maranhão (2013).

Quadro 4 – Testes de Acurácia Posicional 02

Teste de Acurácia	Método de Comparação	Componente posicional	Descrição
NMAS (National Map Accuracy Standard)	Fontes de maior exatidão	Horizontal e vertical	Estabelecimento do erro comparando as coordenadas de amostragem de pontos no produto com as coordenadas de pontos em fontes de maior exatidão dentro de um limite das componentes.
Teste da ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing)	Fontes de maior exatidão	Horizontal e vertical	Para mapas de melhor qualidade (Classe I), se estabelece limites ao EMQ para as componentes X e Y conforme escala do mapa. Na altimetria se considera que o EMQ é de 1/3 do intervalo entre curvas de nível, exceto em caso de pontos cotados que será de 1/6. Os limites para os mapas de classes II e III se obtém multiplicando os valores dados para classe por dois e por três. Especifica a exatidão de mapas topográficos em escalas grandes.
EMAS (Engineering Map Accuracy Standard)	Fontes de maior exatidão	Horizontal e vertical	Baseado na hipótese sobre limites aceitáveis para erros aleatórios e sistemáticos. Avalia valores aceitáveis de erros e níveis de confiança. Especifica a exatidão de mapas topográficos em escalas grandes.

Fonte: Maranhão (2013).

4.4.2.1 Teste Engineering Map Accuracy Standard (EMAS)

A validação da acurácia posicional é realizada através de testes estatísticos. Os autores Ariza (2002), Pereira e Nero (2012), Vieira e Genro (2013), Maranhão (2013) e Milagros (2018) abordam o teste *Engineering Map Accuracy Standard* (EMAS) para a avaliação do controle posicional. Este teste foi desenvolvido pela Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE) junto com a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS) e apresentado no Congresso americano em Agrimensura e Cartografia e da Sociedade Americana de Fotogrametria em 1982 (ARIZA, 2002 apud VEREGIN y GIORDANO, 1994).

O teste EMAS é realizado com uma amostra de pelo menos vinte (20) pontos para realizar o teste, sendo o tipo de feição o ponto, sendo avaliada separadamente a componente posicional horizontal e vertical, por isso, cada erro é analisado individualmente (Ariza, 2002; Pereira e Nero, 2012; Maranhão, 2013). O teste citado é realizado para determinar se o conjunto de dados analisado (amostra) tem erros sistemáticos ou aleatórios. Portanto, empregando as seguintes equações para realizar o controle de qualidade posicional para cada componente de acordo com Ariza (2002):

- a) Calcular o erro em relação a cada ponto nos eixos X (e_{xi}), Y (e_{yi}) e Z (e_{zi}), conforme Equações 2, 3 e 4, respectivamente:

$$e_{xi} = xt_i - xm_i \quad (2)$$

$$e_{yi} = yt_i - ym_i \quad (3)$$

$$e_{zi} = zt_i - zm_i \quad (4)$$

Onde:

xt_i = Coordenada do ponto no eixo X sobre o terreno de maior precisão;

yt_i = Coordenada do ponto no eixo Y sobre o terreno de maior precisão;

zt_i = Coordenada do ponto no eixo Z sobre o terreno de maior precisão;

xm_i = Coordenada do ponto no eixo X sobre o terreno.

ym_i = Coordenada do ponto no eixo Y sobre o terreno.

zm_i = Coordenada do ponto no eixo Z sobre o terreno.

- b) Determinar o Erro Médio dos pontos nos eixos X (\acute{e}_{xi}), Y (\acute{e}_{yi}), e Z (\acute{e}_{zi}), de acordo com as Equações 5, 6 e 7 respectivamente:

$$\acute{e}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{xi} \quad (5)$$

$$\acute{e}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{yi} \quad (6)$$

$$\acute{e}_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{zi} \quad (7)$$

n = número do tamanho da amostra adquirida em campo.

- c) Calcular o desvio-padrão (S) – Equações 8, 9 e 10:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_{xi} - \acute{e}_x)^2} \quad (8)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_{yi} - \acute{e}_y)^2} \quad (9)$$

$$S_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_{zi} - \acute{e}_z)^2} \quad (10)$$

d) É realizado o teste de conformidade, utilizando os limites de erro aceitáveis em relação aos erros sistemáticos e aleatórios.

a) Em relação ao erro sistemático - Equações 11, 12 e 13, onde obtém-se o cálculo da estatística amostral (t):

$$t_x = \frac{\acute{e}_x \sqrt{n}}{s_x} \quad (11)$$

$$t_y = \frac{\acute{e}_y \sqrt{n}}{s_y} \quad (12)$$

$$t_z = \frac{\acute{e}_z \sqrt{n}}{s_z} \quad (13)$$

Em posse destes valores, se verifica a estatística amostral “t” na tabela da distribuição *t-Student*. Para tal, utilizam-se as discrepâncias das médias amostrais adquiridas em cada eixo das coordenadas coletadas em certo grau de liberdade ($n - 1$) e nível de significância ($\alpha/2$), e empregam-se a Equação 14.

$$|t_x| \leq |t_y| \leq |t_z| \leq t_{n-1, \alpha/2} \quad (14)$$

Admite-se que o valor de $t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}$ calculado esteja sem tendências nas direções cartesianas.

b) Em relação aos erros aleatórios - Efetua-se o teste X^2 para determinar o grau de variabilidade de erros aleatórios, conforme Equações 15, 16 e 17:

$$X_x^2 = \frac{s_x^2(n-1)}{\sigma_x^2} \quad (15)$$

$$X_y^2 = \frac{s_y^2(n-1)}{\sigma_y^2} \quad (16)$$

$$X_z^2 = \frac{s_z^2(n-1)}{\sigma_z^2} \quad (17)$$

Onde σ_x , σ_y e σ_z são as variâncias máximas aceitáveis para os erros nas dimensões X, Y e Z. Após o resultado, faz uma comparação entre os valores obtidos e os tabelados do Teste X^2 – Equação 18.

$$|X_x^2| \leq |X_y^2| \leq |X_z^2| \leq X_{n-1,\alpha}^2 \quad (18)$$

4.4.2.2 Teste National Map Accuracy Standard (NMAS)

O teste NMAS é utilizado há bastante tempo (desde 1947) na área do mapeamento da USGS para a validação posicional, usando os seguintes procedimentos para realizar a validação posicional dos pontos (ARIZA, 2002):

1. Verifica-se se o padrão predefinido de precisão horizontal foi atingido e vertical.

- De acordo o padrão estabelecido pelo *United States Geological Survey* (USGS), no máximo, 10% dos pontos da amostra podem ter um erro horizontal maior que 0,08 cm (1/30 pol) em mapas de escala maior que 1:20.000 ou 0,05 cm (1/50 pol) para mapas com uma escala menor que 1: 20.000.

- Sendo que no máximo de 10% dos números selecionados da amostra pode ter um erro vertical maior que a metade do intervalo entre os contornos. Assim, o erro na dimensão vertical pode ser corrigido variando a posição dos pontos em um valor igual ao erro horizontal aceitável.

4.4.2.3 Teste American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)

O teste ASPRS é utilizado em produtos cartográficos em grandes escalas, utilizando os seguintes procedimentos para realizar o controle de qualidade posicional (ARIZA, 2002):

1. Calcula-se a Raiz do Erro Quadrático Médio (ing. Root Mean Square Error – RMSE) para cada componente, por exemplo, para o componente X e Y – Equações 19 e 20:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xt_i - xm_i)^2}{n}} \quad (19)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (yt_i - ym_i)^2}{n}} \quad (20)$$

Onde:

xt_i = coordenada do ponto i no solo ou na fonte de maior precisão;

yt_i = coordenada do ponto i no solo ou na fonte de maior precisão;

xm_i = coordenada do ponto i sobre o Banco de Dados Geográfico (BDG);

ym_i = coordenada do ponto i sobre o Banco de Dados Geográfico (BDG);

2. Verifica-se a conformidade com o padrão usando os limites de erro definidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Requisitos para Precisão do Teste ASPRS

Requisitos para precisão planimétrica em coordenadas X ou Y para pontos bem definidos em mapas de classe I	
Escala do Produto	RMSE limite (m)
1:10.000	2.50

Fonte: Ariza (2002).

4.4.2.4 Teste National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)

O teste NSSDA é utilizado pelas agências federais dos Estados Unidos na produção de validação dos dados cartográficos analógicos e / ou digitais que devem cumprir os padrões do Comitê Federal de Dados Geográficos (FGDC). Este teste realiza os seguintes procedimentos para validação posicional (ARIZA, 2002):

1. Calcula-se o $RMSE_x$ e $RMSE_y$ para os componentes X e Y, utilizando as equações 19 e 20.

2. Calcula-se $RMSE_r$ para o componente posicional (XY) de acordo – Equação 21:

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (21)$$

3. Calcula-se o coeficiente de precisão posicional com 95% de confiança, dependendo de duas opções:

a) No caso que $RMSE_x = RMSE_y$ - Equação 22:

$$Precisão_r = 1.7308 * RMSE_r \quad (22)$$

b) No caso que $RMSE_x \neq RMSE_y$ - Equação 23:

$$Precisão_r = 1.22385 * (RMSE_x + RMSE_y) \quad (23)$$

4. Calcula-se o $RMSE_z$ para o componente Z – Equação 24.

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (zt_i - zm_i)^2}{n}} \quad (24)$$

Onde:

e_{zi} =o erro em relação Z;

zt_i = Coordenada do ponto no eixo Z sobre o terreno de maior precisão;

zm_i = Coordenada do ponto no eixo Z obtida no Base de Dados Geográficos (BDG);

5. Calcula-se o coeficiente de exatidão posicional com 95% de confiança para o componente Z – Equação 25:

$$Precisão_z = 1.96 * RMSE_z \quad (25)$$

Este teste permite que sejam definidos os limites de aceitação dos trabalhos cartográficos (pelo usuário ou agência de cartografia). Como também substitui os testes NMAS e o ASPRS (ARIZA, 2002).

4.4.2.5 United States Geological Survey (USGS)

O teste USGS é utilizado para definir a precisão do MDT. Este teste realiza os seguintes procedimentos para validação posicional (ARIZA, 2002):

- a) É realizado o cálculo do RMSE na componente vertical Z ($RMSE_z$) utilizando a Equação 23;
- b) É definida a categoria de precisão do MDT de acordo com os níveis apresentados abaixo.
 - a) Nível 01: Se o valor máximo do RMSE é igual a 15 metros, a amostra analisada não deve ter pontos com erro vertical superior a 50 metros;
 - b) Nível 02: Se o valor máximo do RMSE é igual a 7 metros, a amostra analisada não deve ter pontos com erro vertical seja maior que o dobro do intervalo das linhas de contorno da fonte de alta precisão;
 - c) Nível 03: Se o valor máximo do RMSE é igual a 7 metros, a amostra analisada não deve ter pontos com erro vertical maior que o intervalo das curvas de nível de fonte de alta precisão.

Onde o erro vertical (e_{zi}) é calculado, conforme a Equação 4.

4.5 AMOSTRA PARA AVALIAÇÃO DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

A amostra é uma inferência sobre a população investigada. A partir de amostra são retiradas as conclusões sobre a população investigada. Logo Bussab (2005) diz que a amostra é um subconjunto da população, onde a população é o conjunto de todos elementos investigados.

Assim é uma etapa importante na hora do planejamento, saber quantos pontos são necessários para a representação da área de estudo. Esta representação da área não é uma tarefa fácil, principalmente por não existe normas ou leis sobre a quantidade necessária de pontos que devesse coletar em campo através da utilização dos receptores GNSS. A legislação vigente no Brasil tais como: decretos ou normas, não trata como ou quais devem ser os critérios ou procedimentos de escolha do tamanho da amostra para validar os produtos cartográficos gerados por método de levantamento por satélites. Existe a NBR 13.133/1994

que comenta sobre a densidade mínima de pontos a serem medidos em campo utilizando teodolito ou estação total. Por isso, buscou-se em literaturas dos autores: Merchant (1982); NBR 13.133/1994; Barbeta (2001); Nogueira Júnior (2003), Bussab (2005); ASPRS (2015) embasamentos teóricos e práticas de como aprimorar a qualidade dos dados coletados dentro da área de estudo.

4.5.1 Tipos de Amostras

Não é possível adquirir todos os pontos da superfície terrestre, isso iria gerar custo e tempo em relação a finalização do produto final, por isso são escolhidos dentro da superfície terrestres pontos que representam aquela região de estudo. Li et al., (2005) diz que primeiro é necessário adquirir um conjunto de dados amostrais pontuais para poder modelar a superfície terrestre. A amostra é uma inferência sobre a população investigada. A partir de amostra são retiradas as conclusões sobre a população investigada. Logo Bussab (2005) diz que a amostra é um subconjunto da população, onde a população é o conjunto de todos elementos investigados. De acordo com Felgueiras (2001) “a amostragem deve ser representativa do comportamento espacial do atributo”.

A amostragem pode ser classificada em três tipos: amostragem sistemática, aleatória simples e aleatória estratificada (YAMAMOTO & LANDIM, 2015). Wong e Lee (2005) diz que para amostragem sistemática é necessário classificar um conjunto de observações dos fenômenos ou dados da área de estudo com regras pré-definidas. A amostragem aleatória simples não segue nenhuma regra ou estrutura pré-definidas, apenas seleciona os dados ou observações dos fenômenos. Já a amostragem aleatória estratificada em Yamamoto e Landim (2015) diz que divide um conjunto de dados de grupos ou estratos determinados, seguindo regra e dentro de cada grupo é realizado a amostragem aleatória simples.

4.5.2 Tamanho da Amostra

A definição do tamanho de uma amostra da área de estudo é uma tarefa muito importante, pois a partir disso poderá tirar conclusões para a área toda de estudo. A seleção da amostra deve ser por processo aleatórios afim de evitar possível tendenciosidade. Barbeta (2002) diz que existem quatro (4) razões para a utilização da amostragem. A primeira é a economia, pois é bem mais econômico levantar somente uma parte da população. A Segunda

é o tempo, não se tem tempo suficiente para executar uma pesquisa da população eleitoral. O terceiro é a confiabilidade dos dados, devido à redução dos elementos coletados, tem que tomar mais atenção. O quarto e último é a operacionalidade, tem facilidade de operação em pequena escala e tendo problema quando no controle de entrevistados nos censos.

Não é necessário investigar toda a população, pois seria impossível ou difícil, pode-se meditar e avaliar apenas uma parte (amostra) da população. É um fato de extrema importância a determinar um tamanho da amostra, pois com isso é possível saber qual o menor tamanho da amostra que deverá ser utilizada na geração do produto final para representar a população como um todo e assim evita erros grosseiros (NOGUEIRA, 2003).

O tamanho da amostra depende do tipo de risco que o produto irá ter na confecção do produto. De acordo com ASPRS (2015), qualquer tamanho da amostra garante algum tipo de erro para o produto e que o risco do usuário quanto maior for o tamanho da amostra menor será o erro e assim o ASPRS (2015) mostra os números de pontos de controle desejados de acordo com o tamanho da amostra por Km², como apresenta o Quadro 5.

Quadro 5 - Tamanhos de amostra recomendados com base na área do projeto

Superfície do Projeto Km ²	Avaliação da precisão horizontal de ortoimagens e planimetria	Avaliação da precisão horizontal e vertical dos conjuntos de dados de elevações		
	Número total de pontos avaliação estática 2D / 3D (aponta bem definido)	N.º de pontos estáticos Avaliação 3D em solo não cultivado	Número de pontos estáticos de Avaliação de campo 3D vegetado	Número total de pontos estática de Avaliação 3D
≤500	20	20	5	25

Fonte: ASPRS (2015).

Merchant (1982) diz que a exatidão do mapa deve ser verificada entre a comparação das coordenadas do terreno e do mapa a partir de vinte (20) pontos definidos.

4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Com o desenvolvimento das tecnologias que vem acontecendo nas últimas décadas, não é fácil acompanhar o aparecimento das novas tecnologias que surgem no processo de produção dos documentos cartográficos em relação à normatização. Com essas mudanças tecnológicas no processo há eliminação ou redução de vários erros que existiam no processo

tradicional (analógico) na produção dos produtos, mas novos tipos de erros com menor magnitude surgem nos produtos digitais.

Os produtos analógicos se tornaram digitais graças à evolução tecnológica, popularização de equipamento, utilização e necessidade das informações geoespeciais. Assim, com essas novas tecnologias surge a necessidade de gerar padronização dos produtos com qualidade, surgindo Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). O PEC-PCD é a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) e tem como norteador o decreto 89.817/1984 - PEC. A partir da publicação desta especificação, os produtos digitais seguem os valores proposto nela. Os produtos impressos continuam com o Decreto nº 89.817/1984. Sendo assim, o PEC e o PEC – PCD abordam que o controle de qualidade posicional que avalia as coordenadas planialtimétricas dos documentos cartográficos. Isso é realizado, de acordo Maranhão (2013), quando se faz a comparação entre as coordenadas dos pontos escolhidos dentro do produto com seus pontos homólogos obtidos através de uma fonte de maior precisão e também observando o desvio padrão para a escala correspondente do produto.

Os testes estatísticos sobre a validação da acurácia posicional o PEC-84 e PEC-PCD possibilitam que os dados sejam avaliados em relação à verificação de precisão e tendências que pode haver nas medições das coordenadas planialtimétricas das cartas.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apresenta diversas resoluções que sobre o posicionamento dos dados no espaço brasileiro, tais como: A Resolução PR nº05 (1993) - Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS: versão preliminar e o planejamento de campo e Resolução PR nº01 (2005) - Sistema de Referência Brasileiro. As resoluções servem para padronizar o sistema de referência e métodos utilizados, melhorando a execução do trabalho de campo e gerenciamento do processo. Já o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) dispõe da norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais 3ª Edição que apresenta as condições exigíveis para execução dos serviços de georreferenciamento de imóveis rurais.

O INCRA também aborda métodos para a obtenção de coordenadas geográficas e UTM dos documentos cartográficos no Manual Técnico de Posicionamento (Georreferenciamento de Imóveis Rurais). Este manual abrange os métodos de posicionamento que são utilizados em serviços relacionados aos imóveis rurais no posicionamento de vértices de referência e vértices de limites que podem ser artificiais e naturais, abordando o Posicionamento por GNSS, Posicionamento por Topografia Clássica, Posicionamento por Geometria Analítica e o Posicionamento por Sensoriamento remoto

juntamente com o tempo de rastreamento de cada um. Todos os métodos citados são de suma importância na parte de aquisição dos dados, mas o enfoque desta tese é o método de posicionamento relativo estático e o tempo de rastreamento necessário para a obtenção dos dados em campo.

Assim sendo, no que se refere ao estudo proposto nesta Tese, a abordagem neste capítulo é dada aos critérios que definem a qualidade e certificação dos insumos e produtos cartográficos usados na área de geotecnia. Neste contexto, um dos critérios a serem investigados diz respeito ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), que certifica e classifica a acurácia e precisão posicional cartográfica conforme a escala de representação das feições planimétricas e altimétricas, de acordo com o decreto nº89.817/1984, que estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) surgiu da necessidade de assegurar padrões à qualidade de produtos analógicos referentes ao mapeamento sistemático nacional da época (anos 80). Porém, hoje são reunidos os esforços de órgãos com a Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) que tem publicado especificações técnicas que auxiliam na produção de dados geoespaciais padronizados e estruturados de acordo com as suas necessidades, essas especificações são contextualizadas no item 4.2. Portanto, as normatizações, especificações, decretos e testes estatísticos servem para garantir que o produto final atende às necessidades de sua finalidade, que este deve ser seguida desde a parte do planejamento até o produto final.

5 EXPERIMENTOS E ANÁLISES METODOLÓGICAS

A metodologia da Tese para a validação dos pontos de controle posicional planialtimétrico nos dados SAR está dividida em seis etapas. A primeira etapa (5.1) consiste na seleção da área de estudo, que após sua validação será utilizada para confecção de produtos para os estudos de geotecnia. A segunda etapa (5.2) aborda a identificação de feições a serem utilizadas como pontos de controle posicional na ortoimagem e no MDT. A terceira etapa (5.3) apresenta os tamanhos de amostra utilizados no trabalho. A quarta etapa (5.4) consiste em apresentar os pontos de controle posicional planialtimétrico escolhidos dentro da área de estudo de acordo com as características abordadas na segunda etapa. A quinta etapa (5.5) aborda a validação posicional planialtimétrica utilizando diferentes testes de acurácia posicional e as normatizações brasileiras. A última (5.6), aborda os produtos cartográficos confeccionados para utilização da área de Geotecnia. O fluxograma da Figura 51 apresenta de forma sucinta a metodologia aplicada nesta tese.



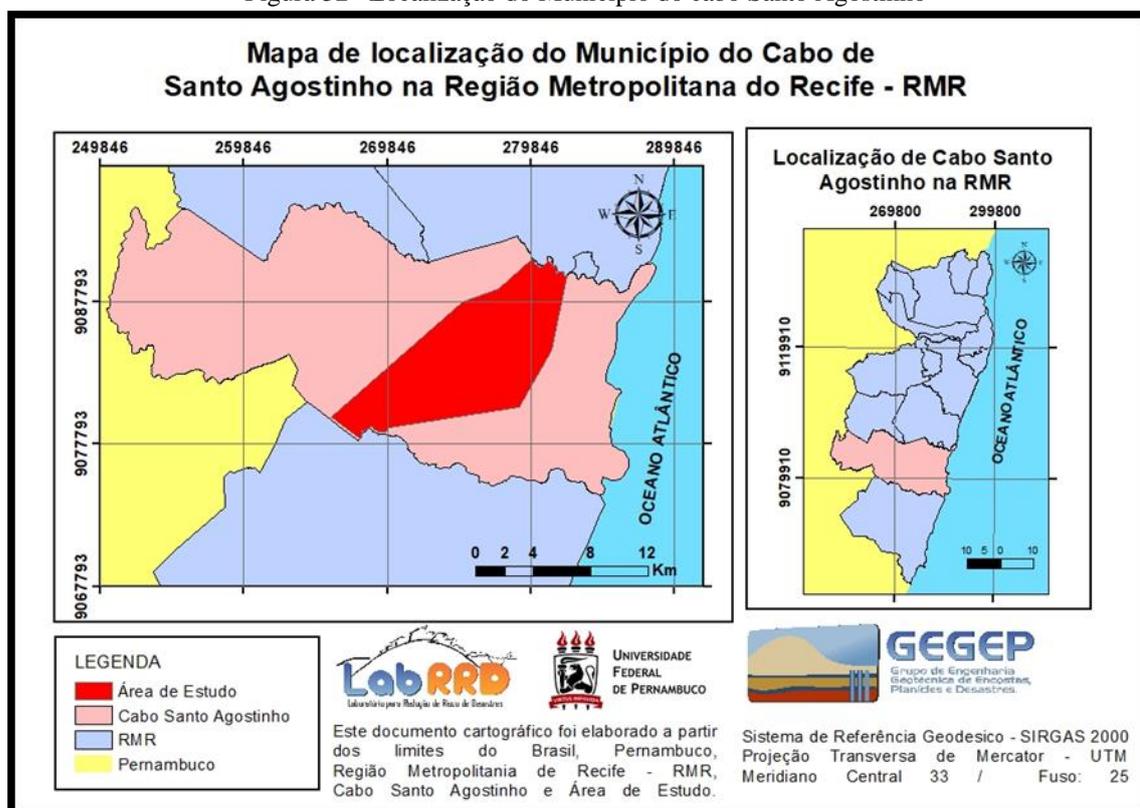
Fonte: A Autora (2019).

5.1 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município do Cabo Santo Agostinho fica na Região Metropolitana de Recife (RMR). Este município representa 14% da RMR e aproximadamente 0,46% da área do estado

de Pernambuco – Brasil, fazendo divisas com os municípios de Escada, Ipojuca, Jaboatão dos Guararapes, Moreno e Vitória de Santo Antão. As coordenadas geográficas em relação a sede do Cabo Santo Agostinho são: latitude 8°17'15" S, longitude 35°02'00" W Greenwich e altitude aproximada de 29 metros. A Figura 52 representa a confecção do Mapa temático apresentando o limite da RMR e do município do Cabo de Santo Agostinho, estes limites foram obtidos pelo banco de dados do IBGE, no sistema de coordenadas SIRGAS2000.

Figura 52– Localização do Município do cabo Santo Agostinho



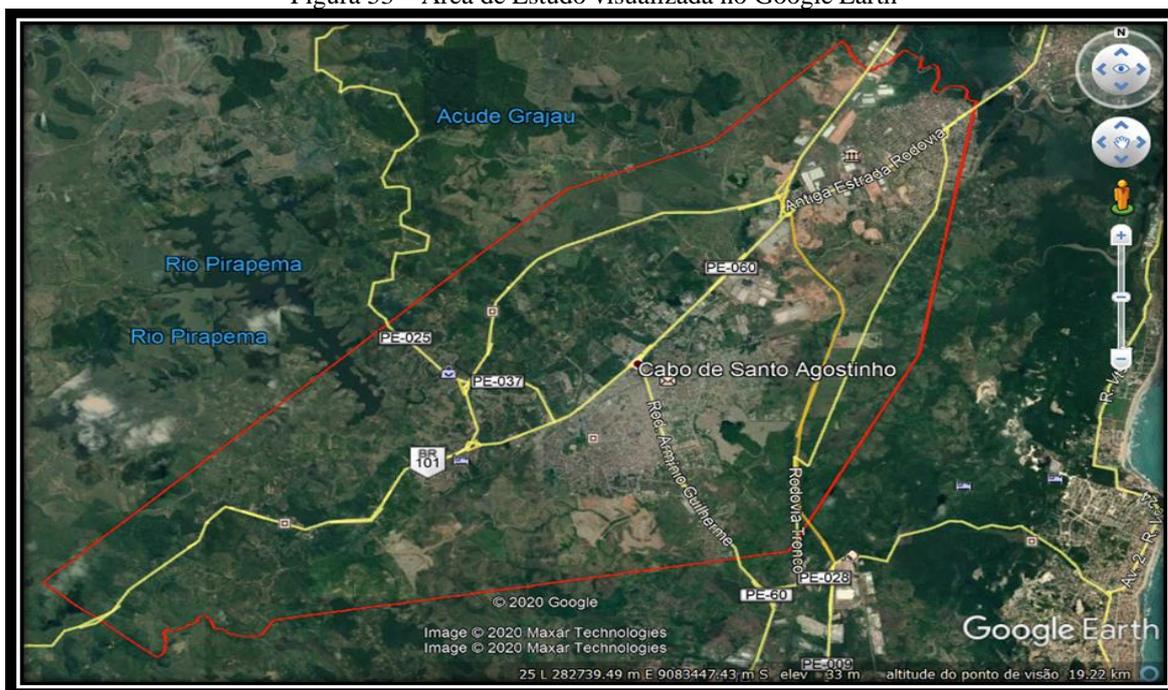
Fonte: A Autora (2019).

Segundo informações do IBGE (2010), o Cabo de Santo Agostinho tem a população residente na região de aproximadamente 185.025 habitantes de acordo com último censo [2010], tendo uma estimativa [2019]= 207.048 habitantes, numa área [2018]= 445,343 km², com uma densidade demográfica [2010]= 412,33 hab/km², com esgotamento sanitário adequado [2010]= 50,9 %. Sendo assim, com essa população do Cabo de Santo Agostinho ocupa o sétimo lugar no estado de Pernambuco e o quinto na RMR.

O município do Cabo de Santo Agostinho está incluído na lista de regiões onde sua população está exposta e vulnerável ao risco de desastres naturais, tais como, risco de inundações, enxurradas e movimentos de massa. Isso é mostrado no relatório IBGE (2018) constatando que 496 domicílios e 1.585 pessoas estão em risco. O município apresenta áreas

de riscos de deslizamento e inundação, afetando assim a população residente nestas áreas de grande suscetibilidade. Como exemplo, durante o período de chuvas intensas ocorridas no ano de 2010, o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (1991 – 2012), registrou que ocorreram deslizamentos e inundações resultando em 563 desabrigados, 224 desalojados e 56.500 afetados. Diante da presença de áreas de risco existentes no Cabo de Santo Agostinho, foi delimitada uma área que apresentava ocupação e provável expansão urbana (Figura 53).

Figura 53 – Área de Estudo visualizada no Google Earth



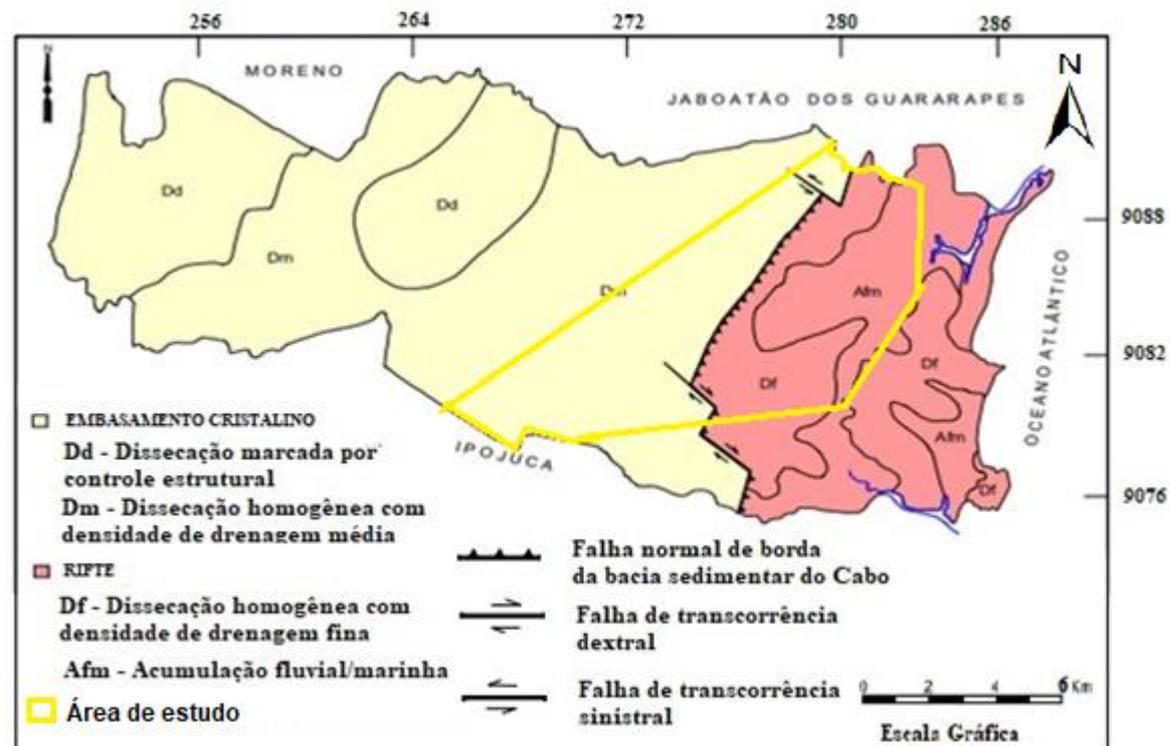
Fonte: Google Earth (2020).

A área escolhida para estudo é caracterizada por relevo acentuado apresentando risco de deslizamentos, como também ocupações em áreas de planícies próximas a elementos hidrográficos apresentando riscos de inundações. Assim, observa-se que grande parte da região foi desenvolvida no entorno do Rio Pirapama e de pequenos canais de drenagem que cortam a região urbana deixando a comunidade propensa à ocorrência de inundação. Portanto, essa área abrange uma área mais heterogênea em relação à rugosidade do relevo, formada também por encostas com grande inclinação que potencializam o risco de deslizamentos.

A área de estudo apresenta dois tipos de rochas que são do embasamento cristalino e rochas sedimentares e, também, nesta região existem falhas formadas devido ao processo rifteamento como apresenta a Figura 54. Esta área apresenta maior rugosidade corresponde à região do embasamento cristalino enquanto a área menos rugosa corresponde às rochas

sedimentares. O processo de rifteamento é responsável pela formação de estruturas geológicas como as falhas, estas por sua vez, são responsáveis pela elevação ou rebaixamento de blocos que ocasiona a formação de ambientes geológicos diferentes

Figura 54 - Domínios Morfoestruturais

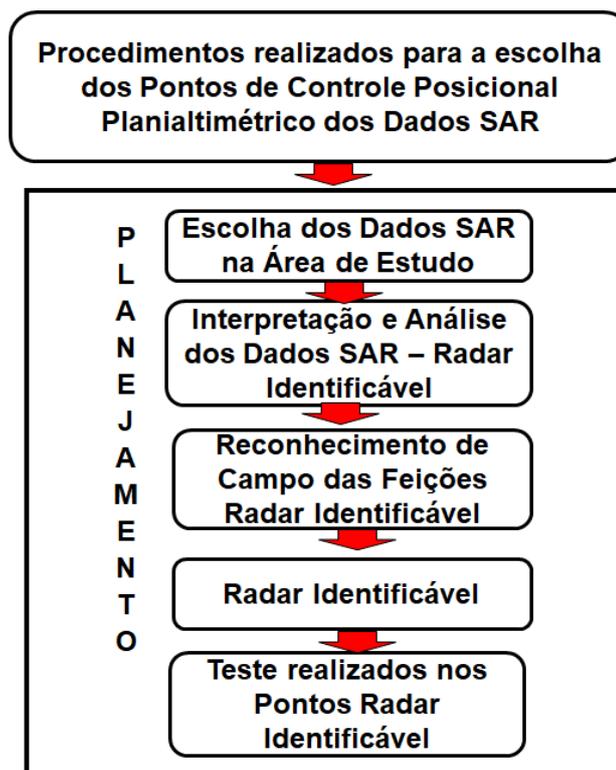


Fonte: Assis (1999) grifo da Autora.

5.2 PROCEDIMENTOS PARA A ESCOLHA DOS PONTOS DE CONTROLE POSICIONAL PLANIALTIMÉTRICO NOS DADOS SAR

Inicialmente, foram verificados quais tipos de dados SAR existiam dentro da área de estudo, para assim, serem definidos quais poderiam ser utilizados na validação posicional planialtimétrica. Os dados SAR foram definidos, analisados e interpretados com o intuito de saber quais as feições poderiam ser utilizadas como pontos de controle. Assim, foi realizado o reconhecimento em campo das feições propostas na pesquisa, que foram denominadas de Radar-Identificável. Após o procedimento adotado na etapa anterior, foi analisada de que forma o radar captura o objeto que apresenta partes metálicas. Para finalizar, foram realizados testes sobre as definições dos pontos de controle. O fluxograma da Figura 55 apresenta de forma resumida os procedimentos adotados para a escolha dos pontos de controle.

Figura 55 – Fluxograma dos Procedimentos realizados para definição de feições Radar-identificável no campo



Fonte: A Autora (2018).

5.2.1 Dados SAR da Área de Estudo

Neste subitem será apresentado como foi escolhido os dados SAR para a validação posicional planialtimétrica da área de estudo.

5.2.1.1 Características do radar aerotransportado OrbiSAR-2

O radar aerotransportado OrbiSAR-2 utiliza um conjunto *Global Position System* (GPS) + Unidade de Medição Inercial (IMU), que fornece 5cm de precisão posicional (X, Y e Z), garantido por até 120km de voo em linha reta sendo o erro médio entre a linha de voo planejada e realmente voada de cerca de 0,5m. A precisão de posicionamento em voo do sensor OrbiSAR-2 é de 5cm nas três direções (X, Y e Z). Como comparação, a precisão de posicionamento em órbita do satélite TerraSAR-X é de 5cm.

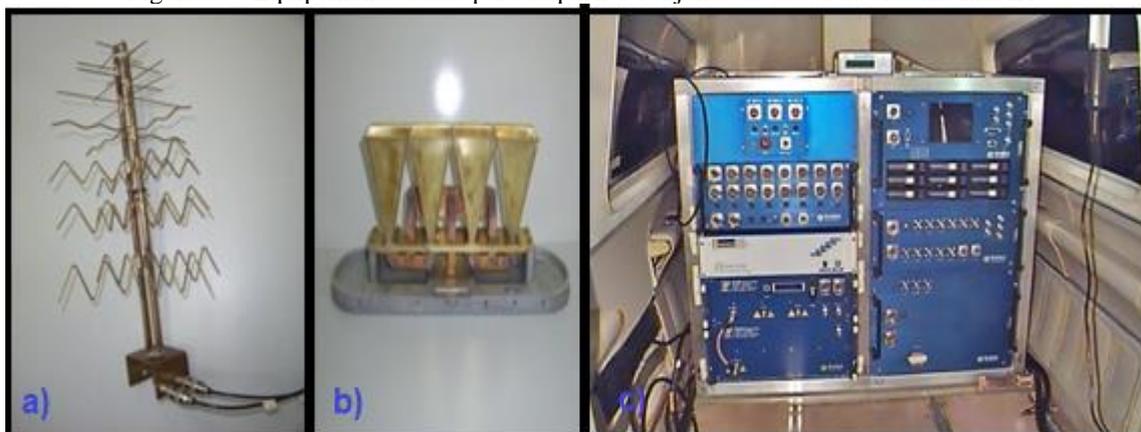
A aquisição de dados SAR utilizou aeronaves *Turbo Commander* Figura 56 que possui equipamentos como antenas das bandas X e P e o sistema de radar OrbiSAR-2, ambos mostrados na Figura 57.

Figura 56 - Aeronave Turbo Commander utilizada para a aquisição do conjunto de dados do sistema InSAR



Fonte: Rosa (2015).

Figura 57 - Equipamento usado para adquirir o conjunto de dados do sistema InSAR



Fonte: Rosa (2015).

a) antena da banda P; b) Antena de banda X; e c) OrbiSAR-2.

A Tabela 8 apresenta as características das bandas X e P.

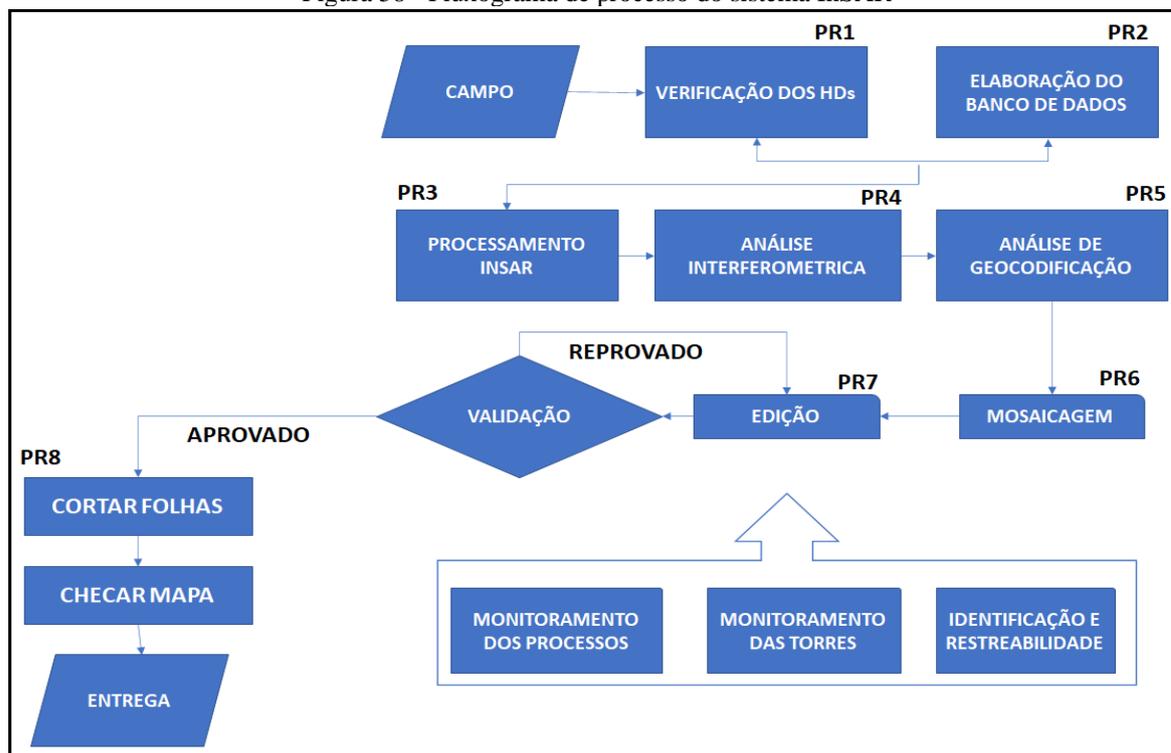
Tabela 8 - Informações da banda X e P do sistema InSAR

	Banda X	Banda P
Aeronave	Turbo Commander	Turbo Commander
Altitude de Voo	6086,62 m	6086,62m
Comprimento de Onda	3,125 cm	74,94 cm
Frequência Portadora	9,6 GHz	400,3 MHz
Largura de Banda	400 MHz	100 MHz
Polarização	HH	HH, HV, VH e VV
Ângulos de Nadir	20 °	10 °
Largura da faixa	14 km	14 km
Tamanho do Pixel	1,5x1,5 m	1,5x1,5 m
Modelo Digital de Elevação (MDE)	MDS	MDT
Resolução Radiométrica da Ortoimagem	0,5 dB	0,5 dB
Resolução da Altimetria do MDE	0,50 m	1,40 m
Representação de Pixel Ortoimagem	16 bits	16 bits
Representação do Pixel MDE	32 bits	32 bits

Fonte: Rosa (2017b).

A Figura 58 mostra como o processamento do sistema de busca foi realizado.

Figura 58 - Fluxograma de processo do sistema InSAR



Fonte: Rosa (2017b).

5.2.1.2 Insumos e produtos SAR

Os insumos e produtos cartográficos georreferenciados no sistema de coordenadas geodésicas e UTM, ambos no sistema de referência SIRGAS2000, utilizados foram adquiridos pelo sistema aerotransportado OrbiSAR-2 da Embraer. O voo foi realizado em janeiro de 2014, a altitude foi 6086,62m, a escala de 1:25.000, sendo posteriormente reprocessada para atendimento na escala de 1:10.000. A Tabela 9 apresenta a lista dos produtos e insumos cartográficos que foram recebidos em formato TIF, com seus respectivos nomes de arquivo e descrição.

Tabela 9 – Lista dos produtos e insumos cartográficos – Modelos Digitais

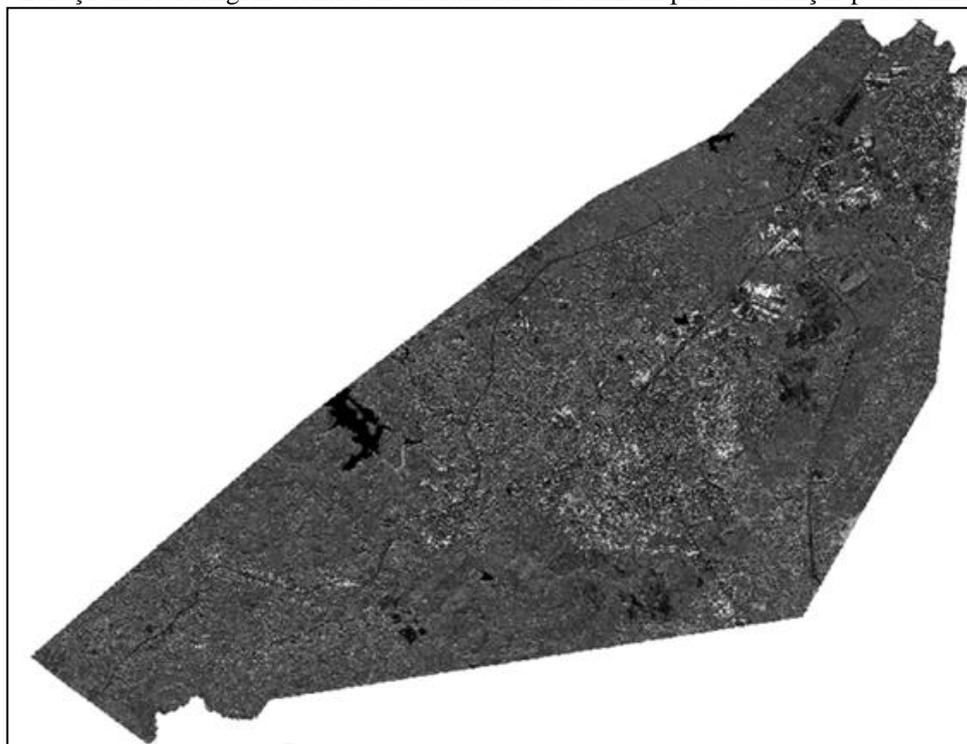
Nome do Arquivo	Descrição	Formato do Dados
*_DSM_1.5m_32bits_v01	Modelo Digital de Superfície Resolução Radiométrica de 32bits Resolução Geométrica de 1,5m	TIF
*_DTM_1.5m_32bits_v01	Modelo Digital de Terreno Resolução Radiométrica de 32bits Resolução Geométrica de 1,5m	TIF
*_ORIP_HH_1.5m_8bits_v01	Orto-imagem de amplitude de Banda P Polarização HH – Sem máscara de água Resolução Radiométrica de 8bits Resolução Geométrica de 1,5m	TIF
*_ORIP_HH_1.5m_16bits_v01	Orto-imagem de amplitude de Banda P Polarização HH – Sem máscara de água Resolução Radiométrica de 16bits Resolução Geométrica de 1,5m	TIF
*_ORIX_1.5m_8bits_v01	Orto-imagem de amplitude de Banda X Resolução Radiométrica de 8bits Resolução Geométrica de 1,5m	TIF
*_ORIX_1.5m_16bits_v01	Orto-imagem de amplitude de Banda X Sem máscara de água Resolução Radiométrica de 16bits Resolução Geométrica de 1,5m	TIF
*_ORIXP_1.5m_24bits_v01	Orto-imagem Colorida Resolução Radiométrica de 24bits Resolução Geométrica de 1,5m	TIF
*_ORIXP_SHADE_1.5m_24bits_v01	Orto-imagem Colorida com Shade Resolução Radiométrica de 24bits Resolução Geométrica de 1,5m	TIF

Fonte: Gegep (2014).

5.2.1.3 Definição dos dados SAR para a Validação Posicional Planialtimétrica

Dentro da área de estudo existem 8 arquivos de dados SAR (Tabela 9) poderiam ser utilizados na validação posicional planialtimétrica. Todas as informações da área de estudo foram adquiridas no momento em que o sistema aerotransportado OrbiSAR-2 passa pela região de estudo. Os dados obtidos são processados e analisados para geração dos insumos e produtos solicitados. Assim, os insumos e produtos SAR estão georreferenciados pelo sistema, porque não precisam ser calibrados quanto à posição horizontal, diferente da fotogrametria. Diante disso, foram escolhidos entre os insumos: a ortoimagem, para a validação posicional planimétrica; e o MDT, para a validação altimétrica. Assim, optou-se pela análise da ortoimagem na banda X, por apresentar melhor detalhamento de feições do que a banda P, como ilustra a Figura 59. A escolha do MDT foi devida a sua grande utilização na confecção de mapas com temáticas para a geotecnia.

Figura 59 – Esboço da Ortoimagem oriundo do sistema InSAR utilizada para a validação posicional planimétrica



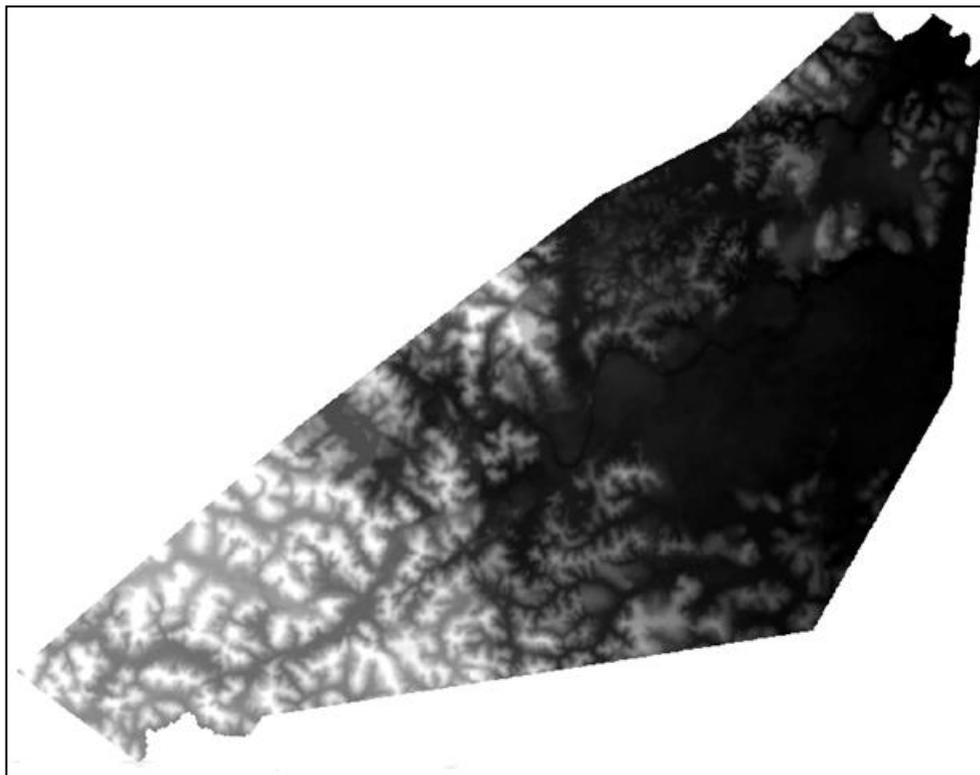
Fonte: A Autora (2019).

A ortoimagem adquirida na banda X (9,6 GHz) com 400 MHz de largura de banda, 20° de ângulo *off-nadir*, 14km de largura de *swath*, 1,5x1,5m de tamanho de *pixel* e resolução radiométrica de 0,5dB e 16 bits. O MDT (Figura 60) adquirido na banda P (400,3 MHz) com 100 MHz de largura de banda, 10° de ângulo *off-nadir*, 14km de largura de *swath*, 1,5x1,5m

de tamanho de *pixel* e resolução altimétrica de 1,4m e 32 bits. O MDT utilizado foi gerado a partir da banda P pela empresa fornecedora do produto. Sendo assim, não utilizou técnica para gerar o MDT, pois a banda P atravessa a vegetação, fornecendo informações do relevo do terreno, ou seja, abaixo da vegetação.

- a) não se utilizou nenhuma técnica para gerar o DTM a partir do DSM e sim Modelo Digital do Terreno (MDT) gerado pela Banda P, que atravessa a vegetação;
- b) dentre os arquivos recebidos pela empresa fornecedora existe o DSM, que foi gerado utilizando uma única passagem com duas antenas;
- c) a ortorretificação utilizou técnica usando SRTM;
- d) para gerar Ortoimagem foi utilizada o DSM da banda X que foi gerado pelo próprio radar simultaneamente;
- e) o DTM banda P foi gerado em duas passagens com uma única cena;
- f) a escala espacial e temporal foi gerada pelo fornecedor do produto (Bradar);
- g) são aplicadas técnicas corregristo em escala de *subpixels*; e
- h) a descorrelação temporal é no máximo 2 dias.

Figura 60 – Esboço do MDT oriundo do sistema InSAR utilizada para a validação posicional altimétrica



Fonte: A Autora (2019).

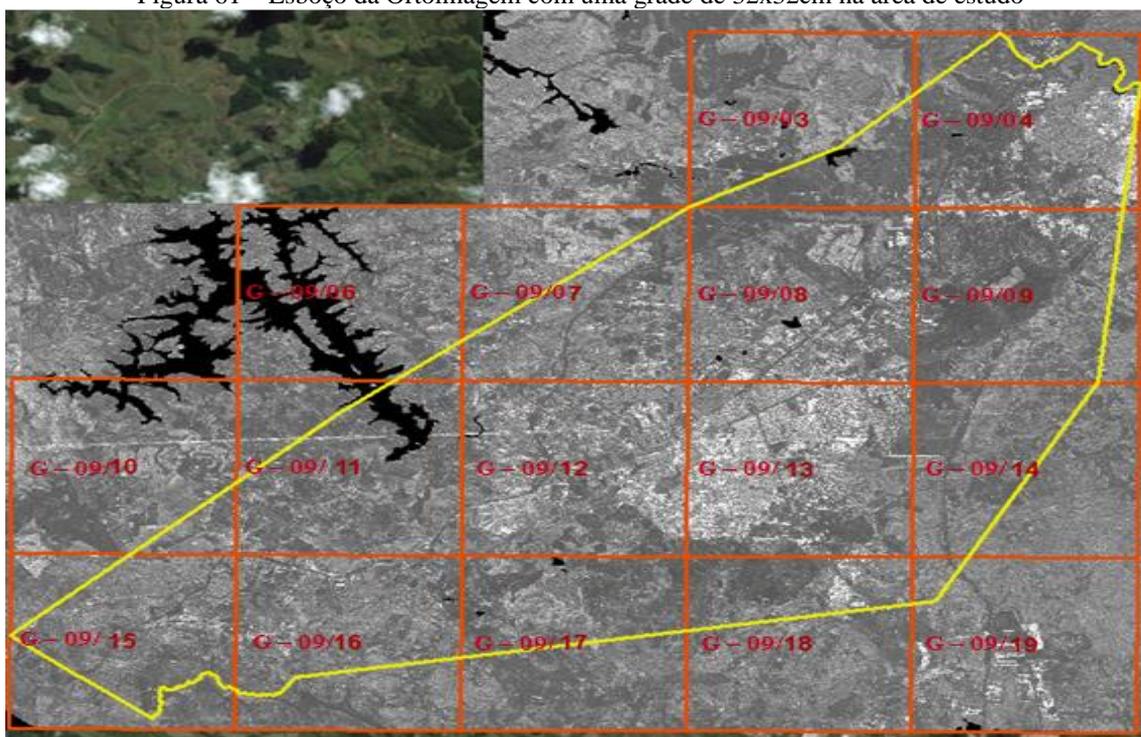
5.2.2 Interpretação e Análise dos dados gerados pelo o InSAR - Radar-Identificável

O radar adquire informações sobre a superfície terrestre utilizando visada lateral, o que causa distorções radiométricas e geométricas nos seus insumos, dificultando a identificação de feições pontuais em sua ortoimagem. Assim, ao analisar os dados SAR para controle de qualidade posicional planialtimétrico, foram observados algumas dificuldades:

- as ortoimagens foram geradas por radar na escala cinza e houve vários pontos com explosões de *pixels*, tornando quase impossível ver e identificar os elementos da imagem; e
- houve dificuldades para selecionar os pontos identificáveis nas ortoimagens, que atuariam como pontos de controle posicional na validação dos conjuntos de dados gerados, tais como: edifícios, cantos ou quinas de ruas, estradas ou avenidas, entre outros, que são utilizados na Fotogrametria.

Portanto, foi necessário realizar dentro da ortoimagem uma análise mais profunda para verificar o que seriam as explosões e se as mesmas serviriam como feições que poderiam ser utilizadas como pontos de controle posicional planialtimétrico, criando assim uma grade dentro da área de estudo para fazer esta análise (Figura 61).

Figura 61 – Esboço da Ortoimagem com uma grade de 32x32cm na área de estudo



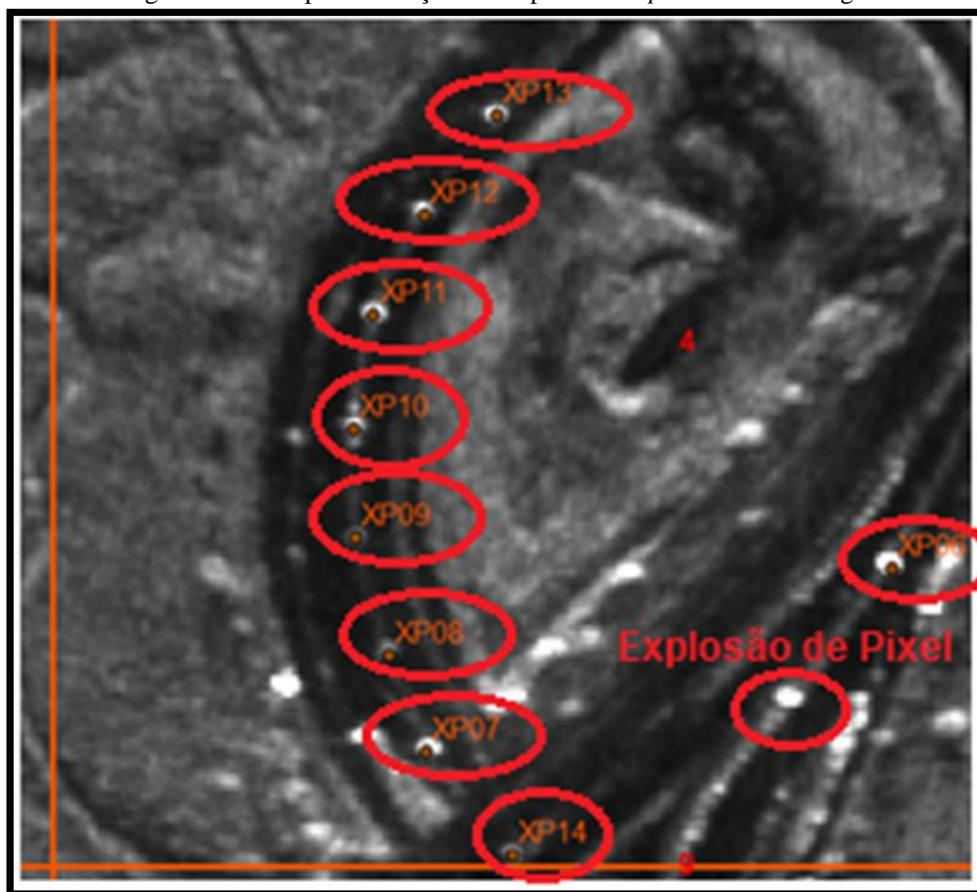
Fonte: A Autora (2019).

Assim, foi realizada uma comparação entre a ortoimagem gerada pelo InSAR e a imagem óptica do *software Google Earth*. Desta forma, serão demonstradas como foram realizadas as interpretações e análises dos dados SAR, na amostragem de duas regiões escolhidas dentro da área de estudo.

5.2.2.1 Região 01 (Grade G – 09/08)

Foram escolhidas várias explosões de *pixels* na ortoimagem para ser feita análise do significavam como ilustra a Figura 62. Esta Figura mostra nítidamente o formato das explosões de *pixels*.

Figura 62- Exemplo da seleção das explosões de *pixels* na Ortoimagem



Fonte: A Autora (2020).

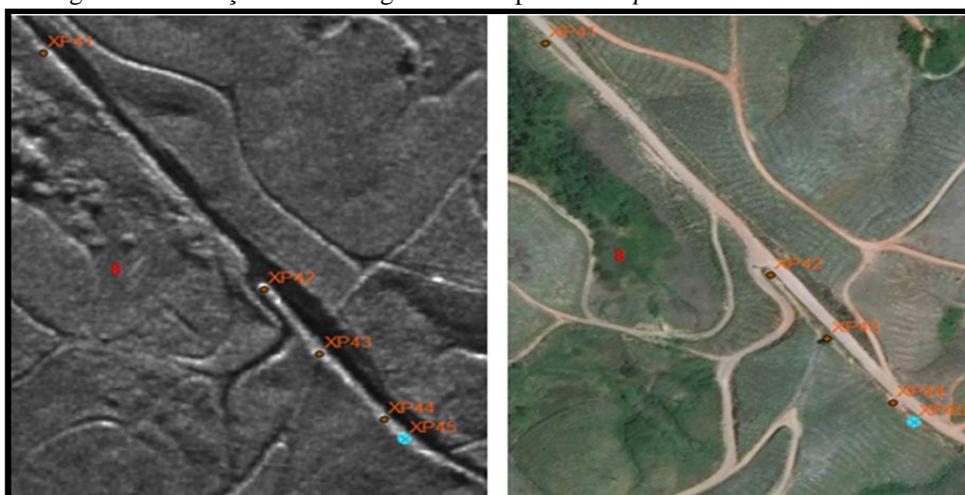
Ao analisar região 01 que fica localizada dentro da grade G - 09/08 foram selecionadas diversas explosões de *pixels* que estavam presente na ortoimagem e comparadas com a imagem óptica do mesmo local como ilustra as Figuras 63, 64, 65, 66 e 67.

Figura 63 - Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* localizadas nas vias 01



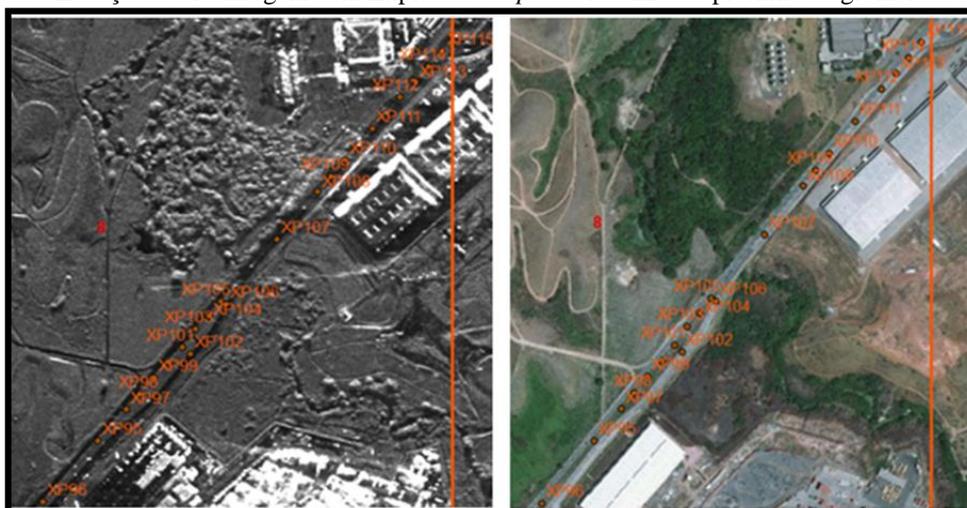
Fonte: A Autora (2019).

Figura 64 - Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* localizadas nas vias 02



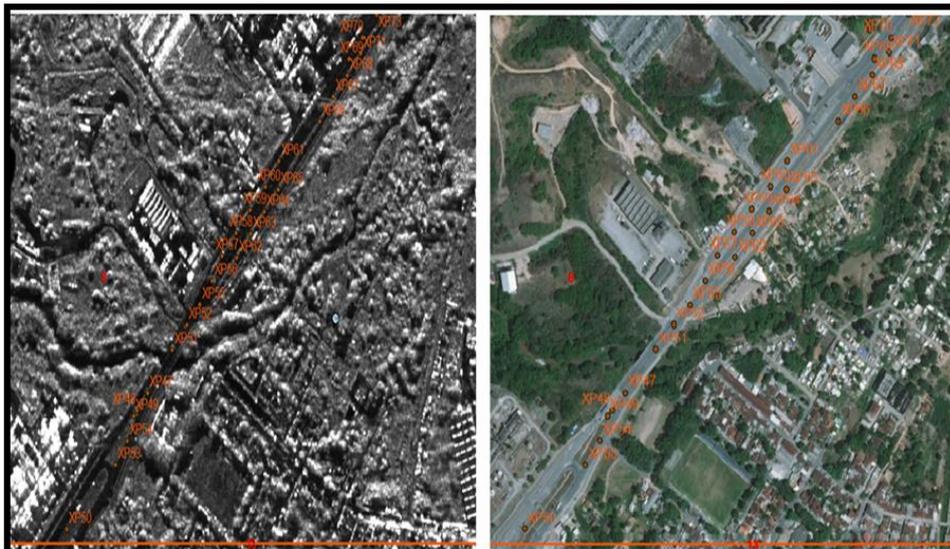
Fonte: A Autora (2019).

Figura 65 - Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* localizadas próximo a aglomerado urbano 03



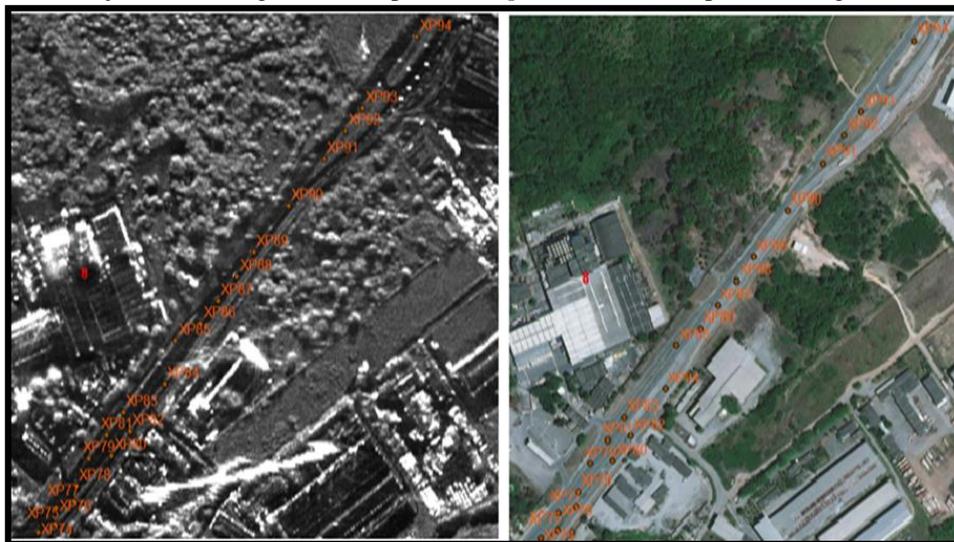
Fonte: A Autora (2019).

Figura 66 - Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* localizadas próximo a aglomerado urbano 01



Fonte: A Autora (2019).

Figura 67 - Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* localizadas próximo a aglomerado urbano 02

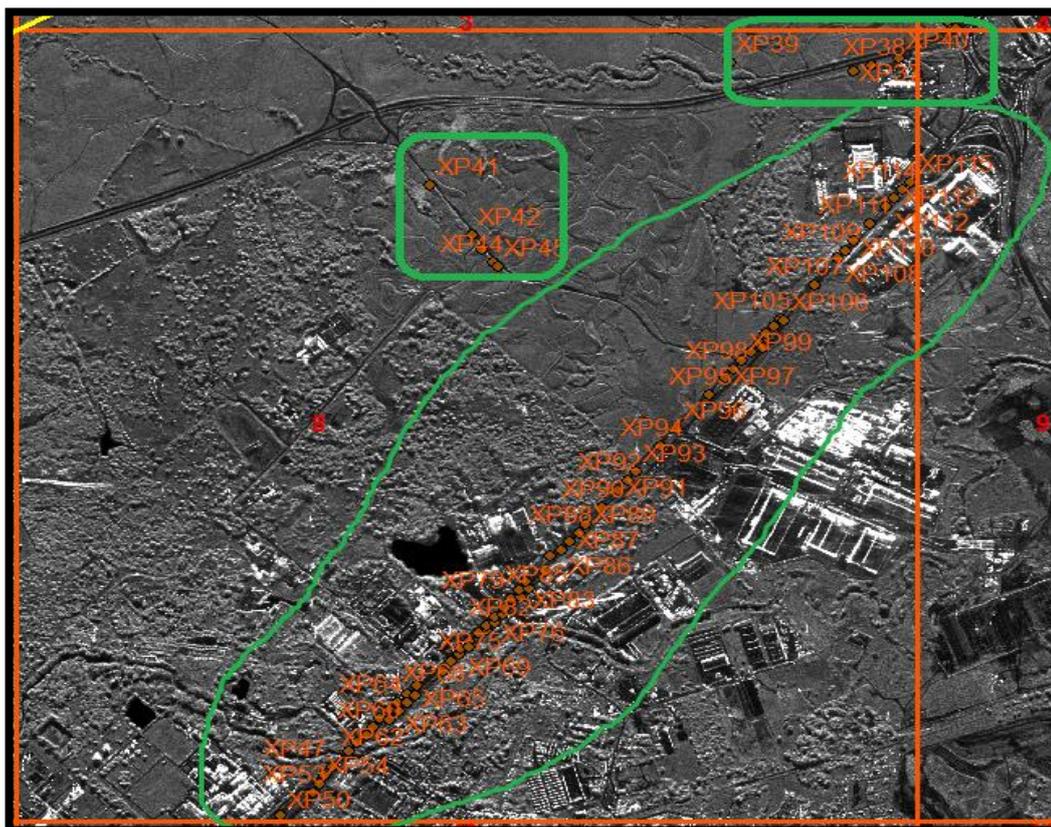


Fonte: A Autora (2019).

Ao comparar as ortoimagens selecionadas, as explosões de *pixels* com a imagem ótica percebe-se que as explosões de *pixels* estavam espalhadas próximas às vias pavimentadas ou não e em regiões com mais aglomerados urbanos. E também que a localização dessas explosões estavam em acostamento ou nos centros das vias. O formato das explosões eram padronizados apresentando formas regulares e arredondadas, e que variam de tamanho (Figura 61).

A Figura 68 apresenta o resumos de todas as explosões de *pixels* selecionadas na região 1 da área de estudo.

Figura 68- Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* em uma região da área de estudo

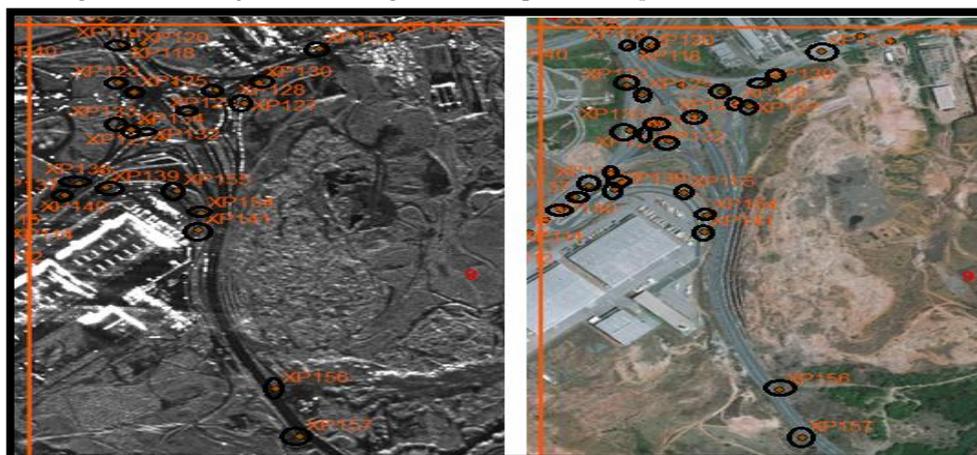


Fonte: A Autora (2019).

5.2.2.2 Região 02 (Grade G – 09/09)

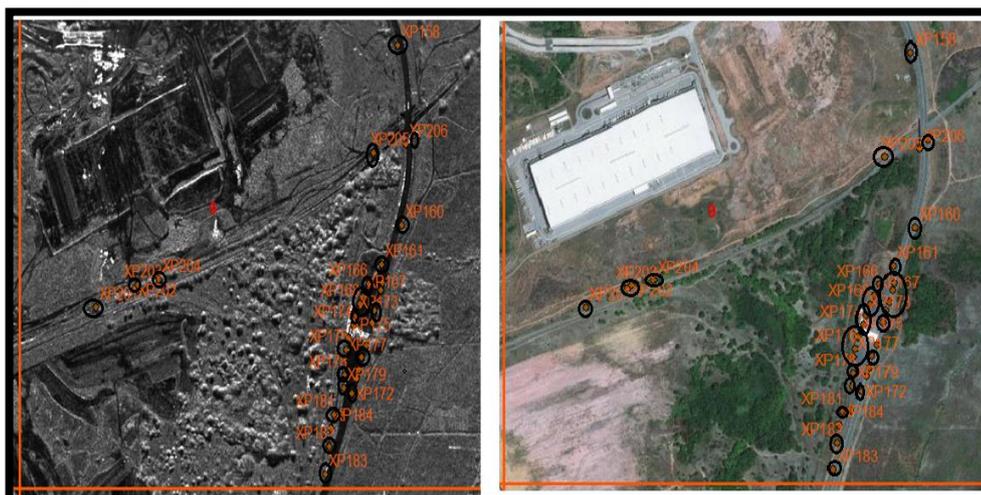
Da mesma maneira que foi realizada na região 01, foram escolhidas várias explosões de *pixels* dentro da ortoimagem para a região 02 que fica localizada dentro da grade G -09/09 como ilustra a Figura 69, 70 e 71.

Figura 69 - Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* localizadas nas vias 03



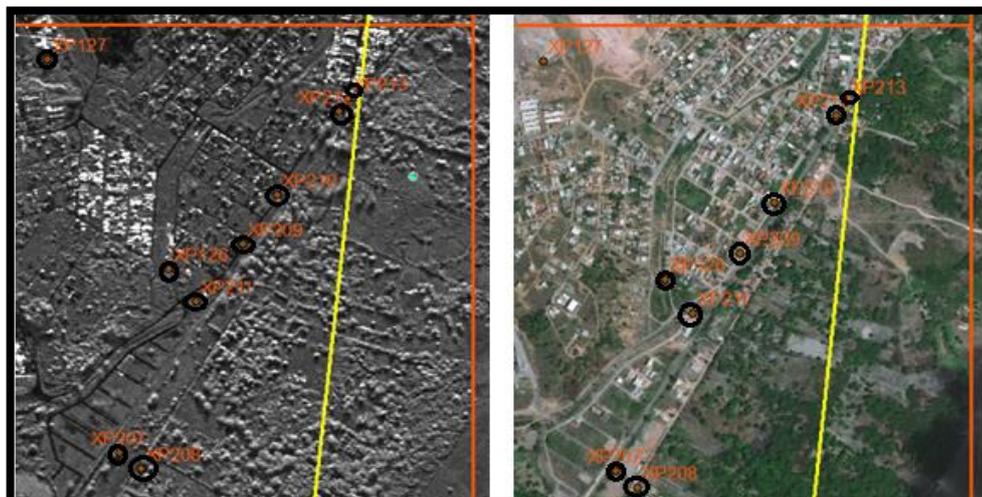
Fonte: A Autora (2019).

Figura 70 - Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* localizadas nas vias 04



Fonte: A Autora (2019).

Figura 71 - Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* localizadas próximo a aglomerado urbano 03

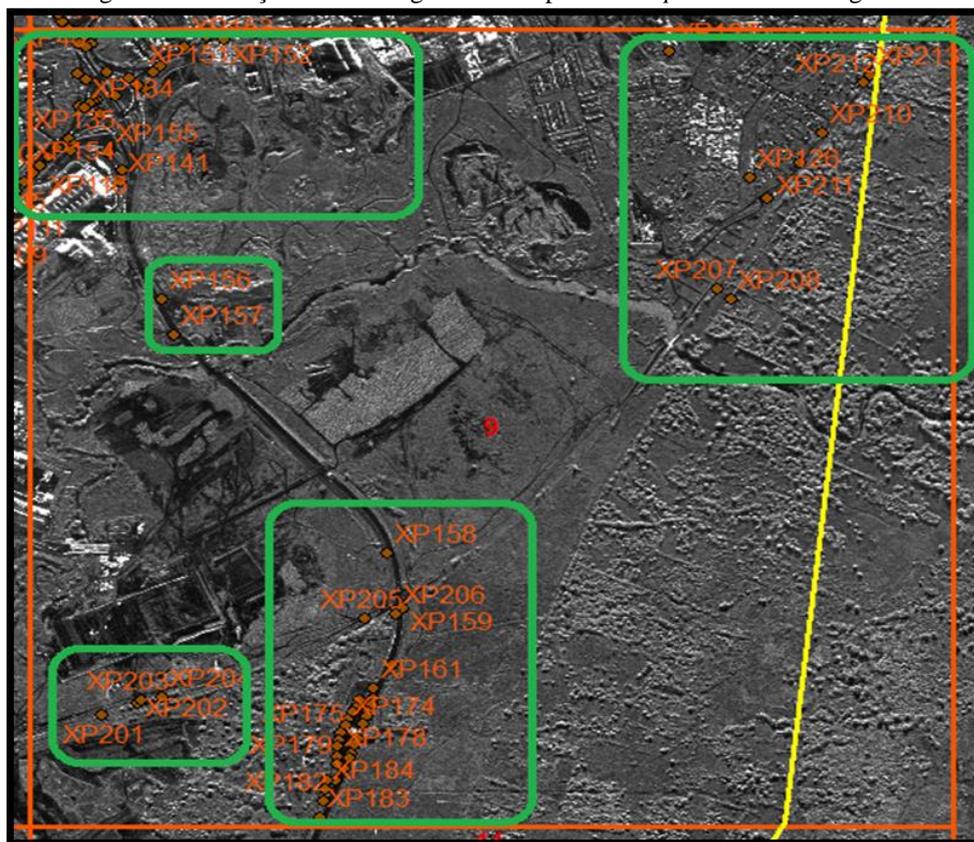


Fonte: A Autora (2019).

A mesma análise e interpretação ocorreram na região 2 e também foi constatado que ao comparar a ortomagem que tinha a seleção das exeplosões de *pixels* com a imagem ótica, percebeu-se que as explosões de *pixels* estavam espalhadas próximas às vias pavimentadas ou não e em regiões com mais aglomerados urbanos. E também que a localização dessas explosões estavam em acostamento ou nos centros das vias. O formato das explosões eram padronizados apresentando formas regulares e arredondadas, e que variam de tamanho (Figura 61).

A Figura 72 apresenta o resumos de todas as explosões de *pixels* selecionadas na região 2 da área de estudo.

Figura 72 - Esboço da Ortoimagem com Explosões de *pixels* na ortoimagem 02



Fonte: A Autora (2019).

5.2.3 Reconhecimento de Campo das Feições Radar- Identificáveis

Na etapa anterior observou-se que a ortoimagem estudada tem maior sensibilidade em regiões urbanas, estradas e vias urbanas, apresentando explosões de *pixels* que são facilmente identificáveis na ortoimagem. Diante disso, foi selecionada uma amostragem de explosões de *pixels* dentro da ortoimagem para verificação em campo. Essas explosões de *pixels* nesta etapa foram denominadas de pontos planejados.

A referida análise foi realizada no ano de 2018, sendo de grande importância para atualizar os dados SAR obtidos em 2014. Nesta etapa foram checados os pontos planejados (explosões de *pixels*), sendo possível identificar estruturas em metal que foram adicionadas ou, até mesmo, removidas ao longo do intervalo de tempo entre 2013 e 2018.

A verificação dos pontos planejados 01, 02, 03, 05, 06 e 07 são ilustradas nas Figuras 73, 74, 75 e 76. Em campo, foi constatado que essas explosões de *pixels* eram objetos pré-existentes na cena do estudo, como por exemplo, distribuidor de energia, postes de iluminação, placas de sinalização, telhados, entre outros.

Figura 73 - Verificação das explosões de *pixels* na área de estudo como pontos planejados 01 e 02



Fonte: A Autora (2019).

Figura 74 - Verificação das explosões de *pixels* na área de estudo como pontos planejados 03 e 04



Fonte: A Autora (2019).

Figura 75 - Verificação dos pontos planejados 05 e 06



Fonte: A Autora (2019).

Figura 76 - Verificação do ponto planejado 07



Fonte: A Autora (2019).

Durante o reconhecimento em campo, identificou-se próximo aos pontos planejados 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32 e 33 a presença de estruturas de sinalizações de porte grande e médio, postes com distribuidor de energia, placas de sinalização de trânsito de tamanhos variados e postes de iluminação, como estão ilustrados nas Figuras 77, 78, 79, 80 e 81.

Figura 77 - Verificação dos pontos planejados 23, 24, 25 e 27



Fonte: A Autora (2019).

Figura 78 - Verificação dos pontos planejados 28, 29, 30, 31, 32 e 33



Fonte: A Autora (2019).

Figura 79 - Verificação dos pontos planejados 34, 35, 36, 37 e 38



Fonte: A Autora (2019).

Figura 80 - Verificação dos pontos planejados 40, 41, 42, 43 e 44



Fonte: A Autora (2019).

Figura 81 - Verificação dos pontos planejados 45, 46, 47, 48, 49 e 50



Fonte: A Autora (2019).

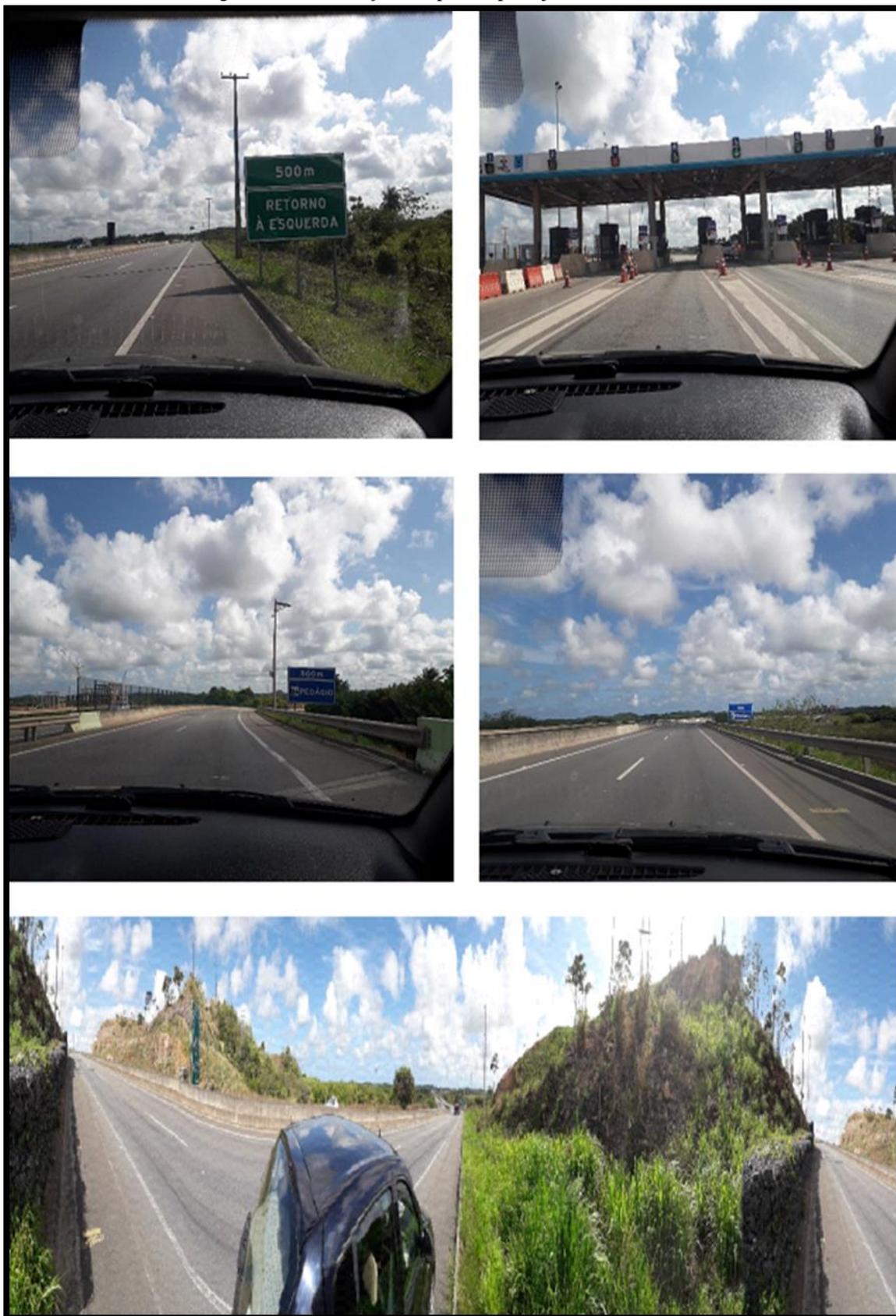
Confirmando a presença de estruturas de sinalização, postes com distribuidor de energia, placas de sinalização e postes de iluminação, em outros pontos planejados 35, 50, 51, 52 e 53, como ilustram as Figuras 82 e 83.

Figura 82 - Verificação dos pontos planejados 35, 50, 51, 52 e 53



Fonte: A Autora (2019).

Figura 83 - Verificação dos pontos planejados 54, 55, 56 e 57



Fonte: A Autora (2019).

Também foram analisadas algumas áreas que não existiam explosão de *pixel*, com o objetivo de verificar a presença de alguma estrutura com composição em metal. Durante a análise, foram verificadas a inexistência de materiais metálicos como mostra a Figura 84.

Figura 84 - Verificação dos pontos planejados 108, 109, 110 e 101



Fonte: A Autora (2019).

Em campo, foi observada a necessidade de reposicionar alguns pontos planejados ou até mesmo excluir devido às condições apresentadas. A Figura 85 representa com nitidez as condições encontradas de alguns desses pontos planejados, revelando em campo problemas devidos ao posicionamento vertical das linhas de transmissão, que apresentam significativas inclinações que geram erros de posicionamento nas coordenadas planimétricas.

Figura 85 – Verificação do ponto planejado 70, 71 e 73



Fonte: A Autora (2019).

A Figura 86 mostra um exemplo de estrutura metálica (linha de transmissão) que foi reposicionada recentemente e não consta seu posicionamento na ortoimagem estudada.

Figura 86 – Verificação do ponto planejado 83, 84 e 85



Fonte: A Autora (2019).

As Figuras 87 e 88 ilustram as condições precárias de algumas placas de sinalização encontradas ao longo das vias da área de estudo, podendo assim induzir a erros na determinação das coordenadas planimétricas.

Figura 87 - Verificação do ponto planejado 59



Fonte: A Autora (2019).

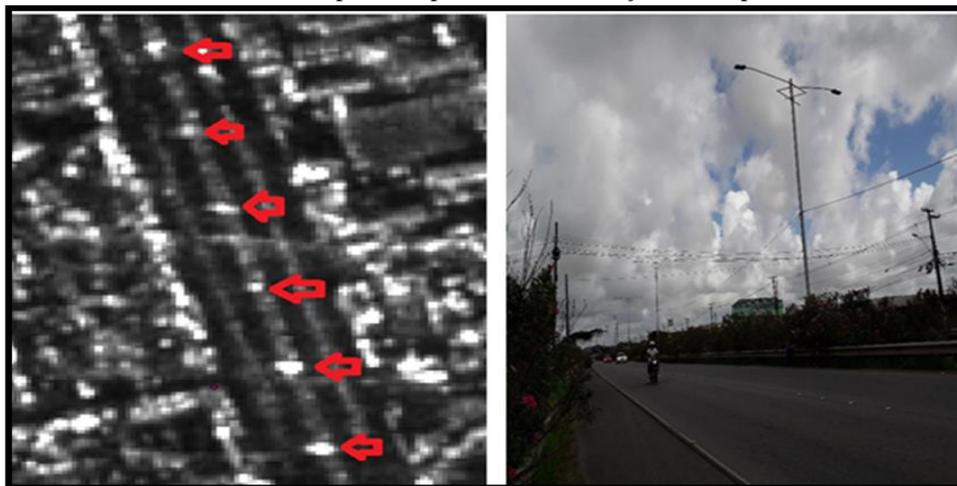
Figura 88 - verificação do ponto planejado 96 e 120



Fonte: A Autora (2019).

Diante do que foi observado em campo, constatou-se que as explosões são devidas à sensibilidade do sistema InSAR, provenientes da presença de estruturas metálicas. Foi observado também que as explosões de *pixel* variavam no tamanho e na forma de acordo com a estrutura em metal. Contudo, nas vias principais essas estruturas eram mais padronizadas, no tamanho e distanciamento, constatando-se que representavam postes de iluminação, como mostrado na Figura 89.

Figure 89 - a) Feições pontuais espalhadas na ortoimagem em uma via pavimentada; b) Feições pontuais identificadas em campo eram postes de iluminação na via pavimentada



Fonte: A Autora (2019).

5.2.4 Radar-identificado

Um dos objetivos do trabalho é coletar pontos de controle para medir a qualidade dos produtos gerados pelo sensoriamento remoto por radar, entretanto, devido à geometria de aquisição de dados do radar e distorções como apresentadas no Capítulo 3. Sendo assim, fez-se necessário procurar objetos pré-existent na cena do estudo, estruturas ou feições que não apresentassem essa distorção e que, assim, pudessem ser utilizados como pontos de controle, ou seja, alvos identificáveis nas imagens e que sua posição na imagem correspondesse a sua posição real.

Sabe-se que o metal é um bom condutor de energia elétrica, sendo conseqüentemente também um bom refletor de sinais eletromagnéticos. Por isso, o sinal do radar InSAR apresenta alta sensibilidade aos objetos com estruturas ou composição metálica, causando uma grande reflexão que pode até gerar explosões de *pixels*, fazendo com que sejam identificáveis nas ortoimagens de radar, ou seja radar-identificável.

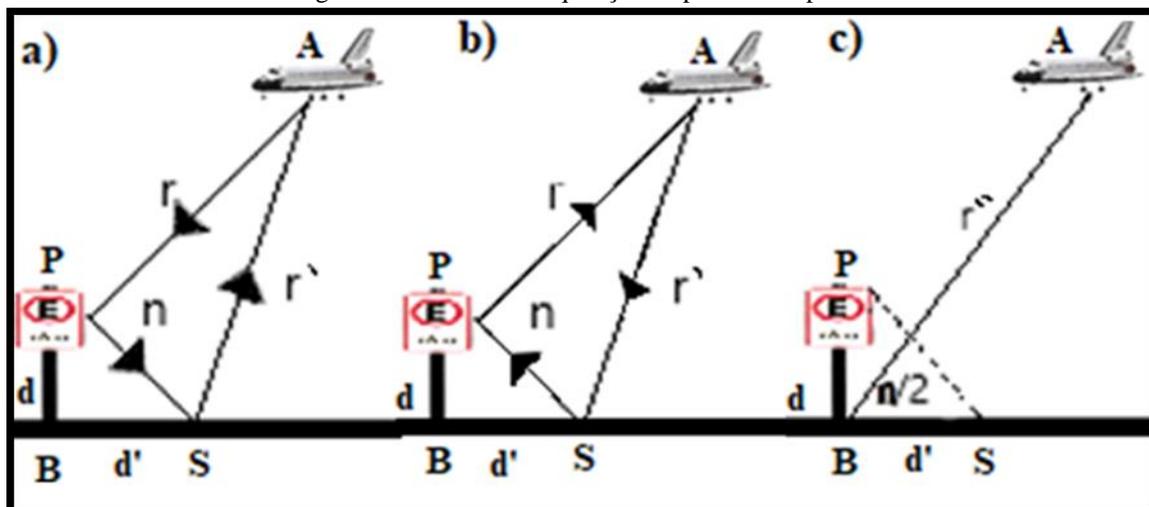
Além disso, estruturas perpendiculares ao solo (como placas de trânsito) fazem com que o sinal do radar sofra uma dupla reflexão (Figuras 90.a e 90.b).

- a Figura 90 a) mostra o sinal saindo do radar, sendo refletido pela placa, logo após sendo refletida pelo solo e retornando ao radar. A distância total percorrida pelo sinal eletromagnético foi de: $D_a = r' + n + r$.

- a Figura 90 b) mostra o sinal saindo do radar, sendo refletido pelo solo, depois sendo refletido pela placa e retornando ao radar. Nesse caso, o percurso do sinal foi de: $D_c = r + n + r'$.

- a Figura 90 c) mostra o sinal saindo do radar, sendo refletido na base da placa em contato com o solo e retornando ao radar, percorrendo a distância de: $D_b = r'' + n/2 + n/2 + r'' = 2r'' + n$.

Figura 90 – Formas de aquisição de ponto na superfície



Fonte: A Autora (2019).

Sendo:

r = distância percorrida pelo o sinal entre o avião e a placa;

r' = distância percorrida pelo o sinal entre a superfície e o avião;

r'' = distância percorrida pelo o sinal entre o avião e o pé da placa;

n = distância percorrida pelo o sinal do radar entre a placa e a superfície.

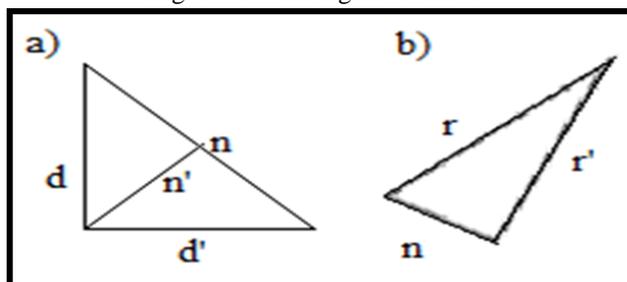
Como $n \ll r$, $n \ll r'$ e $n \ll r''$, e observando a Figura 91, pode-se dizer que:

a) $r \approx r' \approx r''$

b) $d = d'$

c) $n' = n/2$;

Figura 91 – Triângulos formados



Fonte: A Autora (2019).

Assim, tem-se que:

$$D_a = D_b = D_c = 2r + n$$

Conclui-se que a distância percorrida pelo sinal nos três casos é a mesma e, assim, todos os sinais recebidos pelo radar provenientes desses pontos são posicionados exatamente na localização da base da placa, pois é a posição do sinal refletido diretamente do solo, fazendo com que esse tipo de alvo seja recomendado para uso como ponto de controle, já que é possível de identificar (por ser metal) e corresponde a sua posição real (base da placa). Portanto, é possível identificar que as estruturas em metais são boas para serem utilizados como pontos de controle posicional planialtimétrico.

5.2.5 Teste realizado dentro da Área de Estudo

Nesta etapa, foram realizados testes dentro da área de estudo, foram escolhidos pontos de controle posicional planialtimétrico, sendo utilizado para isso os conceitos da fotogrametria (imagem ótica) e a metodologia proposta referente às explosões de *pixels* (radar-identificável), que são explosões de *pixels* (estrutura metálicas) pré-existent na ortomagem SAR. Depois disso os pontos escolhidos pelo método de fotogrametria e radar-identificável foram validados nos dados SAR: ortomagem, em relação a planimetria; e MDT, em relação à altimetria, utilizando o padrão de exatidão cartográfico de normatizações vigentes no Brasil.

5.2.5.1 Fotogrametria

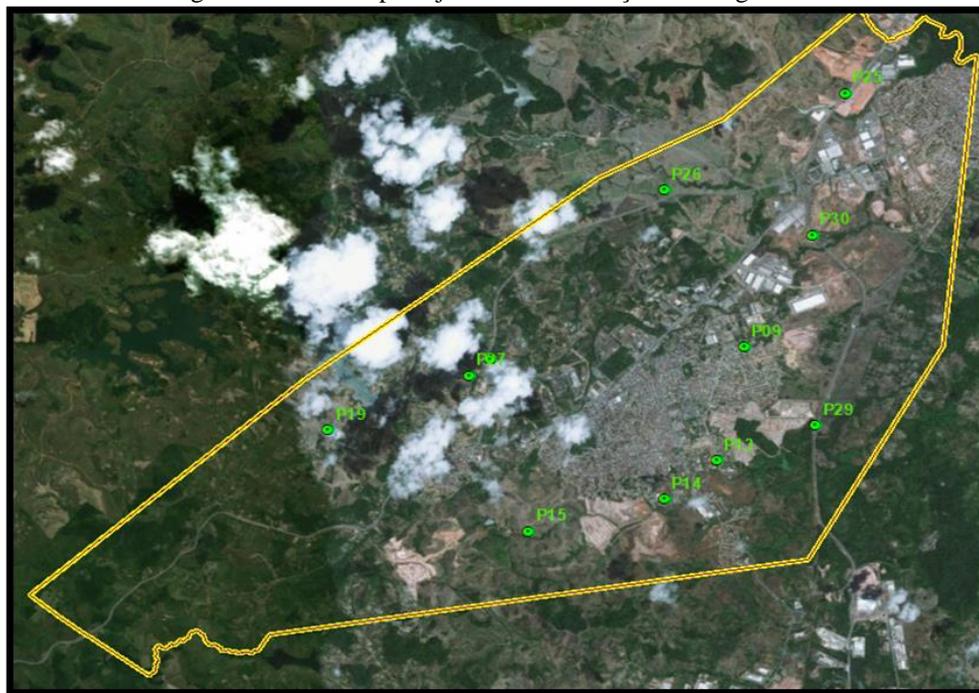
Nesta etapa será apresentado o planejamento, medições e processamentos dos pontos adquiridos pela escolha dos pontos de acordo com o método da fotogrametria.

5.2.5.1.1 Planejamento

A escolha dos pontos de controle posicional pelo método da fotogrametria levou em consideração as feições descritas no subitem 3.1, ou seja, faixas de ruas, quinas de edificações, cantos e cercas, cruzamentos, esquinas, trevos e centro de vias, entre outros. Sendo realizado primeiramente o planejamento de pontos de controle de qualidade que foram

distribuídos na imagem ótica como é observado na Figura 92. Esses pontos foram denominados de P08, P09, P13, P14, P15, P19, P25, P26, P27, P29 e P30. Estes são pontos foto-identificável nas imagens óticas dentro do município do Cabo de Santo Agostinho. As coordenadas dos pontos planejados neste item estão ilustradas na Tabela 10.

Figura 92 – Pontos planejados com utilização da imagem ótica



Fonte: A Autora (2019).

Tabela 10 - Coordenadas planialtimétricas dos pontos teste em SIRGAS 2000 do município de Cabo de Santo Agostinho.

PJT	Latitude (ϕ)	Longitude (λ)	Este (m)	Norte (m)	h (m)
PJT08	8° 17' 27,751" S	35° 00' 16,002" W	279227,810	9082969,755	12,369
PJT09	8° 17' 27,799" S	35° 00' 15,878" W	279231,620	9082968,273	1,820
PJT13	8° 16' 39,447" S	35° 00' 55,229" W	278019,672	9084447,936	2,560
PJT14	8° 16' 39,694" S	35° 0' 55,279" W	278018,190	9084440,316	8,626
PJT15	8° 17' 48,972" S	35° 1' 10,951" W	277549,303	9082309,155	42,559
PJT19	8° 18' 32,406" S	35° 2' 55,144" W	274367,191	9080958,162	111,795
PJT25	8° 16' 56,236" S	35° 3' 26,922" W	273379,244	9083908,267	7,187
PJT26	8° 16' 56,126" S	35° 3' 27,129" W	273372,894	9083911,601	8,774
PJT27	8° 16' 56,178" S	35° 3' 27,015" W	273376,386	9083910,014	18,477
PJT29	8° 17' 29,252" S	35° 4' 44,985" W	270995,163	9082881,297	1,704
PJT30	8° 15' 30,804" S	35° 00' 17,274" W	279170,786	9086563,021	10,329

Fonte: A Autora (2019).

O intuito na utilização dessa comparação é o caso se o usuário pense em utilizar a escolha de pontos de controle utilizando conceitos de outro método de aquisição.

5.2.5.1.2 Medições

A campanha GNSS foi realizada entre os dias 1 a 9 de junho de 2015 para aquisição dos pontos de controle posicional. Foram utilizados nas medições dois (2) receptores geodésicos L1/L2, com tempo de rastreio de aproximadamente 45min para cada ponto. Os receptores foram instalados com tripés e bases nivelantes, e em seguida, foram medidas as alturas das respectivas antenas. A estação de referência foi a RBMC- RECF que na época estava operante. Durante as medições foram adquiridos os vértices P08, P09, P13, P14, P15, P19, P25, P26, P27, P29 e P30, que são pontos foto-identificável nas imagens óticas e estão localizados em lugares que são escolhidos pelo método de fotogrametria, como ilustra as Figuras 93, 94, 95 e 96, aquisição dos pontos P08, P09, P13, P14 e P15.

Figura 93 – Aquisição do Ponto P08



Fonte: Gegep (2014).

Figura 94 – Aquisição do Ponto P09



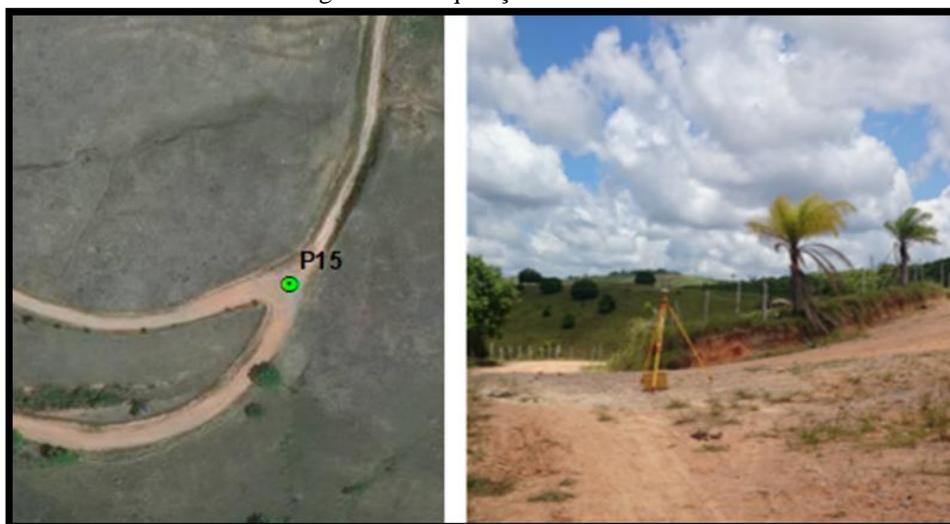
Fonte: Gegep (2014).

Figura 95 – Aquisição do Ponto P14



Fonte: Gegep (2014).

Figura 96 – Aquisição do Ponto P15



Fonte: Gegep (2014).

5.2.5.1.3 Processamento

O processamento dos vértices dos pontos ocorreu no *software TOPCON TOOLS V.8.2* com o nível de confiança de 95%. Assim, utilizou-se a estação RBMC-REC como referência, obtendo-se os vértices P08, P09, P13, P14, P5, P19, P25, P26, P27, P29 e P30, com as coordenadas geodésicas e planas retangulares UTM (SIGAS2000).

A altura ortométrica é calculada pela equação 29 (IBGE, 2020):

$$H = h - N \quad (29)$$

Onde:

H = altitude ortométrica;

h = altitude elipsoidal;

N = altura geoidal

5.2.5.1.4 Validação Posicional Planialtimétrica

De acordo com o PEC-84, para um produto se enquadrar em uma das classes é necessário que pelo menos 90% dos seus pontos esteja com erro inferior ao EM e ao desvio-padrão para aquela classe. Caso os pontos não atinjam os valores pré-estabelecidos da classe, ou seja, os resultados sejam "não conformes" para aquela classe, deve-se encerrar a classificação e iniciar uma nova classificação até que se atinja uma classe para o produto. Caso os dados não se enquadrem em uma das classificações citadas no PEC-84, os dados devem ser classificados como "não conforme" em relação ao PEC.

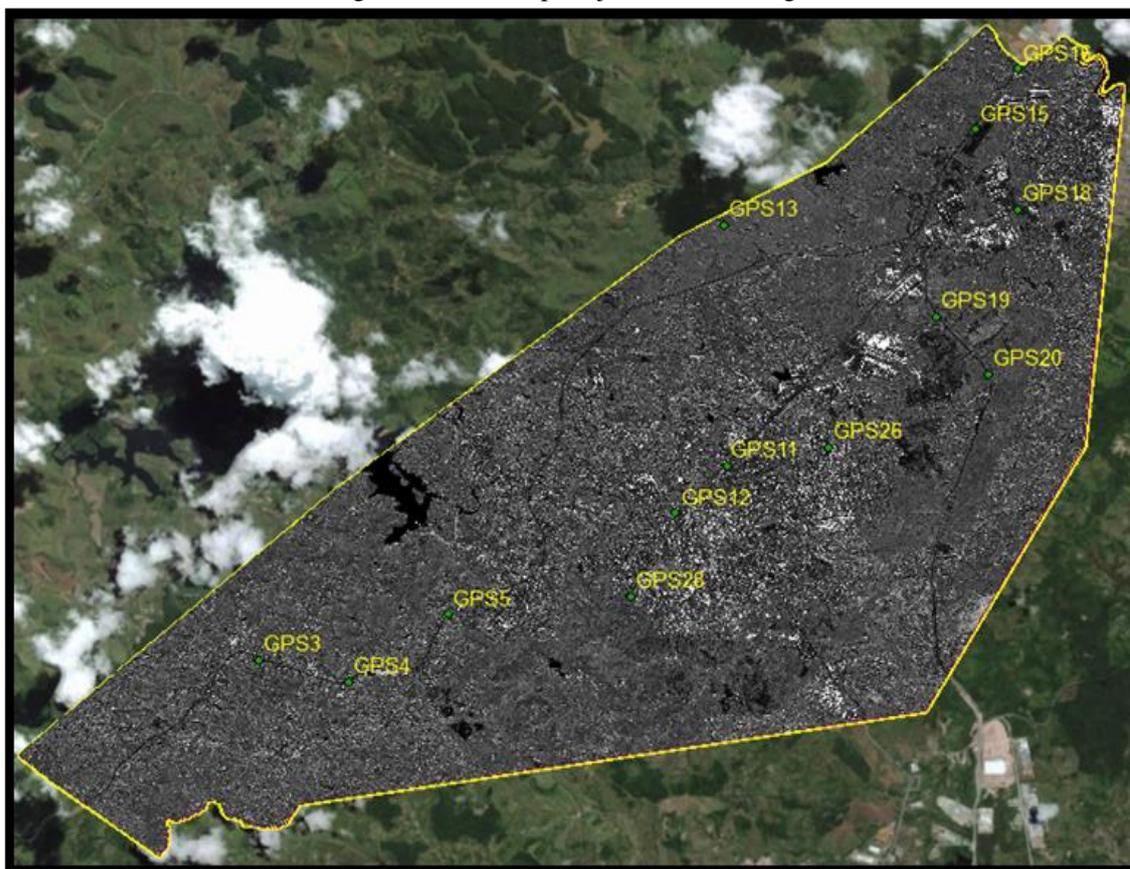
5.2.5.2 Radar-identificável (Explosões de Pixels)

Esta etapa consistiu em planejar os pontos de controle sobre objetos pré-existent dentro da área de estudo como citado no subitem 5.2, que poderiam ser utilizados como pontos de controle posicional.

5.2.5.2.1 Planejamento

Foi selecionada uma amostragem de 7 explosões de *pixels* dentro da área de estudo para validação posicional da ortoimagem e do modelo digital do terreno. A Figura 97 ilustra os pontos planejados GPS3, GPS4, GPS5, GPS11, GPS12, GPS13, GPS15, GPS16, GPS18, GPS19, GPS20, GPS26 e GPS28, dentro da área de estudo.

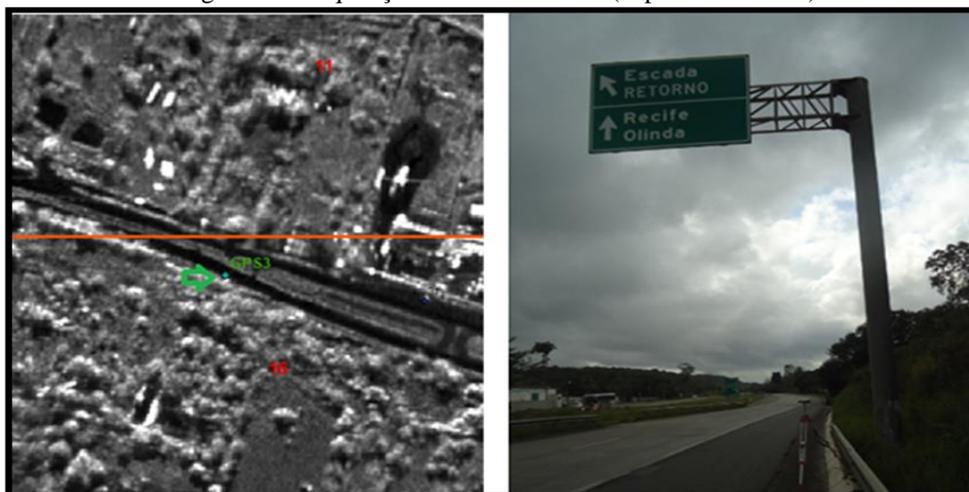
Figura 97 – Pontos planejados na Ortoimagem



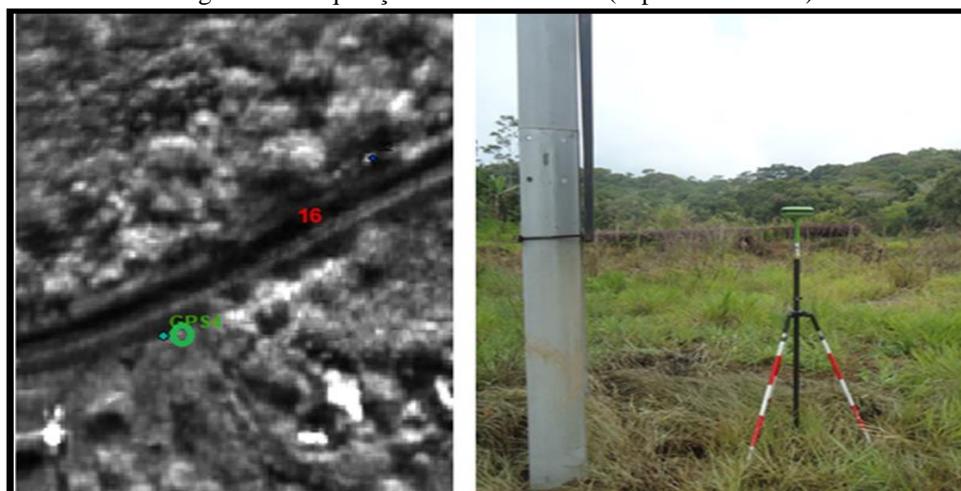
Fonte: A Autora (2019).

5.2.5.2.2 Medições

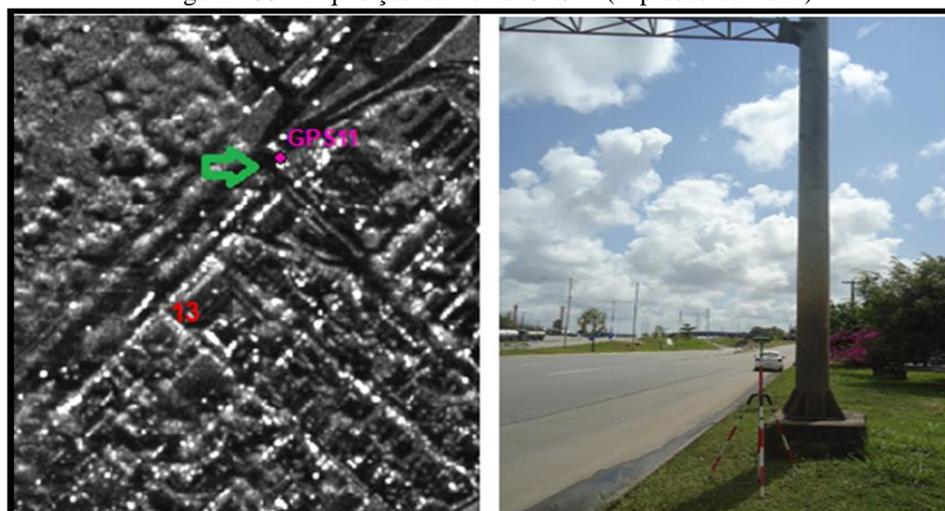
A campanha GNSS ocorreu entre os dias 29 e 30 de outubro de 2018. Nas medições foram utilizados quatro (4) receptores geodésicos L1/L2, com tempo de rastreamento variando de 30 min à 1h30min para cada ponto planejado. Os receptores foram instalados com tripés e bases nivelantes e, em seguida, foram medidas as alturas das respectivas antenas. A estação de referência utilizada foi a RBMC- RECF. As Figuras 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107 e 108 representam a ocupação dos vértices GPS3, GPS5, GPS11, GPS12, GPS15, GPS18, GPS19, GPS20, GPS26 e GPS27-I no município do Cabo Santo Agostinho, que são pontos radar-identificáveis nas ortofotografias SAR e estão localizados em lugares que são escolhidos pela metodologia abordada nesta tese.

Figura 98 – Aquisição do Ponto GPS03 (explosão de *Pixel*)

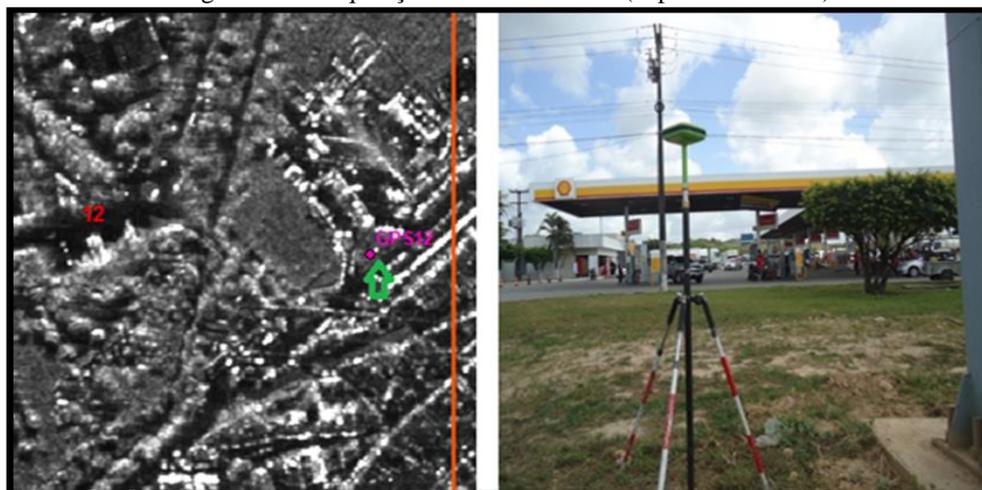
Fonte: A Autora (2019).

Figura 99 – Aquisição do Ponto GPS04 (explosão de *Pixel*)

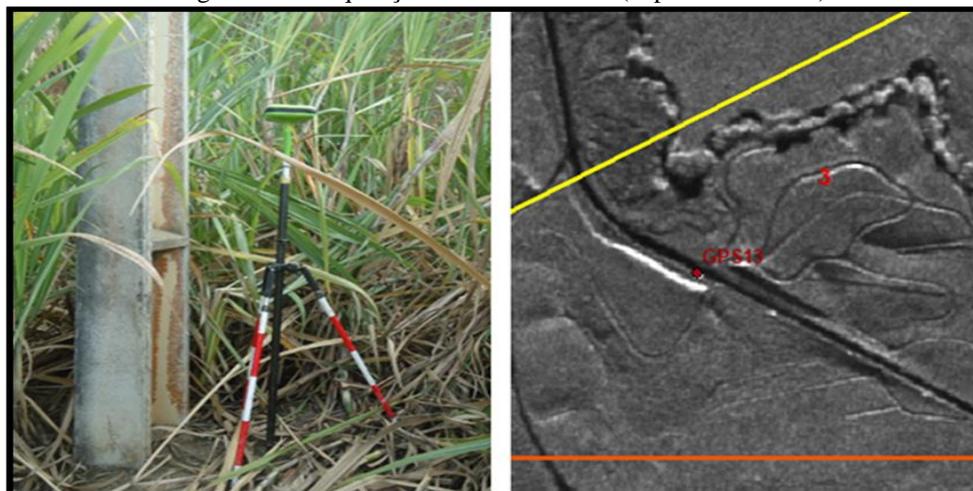
Fonte: A Autora (2019).

Figura 100 – Aquisição do Ponto GPS11 (explosão de *Pixel*)

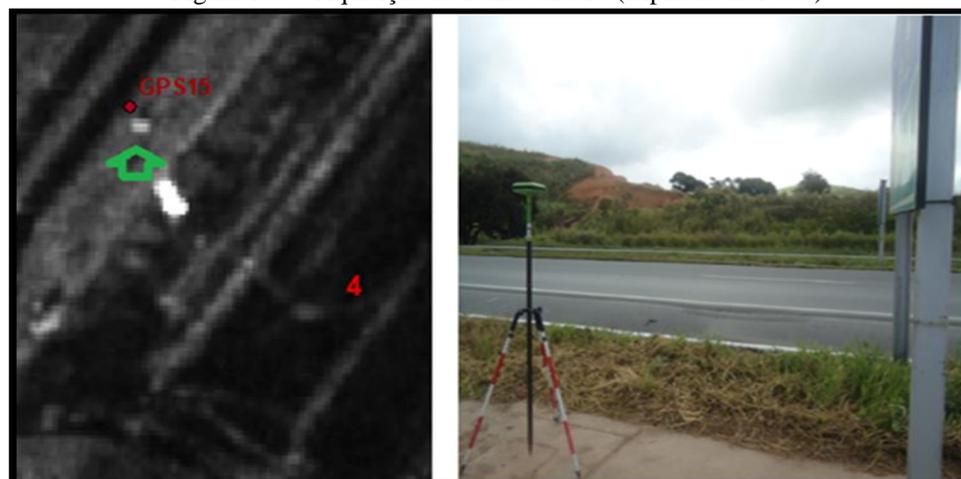
Fonte: A Autora (2019).

Figura 101 – Aquisição do Ponto GPS12 (explosão de *Pixel*)

Fonte: A Autora (2019).

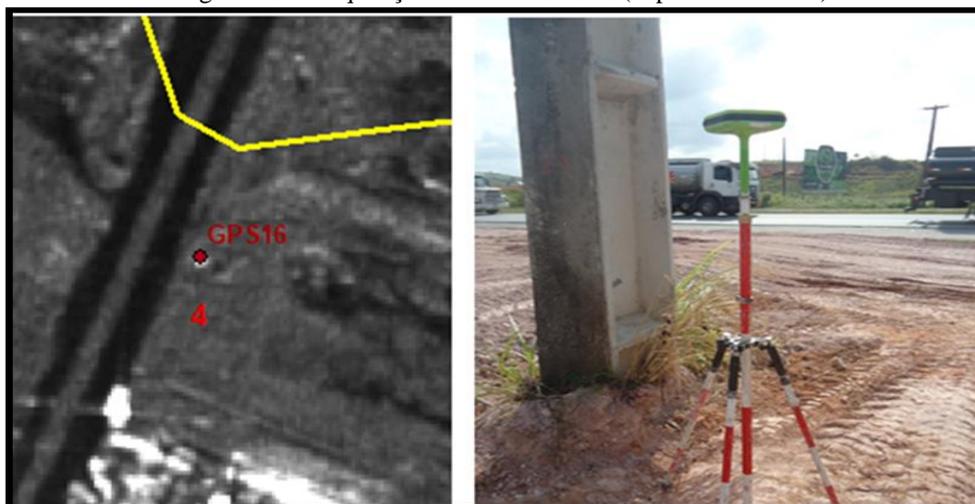
Figura 102 – Aquisição do Ponto GPS13 (explosão de *Pixel*)

Fonte: A Autora (2019).

Figura 103 – Aquisição do Ponto GPS15 (explosão de *Pixel*)

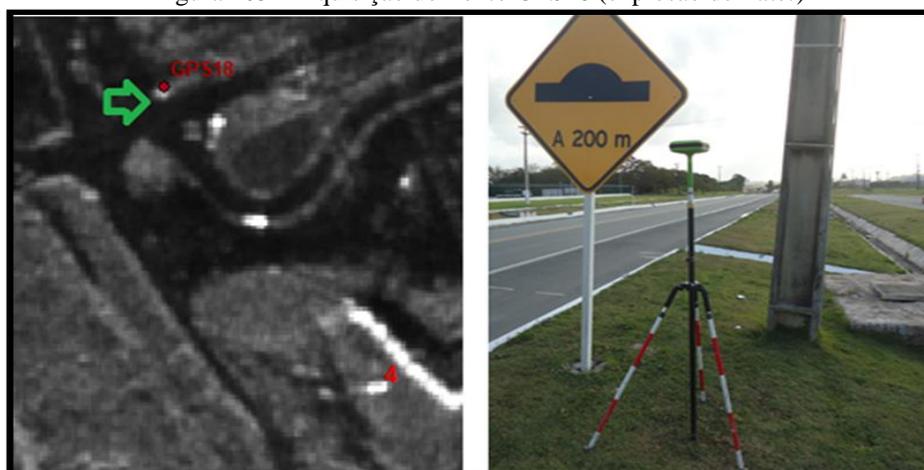
Fonte: A Autora (2019).

Figura 104 – Aquisição do Ponto GPS16 (explosão de *Pixel*)



Fonte: A Autora (2019).

Figura 105 – Aquisição do Ponto GPS18 (explosão de *Pixel*)



Fonte: A Autora (2019).

Figura 106 – Aquisição do Ponto GPS19 (explosão de *Pixel*)



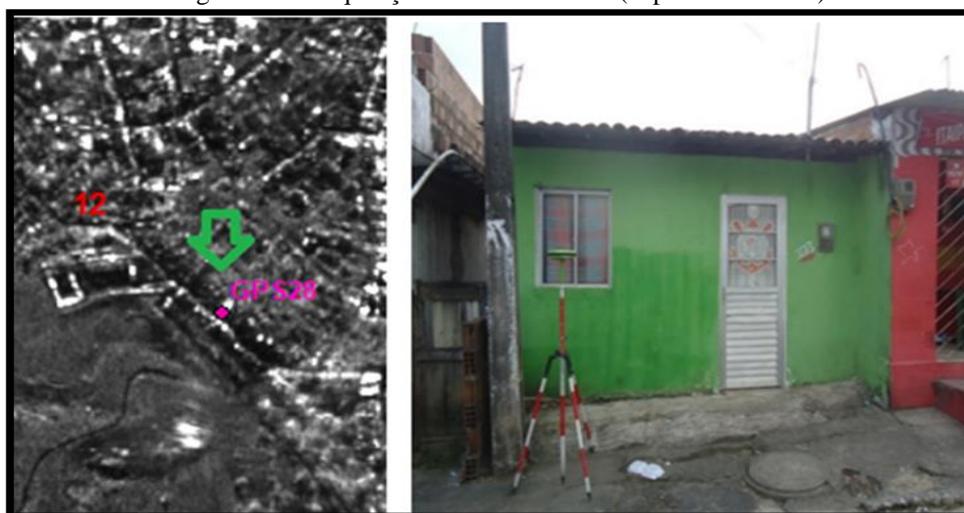
Fonte: A Autora (2019).

Figura 107 – Aquisição do Ponto GPS26 (explosão de *Pixel*)



Fonte: A Autora (2019).

Figura 108 – Aquisição do Ponto GPS03 (explosão de *Pixel*)



Fonte: A Autora (2019).

5.2.5.2.3 Processamento

O processamento dos vértices dos pontos teste pelo método radar-identificável foi realizado com o *software TOPCON TOOLS V.8.2* com o nível de confiança de 95%. Assim, utilizou-se SAT 93315, obtendo-se os GPS3, GPS4, GPS5, GPS11, GPS12, com as coordenadas geodésicas e planas retangulares UTM (SIGAS2000). E a altitude ortométrica é calculada pela Equação 29.

5.2.5.2.4 Validação Posicional Planialtimétrica

De acordo com o PEC-84, para um produto se enquadrar em uma das classes é necessário que pelo menos 90% dos seus pontos esteja com erro inferior ao EM e ao desvio-padrão para aquela classe. Caso os pontos não atinjam os valores pré-estabelecidos da classe, ou seja, os resultados sejam "não conformes" para aquela classe, deve-se encerrar a classificação e iniciar uma nova classificação até que se atinja uma classe para o produto. Caso os dados não se enquadrem em uma das classificações citadas no PEC-84, os dados devem ser classificados como "não conforme" em relação ao PEC.

5.3 TAMANHO DA AMOSTRA DA ÁREA DE ESTUDO

Para a etapa de validação dos pontos de controle de qualidade posicional planialtimétrico foi definido o tamanho da amostra conforme apresentado por Nogueira (2003), ASPRS (2015) e os testes EMAS, NMAS, ASPRS e NSSDA.

5.3.1 Tamanho da Amostra de acordo com os Testes Estatísticos

De acordo com os testes EMAS, NMAS, ASPRS e NSSDA o tamanho da amostra dentro da área de estudo necessário para suas aplicações é de no mínimo 20 pontos. A Tabela da ASPRS, para a área de estudo de 97km² é 20 pontos de controle.

5.4 DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE POSICIONAL PLANIALTIMÉTRICO

Conforme explanado no subitem 5.2, foram definidos os pontos de controle posicional planialtimétrico dentro da área de estudo. Para isso, foram adotadas as seguintes etapas: planejamento; medições; e processamentos dos dados estudados.

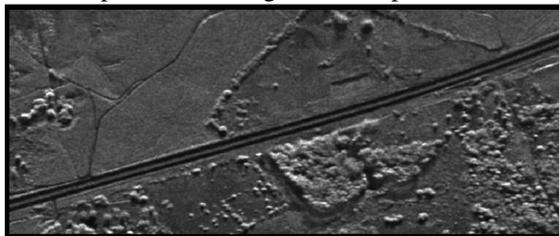
5.4.1 Planejamento

O planejamento foi dividido em três etapas: seleção dos pontos de controle posicional planialtimétrico; escolha da base de referência pertencente ao sistema geodésico brasileiro; equipamentos; e modelo da monografia dos pontos adquiridos em campo.

5.4.1.1 Seleção dos Pontos de Controle Posicional Plainialtimétrico

Em primeiro lugar, não foi possível realizar um melhor espalhamento dos pontos de controle na área de estudo devido à inexistência de explosões em algumas faixas na ortoimagem, como ilustra a Figura 109.

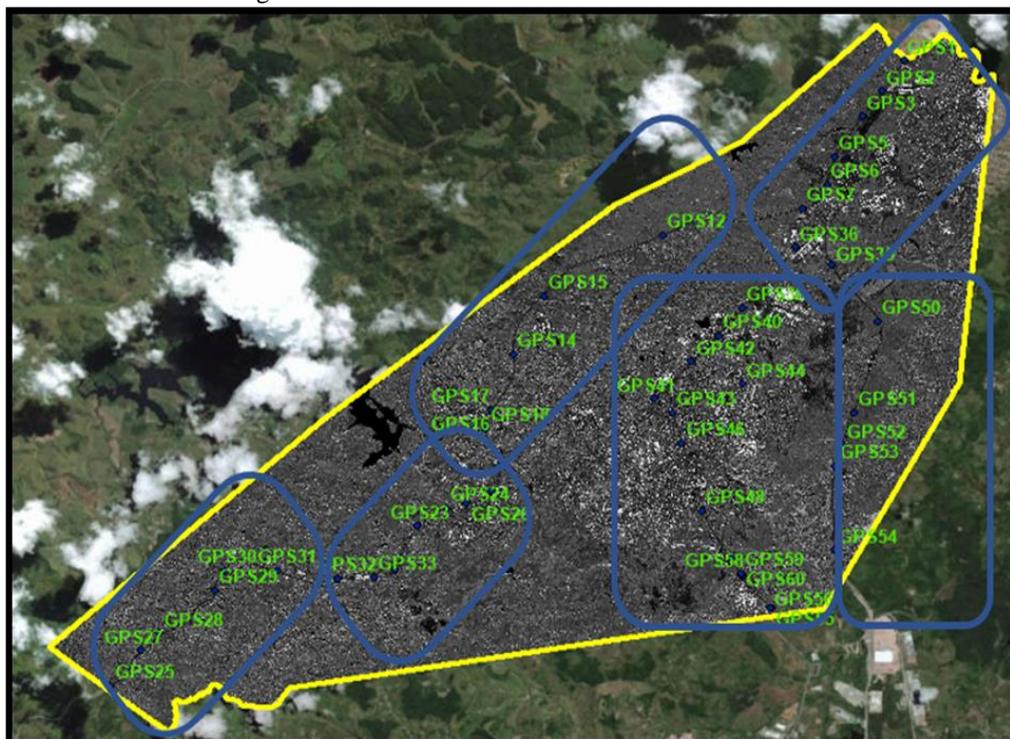
Figure 109 - Exemplo de Ortoimagem sem explosões na beira da Estrada



Fonte: A Autora (2019).

A Figura 110, ilustra as localizações dos possíveis pontos de controle posicional selecionados.

Figura 110 - Os Pontos de Controle Pré-selecionados



Fonte: A Autora (2019).

Foram consideradas nesta Tese as explosões que tiveram um formato de um ponto e que ficaram localizadas no entorno ou dentro das vias para servirem de ponto de controle

posicional planialtimétrico. Foram evitados explosões de *pixels* que não tinham uniformidades, lugares dentro dos centros urbanos, e edificações, pois não apresentavam geometria definida na ortoimagem. Após esta análise, identificou-se os possíveis candidatos que poderiam ser utilizados como pontos de controle posicional planialtimétrico da área de estudo.

A Tabela 11 apresenta os pontos planejados conforme as feições radar-identificável na ortoimagem.

Tabela 11 – Pontos Planejados dentro da Área de Estudo

Name	Este (m)	Norte (m)	Name	Este (m)	Norte (m)
GPS1	280396,0000	9090185,0001	GPS33	271414,0000	9080984,0000
GPS2	280025,0000	9089644,0003	GPS35	279174,0000	9086560,0002
GPS3	279695,0001	9089194,0002	GPS36	278549,9999	9086856,0002
GPS5	279227,0000	9088471,0001	GPS38	277654,9999	9085778,0001
GPS6	279099,9999	9087985,0002	GPS40	277248,0000	9085276,0001
GPS7	278680,0000	9087545,0002	GPS42	276795,9999	9084820,0003
GPS12	276308,0000	9087078,0004	GPS41	276173,0000	9084160,0001
GPS15	274293,0000	9085994,0002	GPS44	277658,0001	9084424,0002
GPS14	273786,0000	9084956,0002	GPS45	277459,0001	9083603,0002
GPS16	273410,0000	9083949,0002	GPS46	276631,9999	9083365,0004
GPS17	273396,0000	9083961,0001	GPS43	276482,0000	9083906,0003
GPS18	273322,0000	9083629,0001	GPS48	276976,0000	9082165,0003
GPS20	272990,0000	9082299,0002	GPS49	277461,0001	9081334,0001
GPS21	273403,9999	9082521,0002	GPS50	279954,9999	9085541,0002
GPS23	272156,0001	9081889,0002	GPS51	279541,0000	9083911,0003
GPS24	272653,0001	9082212,0002	GPS52	279369,0000	9083333,0004
GPS22	271785,9999	9081113,0001	GPS53	279232,0000	9082965,0001
GPS25	266962,0000	9079041,0002	GPS54	279228,0000	9081465,0004
GPS27	267468,9999	9079670,0001	GPS55	278159,9999	9080432,0001
GPS28	267789,9999	9079974,0001	GPS56	278130,0000	9080438,0004
GPS29	268732,9999	9080747,0000	GPS60	277654,0000	9081002,0001
GPS30	268886,9999	9081096,0001	GPS58	277640,0000	9081032,0003
GPS31	269794,0000	9081099,0002	GPS59	277632,0000	9081047,0002

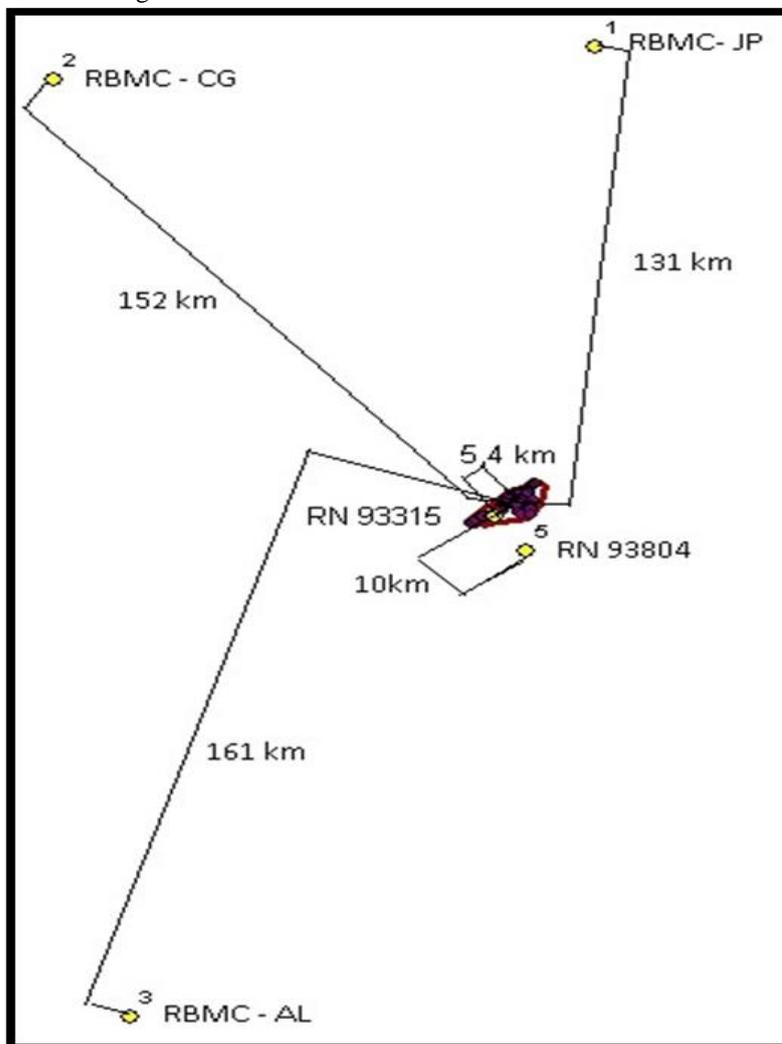
Fonte: A Autora (2019).

5.4.1.2 Escolha da base do Sistema Geodésico Brasileiro

Esta etapa contemplou os procedimentos para a escolha do marco de referência que pertencem ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e que esteja próximo da área de estudo. Para isso, verificou-se quais destes marcos poderiam ser utilizados como base, e a partir disso, determinou-se o tempo de permanência que cada receptor deveria ficar nos pontos de controle planejado nesta etapa. Os procedimentos adotados seguiram as Especificações e

Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro/2017. Devido à estação RBMC-REC estar inoperante, foram então analisadas outras RBMC e estações SAT próximas da área de estudo como ilustra a Figura 111.

Figura 111 – Pontos do IBGE dentro da área de estudo



Fonte: A Autora (2019).

É possível observar na Figura 108, que dentro e próximo à área de estudo, existem cinco (5) pontos de referência implantados pelo IBGE. Dentre os pontos citados, três são RBMC, que estão localizados em Alagoas, Campina Grande e João Pessoa, Brasil; os demais pontos são marcos geodésicos. Foram calculadas as distâncias destes pontos em relação a um ponto escolhido no centro da área de estudo como ilustra a Figura 109, obtendo assim, 161 Km a distância máxima e 5,4 Km a distância mínima. Analisando a norma do INCRA, quanto maior a linha de base (distância da base de referência até o ponto planejado), maior será o tempo de permanência do receptor GNSS no ponto coletado. Portanto, a base escolhida foi

RN 93315 (Figura 112), por estar a 5,4 Km da área de estudo, sendo assim a melhor opção em relação à distância, tempo e custo.

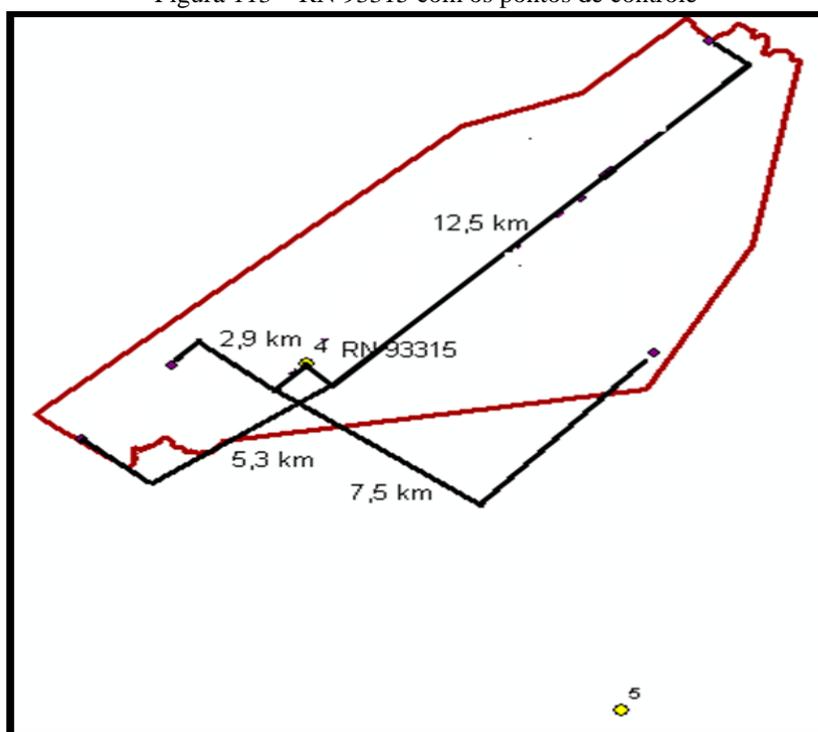
Figura 112 – Relatório de Estação Geodésica nome RN 93315

Estação :	93315	Nome da Estação :	93315	Tipo :	Estação GPS
Município :	CABO DE SANTO AGOSTINHO			UF :	PE
Última Visita:	06/07/2017	Situação Marco Principal :	Bom		
Conexões :	RN : 3672A				
DADOS PLANIALTIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	08 ° 18 ' 25,71082 " S	Altitude Normal(m)	51,4089	Gravidade(mGal)	
Longitude	35 ° 04 ' 20,16972 " W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Datum	
Altitude Geométrica(m)	45,621	Sigma Altitude(m)		0,089	Data Medição
Fonte	GPS Geodésico	Datum	Imbituba		Data Cálculo
Origem	Ajustada	Data Medição	31/05/2013		
Datum	SIRGAS2000	Data Cálculo	30/07/2018		
Data Medição	03/06/2013	Número Geopotencial (m ² /s ²)	502,847		
Data Cálculo	23/05/2014				
Sigma Latitude(m)	0,011				
Sigma Longitude(m)	0,009				
Sigma Altitude Geométrica(m)	0,078				
UTM(N)	9.081.150,360				
UTM(E)	271.763,767				
MC	-33				

Fonte: IBGE (2000).

As distâncias da estação RN 93315 em relação aos limites da área de estudo são: 2,9 Km; 5,3 Km; 7,5 Km; e 12,5 Km, como ilustra a Figura 113.

Figura 113 – RN 93315 com os pontos de controle



Fonte: A Autora (2019).

De acordo com o INCRA, para uma linha de base de 0 a 10 Km o tempo necessário para obter a coordenada do ponto planejado é de 20 minutos, já para uma linha de base de 10 a 20 Km, o tempo necessário é de 30 minutos.

A especificação do IBGE/2017 recomenda que, para uma linha de base de 0 a 5 Km, são necessários 5 a 10 min para obtenção da coordenada do ponto planejado, para uma linha de base de 5 a 10 Km, são necessários 10 a 15 min, e para uma linha de base de 10 a 20 Km, o tempo varia de 10 a 30 min.

De acordo com o que foi visto anteriormente na norma do INCRA e na especificação do IBGE/2017, juntamente com as informações das distâncias entre o centro e o limite da área de estudo, que varia entre 2,9km a 12,5km, optou-se por um tempo de permanência de 30 minutos no ponto de controle.

5.4.1.3 Equipamentos

Os equipamentos utilizados para aquisição dos pontos de controle posicional planialtimétrico dentro da área de estudo foram:

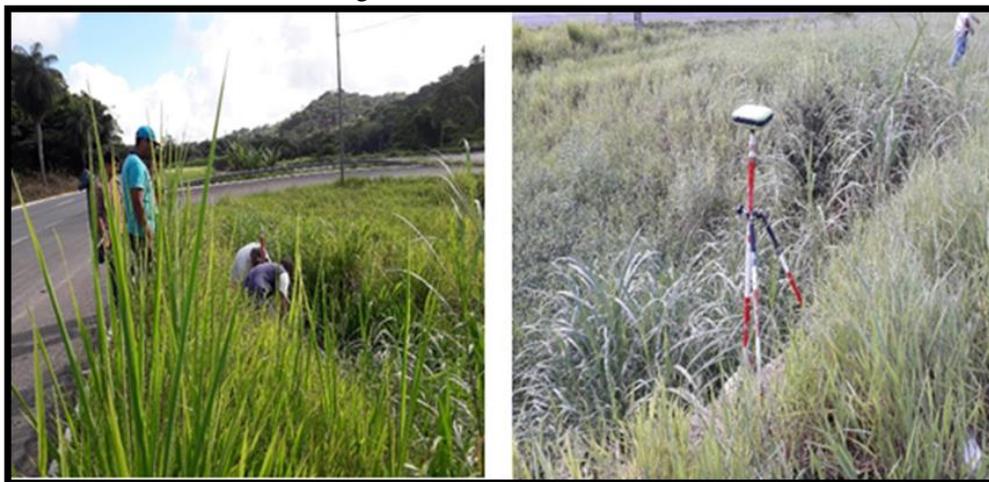
- a) 2 receptores TOPCON L1/L2 que apresentam uma precisão de 10mm + 1ppm para os levantamentos estático e estático-rápido (TOPCON, 2003);
- b) tripés, guarda-sol, bases nivelantes, trena, dentre outros;
- c) suporte automotivo para GPS;
- d) câmara fotográfica digital com 10 *megapixel* ou superior;
- e) modem USB Móvel da Banda Larga ou similar para acesso à internet;
- f) GPS de mão; e
- g) *softwares*: ArcGis 10, TOPCOM TOOLS v.8.2 (com *Hardlock* do LAGEO/DECART), Mapgeo2010, Excel 2010, Word 2010.

5.4.2 Aquisição dos Pontos de Controle Posicional Planialtimétrico - Medições

A campanha GNSS para a aquisição dos pontos de controle em campo foi realizada nos dias 19 e 20 de janeiro de 2019. Durante as medições foram utilizados quatro (4) receptores geodésicos L1/L2 (cf. 5.4.1), com o tempo de rastreamento que variou de 25 a 50 min para cada ponto. A taxa de gravação dos dados foi de 1 segundo, com máscara de elevação de 15°. Os receptores foram instalados com tripés e bases nivelantes e, em seguida, foram

medidas as alturas das respectivas antenas. A campanha visou rastrear simultaneamente os pontos de controle posicional planejados e a base SAT93315. Portanto, um receptor foi locado na base SAT 93315 (Figura 6.a) que pertence ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e o outro receptor coletou os pontos, ou seja, utilizou o método de posicionamento estático. Portanto, a Figura 114 ilustra a instalação da base e a base instalada.

Figura 114 – Base de Referência



Fonte: A Autora (2019).

No dia da aquisição dos pontos de controle foi utilizado *notebook*, GPS de navegação, Celular com GPS e também imagens do local de estudo (Figura 115).

Figura 115 – Pontos Planejados na ortoimagem e localizados na imagem ótica



Fonte: A Autora (2019).

A Figura 116 apresenta as medições realizadas para obtenção da altura da antena do receptor GNSS. E a Figura 117 apresenta a aquisição dos pontos planejados dentro da área de estudo.

Figura 116 – Medições da altura da antena do GNSS



Fonte: A Autora (2019).

Figura 117 – Aquisição dos pontos de controle em campo (1)



Fonte: A Autora (2019).

Houve necessidade em adquirir mais pontos que ficavam no entorno dos pontos planejados, pois não se sabia ao certo qual era o ponto que ficava localizado na mancha da ortomagem, conforme ilustra a Figura 118.

Figura 118 – Aquisição dos pontos de controle em campo (2)



Fonte: A Autora (2019).

5.4.3 Processamento dos Pontos Adquiridos em Campo

O processamento dos vértices dos pontos planejados pelo método radar-identificável foi realizado com o *software* TOPCON TOOLS V.8.2 com o nível de confiança de 95%:

- a) o processamento utilizou a base SAT 93315 como referência e determinou os pontos de controle posicional de cada explosão;
- b) as coordenadas geodésicas e planas retangulares UTM (SIRGAS2000) foram obtidas no fuso 25° S no meridiano central (MC) = 33; e
- c) os dados foram ajustados pelo *software* utilizado.

Os *softwares* Mapgeo2010 e MapGEO2015 foram utilizados para converter a altitude geométrica - h (referente ao elipsóide) para ortométrica – H (referente ao nível médio dos mares (NMM)). A utilização do Mapgeo2010 foi devida à aquisição dos dados SAR utilizados nesta tese terem sido obtidos em 2014.

5.4.4 Análise dos Pontos Adquiridos em Campo - *Outliers*

O Teste de Chauvenet foi aplicado nos Pontos de controle planialtimétrico adquiridos em Campo para detecção dos pontos *outliers* da amostra analisada, selecionando assim quais serão eliminados da amostra. Após isso, foram definidos quais os pontos a serem analisados dentro da amostra.

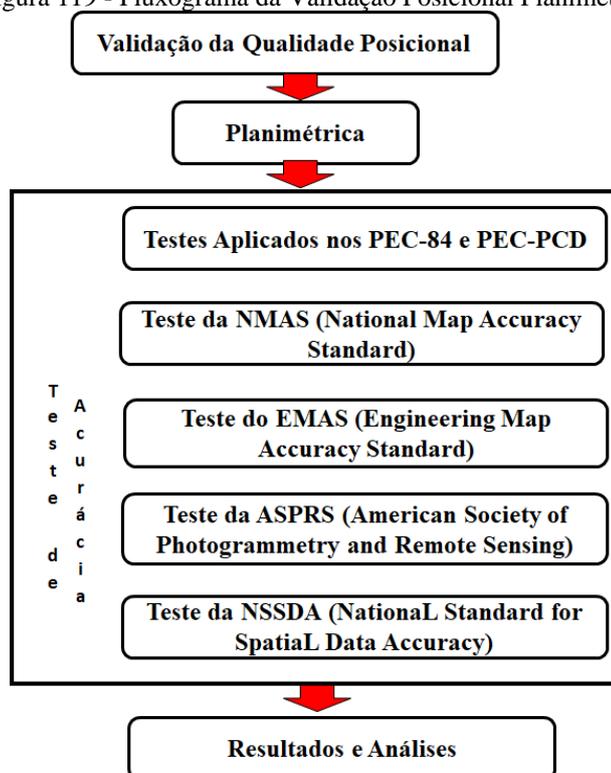
5.5 VALIDAÇÃO DA QUALIDADE POSICIONAL DOS PONTOS DE CONTROLE PLANIALTIMÉTRICO NOS INSUMOS ANALISADOS

A validação da acurácia posicional dos pontos escolhidos pelas características do método radar-identificável utilizou testes estatísticos definidos no subitem 4.4. Esta etapa de validação foi subdividida em duas partes: planimétrica e altimétrica.

5.5.1 Validação Posicional Planimétrica

A validação posicional planimétrica dos pontos de estudo ocorreu conforme apresentado no fluxograma da Figura 119. Sendo assim, foram utilizados os testes estatísticos fornecidos pelos PEC-84 e PEC-PCD, EMAS, NMAS, ASPRS e NSSDA em relação às coordenadas planimétricas. Nesta etapa, foi utilizado o padrão adotado de cada método como também o padrão de exatidão cartográfica de normatizações vigentes no Brasil.

Figura 119 - Fluxograma da Validação Posicional Planimétrica

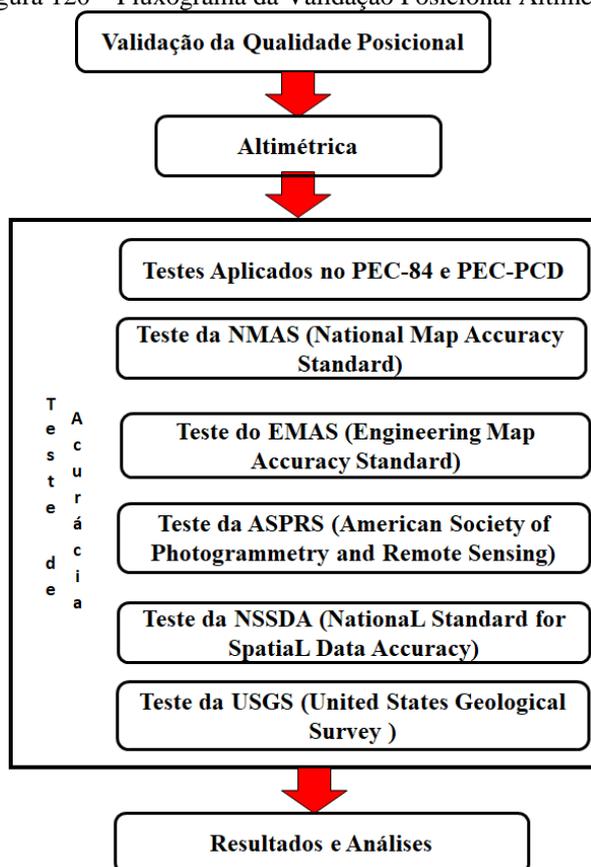


Fonte: A Autora (2019).

5.5.2 Validação Posicional Altimétrica

A validação posicional altimétrica dos pontos de estudo ocorreu conforme apresentado no fluxograma da Figura 120. Sendo assim, foram utilizados os testes estatísticos fornecidos pelos PEC-84 e PEC-PCD, EMAS, NMAS, ASPRS, NSSDA, e USGS em relação às coordenadas altimétricas. Nesta etapa, foi utilizado o padrão adotado de cada método como também o padrão de exatidão cartográfica de normatizações vigentes no Brasil.

Figura 120 – Fluxograma da Validação Posicional Altimétrica



Fonte: A Autora (2019).

5.6 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS CONFECIONADOS PARA GEOTECNIA

Os produtos para a área de geotécnica confeccionados nesta tese foram: Mapa de Declividade; Relevo Sombreado; Curvatura; Modelo Digital do Terreno; Modelo Digital de Elevação; Curvas de Nível; e *Height Above Nearest Drainage* (Hand) na escala de 1:10.000. A confecção destes produtos permite que os estudos possam realizar um melhor planejamento com o conhecimento dos PEC's vigentes no Brasil.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as atividades realizadas em campo, os dados foram processados, interpretados e analisados. A seguir serão apresentados os resultados obtidos, assim como suas discussões.

6.1 OS TESTES DOS PONTOS DE CONTROLE POSICIONAL

Os pontos de controle posicional planialtimétrico testes escolhidos pelo método de fotogrametria e radar-identificável foram coletados, processados e analisados, sendo apresentados a seguir os resultados obtidos.

6.1.1 Por fotogrametria

Foram escolhidos pontos que são estratégicos para fotogrametria, como quinas, esquina, cruzamentos de estradas ou edificações presentes nas imagens óticas. A partir destes pontos, foram obtidas as coordenadas geodésicas e planas retangulares UTM (SIRGAS2000) dos vértices P07, P08, P09, P10, P12, P13, P14, P15, P18 e P19, conforme apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Coordenadas planialtimétricas dos pontos teste (por fotogrametria) em SIRGAS2000

Ponto	Latitude (φ)	Longitude (λ)	Este (m)	Norte (m)	h (m)
P07	8°14'33,810''S	35°01'54,152''W	276196,453	9088299,276	7,069
P08	8°16'46,725''S	35°03'15,668''W	273722,197	9084202,306	12,369
P09	8°16'39,481''S	35°00'55,114''W	278023,213	9084446,898	1,82
P10	8°19'05,363''S	35°00'36,759''W	278607,712	9079967,133	27,472
P12	8°19'42,042''S	35°03'12,536''W	273845,957	9078815,586	57,731
P13	8°17'49,239''S	35°01'10,986''W	277548,275	9082300,943	2,56
P14	8°18'12,682''S	35°01'39,723''W	276672,413	9081576,086	8,626
P15	8°18'32,151''S	35°02'54,836''W	274376,564	9080966,045	42,559
P18	8°18'03,509''S	35°06'50,588''W	267156,222	9081808,270	82,183
P19	8°17'29,261''S	35°04'45,005''W	270994,546	9082880,997	111,795

Fonte: GEGEP (2015).

A validação posicional planialtimétrica dos pontos escolhidos pelo método de planejamento dos pontos por fotogrametria foi dividida em duas etapas. A primeira em relação às coordenadas planimétricas com a utilização da ortoimagem; a segunda em relação à coordenada altimétrica com a utilização do MDT.

A primeira etapa foi a localização dos pontos dentro da ortoimagem para a realização da validação posicional planimétrica. Para isto, foi utilizada a imagem ótica como auxílio na identificação dos pontos planejados pelo método de planejamento de fotogrametria, obtendo-se assim os seguintes resultados:

- a) O ponto 7 (P7) foi planejado e adquirido na esquina de uma rua que fica próxima a uma residência como ilustra a imagem ótica na Figura 121. No entanto, não foi possível localizar o mesmo ponto na ortoimagem, devido à região apresentar distorções nas formas geométricas das ruas e por haver diversas explosões de *pixels* na ortoimagem. Assim, dificultando o correto posicionamento.

Figura 121 – Ponto Planejado P7



Fonte: A Autora (2018).

- b) O ponto 8 (P8) foi planejado e adquirido na esquina de uma rua sem asfalto, próxima a um trevo como ilustra a imagem ótica na Figura 122. Ao tentar localizar o ponto citado na ortoimagem (Figura 120), percebe-se que existem diversas explosões de *pixels* na região e não se consegue visualizar as vias existentes dentro da área. Assim, é impossível identificar a localização do P08 na ortoimagem.

Figura 122 – Ponto Planejado P8



Fonte: A Autora (2018).

- c) O ponto 9 (P9) foi planejado e adquirido no lado oposto da quina de uma casa como é visualizado na imagem ótica (Figura 123). Assim, tentou-se localizar o ponto citado na ortoimagem, mas na região estava presente uma enorme explosão de *pixel* que apresentava também distorções geométricas, tais como, o desaparecimento das ruas e edificações, assim ficando difícil a visualização das vias e do ponto.

Figura 123 – Ponto Planejado P9



Fonte: A Autora (2018).

- d) O ponto 10 (P10) foi planejado e adquirido na esquina do lado direito do trevo formado por ruas sem asfaltamento como mostra a imagem ótica (Figura 124). Ao tentar localizar o mesmo ponto na ortoimagem, percebe-se que há distorções na geometria da estrada e até desaparecimento de algumas ruas não asfaltadas.

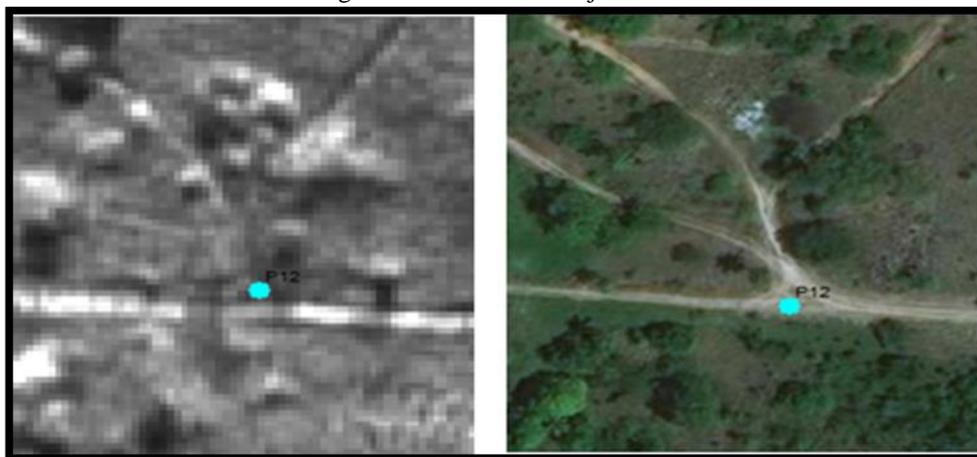
Figura 124 – Ponto Planejado P10



Fonte: A Autora (2018).

- e) O ponto 12 (P12) foi planejado e adquirido do lado oposto a uma bifurcação de ruas não asfaltadas como ilustra a Figura 125. Ao avaliar o mesmo ponto para localizá-lo na ortoimagem, verificou-se que não foi possível identificar o mesmo.

Figura 125 – Ponto Planejado P12



Fonte: A Autora (2018).

- f) O ponto 13 (P13) foi planejado e adquirido em cima de uma quina de uma casa que fica localizada entre uma rua asfaltada e outra não asfaltada como mostra a imagem ótica na Figura 126. Ao analisar a ortoimagem para localizar o ponto citado, verificou-se que a rua asfaltada juntamente com a rua não asfaltada apresentou distorções nos seus formatos na região, dificultando assim a localização do ponto.

Figura 126 – Ponto Planejado P13



Fonte: A Autora (2018).

- g) O ponto 14 (P14) foi planejado e adquirido em uma esquina de uma casa que fica localizada entre uma rua asfaltada e outra não asfaltada como mostra a imagem ótica na Figura 127. Observando a ortoimagem, percebe-se que existe uma linha formada

pelas explosões de *pixels*, percebe-se também que houve deslocamento do mesmo, dificultando assim sua localização.

Figura 127 – Ponto Planejado P14



Fonte: A Autora (2018).

- h) O ponto 15 (P15) foi planejado e adquirido no meio do trevo formado por duas ruas não asfaltadas como é observado na imagem ótica. A ortoimagem (Figura 128) apresenta detalhes sobre as ruas, mas as mesmas estão estreitas, e também com dificuldades de localização do ponto citado.

Figura 128 – Ponto Planejado P15



Fonte: A Autora (2018).

- i) O ponto 18 (P18) foi planejado e adquirido na esquina de um trevo formado por três vias não asfaltadas como ilustra a imagem ótica (Figura 129). Ao observar a ortoimagem, verifica-se que as ruas ficam distorcidas em várias partes, apresentando outro formato, provocando também dificuldade em relação à localização do ponto.

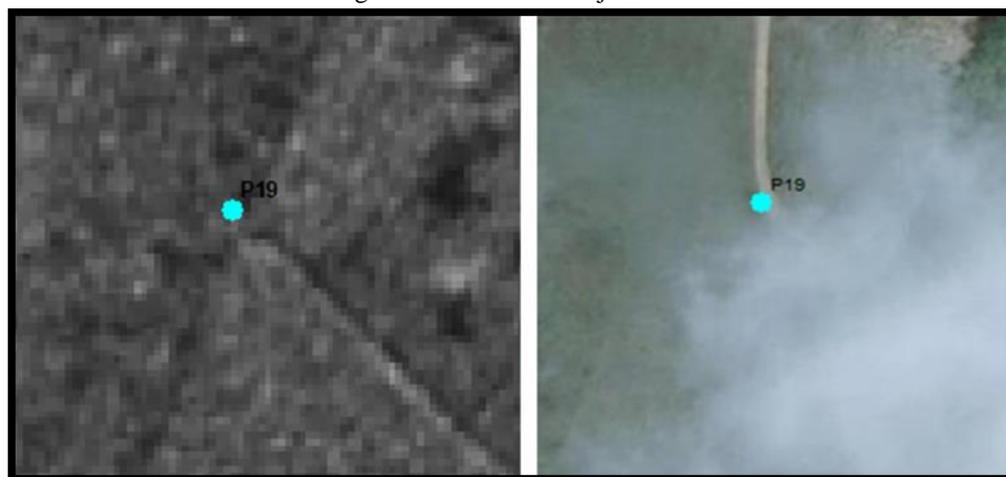
Figura 129 – Ponto Planejado P18



Fonte: A Autora (2018).

- j) O ponto 19 (P19) foi planejado e adquirido no meio da curva de uma via não asfaltada como é visualizado na imagem ótica (Figura 130). Assim, tentou-se localizar o ponto citado na ortoimagem, mas devido às distorções geométricas presentes na região, tal como, o desaparecimento das ruas não asfaltadas, percebe-se que foi difícil a visualização da mesma e do ponto.

Figura 130– Ponto Planejado P19



Fonte: A Autora (2018).

Ao tentar identificar os pontos planejados por fotogrametria, localizados em quinas, cruzamentos de estrada, cantos de quadras e entre outros lugares foto-identificados nas imagens óticas, percebeu-se que não foi possível observar os mesmos na ortoimagem, tornando-se impossível realizar o controle posicional planimétrico destes pontos planejados.

Sendo assim, a localização dos pontos P07, P08, P09, P10, P12, P13, P14, P15, P18 e P19 na ortomagem só foi possível devido as suas coordenadas obtidas em campo.

A segunda etapa é em relação à validação posicional altimétrica, utilizou-se o *software* Arcgis10 para extração da coordenada altimétrica no MDT e das coordenadas de campo. A Tabela 13 apresenta o nome de cada ponto adquirido junto com sua altitude elipsoidal (h), altura geoidal (N) obtida pelo MapGeo2010, a altitude ortométrica calculada pela a Equação 29, e a altitude ortométrica extraída do MDT, para seus respectivos pontos.

Tabela 13 – Altitude Elipsoidal, altura Geoidal e altitude ortométrica obtida em campo e no MDT

Pontos	h (m)	N (m)	H (m)	H raster (m)
P07	7,069	-5,65	12,719	11,993
P08	12,369	-5,66	18,029	18,316
P09	1,82	-5,76	7,58	7,323
P10	27,472	-5,82	33,292	33,439
P12	57,731	-5,72	63,451	64,044
P13	2,56	-5,77	8,33	7,641
P14	8,626	-5,76	14,386	12,182
P15	42,559	-5,71	48,269	47,342
P18	82,183	-5,54	87,723	88,327
P19	111,795	-5,61	117,405	113,011

Fonte: A Autora (2019).

A validação posicional altimétrica utilizou os valores do PEC-84 (Tabela 4). Este PEC determina que os valores das discrepâncias não podem ultrapassar de 2,5m e o erro-padrão= 1,67m para obter classe A (PEC-A) do seu produto analisado. A Tabela 14 apresenta a análise realizada em cada ponto em estudo de acordo com a classificação do PEC-84.

Tabela 14 – Análise em relação a PEC-84

Pontos	Z (e_{zi})	Controle de Qualidade Altimétrica		
	altimetria	PEC A	PEC B	PEC C
P07	0,726	Aprovado	Aprovado	Aprovado
P08	-0,287	Aprovado	Aprovado	Aprovado
P09	0,256	Aprovado	Aprovado	Aprovado
P10	-0,147	Aprovado	Aprovado	Aprovado
P12	-0,593	Aprovado	Aprovado	Aprovado
P13	0,689	Aprovado	Aprovado	Aprovado
P14	2,203	Aprovado	Aprovado	Aprovado
P15	0,927	Aprovado	Aprovado	Aprovado
P18	-0,604	Aprovado	Aprovado	Aprovado
P19	4,394	Reprovado	Reprovado	Reprovado

Fonte: A Autora (2019).

Analisando os resultados dos 10 pontos planejados em relação à classificação do PEC-84, obteve-se os seguintes resultados: 1 ponto foi reprovado e 9 aprovados em relação à classe A. O que representa 90% aprovados na classe A. O erro-padrão obtido foi de 0,613m. Diante dos resultados obtidos nesta amostra, os dados analisados foram satisfatórios por terem conseguido realizar a classificação altimétrica na classe da PEC-84.

6.1.2 Por Radar-identificável

Foram adquiridos pontos de controle pelo método radar-identificável. Este método consiste em escolher pontos de controle na ortoimagem com representação em forma de explosões de *pixels* padronizada localizadas em vias, que são estruturas em metal. Neste método foram obtidas as coordenadas geodésicas e planas retangulares UTM (SIRGAS2000) dos vértices GPS5, GPS11, GPS12, GPS13, GPS15, GPS16, GPS18, GPS19, GPS26 e GPS28 conforme apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Coordenadas planialtimétricas dos pontos teste (por Radar- identificável) em SIRGAS2000 do município de Cabo de Santo Agostinho

Ponto	Latitude (ϕ)	Longitude (λ)	Este (m)	Norte (m)	h (m)
GPS5	8° 18' 1,650" S	35° 4' 7,378" W	272151,415	9081891,770	47,776
GPS11	8° 16' 48,892" S	35° 1' 55,454" W	276177,791	9084148,315	7,015
GPS12	8° 17' 12,118" S	35° 2' 19,892" W	275433,438	9083430,799	8,027
GPS13	8° 14' 49,510" S	35° 1' 56,303" W	276133,083	9087816,530	14,051
GPS15	8° 14' 2,789" S	34° 59' 57,372" W	279767,6326	9089267,315	6,848
GPS16	8° 13' 32,946" S	34° 59' 36,721" W	280394,013	9090190,680	9,216
GPS18	8° 14' 42,430" S	34° 59' 37,100" W	280393,048	9088055,558	9,216
GPS19	8° 15' 35,443" S	35° 0' 15,913" W	279213,150	9086420,687	6,232
GPS26	8° 16' 39,892" S	35° 1' 7,330" W	277649,364	9084432,369	4,805
GPS28	8° 17' 53,289" S	35° 2' 41,012" W	274793,502	9082162,375	49,418

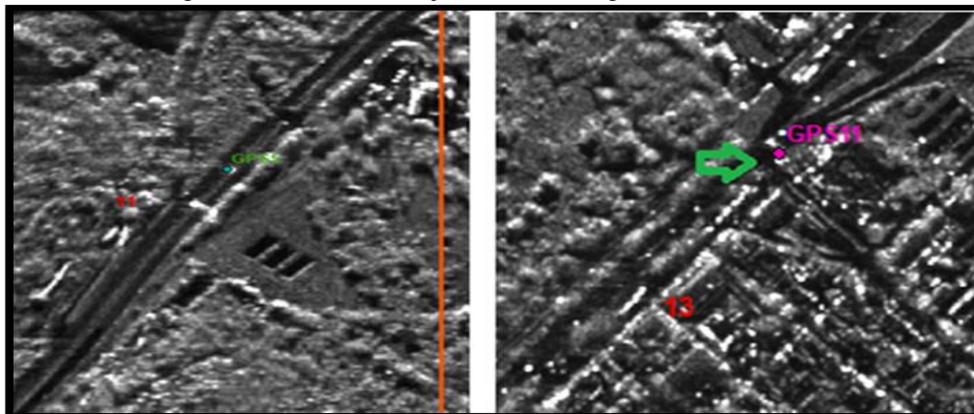
Fonte: A Autora (2019).

A validação posicional planialtimétrica utilizando feições radar-identificável na ortoimagem foi dividida em duas etapas. A primeira em relação às coordenadas planimétricas com a utilização da ortoimagem; a segunda em relação à coordenada altimétricas com a utilização do MDT.

A primeira etapa foi a localização dos pontos dentro da ortoimagem para a realização da validação posicional planimétrica, utilizou-se os conceitos abordados no subitem 5.2.4 na identificação dos pontos planejados pelo método de radar-identificável. As Figuras 130, 131,

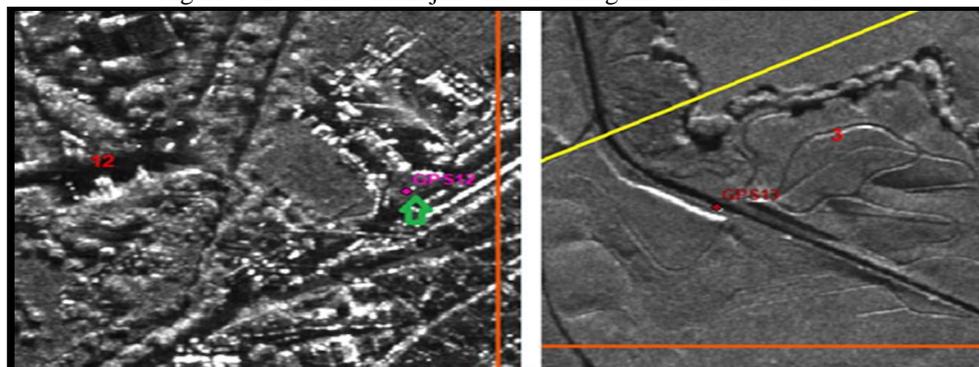
132, 133, 134 e 135 mostram a localização dos pontos. Todos estes pontos ficam localizados próximos à estrutura com metal.

Figura 131 – Ponto Planejado na Ortoimagem GPS5 e GPS11



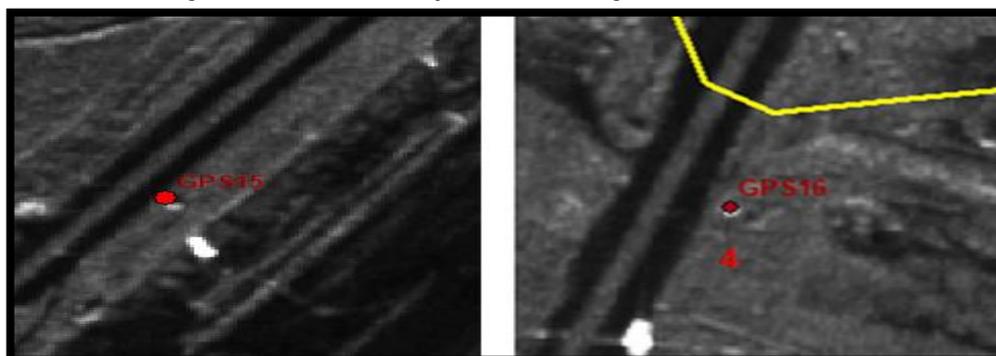
Fonte: A Autora (2019).

Figura 132 – Ponto Planejado na Ortoimagem GPS12 e GPS13



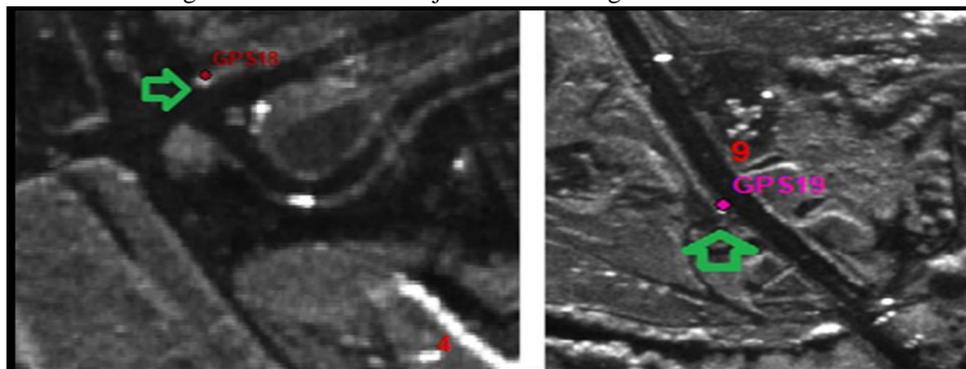
Fonte: A Autora (2019).

Figura 133 – Ponto Planejado na Ortoimagem GPS15 e GPS16



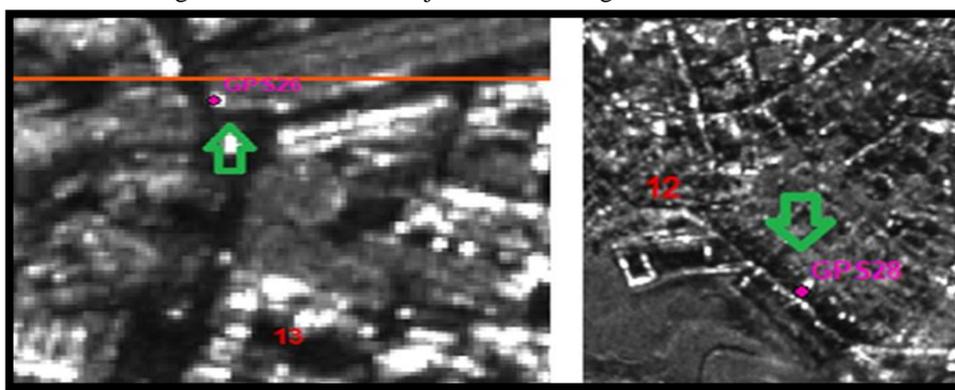
Fonte: A Autora (2019).

Figura 134 – Ponto Planejado na Ortoimagem GPS18 e GPS19



Fonte: A Autora (2019).

Figura 135 – Ponto Planejado na Ortoimagem GPS26 e GPS28



Fonte: A Autora (2019).

Em posse das coordenadas planialtimétricas dos pontos planejados por feições radar-identificável e das coordenadas obtidas na ortoimagem, utilizou-se as Equações 2, 3 e 4 apresentadas no subitem 4.4.2.1, obtendo-se como resultados as discrepâncias destes pontos que estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Coordenadas da ortoimagem e em campo com suas respectivas discrepâncias

Pontos	E (m)	E carta (m)	X(e _{xi})(m)	N (m)	N Carta (m)	Y(e _{yi})(m)
GPS5	272151,415	269407,200	-1,858	9081891,770	9081892,235	-0,464
GPS11	276177,791	276178,559	-0,767	9084148,315	9084148,043	0,272
GPS12	275433,438	275436,664	-3,226	9083430,799	9083431,831	-1,032
GPS13	276133,083	276134,941	-1,858	9087816,530	9087815,137	1,393
GPS15	279766,423	279767,633	-1,210	9089270,518	9089267,315	3,203
GPS16	280394,013	280394,013	0,000	9090190,680	9090189,287	1,393
GPS18	280393,048	280392,119	0,929	9088055,558	9088052,307	3,251
GPS19	279213,150	279212,221	0,929	9086420,687	9086416,507	4,180
GPS26	277649,364	277650,293	-0,929	9084432,369	9084432,833	-0,464
GPS28	274793,502	274794,431	-0,929	9082162,375	9082161,910	0,464

Fonte: A Autora (2019).

Analisando as discrepâncias encontradas em cada eixo de coordenada, obteve-se os seguintes resultados: para o eixo X, o maior valor, em módulo, foi de -5,889m; e o menor valor foi de 0,000; e no eixo Y, o maior valor, em módulo, foi de 4,180m e o menor valor foi de 0,272m.

Com os resultados das discrepâncias em relação a cada eixo, foram calculados os resíduos da resultante das coordenadas planimétricas em cada ponto conforme as Equações 2 e 3. Os dados foram analisados e classificados de acordo com o PEC-84 nas componentes horizontais, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Cálculo do PEC-84

Pontos	e_{xi}^2 (m ²)	e_{yi}^2 (m ²)	Δe (m)	Pontos	e_{xi}^2 (m ²)	e_{yi}^2 (m ²)	Δe (m)
GPS5	3,451	0,216	1,915	GPS16	0,000	1,941	1,393
GPS11	0,589	0,074	0,814	GPS18	0,863	10,570	3,381
GPS12	10,408	1,065	3,387	GPS19	0,863	17,473	4,282
GPS13	3,451	1,941	2,322	GPS26	0,863	0,216	1,039
GPS15	1,463	10,259	3,424	GPS28	0,863	0,216	1,039

Fonte: A Autora (2019).

Analisando os resultados dos 10 pontos planejados em relação à classificação do PEC-84, obteve-se os seguintes resultados: 1 ponto foi reprovado e 9 aprovados em relação à classe A, o que representa 90% aprovados na classe A. O erro-padrão foi de 1,242m. Diante dos resultados obtidos nesta amostra, os dados analisados foram satisfatórios por terem conseguido realizar a classificação planimétrica, resultando com isso classe A para este produto, pois 90% dos pontos enquadraram-se na referida classe.

A segunda etapa é em relação à validação posicional altimétrica, utilizou-se o software Arcgis10 para extração da coordenada altimétrica no MDT e das coordenadas de campo. A Tabela 18 apresenta o nome de cada ponto adquirido junto com sua altitude elipsoidal, ondulações geoidais (N) obtida pelo MapGeo2010 e ondulações geoidais (N') obtida pelo MapGeo2015, a altitude ortométrica calculada pela Equação 29 apresentada no subitem 5.2.5.1.3, e a altitude ortométrica extraída do MDT, para seus respectivos pontos.

Tabela 18 – Altitude elipsoidal, ondulações geoidais, altitude ortométrica obtida em campo e no MDT

Pontos	h (m)	N (m)	N' (m)	H (m)	H' (m)	H raster (m)
GPS5	47,776	-5,65	-5,68	53,426	53,456	52,261
GPS11	7,015	-5,72	-5,71	12,735	12,725	12,821
GPS12	8,027	-5,71	-5,70	13,737	13,727	12,081
GPS13	14,051	-5,66	-5,71	19,711	19,761	21,398
GPS15	6,848	-5,75	-5,77	12,598	12,618	12,085
GPS16	-0,183	-5,77	-5,77	5,587	5,587	5,584
GPS18	9,216	-5,79	-5,80	15,006	15,016	13,843
GPS19	6,232	-5,77	-5,79	12,002	12,022	11,174
GPS26	4,805	-5,75	-5,75	10,555	10,555	8,984
GPS28	49,418	-5,71	-5,70	55,128	55,118	52,079

Fonte: A Autora (2019).

A validação posicional altimétrica utilizou os valores do PEC-84 (Tabela 4). Este PEC determina que os valores das discrepâncias não podem ultrapassar de 2,5m e o erro-padrão= 1,67 para obter classe A (PEC-A) do seu produto analisado. A Tabela 19 apresenta a análise realizada em cada ponto em estudo de acordo com a classificação do PEC-84.

Tabela 19 – Análise de cada Ponto PEC-84

Pontos	e _{zi} (m)	e _{zi'} (m)	Pontos	e _{zi} (m)	e _{zi'} (m)
	Altimetria			Altimetria	
GPS5	1,165	-1,195	GPS16	0,003	0,003
GPS11	-0,086	0,096	GPS18	1,163	1,173
GPS12	1,656	-1,646	GPS19	0,828	0,848
GPS13	-1,687	-1,637	GPS26	1,571	1,571
GPS15	0,513	-0,533	GPS28	3,049	3,039

Fonte: A Autora (2019).

Analisando os resultados dos 10 pontos planejados em relação à classificação do PEC-84, obteve-se os seguintes resultados: 1 ponto foi reprovado e 9 aprovados em relação à classe A, o que representa 90% aprovados na classe A. O erro-padrão utilizando o mapgeo2010 foi de: 1,158m e utilizando o mapageo2015 foi de: 1,148m. Diante dos resultados obtidos nesta amostra, os dados analisados foram satisfatórios na classe A da PEC-84.

6.2 COORDENADAS PLANIALTIMÉTRICAS DEFINIDAS DA ÁREA DE ESTUDO

Após a etapa de testes para verificar quais os tipos de feições poderiam ser utilizados como pontos de controle posicional planialtimétrico, foram escolhidas feições radar-identificáveis na ortoimagem, sendo escolhidos 28 pontos dentro da área de estudo,

denominados por: GPS46B, GPS45A, GPS40, GPS46, GPS48, GPS45, GPS54, GPS46A, GPS49, GPS44C, GPS36, GPS35, GPS49A, GPS28, GPS23, GPS26, GPS06, GPS27, GPS07, GPS02A, GPS31, GPS33, GPS24A, GPS24, GPS24B, GPS17, GPS42C e GPS01. As coordenadas destes pontos estão em coordenadas geodésicas e planas retangulares UTM (SIRGAS2000) como ilustra a Tabela 20.

Tabela 20 - Coordenadas planialtimétricas dos pontos por Radar- identificável em SIRGAS2000 do município de Cabo de Santo Agostinho 01

Nº	PCP	Latitude (ϕ)	Longitude (λ)	Este (m)	Norte (m)	h (m)
1	GPS46B	8° 17' 19,569" S	35° 1' 39,334" W	276675,978	9083208,205	6,359
2	GPS45A	8° 16' 43,878" S	35° 1' 8,097" W	277626,502	9084309,784	3,254
3	GPS40	8° 16' 12,270" S	35° 1' 20,379" W	277245,636	9085279,099	5,039
4	GPS46	8° 17' 14,558" S	35° 1' 40,767" W	276631,333	9083361,957	6,336
5	GPS48	8° 17' 53,537" S	35° 1' 29,795" W	276973,283	9082165,931	5,317
6	GPS45	8° 17' 7,037" S	35° 1' 13,857" W	277453,809	9083597,253	3,827
7	GPS54	8° 18' 16,336" S	35° 0' 17,527" W	279188,697	9081476,615	8,600
8	GPS46A	8° 17' 13,816" S	35° 1' 39,891" W	276658,050	9083384,898	6,679
9	GPS49	8° 18' 21,467" S	35° 1' 13,451" W	277477,898	9081310,279	5,880
10	GPS44C	8° 16' 49,436" S	35° 1' 9,483" W	277584,940	9084138,785	2,874
11	GPS36	8° 15' 20,017" S	35° 0' 36,602" W	278577,506	9086891,502	13,259
12	GPS35	8° 15' 30,854" S	35° 0' 17,351" W	279168,451	9086561,455	10,711
13	GPS49A	8° 18' 25,632" S	35° 1' 11,303" W	277544,288	9081182,625	5,943
14	GPS28	8° 19' 3,023" S	35° 6' 30,042" W	267794,856	9079982,820	65,877
15	GPS23	8° 18' 1,612" S	35° 4' 7,313" W	272153,410	9081892,930	47,522
16	GPS26	8° 19' 30,233" S	35° 6' 53,481" W	267081,929	9079142,843	68,541
17	GPS06	8° 14' 44,325" S	35° 0' 19,532" W	279094,479	9087990,843	24,638
18	GPS27	8° 19' 13,068" S	35° 6' 40,822" W	267466,553	9079672,396	58,360
19	GPS07	8° 14' 58,677" S	35° 0' 32,290" W	278706,190	9087547,879	9,607
20	GPS02A	8° 13' 44,972" S	34° 59' 44,175" W	280167,668	9089820,000	0,538
21	GPS31	8° 18' 27,309" S	35° 5' 23,404" W	269828,604	9081091,079	71,087
22	GPS33	8° 18' 31,006" S	35° 4' 30,899" W	271436,244	9080985,921	53,843
23	GPS24A	8° 17' 51,055" S	35° 3' 47,792" W	272749,218	9082220,434	42,006
24	GPS24	8° 17' 51,557" S	35° 3' 49,939" W	272683,579	9082204,682	40,699
25	GPS24B	8° 17' 50,434" S	35° 3' 48,171" W	272737,496	9082239,484	41,325
26	GPS01	8° 13' 32,698" S	34° 59' 36,486" W	280401,160	9090198,331	0,496
27	GPS17	8° 16' 56,052" S	35° 3' 26,451" W	273393,641	9083913,997	18,702
28	GPS42C	8° 16' 23,907" S	35° 1' 31,663" W	276902,059	9084919,786	9,537

Fonte: A Autora (2019).

Com as coordenadas planimétricas dos pontos adquiridos em campo (X, Y) e no mapa (X, Y) no sistema de coordenadas UTM em SIRGAS2000, utilizou-se as Equações 2 e 3 do subitem 4.4.2.1, obtendo as seguintes discrepâncias e_{xi} e e_{yi} nos eixos X e Y,

respectivamente em relação a cada ponto analisado. Os valores das discrepâncias ex_i e ey_i estão apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – As coordenadas planimétricas nos eixos X e Y

Pontos	X (m)	Y (m)	Mapa X (m)	Mapa Y (m)	ex_i (m)	ey_i (m)
GPS46B	276675,978	9083208,205	276676,941	9083208,027	-0,963	0,178
GPS45A	277626,502	9084309,784	277627,708	9084310,464	-1,206	-0,680
GPS40	277245,636	9085279,099	277247,384	9085277,073	-1,749	2,026
GPS46	276631,3331	9083361,957	276633,550	9083362,015	-2,217	-0,057
GPS48	276973,283	9082165,931	276972,746	9082166,096	0,536	-0,164
GPS45	277453,809	9083597,253	277455,517	9083595,890	-1,708	1,363
GPS54	279188,697	9081476,615	279190,030	9081474,888	-1,333	1,727
GPS46A	276658,050	9083384,898	276657,362	9083383,182	0,687	1,716
GPS49	277477,898	9081310,279	277478,016	9081311,098	-0,118	-0,819
GPS44C	277584,940	9084138,785	277587,234	9084137,340	-2,293	1,445
GPS36	278577,506	9086891,502	278578,058	9086889,660	-0,552	1,843
GPS35	279168,451	9086561,455	279169,833	9086559,925	-1,382	1,529
GPS49A	277544,288	9081182,625	277545,306	9081182,373	-1,018	0,252
GPS28	267794,856	9079982,820	267792,392	9079978,014	2,464	4,806
GPS23	272153,410	9081892,930	272154,851	9081891,749	-1,441	1,181
GPS26	267081,929	9079142,843	267084,365	9079142,987	-2,436	-0,144
GPS06	279094,479	9087990,843	279093,695	9087989,679	0,784	1,164
GPS27	267466,553	9079672,396	267469,335	9079672,419	-2,782	-0,023
GPS07	278706,190	9087547,879	278706,344	9087548,353	-0,154	-0,474
GPS02A	280167,668	9089820,000	280168,963	9089818,483	-1,296	1,517
GPS31	269828,604	9081091,079	269829,952	9081089,266	-1,348	1,813
GPS33	271436,244	9080985,921	271439,680	9080985,284	-3,437	0,637
GPS24A	272749,218	9082220,434	272756,555	9082219,568	-7,337	0,866
GPS24	272683,579	9082204,682	272686,664	9082209,487	-3,085	-4,805
GPS01	280401,160	9090198,331	280395,389	9090197,371	5,771	0,960
GPS24B	272737,496	9082239,484	272744,952	9082237,031	-7,456	2,453
GPS17	273393,641	9083913,997	273392,971	9083918,913	0,670	-4,916
GPS42C	276902,059	9084919,786	276903,425	9084913,768	-1,367	6,018

Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 22 apresenta a altitude elipsoidal adquirida em campo (h), a ondulação Geoidal obtida no MapGeo2010 (N), altitude ortométrica ($H - 10$), a altitude elipsoidal extraída do MDT ($h - MDT$) pelo arcgis10 em cada ponto e a discrepância ($ezi - 10$) no eixo Z que foi obtida pela Equação 4.

Tabela 22 – As coordenadas altimétricas MapGeo2010

Pontos	h	N	H - 10	H - MDT	$e_{zi} - 10$ (m)
GPS46B	6,359	-5,74	12,099	11,418	0,681
GPS45A	3,254	-5,75	9,004	8,571	0,433
GPS40	5,039	-5,73	10,769	11,076	-0,307
GPS46	6,336	-5,74	12,076	11,559	0,517
GPS48	5,317	-5,76	11,077	10,564	0,513
GPS45	3,827	-5,76	9,587	9,811	-0,224
GPS54	8,600	-5,82	14,420	13,853	0,567
GPS46A	6,679	-5,74	12,419	11,409	1,011
GPS49	5,880	-5,78	11,660	10,968	0,692
GPS44C	2,874	-5,75	8,624	9,369	-0,745
GPS36	1,259	-5,75	19,009	20,178	-1,169
GPS35	10,711	-5,77	16,481	16,881	-0,399
GPS49A	5,943	-5,78	11,723	9,453	2,270
GPS28	65,877	-5,57	71,447	69,591	1,856
GPS23	47,522	-5,65	53,172	51,942	1,230
GPS26	68,541	-5,57	74,111	75,949	-1,838
GPS06	24,638	-5,75	30,388	30,322	0,066
GPS27	58,360	-5,57	63,930	61,954	1,976
GPS07	9,607	-5,74	15,347	15,447	-0,100
GPS02A	0,538	-5,76	6,298	6,426	-0,127
GPS31	71,087	-5,60	76,687	78,057	-1,369
GPS33	53,843	-5,64	59,483	62,004	-2,521
GPS24A	42,006	-5,66	47,666	42,937	4,729
GPS24	40,699	-5,66	46,359	41,508	4,851
GPS01	0,496	-5,77	6,266	5,133	1,133
GPS24B	41,325	-5,66	46,985	43,814	3,171
GPS17	18,702	-5,65	24,352	19,763	4,589
GPS42C	9,537	-5,73	15,267	11,659	3,609

Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 23 apresenta a altitude elipsoidal adquirida em campo (h), a ondulação Geoidal obtida no MapGeo2015 (N'), altitude ortométrica (H -15), a altitude elipsoidal extraída do MDT (h – MDT) pelo arcgis10 em cada ponto e a discrepância ($e_{zi}' - 15$) no eixo Z que foi obtida pela Equação 4.

Tabela 23 – As coordenadas altimétricas MapGeo2015

Pontos	h	N'	H - 15	H - MDT	ez _i - 15 (m)
GPS46B	6,359	-5,73	12,089	11,418	0,671
GPS45A	3,254	-5,75	9,004	8,571	0,433
GPS40	5,039	-5,74	10,779	11,076	-0,297
GPS46	6,336	-5,73	12,066	11,559	0,507
GPS48	5,317	-5,75	11,067	10,564	0,503
GPS45	3,827	-5,75	9,577	9,811	-0,234
GPS54	8,600	-5,83	14,430	13,853	0,577
GPS46A	6,679	-5,73	12,409	11,409	1,001
GPS49	5,880	-5,78	11,660	10,968	0,692
GPS44C	2,874	-5,75	8,624	9,369	-0,745
GPS36	1,259	-5,77	19,029	20,178	-1,149
GPS35	10,711	-5,78	16,491	16,881	-0,389
GPS49A	5,943	-5,78	11,723	9,453	2,270
GPS28	65,877	-5,65	71,527	69,591	1,936
GPS23	47,522	-5,68	53,202	51,942	1,260
GPS26	68,541	-5,66	74,201	75,949	-1,748
GPS06	24,638	-5,77	30,408	30,322	0,086
GPS27	58,360	-5,65	64,010	61,954	2,056
GPS07	9,607	-5,77	15,377	15,447	-0,070
GPS02A	0,538	-5,78	6,318	6,426	-0,107
GPS31	71,087	-5,66	76,747	78,057	-1,309
GPS33	53,843	-5,68	59,523	62,004	-2,481
GPS24A	42,006	-5,68	47,686	42,937	4,749
GPS24	40,699	-5,68	46,379	41,508	4,871
GPS01	0,496	-5,77	6,266	5,133	1,133
GPS24B	41,325	-5,68	47,005	43,814	3,191
GPS17	18,702	-5,67	24,372	19,763	4,609
GPS42C	9,537	-5,73	15,267	11,659	3,609

Fonte: A Autora (2019).

Após as discrepâncias obtidas em cada eixo do ponto foi aplicada a Equação 1 do subitem 4.4 do teste de Chauvenet para eliminação dos pontos outliers da amostra, obtendo o seguinte resultado apresentado na Tabela 24. Observou-se também na Tabela 6 que para uma amostra de 28 pontos o máximo “C” obtido em cada eixo deve ser um valor inferior a 2,37.

Tabela 24 – Valores encontrados no teste Chauvenet

Ponto	Valor X (m)	Valor Y (m)	Valor Z -10 (m)	Valor Z -15 (m)
GPS46B	0,125	0,256	0,112	0,127
GPS45A	0,028	0,654	0,241	0,251
GPS40	0,187	0,602	0,626	0,632
GPS46	0,373	0,365	0,197	0,213
GPS48	0,721	0,415	0,199	0,215
GPS45	0,171	0,294	0,583	0,599
GPS54	0,022	0,463	0,171	0,176
GPS46A	0,781	0,458	0,060	0,045
GPS49	0,461	0,718	0,106	0,116
GPS44C	0,404	0,332	0,854	0,865
GPS36	0,288	0,517	1,075	1,076
GPS35	0,042	0,371	0,674	0,680
GPS49A	0,103	0,221	0,715	0,706
GPS28	1,487	1,892	0,499	0,532
GPS23	0,065	0,210	0,173	0,180
GPS26	0,461	0,405	1,423	1,388
GPS06	0,819	0,202	0,432	0,432
GPS27	0,598	0,349	0,562	0,595
GPS07	0,446	0,558	0,518	0,513
GPS02A	0,007	0,366	0,533	0,533
GPS31	0,028	0,503	1,179	1,160
GPS33	0,858	0,043	1,778	1,770
GPS24A	2,408	0,064	1,994	1,998
GPS24	0,718	2,568	2,058	2,062
GPS01	2,801	0,107	0,123	0,114
GPS24B	2,455	0,336	1,184	1,187
GPS17	0,774	2,619	1,922	1,926
GPS42C	0,036	2,454	1,412	1,404

Fonte: A Autora (2019).

Os valores da Tabela 24 foram analisados, verificando-se que os pontos GPS01, GPS17, GPS24, GPS24A, GPS24B e GPS42C estavam com valor superior a 2,37 em algum dos eixos. Portanto, esses pontos foram eliminados na amostra, restando 22 pontos como ilustra a Tabela 25. Sendo assim, esses pontos foram utilizados para a validação planialtimétrica.

Tabela 25 - As coordenadas extraídas na Ortoimagem e MDT

Pontos	Planimetria		Altimetria
	X (m)	Y (m)	H (m)
GPS46B	276676,942	9083208,027	11,418
GPS45A	277627,708	9084310,464	8,571
GPS40	277247,384	9085277,073	11,076
GPS46	276633,550	9083362,015	11,559
GPS48	276972,746	9082166,096	10,564
GPS45	277455,517	9083595,890	9,811
GPS54	279190,030	9081474,888	13,853
GPS46A	276657,362	9083383,182	11,409
GPS49	277478,016	9081311,098	10,968
GPS44C	277587,234	9084137,340	9,369
GPS36	278578,058	9086889,660	20,178
GPS35	279169,833	9086559,925	16,881
GPS49A	277545,306	9081182,373	9,453
GPS28	267792,392	9079978,014	69,591
GPS23	272154,851	9081891,749	51,942
GPS26	267084,365	9079142,987	75,949
GPS06	279093,695	9087989,679	30,322
GPS27	267469,335	9079672,419	61,954
GPS07	278706,344	9087548,353	15,447
GPS02A	280168,963	9089818,483	6,426
GPS31	269829,952	9081089,266	78,057
GPS33	271439,680	9080985,284	62,004

Fonte: A Autora (2019).

6.3 VALIDAÇÃO POSICIONAL DOS PONTOS DE CONTROLE POR FEIÇÕES RADAR-IDENTIFICÁVEL

A validação dos pontos de controle posicional planialtimétrico escolhidos pelo método radar-identificável utilizou 22 pontos denominados por: GPS46B, GPS45A, GPS40, GPS46, GPS48, GPS45, GPS54, GPS46A, GPS49, GPS44C, GPS36, GPS35, GPS49A, GPS28, GPS23, GPS26, GPS06, GPS27, GPS07, GPS02A, GPS31 e GPS33, obtendo assim os resultados apresentados a seguir em relação a cada teste de qualidade posicional planialtimétrico e normatizações vigente no Brasil.

6.3.1 Validação Planimétrica - Ortoimagens

Primeiro validou a ortomagem em relação à planimetria utilizou os testes da Normatização Brasileira, EMAS, NMAS, ASPRS e NSSDA, obtendo os valores de acordo com cada teste aplicado junto com as normatizações brasileiras de padrão de exatidão cartográfica (PEC-84 e PEC-PCD).

6.3.1.1 Testes da Normatização Brasileira - Planimetria

Para os testes aplicados de acordo com a normatização foram necessárias as discrepâncias obtidas pelas Equações 2 e 3 do subitem 4.4.2.1 em relação aos eixos X e Y como estão apresentados na Tabela 26; e os valores dos desvios-padrão que foram obtidos em relação ao eixo X e Y utilizando as equações 8 e 9, respectivamente, que estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 26 – Coordenadas planimétricas obtidas na ortomagem e em campo com suas respectivas discrepâncias

Pontos	ex_i (m)	ey_i (m)	Pontos	ex_i (m)	ey_i (m)
GPS46B	-0,963	0,178	GPS35	-1,382	1,529
GPS45A	-1,206	-0,680	GPS49A	-1,018	0,252
GPS40	-1,749	2,026	GPS28	2,464	4,806
GPS46	-2,217	-0,057	GPS23	-1,441	1,181
GPS48	0,536	-0,164	GPS26	-2,436	-0,144
GPS45	-1,708	1,363	GPS06	0,784	1,164
GPS54	-1,333	1,727	GPS27	-2,782	-0,023
GPS46A	0,687	1,716	GPS07	-0,154	-0,474
GPS49	-0,118	-0,819	GPS02A	-1,296	1,517
GPS44C	-2,293	1,445	GPS31	-1,348	1,813
GPS36	-0,552	1,843	GPS33	-3,437	0,637

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 27 – Desvios-padrão obtidos pelas equações 8 e 9

Desvio-Padrão	m	Desvio-Padrão	m
S_x	1,348	S_y	1,260

Fonte: A Autora (2019).

Para uma amostra ser classificada na classe A dos PEC-84 e PEC-PCD são necessários que pelo menos 90% dos valores dos pontos estejam até 2,5m para PEC-84 e 2,80m para a PEC-PCD; e que o valor do erro-padrão esteja até 3,0m para a PEC-84 e 1,70m para a PEC-

PCD na planimetria numa escala de 1:10.000, sendo assim, nesta amostra de 22 pontos foram obtidos os seguintes resultados:

a) Em relação ao PEC/84:

Dentre os valores encontrados na Tabela 26, todos os pontos ficaram até 5,00m no eixo X e Y, representando 100% dos pontos; e o valor do erro-padrão ficou até 3m em relação à planimetria numa escala de 1:10.000 para atendimento da classe A. Portanto, o conjunto de dados SAR em relação à planimetria ficou na “Classe A” do PEC-84, o que atende inteiramente ao PEC-84, pois a confecção deste conjunto foi baseada nesta PEC-84.

b) Em relação ao PEC-PCD:

Dentre os valores encontrados na Tabela 26, 21 pontos ficaram até 2,80m no eixo X e Y representando 95,46% dos pontos; e o valor do erro-padrão ficou até 1,70m em relação à planimetria numa escala de 1:10.000 para atendimento da classe A. Portanto, o conjunto de dados SAR também atende a classificação do PEC-PCD na “Classe A” mesmo sendo confeccionados um ano antes do seu lançamento.

6.3.1.2 Engineering Map Accuracy Standard (EMAS)

O Teste EMAS utilizou as Equações 2 e 3 do subitem 4.4.2.1 obtendo os valores das discrepâncias nos eixos X e Y como foram apresentadas na Tabela 26; e para a obtenção dos valores dos desvios-padrão em relação ao eixo X e Y utilizou-se as Equações 8 e 9 que foram apresentados na Tabela 27. E para os valores dos erros médios, utilizou-se as Equações 5 e 6 em relação ao eixo X e Y como estão apresentadas na Tabela 28. Esses dados serão utilizados para determinar incidência de erros sistemáticos e aleatórios dos pontos de controle (subitem 4.4.2.1).

Tabela 28 – Erro Médio obtidos pelas Equações 5 e 6

Erro Médio	m	Erro Médio	m
\acute{e}_x	-1,044	\acute{e}_y	0,947

Fonte: A Autora (2019).

a) Erro Sistemático

A verificação do erro sistemático é realizada através do teste de conformidade utilizando o *t-student* e aceitando as seguintes hipóteses em relação a cada eixo:

H0: Se $\Delta t_{x,y} = 0$, então $t_{x,y}$ não é tendencioso.

H1: Se $\Delta t_{x,y} \neq 0$, então $t_{x,y}$ é tendencioso.

Utilizando as Equações 11 e 12 no subitem 4.4.2.1, obteve-se os seguintes resultados:

$$t_{x'} = -3,633 \text{ e } t_{y'} = 3,526.$$

Utilizando um grau de liberdade igual a 22 com um nível de significância igual a 90%, obteve-se o valor tabelado de $t_{(22,90)} = 1,323$ uni caudal.

Através destes resultados, atesta-se que, no eixo X e Y, houve tendências, pois os resultados não atendem a hipótese H0.

b) Erros Aleatórios

A averiguação do erro aleatório é realizada através do teste de conformidade utilizando o teste de Qui-quadrático (χ^2) usando os valores pré-estabelecidos pelo erro padrão (EP) do PEC/84 e PEC-PCD numa escala de 1:10.000.

Utilizando para isso as equações: $\sigma_x = \sigma_y = EP/\sqrt{2}$ para variância, junto com o erro padrão tabelado da PEC/84 e PEC-PCD para a “Classe A” na escala de 1:10.000.

Com posse dos resultados e aceitando as seguintes hipóteses em relação a cada eixo:

H0: Se $X^2_{x,y} \text{ PEC} \leq X^2_{x,y}$ e

H1: $X^2_{x,y} \text{ PEC} > X^2_{x,y}$

a) Aplicação dos dados do PEC/84

Utilizando para EP tipo A: $\sigma = 2,121\text{m}$ nas equações 15 e 16, obteve-se os seguintes valores:

$$X^2_x = 8,478 \text{ e } X^2_{y'} = 7,406$$

A hipótese H_0 é aceita se o valor de X^2 calculado for igual ou menor a X^2 tabelado.

Comparando o valor tabelado de $X^2_{(22,90)} = 29,615$ com os calculados: $X^2_{x'}$ e $X^2_{y'}$, nota-se que os dados testados não existem erros aleatórios para aquela escala do mapa e se encontram classificados como PEC-A.

b) Aplicação dos dados do PEC-PCD

Para um EP tipo A: $\sigma = 1,202\text{m}$, obteve-se os seguintes valores:

$$X^2_{x''} = 26,394 \text{ e } X^2_{y''} = 23,064$$

Comparando-se o valor tabelado $X^2_{(22,90)} = 29,615$ com os calculados: $X^2_{x''}$ e $X^2_{y''}$, nota-se que para os dados testados não existem erros aleatórios para aquela escala do mapa e se encontram classificados como PEC-PCD de “classe A”.

6.3.1.3 National Map Accuracy Standard (NMAS)

Para aplicação do teste NMAS utilizou-se as Equações 2 e 3 do subitem 4.4.2.1, obtendo as discrepâncias nos eixos X e Y em relação a cada ponto, como estão apresentados na Tabela 28. Essas discrepâncias foram analisadas da seguinte forma:

- Considerando os valores fornecidos pela USGS, temos que no máximo 10% dos pontos da amostra podem ter um erro horizontal maior que 0,08cm (1/30 de polegada) para mapas com escala menores que 1:20.000 ou 0,05cm (1/50 de polegada), para mapas com escala maiores que 1:20.000. No caso desse estudo o mapa tem escala de 1:10.000, sendo assim, considerando 0,08cm.

Analisando os valores ex_i e ey_i na Tabela 29, somente dois valores foram encontrados sendo um no ponto GPS46 no eixo Y e outro no GPS27 no eixo X. Portanto, o conjunto de dados SAR analisado aqui não atende ao valor fornecido pela USGS.

Tabela 29 – Coordenadas planimétricas obtidas na ortoimagem e em campo com suas respectivas discrepâncias teste NMAS

Pontos	e_{xi} (m)	e_{yi} (m)	Pontos	e_{xi} (m)	e_{yi} (m)
GPS46B	-0,963	0,178	GPS35	-1,382	1,529
GPS45A	-1,206	-0,680	GPS49A	-1,018	0,252
GPS40	-1,749	2,026	GPS28	2,464	4,806
GPS46	-2,217	-0,057	GPS23	-1,441	1,181
GPS48	0,536	-0,164	GPS26	-2,436	-0,144
GPS45	-1,708	1,363	GPS06	0,784	1,164
GPS54	-1,333	1,727	GPS27	-2,782	-0,023
GPS46A	0,687	1,716	GPS07	-0,154	-0,474
GPS49	-0,118	-0,819	GPS02A	-1,296	1,517
GPS44C	-2,293	1,445	GPS31	-1,348	1,813
GPS36	-0,552	1,843	GPS33	-3,437	0,637

Fonte: A Autora (2019).

- Considerando os valores fornecidos pelos PEC-84 e PEC-PCD na Tabela 4, tem-se que considerar que a amostra tenha até 90% dos pontos naquela classe desejada e que o erro-padrão seja igual ou menor daquela mesma classe escolhida. No caso desse estudo com o mapa na escala de 1:10.000, tem-se os seguintes valores aceitos para a “Classe A” em relação a planimetria: 5m para o PEC-84 e de 2,80m para o PEC-PCD. Isto posto, as Tabelas 30 e 31 mostram os resultados da precisão horizontal nos eixos X e Y em cada ponto considerando os valores do PEC-84 e ao PEC-PCD

Tabela 30 - Análise dos pontos de controle posicional planimétrico no eixo X de acordo com PEC-84 e PEC-PCD

Pontos	e_{xi} (m)	PEC-84	PEC-PCD	Pontos	e_{xi} (m)	PEC-84	PEC-PCD
GPS46B	-0,963	A	A	GPS35	-1,382	A	A
GPS45A	-1,206	A	A	GPS49A	-1,018	A	A
GPS40	-1,749	A	A	GPS28	2,464	A	A
GPS46	-2,217	A	A	GPS23	-1,441	A	A
GPS48	0,536	A	A	GPS26	-2,436	A	A
GPS45	-1,708	A	A	GPS06	0,784	A	A
GPS54	-1,333	A	A	GPS27	-2,782	A	A
GPS46A	0,687	A	A	GPS07	-0,154	A	A
GPS49	-0,118	A	A	GPS02A	-1,296	A	A
GPS44C	-2,293	A	A	GPS31	-1,348	A	A
GPS36	-0,552	A	A	GPS33	-3,437	A	B

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 31 - Análise dos pontos de controle posicional planimétrico no eixo Y de acordo com PEC-84 e PEC-PCD

Pontos	e_{yi} (m)	PEC-84	PEC-PCD	Pontos	e_{yi} (m)	PEC-84	PEC-PCD
GPS46B	0,178	A	A	GPS35	1,529	A	A
GPS45A	-0,680	A	A	GPS49A	0,252	A	A
GPS40	2,026	A	A	GPS28	4,806	A	B
GPS46	-0,057	A	A	GPS23	1,181	A	A
GPS48	-0,164	A	A	GPS26	-0,144	A	A
GPS45	1,363	A	A	GPS06	1,164	A	A
GPS54	1,727	A	A	GPS27	-0,023	A	A
GPS46A	1,716	A	A	GPS07	-0,474	A	A
GPS49	-0,819	A	A	GPS02A	1,517	A	A
GPS44C	1,445	A	A	GPS31	1,813	A	A
GPS36	1,843	A	A	GPS33	0,637	A	A

Fonte: A Autora (2019).

Analisando os valores e_{xi} e e_{yi} nas Tabelas 30 e 31 em relação a PEC-84 e PEC-PCD, temos que:

- Em relação a PEC-84, todos os valores ficaram até 5m, representando 100% dos pontos da amostra, ficando classificados na classe “A”.

- Em relação a PEC-PCD, os valores dos 20 pontos ficaram até 2,8m, totalizando 90,91% aprovados na classe “A” e 2 pontos aprovados na classe “B”. Portanto, de acordo com os resultados obtidos o conjunto de dados SAR ficaram classificados na classe “A”.

6.3.1.4 American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)

O teste ASPRS utilizou as Equações 19 e 20 do subitem 4.4.2.2, obtendo os seguintes resultados para o eixo X e Y:

$$RMSE_x = 1,317m \text{ e } RMSE_y = 1,231m.$$

Observando a Tabela 7, verifica-se que para uma escala de 1:10.000 o RMSE limite é até 2,50m. Portanto o conjunto de dados SAR de acordo com os resultados obtidos $RMSE_x$ e $RMSE_y$ estão inferiores ao RMSE limite, sendo assim, estão de acordo com os requisitos de precisão do ASPRS.

Observando a Tabela 4 que mostra para uma “classe A” numa escala 1:10.000 o RMSE limite é até 3,00m para o PEC-84 e 1,70m para o PEC-PCD. Portanto, o conjunto de dados SAR de acordo com os resultados obtidos dos $RMSE_x$ e $RMSE_y$ e estão inferiores aos

limites estabelecidos pelo PEC-84 e PEC-PCD, sendo assim, estão de acordo com os requisitos de precisão da “classe A” dos PEC-84 e PEC-PCD.

Também, com relação a esse teste estatístico, verifica-se o mesmo que no caso anterior. O desenvolvimento de tecnologias digitais propicia melhoria de precisão nos mapas planimétricos o que é verificado quando se aplicam os testes estatísticos aos dados adquiridos.

6.3.1.5 National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)

O teste NSSDA utilizou as Equações 19 e 20 do subitem 4.4.2.2, obtendo os seguintes resultados para o eixo X e Y, pois neste teste a análise é feita em conjunto os eixos X e Y:

$$RMSE_x = 1,317\text{m}; \text{ e } RMSE_y = 1,231\text{m}.$$

Assim para analisar os eixos X e Y em conjunto utilizou a equação 21 do subitem 4.4.2.4 para a obtenção do resultado $RMSE_r$:

$$RMSE_r = 1,802\text{m}.$$

Sendo que para o coeficiente de precisão posicional de 95% de confiança e sabendo que $RMSE_x \neq RMSE_y$ utilizou a Equação 23, obtendo o seguinte resultado:

$$Precisão_r = 3,118\text{m};$$

O teste NSSDA analisa a amostra com o nível de confiança de 95% mostrando o índice de qualidade da cartografia nas unidades reais do terreno. Este teste permite também que os profissionais decidam o nível de confiança do trabalho, mas nesta Tese utilizou-se 95% de nível de confiança para este teste.

6.3.2 Validação Altimétrica - MDT

Segundo validação do MDT em relação à altimetria utilizou-se os testes da Normatização Brasileira, EMAS, NMAS, ASPRS, NSSDA e USGS, obtendo os valores de acordo com cada teste aplicado junto com as normatizações brasileiras de padrão de exatidão cartográfica (PEC-84 e PEC-PCD).

6.3.2.1 Testes da Normatização Brasileira- Altimetria

Para os testes aplicados de acordo com a normatização, obteve-se as discrepâncias utilizando a Equação 4 do subitem 4.4.2.1 em relação ao eixo Z como estão apresentados na Tabela 32; e os desvios-padrão obtidos pela Equação 10 em relação ao eixo Z, utilizando os dados obtidos pelos *softwares* MapGeo2010 e MapGeo2015, respectivamente. Esses valores dos erros-padrão estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 32 – Coordenadas altimétricas obtidas na MDT e em campo com suas respectivas discrepâncias

Pontos	e_{zi10} (m)	e_{zi15} (m)	Pontos	e_{zi10} (m)	e_{zi15} (m)
GPS46B	0,681	0,671	GPS35	-0,399	-0,389
GPS45A	0,433	0,433	GPS49A	2,270	2,270
GPS40	-0,307	-0,297	GPS28	1,856	1,936
GPS46	0,517	0,507	GPS23	1,230	1,260
GPS48	0,513	0,503	GPS26	-1,838	-1,748
GPS45	-0,224	-0,234	GPS06	0,066	0,086
GPS54	0,567	0,577	GPS27	1,976	2,056
GPS46A	1,011	1,001	GPS07	-0,100	-0,070
GPS49	0,692	0,692	GPS02A	-0,127	-0,107
GPS44C	-0,745	-0,745	GPS31	-1,369	-1,309
GPS36	-1,169	-1,149	GPS33	-2,521	-2,481

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 33 – Desvios-Padrões obtidos pela equação 10

Desvio-Padrão	m	Desvio-Padrão	m
S_{z2010}	1,204	S_{y2015}	1,200

Fonte: A Autora (2019).

Para uma amostra ser classificada na classe A dos PEC-84 e PEC-PCD são necessários que pelo menos 90% dos valores dos pontos estejam até 2,50m para PEC-84 e 1,35m para a PEC-PCD; e que o valor do erro-padrão esteja até 1,67m para a PEC-84 e 0,84m para a PEC-PCD na altimetria numa escala de 1:10.000, sendo assim, nesta amostra de 22 pontos foram obtidos os seguintes resultados:

- Em relação ao PEC/84:

Dentre os valores encontrados na Tabela 32, 21 pontos ficaram até 2,50m no eixo Z utilizando os dados do *software* MapGeo2010, representando 95,46% dos pontos; e o valor do erro-padrão ficou até 1,67m em relação a altimetria numa escala de 1:10.000 para

atendimento da classe A. Portanto, o conjunto de dados SAR em relação a altimetria ficou na “Classe A” do PEC-84.

Para os valores encontrados na Tabela 32, todos os pontos ficaram até 2,50m no eixo Z utilizando os dados do *software* MapGeo2015, representando 100% dos pontos; e o valor do erro-padrão ficou até 1,67m em relação a altimetria numa escala de 1:10.000 para atendimento da classe A. Portanto, o conjunto de dados SAR em relação a altimetria ficou na “Classe A” do PEC-84.

Ambos os resultados utilizando dados dos *softwares* MapGeo2010 e MapGeo2015 mostram que o conjunto de dados SAR, atende inteiramente ao PEC-84 pois a confecção deste conjunto foi baseada nesta PEC-84.

- Em relação ao PEC-PCD:

Dentre os valores encontrados na Tabela 32, 16 pontos ficaram até 1,35m no eixo Z utilizando os dados dos *softwares* MapGeo2010 e MapGeo2015 representando 72,73% dos pontos; o valor do erro-padrão ficou acima de 0,84m em relação à altimetria numa escala de 1:10.000. Assim, de acordo com os resultados obtidos, verifica-se que estes pontos não atendem à classe A.

Assim os valores encontrados na Tabela 32 foram reanalisados para uma classe inferior do conjunto de dados SAR, ou seja, a classe B, sendo encontrados 22 pontos até 2,50m utilizando os dados do MapGeo2010 e 21 utilizando o MapGeo2015, representando 100% e 95,24%, respectivamente. O erro-padrão encontrado fica abaixo de 1,67m, assim, o conjunto de dados SAR é classificado na classe B do PEC-PCD.

Observa-se também que as diferenças entre os erros padrões calculados e aqueles dessa normatização são mais próximos sugerindo que a precisão dos dados estudados é menor. O conjunto de dados usado foi adquirido em 2014, portanto, um ano antes do lançamento do PEC-PCD. A confecção desses mapas usados no estudo certamente não foi baseada nos padrões designados pela PEC-PCD. Portanto, o uso desses dados em problemas que envolvam altimetria, como em estabilidade de encostas, deslizamentos, devem ser checados em campo.

6.3.2.2 Engineering Map Accuracy Standard (EMAS)

O Teste EMAS utilizou a Equação 4 do subitem 4.4.2.1 obtendo os valores das discrepâncias no eixo Z como estão apresentados na Tabela 32; e para a obtenção dos valores

dos desvios-padrão em relação ao eixo Z utilizou-se a Equação 10 como estão apresentados na Tabela 33. E para os valores dos erros médios utilizou-se a Equação 7 em relação ao eixo Z como estão apresentadas na Tabela 34. Esses dados serão utilizados para determinar incidência de erros sistemáticos e aleatórios dos pontos de controle (subitem 4.4.2.1).

Tabela 34 – Erro Médio obtidos pela Equação 7

Erro Médio	m	Erro Médio	m
\acute{e}_{x10}	0,137	\acute{e}_{y15}	0,157

Fonte: A Autora (2019).

- Erro Sistemático

A verificação do erro sistemático é realizada através do teste de conformidade utilizando o *t-student* e aceitando as seguintes hipóteses em relação a cada eixo:

H0: Se $\Delta t_z = 0$, então t_z não é tendencioso.

H1: Se $\Delta t_z \neq 0$, então t_z é tendencioso.

Desta forma, utilizando a Equação 13, foram obtidos para o eixo Z em relação os dados calculados pelos MapGeo2010 e 2015 os seguintes resultados:

$$t_{z10} = 0,533 \text{ e } t_{z15} = 0,615.$$

Utilizando um grau de liberdade igual a 22 com um nível de significância igual a 90%, obteve-se o valor tabelado de $t_{(22,90)} = 1,323$ uni caudal.

Através destes resultados, atesta-se que para o eixo Z, não há tendências, pois o resultado atende a hipótese H0.

- Erros Aleatórios

A averiguação do erro aleatório é realizada através do teste de conformidade utilizando o teste de Qui-quadrático (χ^2) usando os valores pré-estabelecidos pelo erro padrão (EP) do PEC/84 e PEC-PCD numa escala de 1:10.000.

Utilizando para isso a equação: $\sigma_z = EP/\sqrt{2}$ para variância, junto com o erro padrão tabelado da PEC/84 e PEC-PCD para a “Classe A” na escala de 1:10.000.

Com posse dos resultados e aceitando as seguintes hipóteses em relação ao eixo Z:

$$H_0: \text{Se } X^2_{z'} \text{ PEC} \leq X^2_{z'} \text{ e}$$

$$H_1: X^2_{z'} \text{ PEC} > X^2_{z'}$$

- Aplicação dos dados do PEC/84

A hipótese H_0 é aceita se o valor de X^2 calculado for igual ou menor a X^2 tabelado.

Utilizando para EP tipo A: $\sigma' = 1,181\text{m}$ na equação 17, obteve-se os seguintes valores:

$$X^2_{z'10'} = 21,846 \text{ e } X^2_{z'15'} = 21,688.$$

A hipótese H_0 é aceita se o valor de X^2 calculado for igual ou menor a X^2 tabelado.

Comparando o valo tabelado de $X^2_{(22,90)} = 29,615$ com os calculados: $X^2_{z'}$ e $X^2_{z''}$, nota-se que os dados testados não existem erros aleatórios para aquela escala do mapa e se encontram classificado como PEC-A.

- Aplicação dos dados do PEC-PCD

Para um EP tipo A: $\sigma'' = 0,594\text{m}$, obteve-se os seguintes valores:

$$X^2_{z'10''} = 86,348 \text{ e } X^2_{z'15''} = 85,723.$$

Comparando o valor tabelado de $X^2_{(22,90)} = 29,615$ com os calculados: $X^2_{z'}$ e $X^2_{z''}$, nota-se que os dados testados existem erros aleatórios para aquela escala do mapa caso utilize a classificação do PEC-PCD na “classe A”.

6.3.2.3 National Map Accuracy Standard (NMAS)

Para aplicação do teste NMAS utilizou-se a Equação 4 do subitem 4.4.2.1 obtendo as discrepâncias no eixo Z em relação a cada ponto, como estão apresentados na Tabela 32. Essas discrepâncias foram analisadas da seguinte forma:

- Considera que os valores encontrados na amostra que no máximo 10% dos pontos selecionados não podem ter um erro vertical maior que a metade do intervalo entre as linhas de contorno. No caso desse estudo o espaçamento das curvas de nível é 5m, logo foram aceitos valores até 2,5m.

Analisando os valores $e_{z'i}$ e $e_{z''i}$ na Tabela 35, dos 22 pontos da amostra, verificou-se que somente 1 ponto está acima de 2,50 enquanto 21 pontos estava até 2,50m utilizando os dados obtidos do MapGeo2010; e em relação ao MapGeo2015 todos os pontos estavam até 2,50m, representando 95,46% e 100%, respectivamente.

Tabela 35 – Coordenadas Altimétricas obtidas no MDT e em campo com suas respectivas discrepâncias teste NMAS

Pontos	e_{zi10} (m)	e_{zi15} (m)	Pontos	e_{zi10} (m)	e_{zi15} (m)
GPS46B	0,681	0,671	GPS35	-0,399	-0,389
GPS45A	0,433	0,433	GPS49A	2,270	2,270
GPS40	-0,307	-0,297	GPS28	1,856	1,936
GPS46	0,517	0,507	GPS23	1,230	1,260
GPS48	0,513	0,503	GPS26	-1,838	-1,748
GPS45	-0,224	-0,234	GPS06	0,066	0,086
GPS54	0,567	0,577	GPS27	1,976	2,056
GPS46A	1,011	1,001	GPS07	-0,100	-0,070
GPS49	0,692	0,692	GPS02A	-0,127	-0,107
GPS44C	-0,745	-0,745	GPS31	-1,369	-1,309
GPS36	-1,169	-1,149	GPS33	-2,521	-2,481

Fonte: A Autora (2019).

- Considerando os valores fornecidos pelos PEC-84 e PEC-PCD na Tabela 4, tem-se que considerar que a amostra tenha até 90% dos pontos naquela classe desejada e que o erro-padrão seja igual ou menor daquela mesma classe escolhida. No caso desse estudo com o mapa na escala de 1:10.000, tem-se os seguintes valores aceitos para a “Classe A” em relação a altimetria: 2,5m para o PEC-84 e de 1,35m para o PEC-PCD. Isto posto, as Tabelas 36 e 37 mostram os resultados da precisão vertical no eixo Z em cada ponto considerando os valores do PEC-84 e ao PEC-PCD.

Analisando os valores de e_{zi10} na Tabela 36 em relação a PEC-84 e PEC-PCD, temos que:

- Em relação a PEC-84, 21 pontos ficaram até 2,50m, representando 95,46% dos pontos da amostra. De acordo com esses resultados o conjunto de dados SAR ficou classificado na classe “A”.

-Em relação a PEC-PCD, ficaram 16 pontos até 1,35m, totalizando 72,73% aprovados na classe “A” e 10 pontos aprovados na classe “B”. Assim, foram reclassificados para uma classe inferior B, obtendo os seguintes resultados: 21 pontos ficaram abaixo de 5m, representando 95,46% dos pontos da amostra. Portanto, de acordo com os resultados obtidos o conjunto de dados SAR ficaram classificados na classe “B” no PEC-PCD.

Tabela 36 - Análise dos pontos de controle posicional altimétrico (MapGeo2010) de acordo com PEC-84 e PEC-PCD

Pontos	e_{zi10} (m)	PEC	
		84	PCD
GPS46B	0,681	A	A
GPS45A	0,433	A	A
GPS40	-0,307	A	A
GPS46	0,517	A	A
GPS48	0,513	A	A
GPS45	-0,224	A	A
GPS54	0,567	A	A
GPS46A	1,011	A	A
GPS49	0,692	A	A
GPS44C	-0,745	A	A
GPS36	-1,169	A	A
GPS35	-0,399	A	A
GPS49A	2,270	A	B
GPS28	1,856	A	B
GPS23	1,230	A	A
GPS26	-1,838	A	B
GPS06	0,066	A	A
GPS27	1,976	A	B
GPS07	-0,100	A	A
GPS02A	-0,127	A	A
GPS31	-1,369	A	B
GPS33	-2,521	A	B

Fonte: A Autora (2019).

Analisando os valores de e_{zi15} na Tabela 37 em relação a PEC-84 e PEC-PCD, temos que:

- em relação a PEC-84, 22 pontos ficaram abaixo de 2,50m, representando 100% dos pontos da amostra. De acordo com esses resultados o conjunto de dados SAR ficou classificado na classe “A”.

- em relação a PEC-PCD, ficaram 17 pontos abaixo de 1,35m, totalizando 77,28% aprovados na classe “A” e 10 pontos aprovados na classe “B”. Assim, foram reclassificados para uma classe inferior B, obtendo os seguintes resultados: 22 pontos ficaram abaixo de 5m, representando 100% dos pontos da amostra. Portanto, de acordo com os resultados obtidos o conjunto de dados SAR ficaram classificados na classe “B” da PEC-PCD.

Tabela 37 - Análise dos pontos de controle posicional altimétrico (MapGeo2015) de acordo com PEC-84 e PEC-PCD

Pontos	$e_{zi15}(m)$	PEC	
		84	PCD
GPS46B	0,671	A	A
GPS45A	0,433	A	A
GPS40	-0,297	A	A
GPS46	0,507	A	A
GPS48	0,503	A	A
GPS45	-0,234	A	A
GPS54	0,577	A	A
GPS46A	1,001	A	A
GPS49	0,692	A	A
GPS44C	-0,745	A	A
GPS36	-1,149	A	A
GPS35	-0,389	A	A
GPS49A	2,270	A	B
GPS28	1,936	A	B
GPS23	1,260	A	A
GPS26	-1,748	A	B
GPS06	0,086	A	A
GPS27	2,056	A	B
GPS07	-0,070	A	A
GPS02A	-0,107	A	A
GPS31	-1,309	A	A
GPS33	-2,481	A	B

Fonte: A Autora (2019).

6.3.2.4 American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)

Os resultados obtidos do *RMSE* pela equação 7 de cada eixo foram:

$$RMSE_{z2010} = 1,177\text{m e } RMSE_{z2015} = 1,172\text{m.}$$

Em relação a altimetria o RMSE é considerado 1/3 do intervalo entre as linhas de contorno, portanto RMSE para este caso será de 1,667m. Logo $RMSE_z$ atende o teste ASPRS.

6.3.2.5 National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)

O teste NSSDA utilizou a Equação 24 do subitem 4.4.2.4, obtendo o seguinte resultado para o eixo Z.

$$RMSE_{z10} = 1,177\text{m e } RMSE_{z15} = 1,172\text{m.}$$

Assim, para analisar a precisão no eixo Z com coeficiente de exatidão posicional de 95% de confiança, utilizou-se a Equação 25:

$$Precisão_{z10} = 2,306\text{m e } Precisão_{z15} = 2,298\text{m.}$$

Neste teste, o conjunto de dados altimétricos, com o nível de confiança de 95%, ficou com a precisão de 2,306m ao ser utilizado o *software* MapGeo2010, e precisão de 2,298m ao ser utilizado o *software* MapGeo2015. Este teste permite que os profissionais determinem o nível de confiança que querem nos trabalhos cartográficos analisados. Sendo assim, de acordo com as precisões encontradas e a precisão exigida na Tese, estes dados atendem em relação à qualidade posicional altimétrica.

6.3.2.6 United States Geological Survey (USGS)

Para o teste USGS utilizou-se a Equação 24 do subitem 4.4.2.4, obtendo assim o $RMSE_z$, em relação ao MapGeo2010 e MapGeo2015, respectivamente:

$$RMSE_{z10} = 1,177\text{m e } RMSE_{z15} = 1,172\text{m.}$$

Analisando os resultados obtidos pelo $RMSE_{z10}$ e $RMSE_{z15}$, observa-se que entre os níveis apresentados no subitem 4.4.2.5, os resultados podem estar no nível 03.

Assim, para o nível 03, o RMSE pode ter o valor máximo de 7 metros, observando que os valores encontrados de RMSE não ultrapassam deste intervalo [0,7]. O segundo ponto é

analisar o erro vertical na amostra, sendo que este não seja maior que o intervalo das curvas de nível, no caso desta pesquisa o intervalo das curvas de nível é 5m.

6.4 PRODUTOS GERADOS DO MDT

Os produtos confeccionados para a área de Geotecnia foram gerados a partir do MDT. O MDT utilizado foi validado em relação à altimetria, obtendo assim, de acordo com o PEC-84, classificação A e, de acordo com o PEC-PCD, classificação B. Em relação à planimetria obteve-se de acordo com o PEC-84 e PEC-PCD, classificação “A”. Estas especificações (PEC-84 e PEC-PCD) sobre a qualidade posicional planialtimétrica foram incluídas na nota técnica dos mapas criados. Sendo assim, estes produtos confeccionados utilizou o *shapefile* do MDT da área de estudo no *software* ArcGis10 com as seguintes ferramentas: no mapa da declividade, utilizou-se a função “*slope*”; no Relevo sombreado utilizou-se a função “*hillshade*”; curvas de níveis, utilizou-se o *shapefile* das curvas de nível recortada da área de estudo; no Relevo sombreado com curvatura utilizou-se a função “*hillshade*” e o *shapefile* das curvas de nível recortadas da área de estudo; e Mapa de curvatura, utilizou-se a função “*curvature*” e sendo classificados de convexas os valores negativos, côncava valores positivos e retilínea valores nulos. E na confecção do Mapa temático sobre *Height Above Nearest Drainage* (Hand) utilizou-se o *software* Terraview aplicando a extensão da função “*TerraHidro*”, após a obtenção do *shapefile* com a temática do Hand foi utilizado o *software* Arcgis10 para a confecção do mapa.

O mapa de declividade (Figura 136) é uma variável morfométrica que permite analisar a instabilidade da encosta. Este mapa é utilizado para identificar e classificar as áreas altas e baixas no terreno. Isso possibilita saber o caminho do processo de transporte gravitacional de massa (escoamento, erosão, deslizamento) e da água que percorre a região estudada, ou seja, demonstrando suas inclinações ao longo da área de estudo. É também possível a identificação de falhas (estruturas geológicas) no mapa. Com a utilização do mesmo, é possível que essas áreas sejam analisadas com mais atenção na hora do planejamento em atividades humanas, tais como, em áreas agrícolas, ocupação urbana, construções civis, restrições de uso devido às inundações e erosões naquela região.

O mapa do relevo sombreado (Figura 137) é importante, pois permite na identificação das variações das paisagens na região de estudo, assim, permite identificar diferenças sutis no terreno e fraturas do relevo. Sendo que o relevo é base da evolução das paisagens e uma das

primeiras variáveis a ser considerada em planejamentos. É bastante utilizado no Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para o planejamento de obras.

O mapa de curvas de nível (Figura 139) é a representação do relevo em formas de linhas, permitindo saber as diferenças entre dois pontos ou mais no terreno. Esse mapa mostra a representação do relevo através de linhas que se unem em pontos com mesma altitude ou cota. Assim, curvas mais afastadas representam terreno plano e curvas próximas terrenos altos. O mapa do relevo sombreado juntamente com curvas de nível (Figura 138) permite identificar as áreas acidentadas, íngremes, plana, montanhosas, entre outras que têm grande importância para o planejamento urbano.

O mapa de curvatura (Figura 140) permite identificar a aceleração ou desaceleração do fluxo de água no terreno, descrevendo as características físicas da drenagem para entender o processo de erosão, escoamento e disposição. Sua classificação de vertentes permite analisar a direção da declividade, sendo importante essa informação para projetos na construção civil, agricultura, aterro sanitário, projetos de infraestrutura e outras atividades.

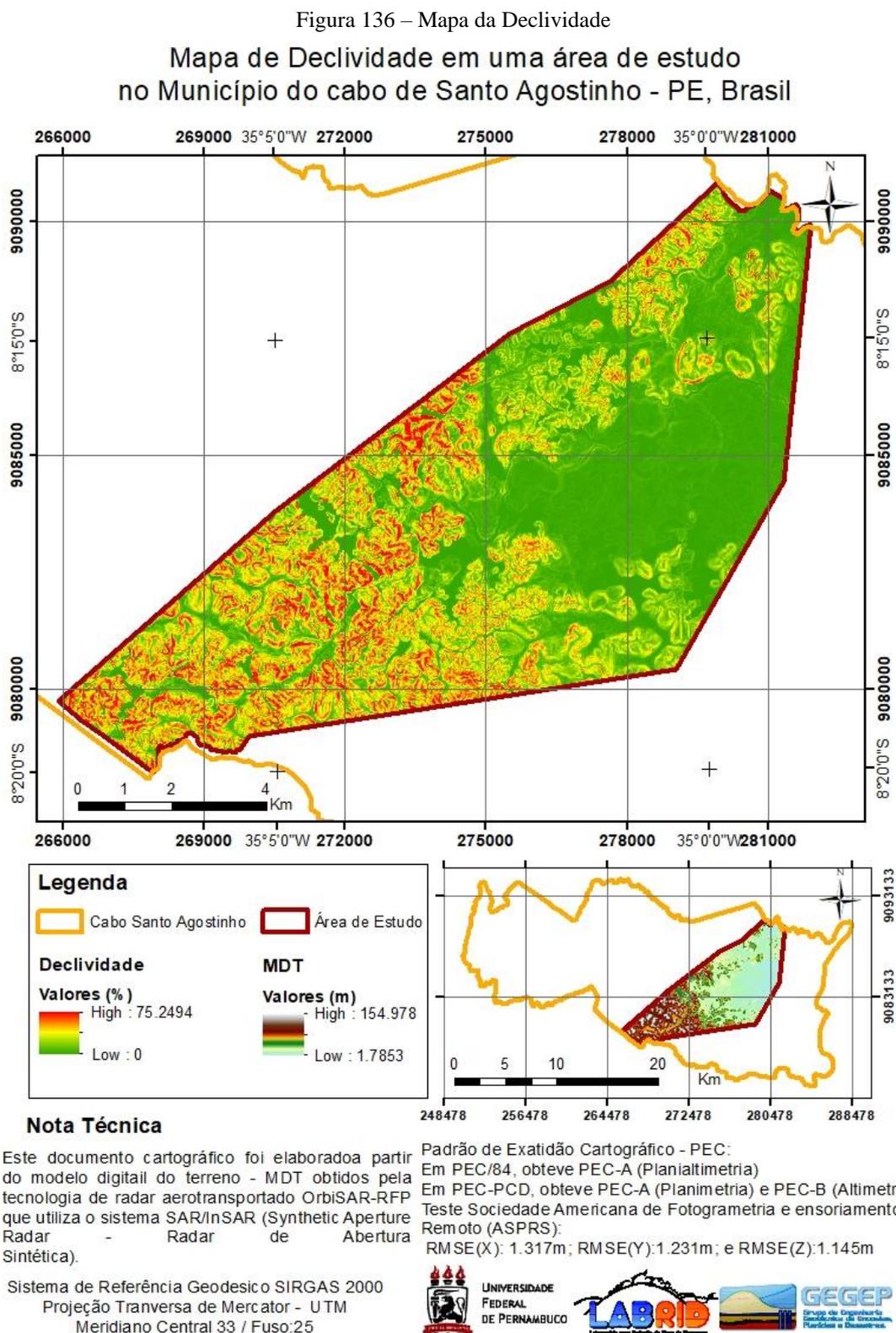
O *Height Above Nearest Drainage* (Hand) (Figura 141) é um modelo simples e útil para detectar áreas que têm probabilidade de inundação, pois é calculado em relação a cada ponto de drenagem que está próxima à região, respeitando o fluxo unidimensional onde a água percorre no terreno. Este possibilita saber a profundidade do lençol freático para saber a disponibilidade de água no solo.

Os mapas temáticos criados permitem proporcionar uma análise mais ampla e completa das características da região de estudo de acordo com cada tema criado. A importância do controle de qualidade nos mapas criados possibilita que os profissionais que utilizem estes produtos saibam a acurácia posicional dos elementos que estão sendo planejados nos mapas. Assim, na hora do planejamento das atividades humanas, por exemplo, da delimitação das áreas de risco tem que levar em consideração as informações posicionais do mapa com seu erro-padrão, a integração de mapas temáticos para a confecção de outro mapa temático ou sobreposição de informações para análise da região estudada e também utilizar base cartográficas atualizadas para não deixar de incluir área suscetível a risco ou classificar áreas erradas.

Todos os mapas temáticos serão apresentados nos subitens a seguir.

6.4.1 Mapa de declividade

A Figura 136 ilustra a área de estudo Cabo de Santo Agostinho com declividade.

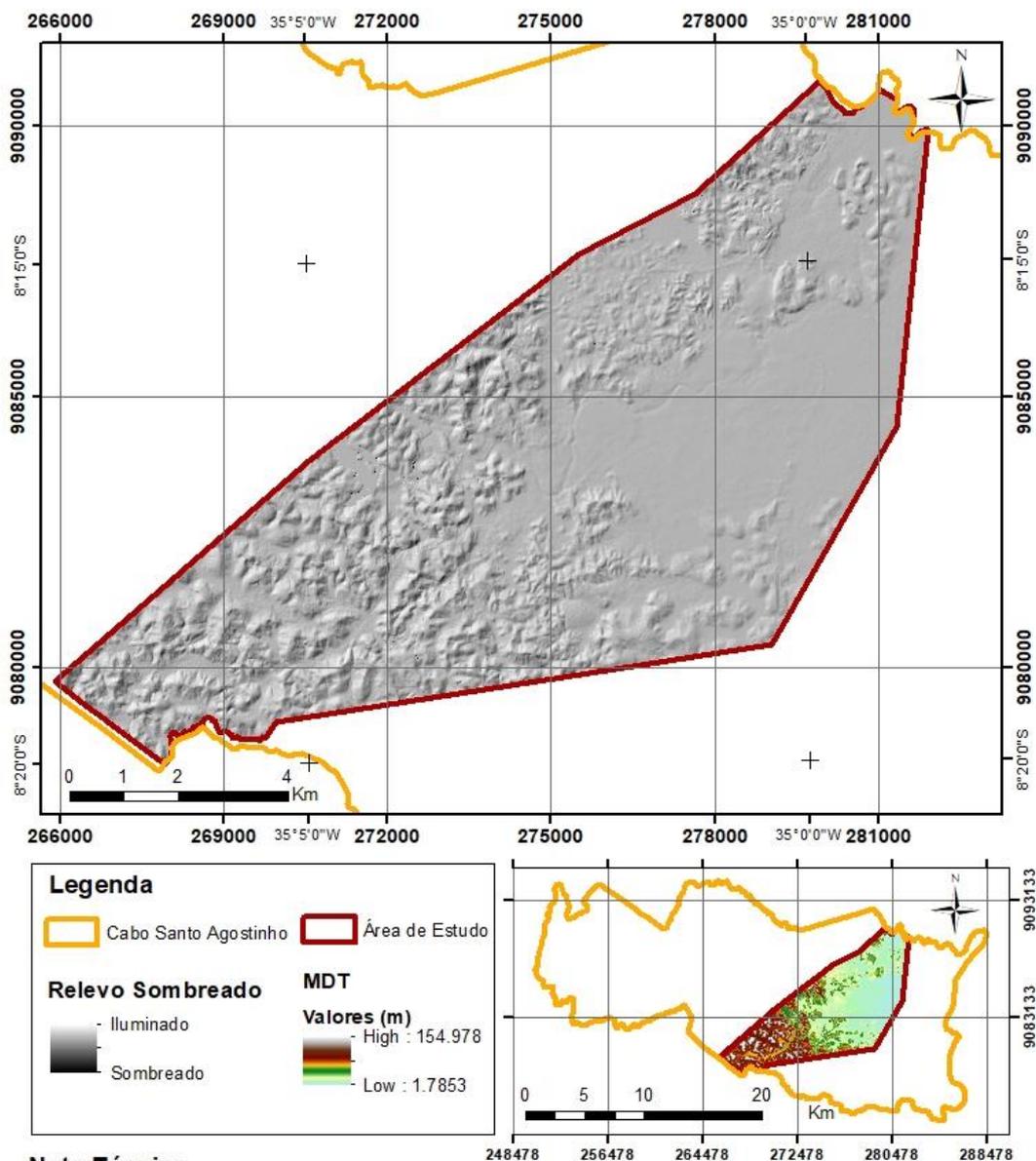


6.4.2 Relevo Sombreado (*hillshade*)

A Figura 137 ilustra a área de estudo Cabo de Santo Agostinho com Relevo Sombreado.

Figura 137 – Relevo Sombreado

Mapa do Relevo Sombreado em uma área de estudo no Município do Cabo de Santo Agostinho - PE, Brasil



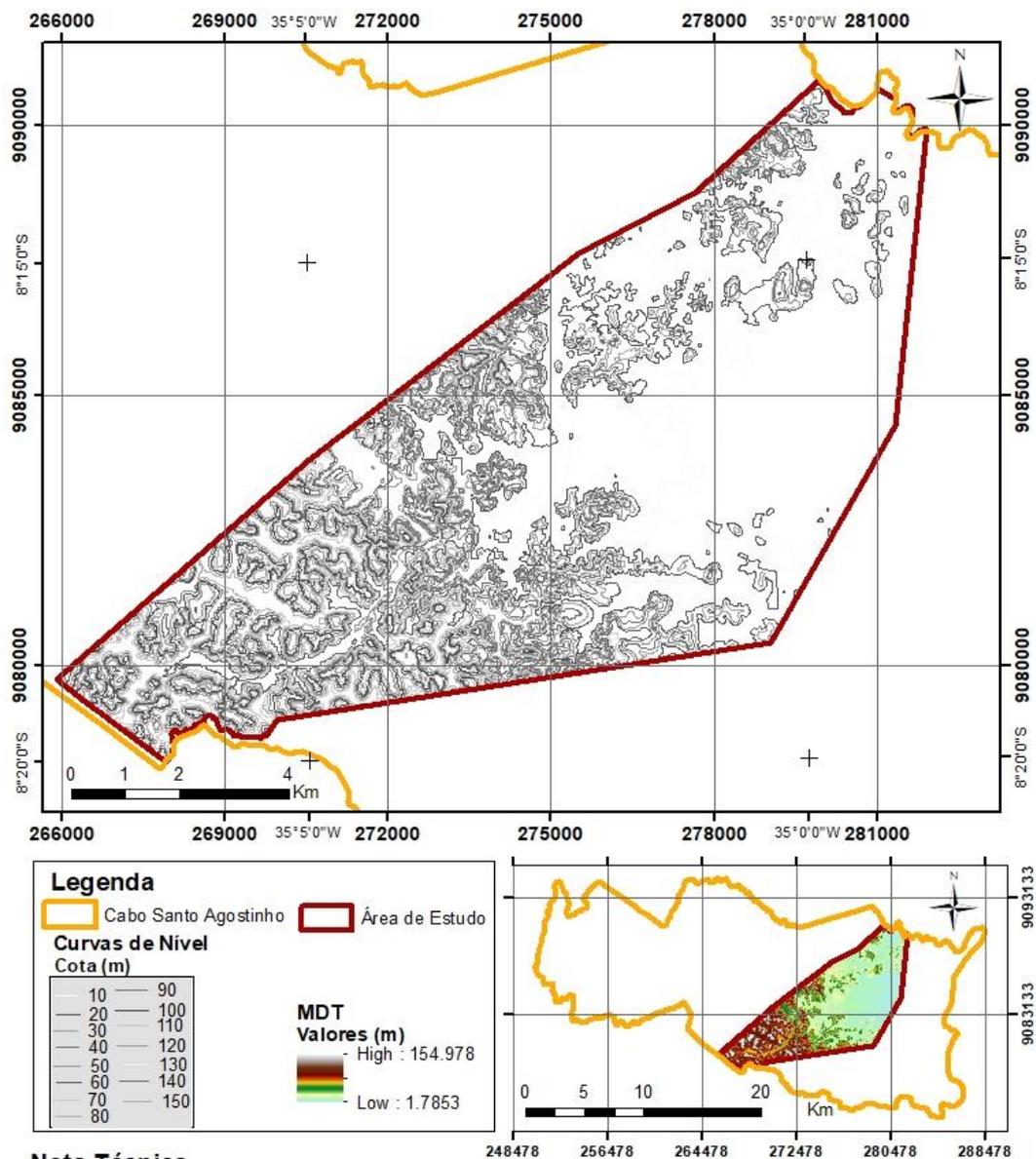
Fonte: A Autora (2019).

6.4.3 Curvas de Níveis

A Figura 138 ilustra a área de estudo Cabo de Santo Agostinho com as Curvas de Nível.

Figura 138 – Curvas de Níveis 1,5x1,5m

Mapa de curvas de Nível em uma área de estudo no Município do cabo de Santo Agostinho - PE, Brasil

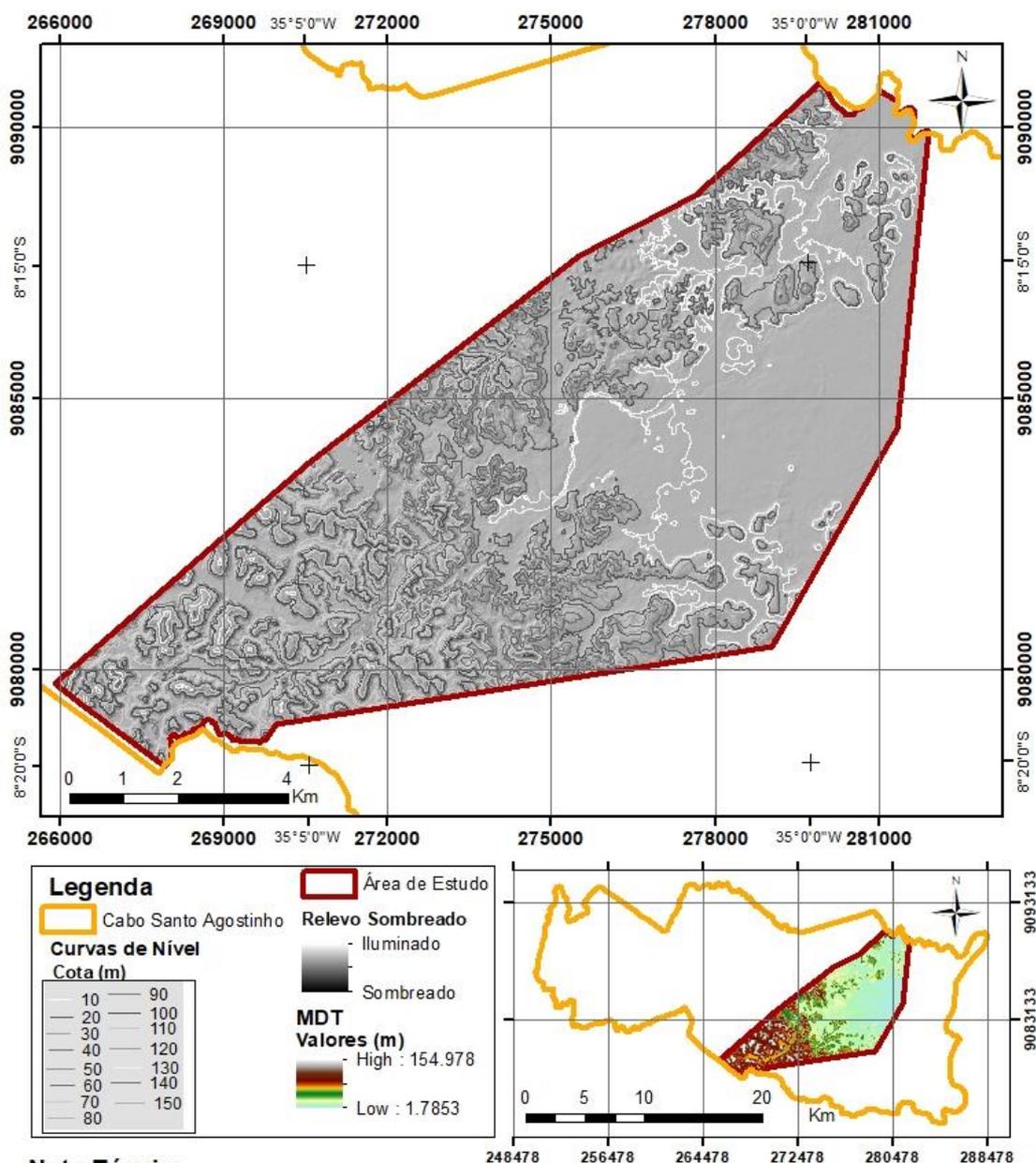


Fonte: A Autora (2019).

A Figura 139 ilustra a área de estudo Cabo de Santo Agostinho com relevo sombreado e curvas de nível.

Figura 139 – Curvas de Níveis com relevo sombreado com o filtro Boxcar

Mapa do Relevo Sombreado com curvas de níveis em uma área de estudo no Município do cabo de Santo Agostinho - PE, Brasil



Nota Técnica

Este documento cartográfico foi elaborado a partir do modelo digital do terreno - MDT obtidos pela tecnologia de radar aerotransportado OrbiSAR-RFP que utiliza o sistema SAR/InSAR (Synthetic Aperture Radar - Radar de Abertura Sintética).

Sistema de Referência Geodésico SIRGAS 2000
Projeção Transversa de Mercator - UTM
Meridiano Central 33 / Fuso:25

Padrão de Exatidão Cartográfico - PEC:

Em PEC/84, obteve PEC-A (Planialtimetria)
Em PEC-PCD, obteve PEC-A (Planimetria) e PEC-B (Altimetria)
Teste Sociedade Americana de Fotogrametria e ensorimento Remoto (ASPRS):
RMSE(X): 1.317m; RMSE(Y):1.231m; e RMSE(Z):1.145m



UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO

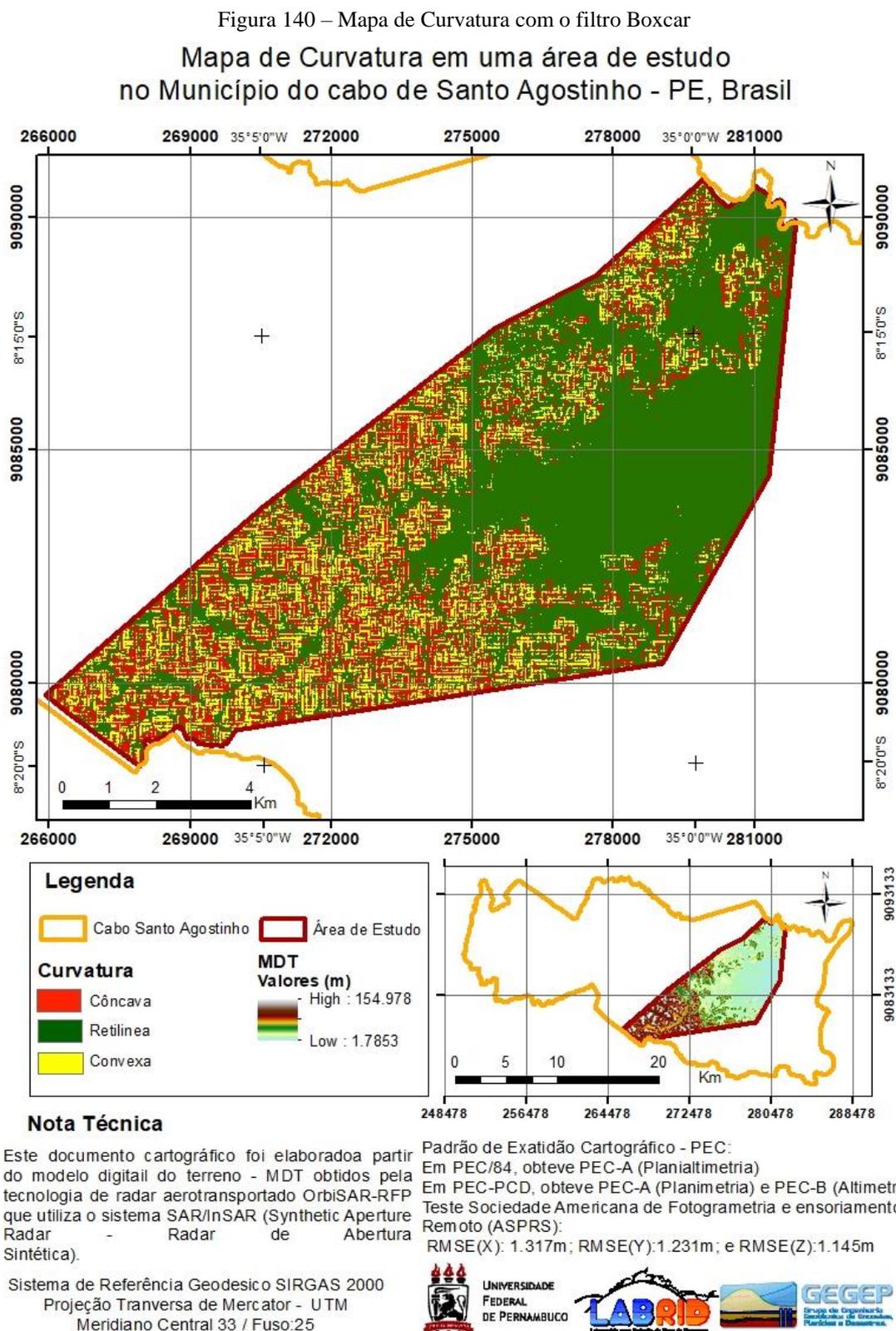


GEGEP
Grupo de Engenharia
Geodésica de Geomática,
Planimetria e Altimetria.

Fonte: A Autora (2019).

6.4.4 Mapa da curvatura

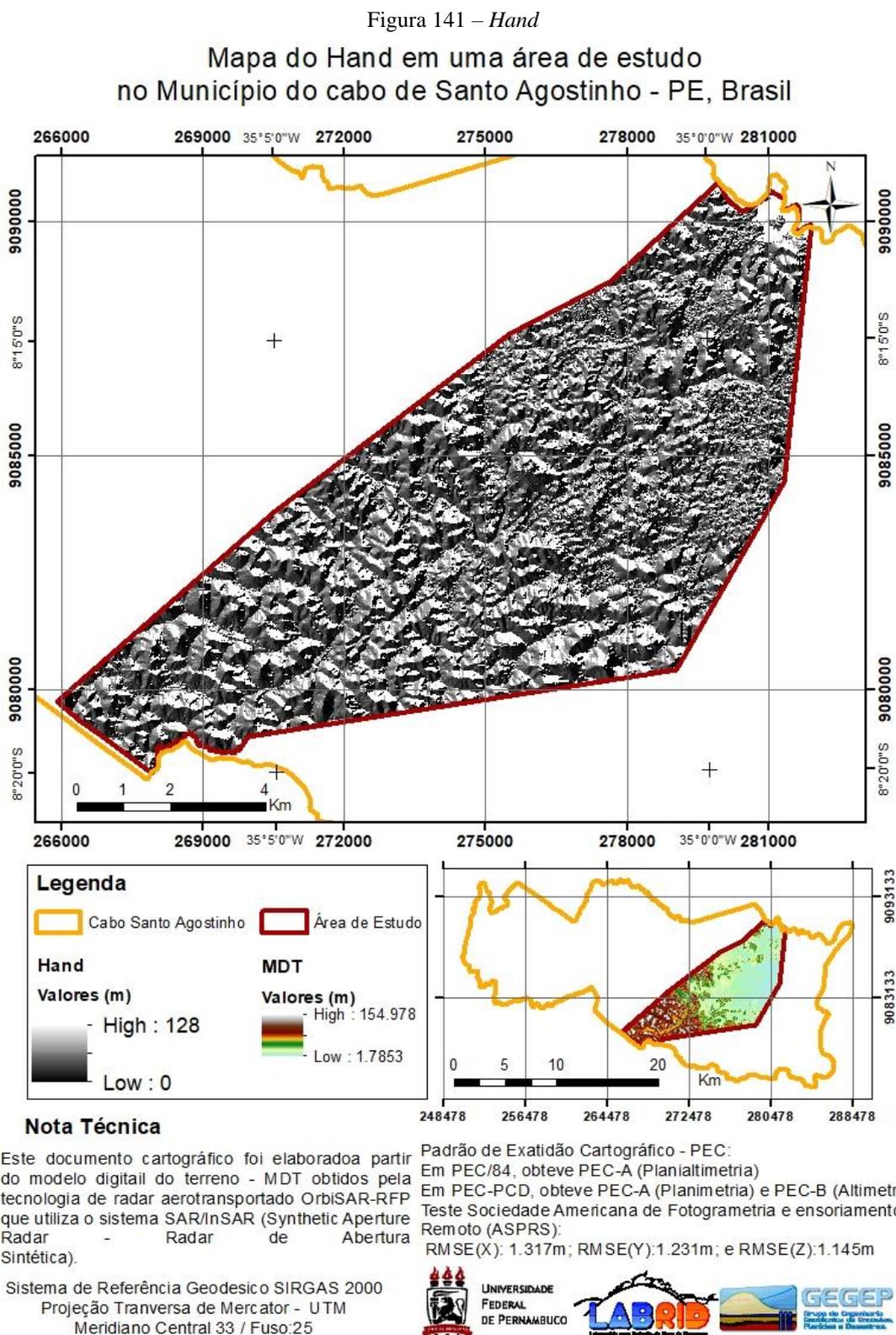
A Figura 140 ilustra a área de estudo Cabo de Santo Agostinho com curvatura.



Fonte: A Autora (2019).

6.4.5 Height Above Nearest Drainage (Hand)

A Figura 141 ilustra a área de estudo Cabo de Santo Agostinho com *Hand*.

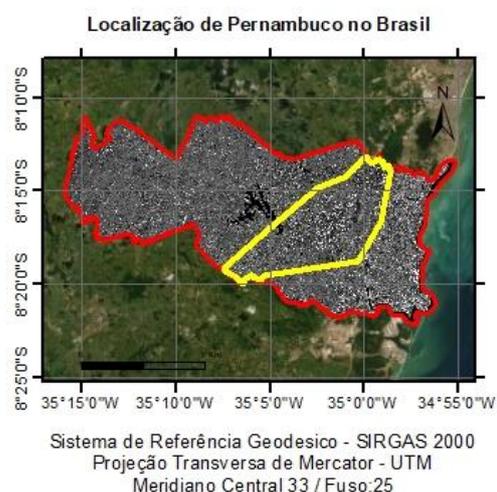
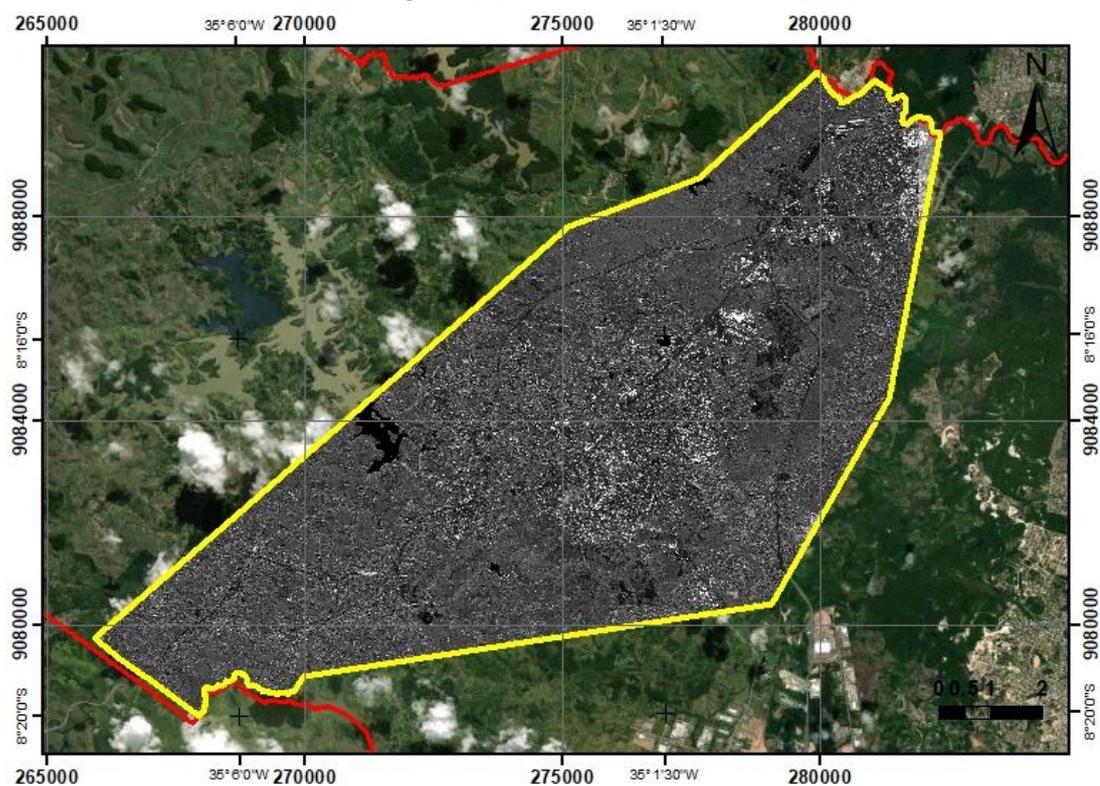


Fonte: A Autora (2019).

6.4.6 Produtos Confeccionados com dados SAR

Foram confeccionados mapas temáticos com os arquivos recebidos, como estão apresentadas nas Figuras 142, 143, 144, 145, 146 e 147.

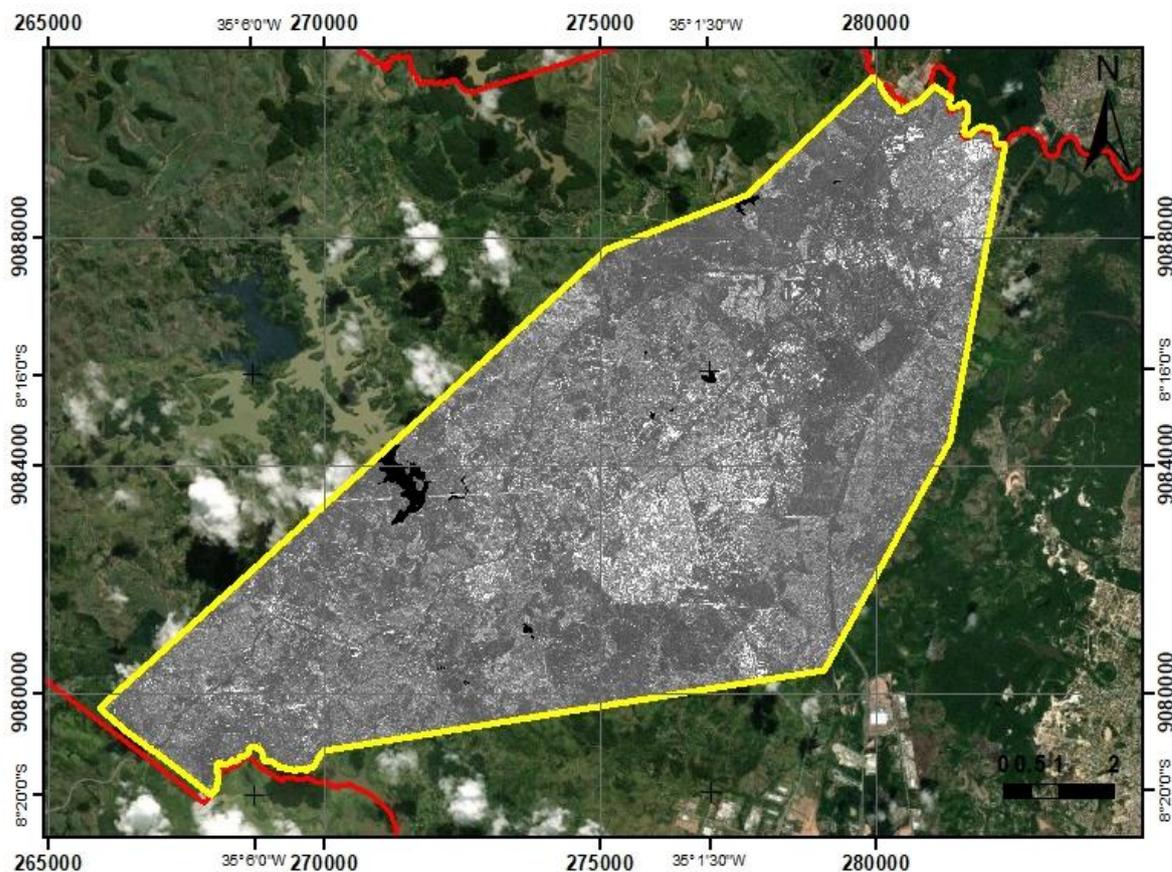
Figura 142 – Orto-imagem da Área de Estudo na banda X
Mapa da Orto-imagem de amplitude de Banda X da área de estudo localizado no Município do Cabo de Santo Agostinho na Região Metropolitana do Recife - RMR



Este documento cartográfico foi elaborado a partir dos limites do Cabo Santo Agostinho e Área de Estudo, utilizando a Orto-imagem de amplitude de Banda X.

Figura 143 – Ortoimagem da Área de Estudo na banda P

Mapa de Orto-imagem de amplitude de Banda P da Área de Estudo no Município do Cabo de Santo Agostinho na Região Metropolitana do Recife - RMR



LEGENDA

- Área de Estudo
- Cabo Santo Agostinho

Área de Estudo - P Radar

Valores (m)

- High : 11581
- Low : 0

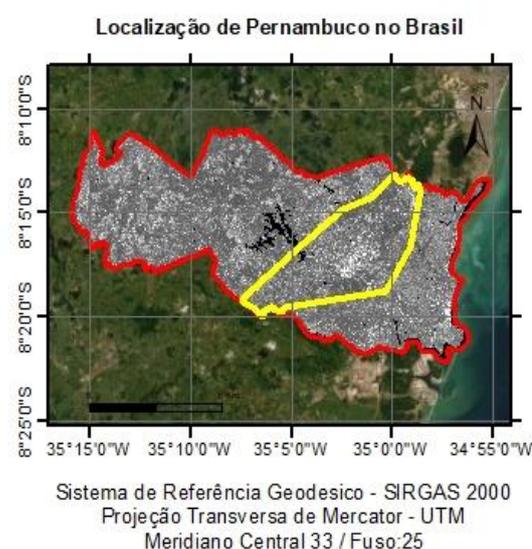
Cabo Santo Agostinho - P Radar

Valores (m)

- High : 21306
- Low : 0

Imagens da Área de Estudo (Mapa Base)

- Imagens de 15m de baixa resolução
- Imagens de alta resolução de 60cm
- Imagens de alta resolução de 30 cm

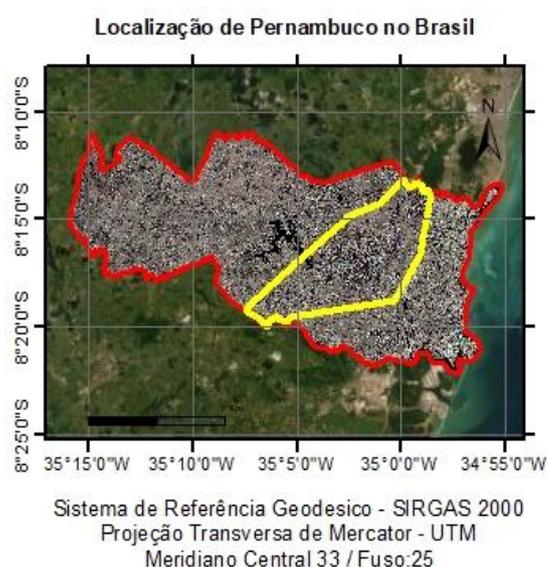
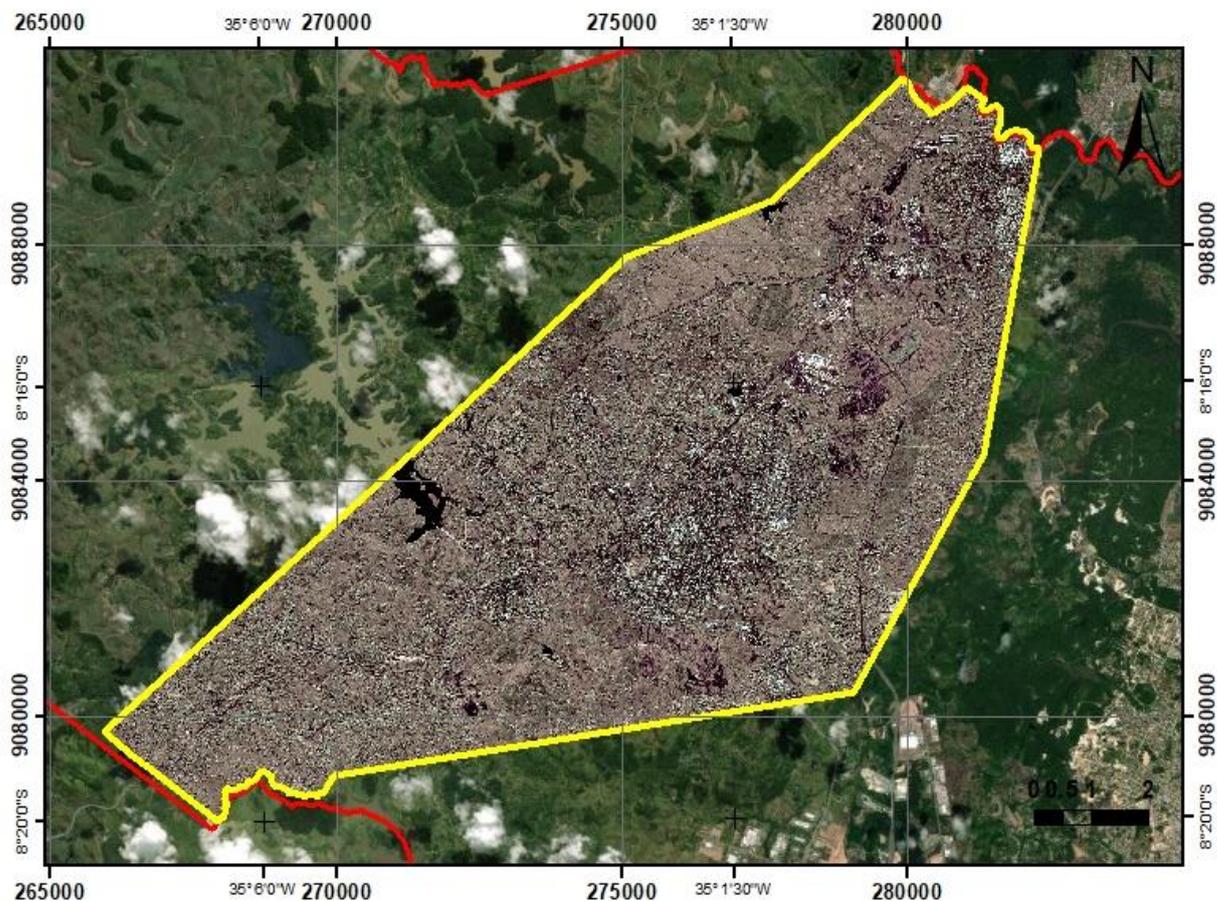


Este documento cartográfico foi elaborado a partir dos limites do Cabo Santo Agostinho e Área de Estudo, utilizando a Orto-imagem de amplitude de Banda P.



Figura 144 – Ortoimagem da Área de Estudo na banda XP

Mapa Orto-imagem Colorida XP da área de estudo localizado no Município do Cabo de Santo Agostinho na Região Metropolitana do Recife - RMR



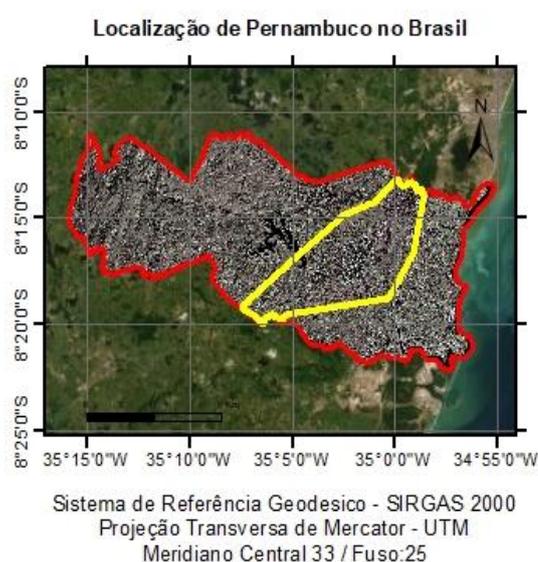
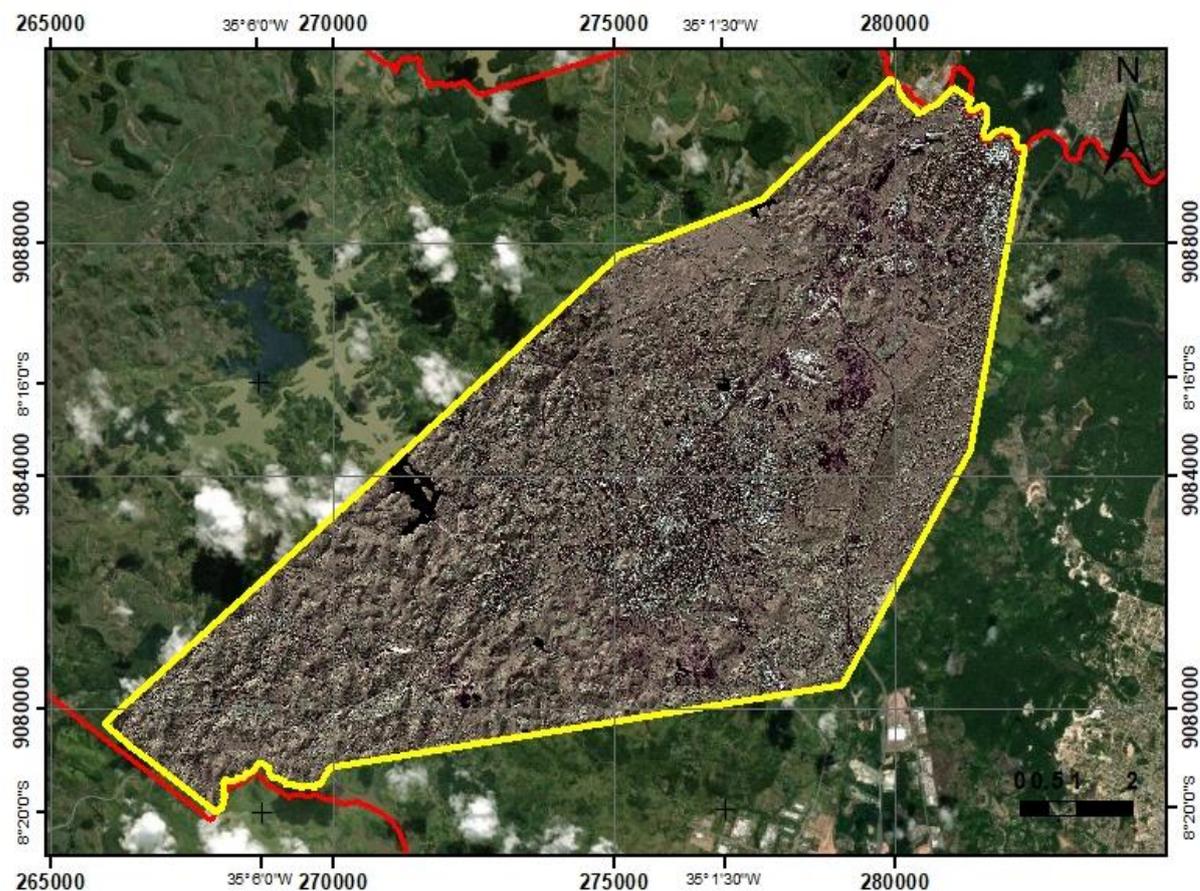
UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO



GEGEP
Grupo de Engenharia
de Geoprocessamento
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

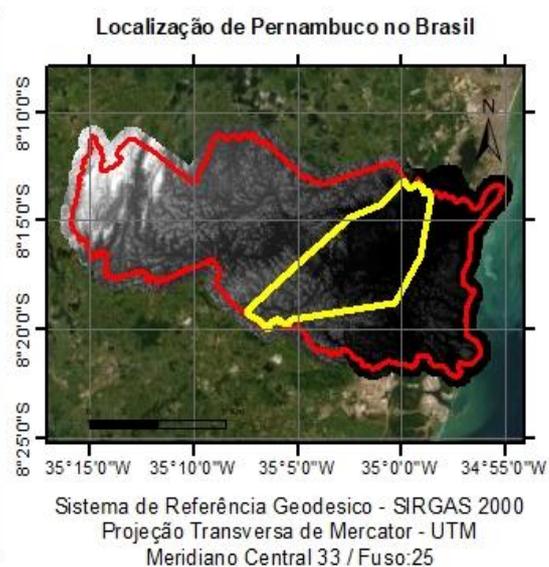
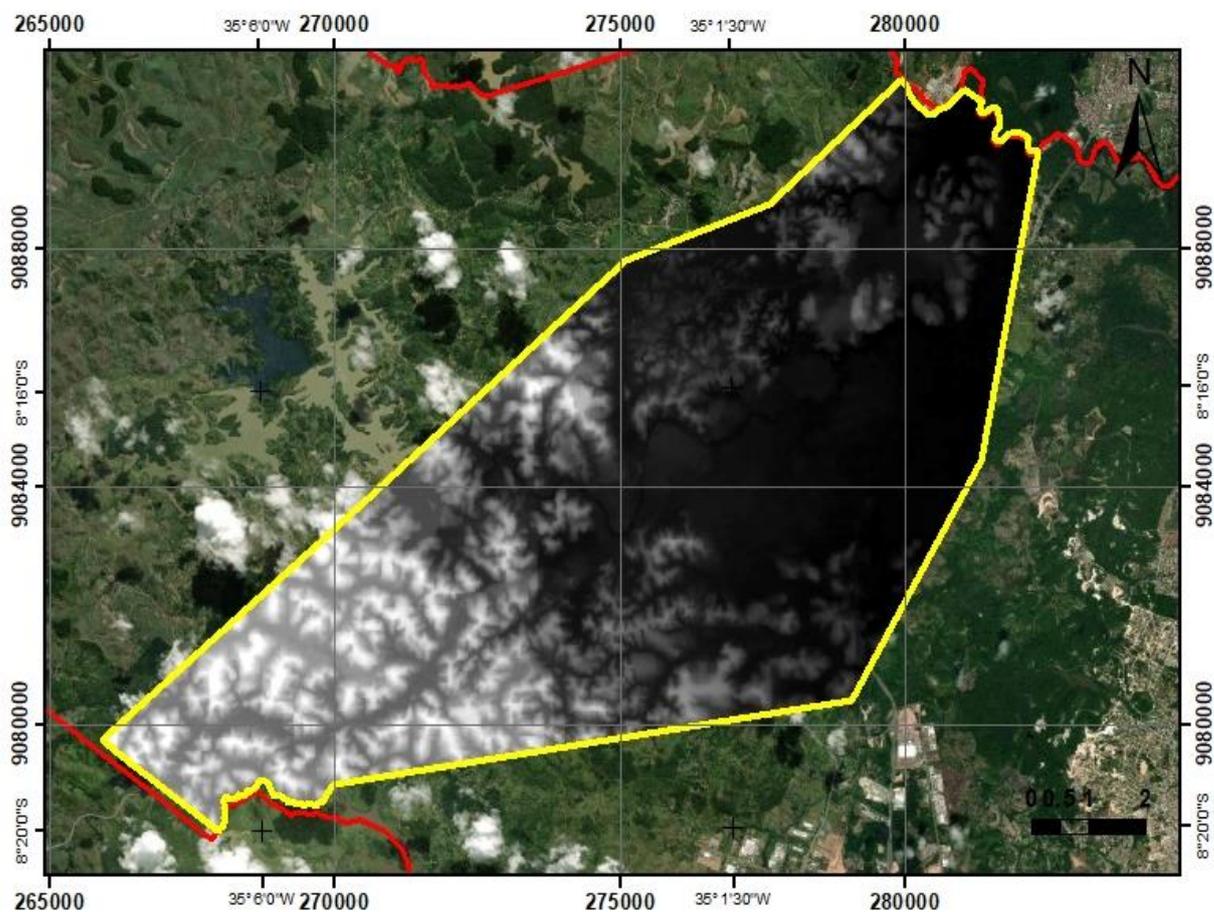
Este documento cartográfico foi elaborado a partir dos limites do Cabo Santo Agostinho e Área de Estudo, utilizando a Orto-imagem Colorida XP.

Figura 145 – Ortoimagem da Área de Estudo na banda XP *Shade*
Mapa Orto-imagem Colorida com Shade XP da área de estudo
localizado no Município do Cabo de Santo Agostinho na Região
Metropolitana do Recife - RMR



Este documento cartográfico foi elaborado a partir dos limites do Cabo Santo Agostinho e Área de Estudo, utilizando a Orto-imagem Colorida com Shade XP.

Figura 146 – MDT da Área de Estudo
Mapa do Modelo Digital do Terreno da área de estudo localizado no Município do Cabo de Santo Agostinho na Região Metropolitana do Recife - RMR



UNIVERSIDADE
 FEDERAL
 DE PERNAMBUCO



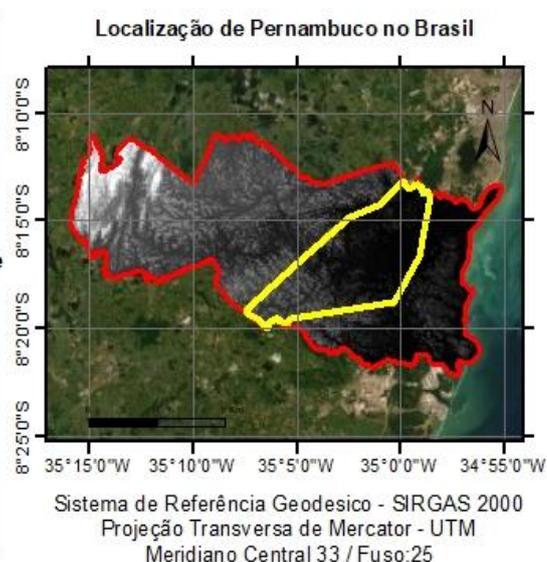
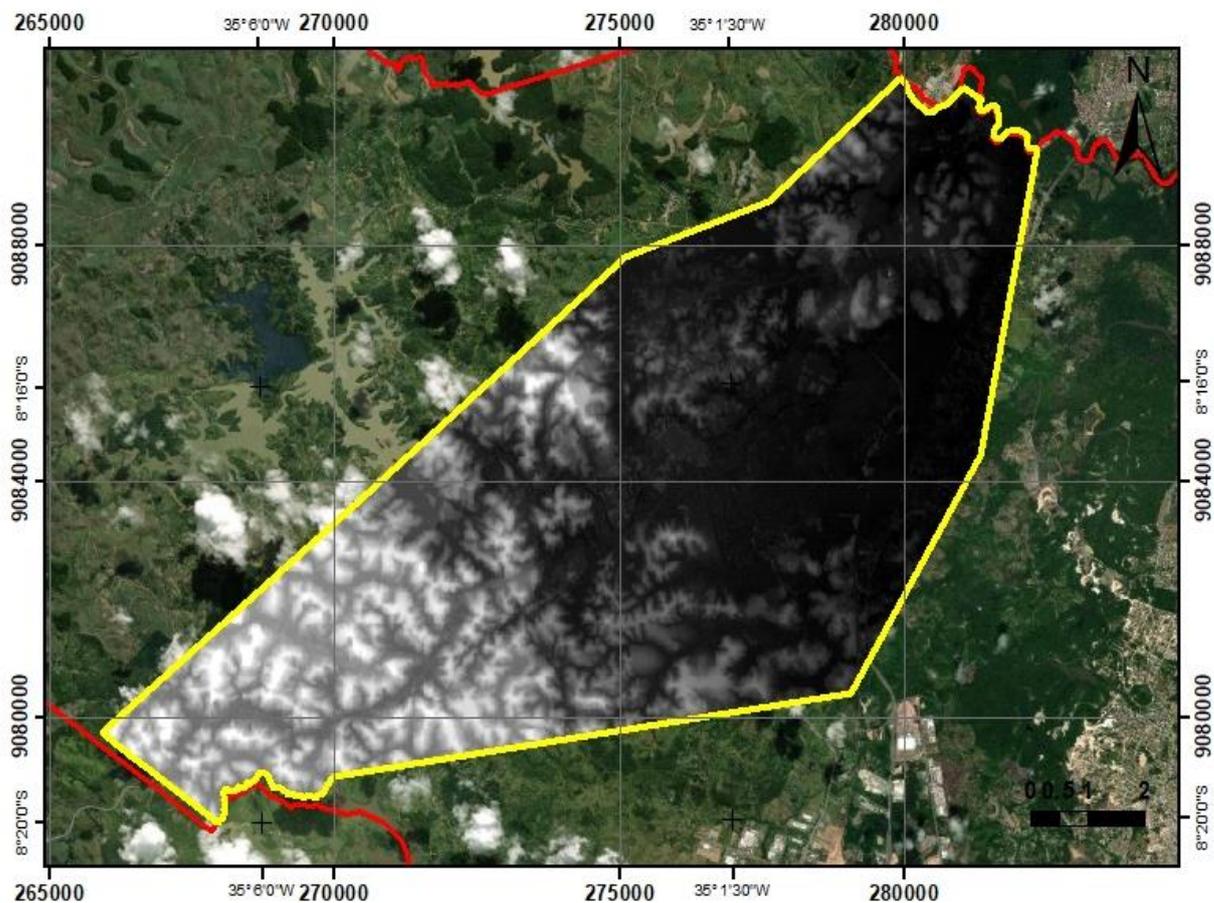
GEGEP
 Grupo de Engenharia
 Geodésica e Geomática

Este documento cartográfico foi elaborado a partir dos limites do Cabo Santo Agostinho e Área de Estudo, utilizando Modelo Digital do Terreno.

Fonte: A Autora (2019).

Figura 147 – MDS da Área de Estudo

Mapa do Modelo Digital da Superfície da área de estudo localizado no Município do Cabo de Santo Agostinho na Região Metropolitana do Recife - RMR



UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO



GEGEP
Grupo de Engenharia
Geodésica e Geomática
Pernambuco - Universidade

Este documento cartográfico foi elaborado a partir dos limites do Cabo Santo Agostinho e Área de Estudo, utilizando Modelo Digital da Superfície.

Fonte: A Autora (2019).

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A seleção de pontos de controle posicional exige que as posições escolhidas sejam identificadas tanto no insumo quanto na área de estudo escolhida como ilustram os autores Ariza (2002), Nogueira Júnior (2003), Nero (2005), Santos (2010), Pereira & Nero (2012), Maranhão, (2013) e Dos Santos (2015). Os insumos são conjuntos de dados vetoriais (ET-PCDG, 2016) e podem ser gerados por diferentes métodos de aquisição tais como fotogrametria, radar, LiDAR, geodesia, Vant e entre outros (capítulo 3). Cada método de aquisição tem suas especificações e particularidades em relação a plataforma de aquisição, tecnologia, faixa eletromagnética utilizada na aquisição, processamentos dos dados e escolhas de feições em seus produtos para serem utilizadas como controle. Foram realizados testes escolhendo feições que são definidas na fotogrametria nesta Tese. Essas feições escolhidas por fotografia não serviram para a validação posicional planimétrica na ortoimagem, pois não foram possíveis identificá-las na ortoimagem de radar.

Durante a pesquisa observou-se que as características do radar no mapeamento é a alta refletividade de objetos metálico e de objetos perpendiculares ao solo, que causam explosões de pixels e isso pode ser uma desvantagem, porque deixa a ortoimagem com aspectos visual estranho, entretanto é uma grande vantagem quando o objetivo é justamente detectar feições identificáveis na ortoimagem e em campo, que são utilizadas na validação posicional planialtimétrica. Percebeu-se que essas explosões de *pixels* apresentavam localidades e formas iguais, constatando em campo que eram edificações, estruturas de iluminação e sinalização (estruturas metálicas. Essas estruturas pré-existentes dentro da área de estudo, mostram que são boas escolhas como ponto de controle como apresenta o subitem 2.2.3, pois diversos feixes do sistema InSAR refletem nela em diferentes locais da estrutura. Assim, o sistema irá entender que todos os lugares estão no centro da placa e sua posição era realmente o que representava na superfície e na ortoimagem. Percebendo-se que o sistema apresenta sensibilidade a objetos em metais e também esses poderiam ser utilizados na aquisição como pontos de controle posicional planialtimétrico para validação da ortoimagem e MDT. E também existem trabalhos de Larson et al. (1988); Gray et al. (1990); Chen e Quegan (2011) e Saleeb et al. (2015) que utilizam diedros ou objetos metálicos dentro da área de estudo para realizar a calibração do sistema de radar, pois esses objetos são identificados na ortoimagem.

Após a identificação das feições que serviriam como pontos de controle posicional planialtimétrico, foram coletados esses pontos utilizando o método estático em todos eles com a base de referência que pertence ao Sistema Geodésico Brasileiro – SGB. Em posse dos

pontos realizou-se a validação posicional do conjunto de dados: ortoimagem e MDT, utilizando-se o teste estatístico ASPRS (subitem 2.4) para obtenção do erro quadrático médio de cada eixo de coordenada. E assim com os resultados obtidos neste trabalho, a ortoimagem, em relação a planimetria; e MDT em relação a altimetria oriundos do sistema InSAR, tiveram a classificação de acordo com o padrão de exatidão cartográfica do PEC-84 classe “A”. Em relação a outra norma ao PEC-PCD, a ortoimagem obteve a classe “A” e o MDT teve classe “B”. Conclui-se que o conjunto de dados: ortoimagem e MDT, foi adquirido em 2014 com a normatização vigente que era a PEC-84 e mesmo assim, conseguiu-se a classe “A” em relação a parte planimétrica de acordo com a PEC-PCD. Assim, os resultados mostram que a metodologia proposta para validar os pontos de controle pré-existentes no cenário de estudos de ortoimagem e DTM adquiridos pelo OrbiSAR aerotransportado da Embraer está em conformidade com as regulamentações brasileiras vigentes.

Os resultados apresentados nesta pesquisa mostram em relação aos testes de controle de acurácia posicional, que:

- Os testes NMAS e ASPRS, para realizar a análise do conjunto de dados, utilizam as fórmulas das discrepâncias em cada eixo de coordenada (X, Y e Z). Estas discrepâncias são classificadas de acordo com as normatizações brasileiras vigentes.

- O teste NSSDA também utiliza RMSE em cada eixo de coordenada (X, Y e Z) em suas etapas, mas além disso fornece informações do desvio-padrão e a precisão em relação a distância entre os dados fornecido pelo GNSS e insumos (Ortoimagem e MDT).

Finalmente é importante destacar que esta tese contribui para fornecer uma metodologia para validar a qualidade posicional planialtimétrica procurando investigar as feições que eram radar-identificáveis na ortoimagem e pré-existentes na área de estudo para servir como pontos de controle posicional planialtimétrico. Utilizou-se também na metodologia o PEC-84, o PEC-PCD e diferentes testes estatísticos na validação posicional planialtimétrica no conjunto de dados da tecnologia SAR: ortoimagem, em relação à planimetria; e MDT, em relação à altimetria, muitos deles disponíveis em plataformas gratuitas. A partir do MDT foi possível a confecção dos produtos utilizados na área de geotecnia, tais como mapa de declividade, relevo sombreado, relevo sombreado com curvas de nível, curvatura, hand, ortoimagem na banda X, ortoimagem na banda P, ortoimagem na banda XP, ortoimagem na banda XP Shade, Modelo Digital da Superfície e Modelo Digital do Terreno. Os mapas temáticos citados são importantes, pois o hand possibilita detectar áreas de risco sob ameaça de inundação; o relevo sombreado possibilita identificar sutis variações no terreno, a declividade permite analisar áreas altas e baixas e também analisar os

movimentos de massa na área de risco e inundações, e o de curvatura possibilitar analisar o comportamento dos movimentos e direção dos fluxos. Esses produtos são bastante importantes para entender o comportamento da superfície terrestre na área de estudo e com o conhecimento da qualidade posicional planialtimétrica permitem que o profissional planeje, delimite e classifique todos os fatores, tais como, áreas de inundações, de escorregamento, de erosões e de movimento de massa, etc, dentro da área com o conhecimento do erro-padrão embutido no mesmo.

REFERÊNCIAS

- ALHEIROS, M. M. *et al.* **Manual de ocupação dos morros da região metropolitana do Recife**. Recife: FIDEM, 2003. 384 p.
- AMARAL, S; COSTA, C.B; ARASATO, L.S; VALERIANO, D. D; RENNÓ, C.D; VALERIANO, D. M. **Declividade ou Gradiente**. INPE. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/declividade_gradiente.php. Acesso em: 10 out. 2019.
- AMARAL, S; COSTA, C.B; ARASATO, L.S; XIMENES, A.C; RENNÓ, C.D. AMBDATA: Variáveis ambientais para Modelos de Distribuição de Espécies (SDMs). *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. São José dos Campos: SBSR; INPE, 2013. p. 6930-6937. Disponível em: <http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GH36>. Acesso em: 10 de jan. de 2019.
- ANJOS, D. S; JUNIOR, M. M; NUNES, J. O. R. **Classificação da curvatura de vertentes em perfil via Modelo de Terreno**. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266037280_Classificacao_da_curvatura_de_vertentes_em_perfil_via_Modelo_de_Terreno.
- ANTUNES, C. **Método sequencial de ajustamento no tratamento de observações GPS**. Conferência de Cartografia e Geodesia. FCUL. 1996.
- ARCANJO, D. R.; DOS ANJOS, C. S. Análise da acurácia posicional planimétrica de imagem orbital do sensor PAN/CBERS-4. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR)*, 19., 2019. **Anais [...]**.
- ARIZA, F. J. **Calidad em La producción cartográfica**. Espanha: RaMa, 2002. 389p.
- ASPRS, 2015. **ASPRS Positional accuracy standards for digital geospatial data**. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* v. 81, n. 3, p. A1–A26. Disponível em: <http://essential.metapress.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.14358/PERS.81.3.A1-A26>. Acesso em: 10 de jan. de 2019.
- ASSIS, H. M. B. **Cartografia geomorfológica do Município do Cabo de Santo Agostinho/PE**. Recife: CPRM/FIDEM, 1999. (Série Cartas Temáticas, v. 4). 32 p. il.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.133** – Normas Técnicas para a execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- AZEVEDO, P. V; ARAÚJO, L. E. Classificação da precipitação diária e impactos decorrentes dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife - PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 250-268, 2012.
- BARBOZA, M. R; ROSA, R. A. S; LÁZARO, J. M; NOGUEIRA JR., J. B. **Detecção de mancha de inundação abaixo da floresta utilizando a coerência multi-temporal entre imagens SAR da banda P**. *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*. 2017.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BISPO, P. D. C; PARDINIC, M; PAPATHANASSIOUC, K; KUGLERC, F; BALZTERA, H; RAINSD D; SANTOSF, J. R; RIZAEV, I. G; TANSEYA, K; SANTOSH, M. N; ARAUJO, L. S. Mapping forest successional stages in the Brazilian Amazon using forest heights derived from TanDEM-X SAR interferometry. **Journal Remote Sensing of Environment**. 2019. DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.013.

BITAR, O. Y. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000** (livro eletrônico): nota técnica explicativa. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014.

BLASCZYNSKI, J. S. Landform characterization with Geographic Information Systems. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 63, n. 2, p. 183-191, 1997.

BRASIL. **Decreto n. 89.817** - Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 1984.

BRASIL. **Lei Federal n° 12.608**. 2012.

BRASIL. **Lei n° 5.878, de 11 de maio de 1973**. Dispõe sobre a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, e dá outras providências. Brasília, 1973.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Projeto Amazônia Legal**. Rio de Janeiro. 2015.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RADAMBRASIL - Levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro, 1973-1987. 34 vls.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Especificação Técnica de Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG)**. 2. ed. Rio de Janeiro: CONCAR, 2016. Disponível em: <http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2?id=134>. Acesso em: 19 de dez. de 2019.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Especificação Técnica para a Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. 1. ed. Rio de Janeiro: CONCAR, 2015.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Especificação Técnica para a Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. 2. ed. Rio de Janeiro: CONCAR, 2016. Disponível em: <http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2?id=134>.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais (ET-ADGV) versão 3.0**. 3. ed. Rio de Janeiro: CONCAR, 2018.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Especificação Técnica para o Controle de Qualidade dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. 2. ed. Rio de Janeiro: CONCAR, 2016.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG)**. 2. ed. Rio de Janeiro: CONCAR, 2016. Disponível: <http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2?id=134>.

BRENARDI, J.; LANDIM, P. **Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na Coleta de Dados**. UNESP/Campus de Rio Claro. Departamento de Geologia Aplicada - IGCE — Laboratório de Geomatématica — Texto Didático 10. 2002.

BURITY, E. F; BRITO, J. L. N. AND PHILIPS, J. **Data quality for mapping**. *In: Brazilian Cartography Congress*. Recife. Annals - CD-ROM. 1999.

BURITY, E. F; BRITO, J. L. N., PHILIPS, J. **Qualidade de dados para mapeamento**. *In: Congresso Brasileiro de Cartografia*. Recife. Anais - CD-ROM. 1999.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford, Clarendon Press, 1986. 193 p.

BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2005.

CAMARGO, F. F; OLIVEIRA, C. G; FLORENZANO, T. G. ALMEIDA. **Avaliação da Acurácia Posicional da Base Cartográfica do Município de São José dos Campos (SP) por Análise de Tendência e Precisão**. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, 2007.

CANIL, K.; FREITAS, C. G. L.; SOBREIRA, F. G.; COLLARES, E. G. **Geologia de Engenharia e Ambiental** – Cartografia Geotécnica e Geoambiental. São Paulo: ABGE, 2018.

CARVALHO, C. S; GALVÃO, T. **Prevenção de risco de deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais**. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006. 111 p.

CARVALHO, J. A. B.; SILVA, D. C. Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil - Methods for Evaluating Altimetric Positional Accuracy in Brazil. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2018. DOI: 10.14393/rbcv70n2-45404.

CASTRO, A. L. C; CALHEIROS, L. B; CUNHA, M. I. R; BRINGEL, M. L. N. C. **Manual de desastres: desastres naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. 174p.

CASTRO, C. M; PEIXOTO, M. N. O; RIO, G. A. P. Riscos ambientais e geografia: conceituações, abordagens e escalas. **Anuário do Instituto de Geociências** – UFRJ. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. v. 28-2.

CHEN, J., QUEGAN, S. Calibration of Spaceborne CTLR Compact Polarimetric Low-Frequency SAR Using Mixed Radar Calibrators. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2011. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2109065.

COUTINHO, R. Q. **Projeto de mapeamento de áreas de riscos em municípios da Região Metropolitana do Recife**. Convênio firmado entre o GEGEP e o Ministério da Integração Nacional/Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC/MI), 2015.

COUTINHO, R. Q; BANDEIRA, A. P. N. Processos de instabilização de encostas e avaliação do grau de risco: estudo de caso nas cidades de Recife e Camaragibe. *In: LACERDA, W. A. et al. (Org.). Desastres naturais: suscetibilidade e riscos, mitigação e prevenção, gestão e ações emergenciais*. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2012. 211 p.

CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic aperture radar: systems and signal processing**. 1 ed. (Wiley Series in Remote Sensing and Image Processing, v. 5). São Paulo: Wiley-Interscience, 1991.

DALMOLIN, Q.; LEAL, E. D. M. Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em CAD. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 7, n. 1, 2001.

DIAS, P. M. R. C. **Elaboração de uma carta de aterros da cidade de Lisboa por LiDAR e fotogrametria aérea**. Dissertação. 2013.

DINIZ, N. C. Cartografia geotécnica por classificação de unidades de terreno e avaliação de suscetibilidade e aptidão. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 29-77, 2012.

DOYLE, F.J. Digital terrain models: an overview. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 44, n.12, p.1481-1485, 1978.

DPI/INPE. **Sensoriamento Remoto**. Software SPRING. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html. Acessado: 11/12/2017.

DPI/INPE. **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas**. Software SPRING. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/radar/radar.htm>. Última atualização: 07/2017. Acessado: 17/10/2017.

DRONENG. **MDT e MDS: Você sabe a diferença?**. Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/mdt-e-mds/>. Acesso em: 10 de dez. de 2019.

DUARTE, C. C. **Eventos extremos de chuva e análise da suscetibilidade a movimentos de massa no município do Ipojuca – PE**. 2015. Tese (Doutorado) - Departamento de Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

ENGEFOTO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S.A. **o uso de vants na engenharia**. Disponível em: <https://brasilconstrucao.com.br/?p=5843>. Acesso em: 27 out. 2018.

ERIS. **Software ArcMap 10.3 Como a curvatura funciona**. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>. Acessado: 01/04/2020.

ERIS. **Software ArcMap 10.3 Como declividade funciona**. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/understanding-slope.htm>. Acessado: 01/04/2020.

ERIS. **Software ArcMap 10.3 Como o relevo sombreado funciona.** Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-hillshade-works.htm>. Acessado: 01/04/2020.

ERIS. **Software ArcMap 10.3 Função curvatura.** Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>. Acessado: 01/04/2020.

ERIS. **Software ArcMap 10.3 Função Declividade.** Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/slope-function.htm>. Acessado: 01/04/2020.

ERIS. Software ArcMap 10.3 **Função Relevo Sombreado.** Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/hillshade-function.htm>. Acessado: 01/04/2020.

FARIAS, J. L. P; MERÊNCIO, I; VIEIRA, C. A. O. **Avaliação da acurácia cartográfica planimétrica do produto gerado a partir de aeronave remotamente pilotada (RPA)** - Evaluation of the planimetric cartographic accuracy of the product generated from a remotely piloted aircraft (RPA). COBRAC, 2018.

FELL, R. et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, p. 83-111, 2008.

FERNANDES, N. F. *et al.* Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa uma abordagem geológica-geomorfológica. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Ed.) **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. cap. 3, p.123-194.

Físicas. University of Colorado: Bookman, 2012. 329 ISBN 8540701367.

FRANCESCHETTI, G; LANARI, R. **Synthetic Aperture Radar Processing**. 1. ed. CRC Press, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203737484>.

FREEMAN, A; CURLANDER, J. C. Radiometric correction and calibration of SAR images. Project: SAR Calibration. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 55, n. 9. 1989.

GALO, M; CAMARGO, P. O. **Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas**. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 1., 1994. **Anais [...]**. Local: CBCTM, 1994. Tomo II, p. 41-48.

GARESTIER, F. LE TOAN, T. DUBOIS-FERNANDEZ, PASCALE. **Forest height estimation using P-band Pol-InSAR data**. Proceedings of the 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry. ISBN:92-9291-208-7. Noordwijk, Netherlands: European Space Agency, id.36. 2007.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994, 319p.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Editora UFPR, 2016.

GOODCHILD, M. F; GLENNON, J. A. A. Crowdsourcing geographic information for disaster response: a research frontier. **International Journal of Digital Earth**, v. 3, n. 3, p. 231–241, 2010.

Google. **software Google Earth Pro** - versão 7.3. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>. Acesso em: 2 fev. 2019.

GRAY, A. L; VACHON, P.W; LIVINGSTONE, C. E; LUKOWSKI, T.I. Synthetic aperture radar calibration using reference reflectors. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 3, 1990. DOI: 10.1109/36.54363.

GUIZADO MENA, Y. M. **Aplicación de test para control de calidad posicional al producto cartográfico obtenido mediante vuelo aerofotogramétrico con VANT**. 2018.

HOFFMANN-WELLENHOF, B; LICHTENEGGER, H; COLLINS, J. **GPS – Theory and Practice**. 5th edition, Springer. 2001.

Horus Aeronaves. **Tecnologia em imagens aéreas com o uso de drones**. Disponível em: <https://horusaeronaves.com/a-empresa/>. Acessado:27/10/2018.

HOSSEINI, S; EBADI, H; MAGHSOUDI, Y; GARESTIER, F. Pol-InSAR for Forest Biomass Estimation with the Transformation of the Polarization Basis. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**. 2019.ISSN: 0255-660X (Print) 0974-3006 (Online). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12524-019-00972-0>.

IBGE. **A Resolução PR nº22 - Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos**. 1983.

IBGE. **A Resolução PR nº 01 – Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro**. 2005.

IBGE. **Altitude Ortométrica**. Disponível em: <https://metrica.zendesk.com/hc/pt-br/articles/205673019-MAPGEO-2015-Modelo-de-Ondula%C3%A7%C3%A3o-Geoidal>. Acessado 12/01/2020.

IBGE. **Apostila - noções básicas de cartografia**. 1999. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv8595_v1.pdf. Acessado: 18/05/2018.

IBGE. **Apostila: Noções Básicas de Cartografia**. 2012. Site: https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoos/representacao.html. Acessado: 18/11/2017.

IBGE. **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos (Coletânea de Normas Vigentes)**, Preprint. 1998.

IBGE. **População em áreas de risco no Brasil / IBGE**. Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro, 2018.

IBGE. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos – GPS**. 2008.

IBGE. **Resolução PR nº5 - Levantamentos Relativos Estáticos – GPS: especificações e normas gerais para levantamentos GPS.** 1993.

IBGE. **SIRGAS2000: O Referencial Geocêntrico do Brasil. Revista Ponto de Referência - IBGE.** 2006b.

INDE. **São agora 112 as estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo que permitem obter coordenadas de alta precisão.** Disponível em: <http://www.inde.gov.br/noticias-inde/7943-sao-agora-112-as-estacoes-da-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-que-permitem-obter-coordenadas-de-alta-precisao.html>. Acessado: 18/05/2018.

KEIM, A. **Conheça as novidades do sensor RADAR aerotransportado.** BASE Aerofotogrametria e Projetos S/A. Disponível em: https://mundogeoconnect.com/2013/arquivos/palestras/20_jun-f-andreas-keim.pdf. Acesso em: 1 fev. 2019.

KRIEGER, G; MOREIRA, A; FIEDLER, H; HAJNSEK, I; WERNER, M; YOUNIS, M. **TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry.** **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 45, n. 11, 2007. DOI: 10.1109/TGRS.2007.900693.

KURZ, F; KRAUß, T; RUNGE, H; ROSENBAUM, D; D'ANGELO, P. **Precise aerial image orientation using sar ground control points for mapping of urban landmarks.** ISPRS Geospatial Week 2019. 2019. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-61-2019.

LARSON, R.W; JACKSON, P.L; KASISCHKE, E.S. **A digital calibration method for synthetic aperture radar systems.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (Volume: 26, Issue: 6). DOI: 10.1109/36.7707. 1988.

LiDAR. Perfilamento a Laser. Disponível em: <http://www.lidar.com.br/>. Acessado: 27/10/2018.

LÓPEZ, F. J. A. **Calidad em La producción cartográfica.** Espanha. 2005.

MARANHÃO, V, C. **Modelagem e controle de qualidade de uma infraestrutura de dados espaciais para o Estado de Pernambuco.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2013.

MENESES, P. R; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto.** p. 266, 2012.

MENESES, P. R; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos alvos naturais.** Brasília - DF: Embrapa Cerrados, 2001.

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.

MILAGROS, Y. **Aplicación de test para control de calidad posicional al producto cartográfico obtenido mediante vuelo aerofotogramétrico con VANT.** Tesis para optar

título profesional ingeniero geografo. Disponível em:
<http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/3114>. 2018.

MONICO, J. F. G. “**Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**”. 1ed. São Paulo: Unesp, 2000.

MUNDOGEO. **Palestra Online: Análise Temporal para Detecção de Alterações**. 2018. Acessado: 12/12/2020. Disponível em: <https://mundogeo.com/2018/05/07/palestra-online-analise-temporal-para-deteccao-de-alteracoes/>.

NERO, M. A. **Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional**. TESE (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005, 186p.

NERO, M; CINTRA, J. P; FERREIRA, G. F; PEREIRA, T. Á. J; FARIA, T. S. A **computational tool to evaluate the sample size in map positional accuracy**. BULLETIN OF GEODETIC SCIENCES (Boletim de Ciências Geodésicas). vol.23 no.3 Curitiba July/Sept. 2017.

NOBRE, A. D; CUARTAS, L. A; HODNETT, M; RENNÓ, C. D; RODRIGUES, G. SILVEIRA, A; WATERLOO, M; SALESKA, S. Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**. 2011. Disponível: https://www.researchgate.net/publication/232042361_Height_Above_the_Nearest_Drainage_-_a_hydrologically_relevant_new_terrain_model. Acessado: 12/01/2020.

NOGUEIRA JÚNIOR, J. B. **Controle de qualidade de produtos cartográficos: uma proposta metodológica**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2003.

NUNES, J.O.R. **Mapeamento Geomorfológico do perímetro urbano de Presidente Prudente – S.P.** In: Anais da 57ª Reunião Anual da SBPC. Fortaleza. 2005.

OSMANOGLU, B; SUNAR, F; WDOWINSKI, S; CABRAL-CANO. **Time series analysis of InSAR data: Methods and trends**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003.

PCI GEOMATICS. **Curso: Técnicas, processamento e aplicações de imagem de radar (SAR)**. 2018.

PEREIRA, T. Á. J; NERO, M. A. **Controle de qualidade posicional de imagem quickbird ortorretificada no spring de acordo com o PEC-PCD**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR - 1 INPE. 2015.

PEREIRA, T.A. J; NERO, M. A. **Análise de Normas de Controle de Qualidade Posicional em Cartografia ao redor do mundo: Exemplos atuais de alguns países**. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, 06- 09. 2012.

PFALTZGRAFF, P. A. S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife**. 2007. 153 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PONZONI, F. J., PINTO, C. T., LAMPARELLI, R. A. C., ZULLO JUNIOR, J., ANTUNES, M. A. H. **Calibration of Orbital Sensors**. Ed Oficina de Texto. ISBN 978-85-7975-167-7. 2015.

QI, W., SAARELAB, S., ARMSTONA, J., STAHLB, G., DUBAYAHA, R. **Forest biomass estimation over three distinct forest types using TanDEM-X InSAR data and simulated GEDI lidar data**. Remote Sensing of Environment. 2019.

RENNÓ, C. D. et al. **HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia**. Remote Sensing of Environment, v. 112, p. 3469- 3481, 2008.

ROSA, R. A. S. **Correção Radiométrica de Imagens de Radar de Abertura Sintética Aerotransportado**. Tese de Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 86f. 2009.

ROSA, R. A. S. **Desenvolvimento de um Algoritmo de Desdobramento de Fase para Radar de Imagens Interferométrico Aerotransportado Utilizando uma Linha de Base**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 106f. 2004.

Rosa, R. A. S. **Detecção de mudanças em imagens SAR multitemporais das bandas X e P**. Tese de Doutorado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). 2017a.

ROSA, R. A. S. et al. **Uso de radar de abertura sintética aerotransportado para monitoramento de impactos ambientais**. p. 5, [s.d.].

Rosa, R. A. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto por Radar - GEGEP/UFPE**. Minicurso. 2017b

ROSA, R. A. S. **Sensoriamento Remoto SAR**. IV Encontro de Ciências Ambientais do Amapá – ECAAP, Geotecnologia no Meio do Mundo. 2016.

Rosa, R. A. S; Fernandes, D; Barreto, T. L. M; Wimmer, C; Nogueira Jr., J. B. **Change detection under the forest in multitemporal**.

ROSS, J. L. S; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, n.10, p.41-56, 1996.

ROUYETA, L; LAUKNESA, T. R; CHRISTIANSENC, H, H; STRANDC, S. M; LARSENA, Y. **Seasonal dynamics of a permafrost landscape, Adventdalen, Svalbard, investigated by InSAR**. Remote Sensing of Environment. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111283>. 2019.

SALEEB, D. A; ELKORANY, A. S; SALEEB, A. A. **Polarimetry radar calibration using trihedral corner reflectors with electromagnetic band gap polarization converters**. IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). 2015. DOI: 10.1109/ICMIM.2015.7117936.

SANTOS, A. P. **Avaliação da Acurácia Posicional em dados espaciais com o uso da estatística espacial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2010.

SANTOS, A. P. MEDEIROS, N. G. DOS SANTOS, ¹ G. R. RODRIGUES, D. D. **CONTROLE DE QUALIDADE POSICIONAL EM DADOS ESPACIAIS UTILIZANDO FEIÇÕES LINEARES (Positional quality control in spatial data using linear feature)**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 21, no 2, p.233-250, abr-jun, 2015.

SANTOS, R. L. R.; MELO, D. H. C. T. B.; ROVANI, F. M. **Decifrando a ferramenta SLOPE com arquivo raster (MDE) no no ArcGIS**. Revista MundoGEO. Curitiba: MundoGEO, ano 19, n. 82, jul. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318755429_Decifrando_a_ferramenta_SLOPE_com_arquivo_raster_MDE_no_ARCGIS. Acessado: 01/2020.

SHI, W. **Principles of Modeling Uncertainties in Spatial Data and Spatial Analyses**. Boca Raton, FL: CRC, 432 p. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420059281>.

SILVA, D. J. **Mapa de risco de deslizamento e erosão em encostas com ocupações desordenadas no município de Abreu e Lima – PE**. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 2016.

SOARES, M. Informações Técnicas: Critério de Chauvenet. 2013. Disponível em: < <http://www.mspc.eng.br/tecdiv/med200.shtml> >.

SOUZA C. J. O. **Geomorfologia no ensino superior: difícil, mas interessante! por quê? uma discussão a partir dos conhecimentos e das dificuldades entre graduandos de geografia – IGC/UFMG**. Belo Horizonte: Inst. Geoc. Univ. Fed. Minas Gerais. (Tese Dout.). 2009.

SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G. **Guia para elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais**. Brasília: Ministério das Cidades, 2014. 68 p.

STABILE, R. A. et al. **Análise de fatores condicionantes de instabilizações em encostas como subsídio para a modelagem estatística da suscetibilidade a deslizamentos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14., 2013, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABGE, 2013. 1 CD ROM.

TAYLOR, J. R. **Introdução à Análise de Erros: O Estudo de Incertezas em Medições**

TINÓS, T. M.; FERREIRA, M. V.; ZAINÉ, J. E.; RIEDEL, P. S. **Técnicas de visualização de modelos digitais de elevação para o reconhecimento de elementos de análise do relevo**. Geociências. São Paulo, UNESP. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267211600_Tecnicas_de_visualizacao_de_modelos_digitais_de_elevacao_para_o_reconhecimento_de_elementos_de_analise_do_relevo. Acessado: 10/12/2020.

TOMASELLI, A. M. G.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. **Análise da Exatidão Cartográfica da Carta Imagem “São Paulo”**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. 1988.

UFSC. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

USGS. *Shuttle Radar Topography Mission*. Disponível em: <http://srtm.usgs.gov/mission.php>. Acessado: 05/06/2018.

USGS. *USGS EROS Archive - Digital Elevation - SRTM Mission Summary*. Science for a changing the world – USGS. Acessado: 05/01/2019. site: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-srtm-mission-summary?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.

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

VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. INPE: São José dos Campos, 2008. (INPE-15318-RPQ/818).

VEIGA, L. A. K; ZANETTI, M. A.Z; FAGGION, P. L. **Fundamentos de topografia**. Engenharia Cartográfica e de Agrimensura Universidade Federal do Paraná. 2012.

VIEIRA, H. B. G; GENRO, R. S. **Estimativa de Acurácia Posicional de documentos cartográficos na Petrobrás a partir do erro máximo provável inferido do erro médio quadrático e da respectiva variância propagada**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR - INPE. 2013.

VOLPI. **Limitações Cartográfica no Monitoramento Ambiental**. Congresso Brasileiro de Geotecnologia para o Meio Ambiente – CBGEO. 2018.

YANG, C; ZHANG, Q; ZHAO, C. JI L; ZHU W. **Monitoring mine collapse by D-InSAR**. *Mining Science and Technology*. 2010. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60265-9](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60265-9).

ZEBKER, H. A; MADSEN, S. N; MARTIN, J. **The TOPSAR Interferometric Radar Topographic Mapping System**, Proe. IGARSS '92. 1992.

ZHAO, C; LU, Z; ZHANG, Q; YANG, C; ZHU, W. Mining collapse monitoring with SAR imagery data: a case study of Datong mine, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014.

ZUQUETTE, L.V. & NAKAZAWA, V.A. Cartas de Geologia de Engenharia. *In*: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. cap. 17, p.283-300.

ZUQUETTE, L.V. GANDOLFI, N. **Cartografia Geotécnica**. Oficina de Textos. São Paulo (SP), 2004. cap. 19p.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993. 2 v.