

MARCIS GUALBERTO MENDONÇA JÚNIOR

**RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES PARA GERAÇÃO DE
ORTOIMAGENS VERDADEIRAS COM EMPREGO DE DADOS LIDAR**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

CURITIBA

FEVEREIRO 2010


TERMO DE APROVAÇÃO

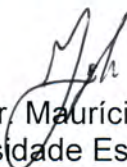
MARCIS GUALBERTO MENDONÇA JÚNIOR

“RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES PARA GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS
VERDADEIRAS COM EMPREGO DE DADOS LIDAR ”

Tese nº 69 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

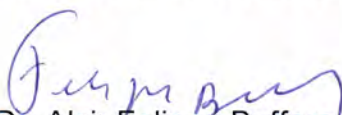

Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Mauricio Galo
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Hideo Araki
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 26 de fevereiro de 2010.

*Aos meus avós maternos José Moreira da Silva e Maria Manoel da Silva,
e paternos Francisco Pereira de Mendonça e Maria José Gualberto Mendonça*

A meus pais Oades e Marcis

A minha esposa Leila Fernanda e a meus filhos Diogo e Gabriela

dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade de ter belas experiências na vida;

À minha esposa Leila, e aos meus filhos Diogo e Gabriela, pelo apoio irrestrito durante os inúmeros momentos de ausência, e durante as cirurgias também;

Ao Exército Brasileiro e, em particular, à Diretoria de Serviço Geográfico, pela formação profissional e oportunidade de crescer realizando o doutoramento;

Ao Professor Edson Aparecido Mitishita pela orientação segura e precisa;

Ao Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, e a Universidade Federal do Paraná, pelos conhecimentos transmitidos;

Ao João Batista Ramos Cortês, Sydney de Oliveira Dias e Ângela Cristina Carraro pelas inúmeras discussões, almoços, confusões e debates durante os três anos convividos no Laboratório de Fotogrametria e nos corredores do CPGCG;

Ao Glauber, Vanessa, Paula e John Alejandro pelo companheirismo e convivência no Laboratório de Fotogrametria;

A meus professores no Instituto Militar de Engenharia, e aos meus companheiros na 1ª Divisão de Levantamento, e na 5ª Divisão de Levantamento pela paciência, experiência e conhecimentos transmitidos durante nossa convivência;

Ao Cel Jacaono Batista de Lima pela revisão da forma da tese; e

A todos que diretamente, ou indiretamente, contribuíram para a realização dessa tese.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVO GERAL	25
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.3 JUSTIFICATIVA	25
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1 CONSIDERAÇÕES.....	27
2.2 MODELOS REPRESENTATIVOS DA SUPERFÍCIE TERRESTRE	27
2.2.1 Definições.....	27
2.2.2 Estruturação	29
2.3 ORTORRETIFICAÇÃO DE IMAGENS	30
2.3.1 Definição de Ortoimagem e Ortoimagem Verdadeira	30
2.3.2 Geração de Ortoimagens	31
2.3.2.1 Fatores que Influenciam a Precisão da Ortoimagem.....	37
2.3.3 Geração de Ortoimagens Verdadeiras	38
2.3.3.1 Introdução.....	38
2.3.3.2 Estado da Arte da Geração de Ortoimagens Verdadeiras	39
2.3.3.3 Áreas Oclusas	41
2.3.3.4 Duplo Mapeamento	42
2.3.3.5 Fluxograma da Geração de Ortoimagens Verdadeiras	44
2.3.3.6 Métodos de Detecção de Áreas Oclusas	46
2.3.3.6.1 Método Z-Buffer	47
2.3.3.6.2 Método Baseado em Ângulos	51
2.4 LIDAR	54
2.4.1 Introdução.....	54
2.4.2 Estrutura de Dados LIDAR Proposta por MACHADO (2006)	56
2.5 RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES A PARTIR DE LEVANTAMENTOS LIDAR	58
2.6 IDENTIFICAÇÃO DA VEGETAÇÃO PROPOSTA POR MACHADO (2006)	60
3 MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1 RECURSOS DE EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS.....	63
3.2 ÁREAS DE ESTUDO	63
3.3 METODOLOGIA.....	73
3.3.1 Introdução	73
3.3.2 Estruturação dos Modelos Representativos da Superfície Terrestre	74
3.3.3 Geração da Malhas Regulares dos Modelos Digitais de Superfície e do Terreno	74
3.3.4 Primeira Harmonização entre o MDS e o MDT	77
3.3.5 Retificação da Base Planimétrica	80

3.3.5.1 Detecção das Bordas das Edificações.....	81
3.3.5.2 Retificação das Bordas e Detecção dos Vértices dos Polígonos	90
3.3.5.2.1 Determinação dos Delimitadores de Retas.....	90
3.3.5.2.2 Determinação dos Vértices do Polígono.....	96
3.3.5.2.3 Montagem do Polígono	104
3.3.5.2.4 Aplicação do Filtro Eliminação pelo Número de Vértices	106
3.3.6 Segunda Harmonização entre o MDS e o MDT.....	108
3.3.7 Retificação das Coberturas das Edificações.....	111
3.3.8 Detecção das Áreas Oclusas	115
3.3.8.1 Detecção da Oclusão Principal	115
3.3.8.2 Eliminação da Porção M	119
3.3.8.3 Atualização do Mapa de Visibilidade	120
3.3.9 Ortorretificação da Fotografia Aérea.....	121
3.3.10 Aplicação das Áreas Oclusas nas Ortoimagens Verdadeiras	122
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	123
4.1 INTRODUÇÃO	123
4.2 PONTOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE GEOMÉTRICA	123
4.3 EXPERIMENTOS	129
4.3.1 Experimento 01 - Área ESCOLA.....	129
4.3.1.1 Reconstrução da Edificação.....	129
4.3.1.2 Geração da Ortoimagem Verdadeira	137
4.3.2 Experimento 02 - Área DUPLA	144
4.3.2.1 Reconstrução das Edificações.....	144
4.3.2.2 Geração das Ortoimagens Verdadeiras.....	151
4.3.3 Experimento 03 - Área VILA.....	162
4.3.3.1 Reconstrução das Edificações.....	162
4.3.3.2 Geração da Ortoimagem Verdadeira	170
4.3.4 Experimento 04 - Área ARQUIT	176
4.3.4.1 Reconstrução das Edificações.....	177
4.3.4.2 Geração das Ortoimagens Verdadeiras.....	184
4.3.5 Experimento 05 - Área QUADRA	197
4.3.5.1 Reconstrução das Edificações.....	197
4.3.5.2 Geração das Ortoimagens Verdadeiras.....	206
4.3.6 Exatidão Global da Reconstrução das Edificações	217
4.3.7 Exatidão Global da Geração de Ortoimagens Verdadeiras	220
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	226
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	232

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01	COMPARAÇÃO ENTRE PROJEÇÕES DA PERSPECTIVA CENTRAL E ORTOGONAL	33
FIGURA 02	CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE	33
FIGURA 03	PROCESSO ITERATIVO DE DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS	35
FIGURA 04	PROCESSO DIRETO DE ORTORRETIFICAÇÃO	35
FIGURA 05	SEQÜÊNCIA DE TRANSFORMAÇÕES (MÉTODO DIRETO).....	36
FIGURA 06	PROCESSO INDIRETO DE ORTORRETIFICAÇÃO	36
FIGURA 07	SEQÜÊNCIA DE TRANSFORMAÇÕES (MÉTODO INVERSO)	37
FIGURA 08	INFLUÊNCIA DO ERRO DO MDS NA ORTORRETIFICAÇÃO	38
FIGURA 09	ÁREAS OCLUSAS E OCLUSORAS	42
FIGURA 10	EXEMPLO DE DUPLO MAPEAMENTO	42
FIGURA 11	DUPLO MAPEAMENTO	43
FIGURA 12	ÁREAS OCLUSAS E DUPLO MAPEAMENTO	44
FIGURA 13	FLUXOGRAMA DE GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS VERDADEIRAS	45
FIGURA 14	COMPETIÇÃO ENTRE <i>PIXELS</i>	47
FIGURA 15	PORÇÃO M.....	49
FIGURA 16	PORÇÃO M (QUINA)	49
FIGURA 17	DIFERENÇA DE RESOLUÇÃO GEOMÉTRICA.....	50
FIGURA 18	PROBLEMA DE ARREDONDAMENTO	51
FIGURA 19	MÉTODO BASEADO EM ÂNGULO	52
FIGURA 20	IMPLEMENTAÇÕES DO MÉTODO BASEADO EM ÂNGULOS.....	53
FIGURA 21	EXEMPLO DE DETECÇÃO DE ÁREAS OCLUSAS – MÉTODO BASEADO EM ÂNGULO.....	53
FIGURA 22	COMPONENTES DO SISTEMA LIDAR	55
FIGURA 23	SUPERMATRIZ PARA ESTRUTURAÇÃO DE DADOS LIDAR	56
FIGURA 24	DIREÇÕES DE PESQUISA DA SUPRESSÃO NÃO-MÁXIMA	59
FIGURA 25	RETAS DELIMITADORES DA COR VERDE NO ESPAÇO CIELUV.....	62
FIGURA 26	ÁREA ESCOLA NA FOTOGRAFIA 023 (VERMELHO)	64
FIGURA 27	ÁREA ESCOLA (FOTOGRAFIA 23)	64
FIGURA 28	BLOCO BACACHERI COM ÁREAS EM DESTAQUE.....	65
FIGURA 29	ÁREA DUPLA (FOTOGRAFIA 37)	66
FIGURA 30	ÁREA VILA (FOTOGRAFIA 48)	66
FIGURA 31	ÁREA ARQUIT (FOTOGRAFIA 41)	66
FIGURA 32	ÁREA QUADRA (FOTOGRAFIA 43)	67
FIGURA 33	CÂMERA KODAK DCS PRO 14N	67
FIGURA 34	SISTEMA LIDAR OPTTECH ALTM 2050	70
FIGURA 35	DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA PRÉDIO)	71

FIGURA 36	DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA DUPLA)	71
FIGURA 37	DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA VILA)	71
FIGURA 38	DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA ARQUIT)	72
FIGURA 39	DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA QUADRA)	72
FIGURA 40	METODOLOGIA PROPOSTA.....	74
FIGURA 41	INTERPOLAÇÃO DA ALTITUDE DO PONTO A (VIZINHO MAIS PRÓXIMO)	75
FIGURA 42	PONTO P EM UM TRIÂNGULO QUALQUER.....	76
FIGURA 43	DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DA MALHA REGULAR A PARTIR DO RECORTE DE UMA FOTOGRAFIA ÁEREA.....	77
FIGURA 44	DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DA MALHA REGULAR FINAL A PARTIR DOS LIMITES PARCIAIS DE MAIS DE UMA MALHA REGULAR.....	77
FIGURA 45	1ª HARMONIZAÇÃO ENTRE O MDS E O MDT	78
FIGURA 46	MODELOS DIGITAIS ANTES DA 1ª HARMONIZAÇÃO ENTRE O MDS E O MDT.....	79
FIGURA 47	MODELOS DIGITAIS DEPOIS DA 1ª HARMONIZAÇÃO ENTRE O MDS E O MDT.....	80
FIGURA 48	SEQUÊNCIA DA DETECÇÃO DE BORDA DAS EDIFICAÇÕES	81
FIGURA 49	GERAÇÃO DA IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA	82
FIGURA 50	IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA APÓS A APLICAÇÃO DOS FILTROS ELIMINA <i>PIXELS</i> ISOLADOS E MODA	83
FIGURA 51	IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA APÓS FECHAMENTO E ABERTURA.....	84
FIGURA 52	IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA APÓS DETECÇÃO DAS BORDAS PROVISÓRIAS	84
FIGURA 53	EXEMPLO DE ROTULAÇÃO DE POLÍGONOS.....	85
FIGURA 54	PONTO INICIAL DO EXEMPLO DE ROTULAÇÃO DE POLÍGONOS.....	85
FIGURA 55	DETERMINAÇÃO DO SEGUNDO PONTO DO EXEMPLO DE ROTULAÇÃO DE POLÍGONOS	86
FIGURA 56	PRIMEIRO E SEGUNDO PONTO DO EXEMPLO DE ROTULAÇÃO DE POLÍGONOS.....	86
FIGURA 57	POLÍGONO ROTULADO	86
FIGURA 58	IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA APÓS A APLICAÇÃO DOS FILTROS DE ÁREA E TOQUE NAS BORDAS	87
FIGURA 59	IMAGEM DE DESNÍVEL OBTIDA A PARTIR DA IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA.....	89
FIGURA 60	IMAGEM DE DESNÍVEL COM BORDAS DETECTADAS.....	89
FIGURA 61	SEQUÊNCIA DA RETIFICAÇÃO DAS BORDAS E DA DETECÇÃO DOS VÉRTICES DOS POLÍGONOS.....	90

FIGURA 62	PRIMEIRA ETAPA DA DETECÇÃO DE POTENCIAIS DELIMITADORES DE RETA	94
FIGURA 63	PRIMEIRA CORREÇÃO DO DELTA DISTANCIA.....	95
FIGURA 64	SEGUNDA ETAPA DA DETECÇÃO DE POTENCIAIS DELIMITADORES DE RETA	96
FIGURA 65	EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – PONTOS INICIAIS	98
FIGURA 66	EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – 1ª ITERAÇÃO.....	98
FIGURA 67	EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – 2ª ITERAÇÃO.....	99
FIGURA 68	EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – 3ª ITERAÇÃO.....	99
FIGURA 69	EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – 4ª ITERAÇÃO.....	99
FIGURA 70	EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – PONTOS INICIAIS COM RETAS AJUSTADAS	100
FIGURA 71	DETERMINAÇÃO DOS VÉRTICES PROVISÓRIOS	100
FIGURA 72	RECONSTRUÇÃO DE POLÍGONOS COM 4 LADOS	101
FIGURA 73	EXEMPLO DA EXECUÇÃO DA SEGUNDA ANÁLISE	103
FIGURA 74	EXEMPLO DA EXECUÇÃO DA TERCEIRA ANÁLISE	104
FIGURA 75	POLÍGONO MONTADO.....	106
FIGURA 76	EXEMPLOS DE FORMAS POLÍGONOS MONTADOS	107
FIGURA 77	EDIFICAÇÃO COM BORDAS NÃO-RETIFICADA E RETIFICADA (1) E COM ÁREAS EXTERNA (AMARELO) E INTERNA (AZUL) EM DESTAQUE (2)	108
FIGURA 78	PLANO π (QUALQUER) E PLANO Φ (PARALELO AO PLANO COORDENADO XY)	110
FIGURA 79	EDIFICAÇÃO A TER SUA COBERTURA RETIFICADA	113
FIGURA 80	RETIFICAÇÃO DE SEGMENTOS DE UMA COBERTURA	114
FIGURA 81	EDIFICAÇÃO COM COBERTURA RECONSTRUÍDA	114
FIGURA 82	EXEMPLO DA BASE PLANIMÉTRICA DERIVADA DA EDIFICAÇÃO DA FIGURA 81.....	115
FIGURA 83	DETECÇÃO DA OCLUSÃO PRINCIPAL.....	116
FIGURA 84	PORÇÃO M NÃO REPRESENTADA	117
FIGURA 85	PORÇÃO M INTERIOR.....	117
FIGURA 86	PORÇÃO M SEPARADORA.....	118
FIGURA 87	TRANSFORMAÇÃO DO ESTADO DA PORÇÃO M DE INTERIOR PARA NÃO REPRESENTADA	118

FIGURA 88	ELIMINAÇÃO DA PORÇÃO M QUINA (ESTADO NÃO REPRESENTADA)	119
FIGURA 89	ELIMINAÇÃO DA PORÇÃO M QUINA (ESTADO SEPARADORA)	120
FIGURA 90	ATUALIZAÇÃO DO MAPA DE VISIBILIDADE	121
FIGURA 91	DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA ESCOLA	125
FIGURA 92	DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA DUPLA	125
FIGURA 93	DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA VILA.....	125
FIGURA 94	DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA ARQUIT.....	126
FIGURA 95	DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA ARQUIT (PARTE NORTE)	126
FIGURA 96	DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA ARQUIT (PARTE SUL)	126
FIGURA 97	DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA QUADRA	127
FIGURA 98	DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA QUADRA (PARTE SUDESTE)	127
FIGURA 99	MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA ESCOLA.....	130
FIGURA 100	MALHA REGULAR MDT ORIGINAL DA ÁREA ESCOLA.....	130
FIGURA 101	MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ESCOLA	131
FIGURA 102	MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ESCOLA	131
FIGURA 103	EDIFICAÇÃO ANTES (VERMELHO) E DEPOIS (AZUL) DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA.....	132
FIGURA 104	BORDA RETIFICADA DA EDIFICAÇÃO SOBRE A IMAGEM HIPSOMÉTRICA.....	132
FIGURA 105	MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ESCOLA	133
FIGURA 106	MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ESCOLA	133
FIGURA 107	MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DA COBERTURA DA ÁREA ESCOLA	134
FIGURA 108	MALHA REGULAR MDS _n DA ÁREA ESCOLA.....	134
FIGURA 109	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA ESCOLA	136
FIGURA 110	ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA ÁREA ESCOLA.....	138
FIGURA 111	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES	138
FIGURA 112	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES	138
FIGURA 113	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA	139
FIGURA 114	POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 23 EM RELAÇÃO À ÁREA ESCOLA.....	140

FIGURA 115	COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DA EDIFICAÇÃO RECONSTRUÍDA E DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA.....	141
FIGURA 116	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES E INCORREÇÕES.....	142
FIGURA 117	MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA DUPLA.....	144
FIGURA 118	MALHA REGULAR MDT ORIGINAL DA ÁREA DUPLA.....	145
FIGURA 119	MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA DUPLA.....	145
FIGURA 120	MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA DUPLA.....	145
FIGURA 121	EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO) E DEPOIS (AZUL) DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA.....	146
FIGURA 122	BORDAS RETIFICADAS DAS EDIFICAÇÕES SOBRE A IMAGEM HIPSOMÉTRICA.....	146
FIGURA 123	MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA DUPLA.....	147
FIGURA 124	MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA DUPLA.....	147
FIGURA 125	MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DAS COBERTURAS DA ÁREA DUPLA.....	148
FIGURA 126	MALHA REGULAR MDS _n DA ÁREA DUPLA.....	148
FIGURA 127	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA DUPLA.....	150
FIGURA 128	EXTRATO DA FOTOGRAFIA 42 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA DUPLA).....	151
FIGURA 129	EXTRATO DA FOTOGRAFIA 43 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA DUPLA).....	152
FIGURA 130	ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DUPLA.....	152
FIGURA 131	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DUPLA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES.....	152
FIGURA 132	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DUPLA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO).....	153
FIGURA 133	ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DUPLA.....	153
FIGURA 134	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DUPLA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES.....	153
FIGURA 135	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DUPLA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO).....	154

FIGURA 136	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS DA ÁREA DUPLA	156
FIGURA 137	POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 42 EM RELAÇÃO À ÁREA DUPLA.....	157
FIGURA 138	POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 43 EM RELAÇÃO À ÁREA DUPLA.....	157
FIGURA 139	COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DA EDIFICAÇÃO RECONSTRUÍDA E DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA DUPLA.....	158
FIGURA 140	AMPLIAÇÃO DA EDIFICAÇÃO B NA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DUPLA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES.....	159
FIGURA 141	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DAS ORTOIMAGENS CONVENCIONAIS DA ÁREA DUPLA	161
FIGURA 142	MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA VILA	162
FIGURA 143	MALHA REGULAR MDT ORIGINAL DA ÁREA VILA.....	163
FIGURA 144	MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA VILA	163
FIGURA 145	MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA VILA	164
FIGURA 146	EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO) E DEPOIS (AZUL) DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA.....	164
FIGURA 147	BORDAS RETIFICADAS (EM AMARELO) DAS EDIFICAÇÕES SOBRE A IMAGEM HIPSOMÉTRICA.....	165
FIGURA 148	MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA VILA	166
FIGURA 149	MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA VILA	166
FIGURA 150	MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DAS COBERTURAS DA ÁREA VILA.....	166
FIGURA 151	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA VILA.....	168
FIGURA 152	EXTRATO DA FOTOGRAFIA 30 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA VILA).....	171
FIGURA 153	ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 30 DA ÁREA VILA	171
FIGURA 154	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 30 DA ÁREA VILA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES	172
FIGURA 155	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 30 DA ÁREA VILA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)	172
FIGURA 156	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA VILA	174
FIGURA 157	POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 30 EM RELAÇÃO À ÁREA VILA.....	175
FIGURA 158	COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DA EDIFICAÇÃO RECONSTRUÍDA E DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA VILA.....	175
FIGURA 159	MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA ARQUIT.....	177
FIGURA 160	MALHA REGULAR MDT ORIGINAL DA ÁREA ARQUIT.....	177

FIGURA 161 MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ARQUIT	178
FIGURA 162 MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ARQUIT	178
FIGURA 163 EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO) E DEPOIS (AZUL) DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA.....	179
FIGURA 164 BORDAS RETIFICADAS (EM AMARELO) DAS EDIFICAÇÕES SOBRE A IMAGEM HIPSOMÉTRICA	179
FIGURA 165 MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ARQUIT	180
FIGURA 166 MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ARQUIT	180
FIGURA 167 MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DAS COBERTURAS DA ÁREA ARQUIT	181
FIGURA 168 MALHA REGULAR MDSn DA ÁREA ARQUIT	181
FIGURA 169 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA ARQUIT	183
FIGURA 170 EXTRATO DA FOTOGRAFIA 41 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA ARQUIT).....	184
FIGURA 171 EXTRATO DA FOTOGRAFIA 42 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA ARQUIT).....	185
FIGURA 172 EXTRATO DA FOTOGRAFIA 43 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA ARQUIT).....	185
FIGURA 173 ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 41 DA ÁREA ARQUIT	186
FIGURA 174 ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 41 DA ÁREA ARQUIT SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES	186
FIGURA 175 ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 41 DA ÁREA ARQUIT COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)	187
FIGURA 176 ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA ARQUIT	187
FIGURA 177 ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA ARQUIT SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES	188
FIGURA 178 ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA ARQUIT COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)	188
FIGURA 179 ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA ARQUIT	189
FIGURA 180 ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA ARQUIT SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES	189

FIGURA 181	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA ARQUIT COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)	190
FIGURA 182	ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA ARQUIT COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO) PELO MÉTODO Z- BUFFER	191
FIGURA 183	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS DA ÁREA ARQUIT	194
FIGURA 184	POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 41 EM RELAÇÃO À ÁREA ARQUIT	195
FIGURA 185	POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 42 EM RELAÇÃO À ÁREA ARQUIT	195
FIGURA 186	POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 43 EM RELAÇÃO À ÁREA ARQUIT	195
FIGURA 187	COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DAS EDIFICAÇÕES RECONSTRUÍDAS E DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS DA ÁREA ARQUIT	196
FIGURA 188	MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA QUADRA	198
FIGURA 189	MALHA REGULAR MDT ORIGINAL DA ÁREA QUADRA	198
FIGURA 190	MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA QUADRA	199
FIGURA 191	MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA QUADRA	199
FIGURA 192	EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO), E DEPOIS (AZUL), DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA	200
FIGURA 193	AMPLIAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO), E DEPOIS (AZUL), DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA	200
FIGURA 194	BORDAS RETIFICADAS (EM AMARELO) DAS EDIFICAÇÕES SOBRE A IMAGEM HIPSOMÉTRICA	201
FIGURA 195	MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA QUADRA	202
FIGURA 196	MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA QUADRA	202
FIGURA 197	MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DAS COBERTURAS DA ÁREA QUADRA	203
FIGURA 198	MALHA REGULAR MDS _n DA ÁREA QUADRA	203
FIGURA 199	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA QUADRA	205
FIGURA 200	ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA QUADRA	207

FIGURA 201 ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA QUADRA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES.....	207
FIGURA 202 ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA QUADRA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES.....	208
FIGURA 203 ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA QUADRA.....	208
FIGURA 204 ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA QUADRA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES.....	209
FIGURA 205 ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA QUADRA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES.....	209
FIGURA 206 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS DA ÁREA QUADRA.....	212
FIGURA 207 POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 38 EM RELAÇÃO À ÁREA QUADRA.....	213
FIGURA 208 POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 42 EM RELAÇÃO À ÁREA QUADRA.....	214
FIGURA 209 COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DAS EDIFICAÇÕES RECONSTRUÍDAS E DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS DA ÁREA QUADRA.....	216
FIGURA 210 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS NORMALIZADOS.....	219
FIGURA 211 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS NORMALIZADOS.....	225

LISTA DE TABELAS

TABELA 01	LUMINOSIDADE CIELUV E PARÂMETROS DE RETAS	62
TABELA 02	POI BLOCO CENTRO POLITÉCNICO	68
TABELA 03	POI BLOCO BACACHERI.....	68
TABELA 04	POE FOTOGRAFIAS DO BLOCO CENTRO POLITÉCNICO	69
TABELA 05	POE FOTOGRAFIAS DO BLOCO BACACHERI.....	69
TABELA 06	ESTAÇÕES BASE E RÉ DOS PAQ NO REFERENCIAL UTM (FUSO 22)	124
TABELA 07	PAQG NO SISTEMA SAD-69 REFERENCIAL UTM (FUSO 22)	128
TABELA 08	EXATIDÃO POSICIONAL DA EDIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO ESCOLA.....	135
TABELA 09	EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DA EDIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO ESCOLA.....	135
TABELA 10	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA DE ESTUDO ESCOLA.....	139
TABELA 11	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA ÁREA DE ESTUDO ESCOLA.....	143
TABELA 12	EXATIDÃO POSICIONAL DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO DUPLA.....	149
TABELA 13	EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DA EDIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO QUADRA	149
TABELA 14	EXATIDÃO DE ÁREA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO DUPLA.....	151
TABELA 15	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA	154
TABELA 16	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA	155
TABELA 17	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA	159
TABELA 18	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA	160
TABELA 19	EXATIDÃO POSICIONAL DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO VILA.....	167
TABELA 20	EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO VILA.....	168
TABELA 21	EXATIDÃO DE ÁREA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO VILA.....	170

TABELA 22	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 30 DA ÁREA DE ESTUDO VILA.....	173
TABELA 23	EXATIDÃO POSICIONAL DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT	182
TABELA 24	EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT	182
TABELA 25	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 41 DA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT	192
TABELA 26	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT	192
TABELA 27	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT	193
TABELA 28	EXATIDÃO POSICIONAL DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO QUADRA.....	204
TABELA 29	EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO QUADRA.....	204
TABELA 30	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA	211
TABELA 31	EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA	211
TABELA 32	EMQ PLANIMÉTRICO POR TIPO DE EDIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO QUADRA.....	214
TABELA 33	COMPARAÇÃO DA EXATIDÃO DOS PONTOS DAS PEQUENAS EDIFICAÇÕES NAS ORTOIMAGENS VERDADEIRA E CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA	215
TABELA 34	COMPARAÇÃO DA EXATIDÃO DOS PONTOS DAS PEQUENAS EDIFICAÇÕES NAS ORTOIMAGENS VERDADEIRA E CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA	215
TABELA 35	EXATIDÃO GLOBAL DAS EDIFICAÇÕES RECONSTRUÍDAS	218
TABELA 36	EXATIDÃO PLANIMÉTRICA NORMALIZADA GLOBAL DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS (PIXELS)	221

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01	ÁREAS DO BLOCO BACACHERI	65
QUADRO 02	KODAK DCS PRO 14N.....	68
QUADRO 03	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA LIDAR OPTECH ALTM2050/INS GPS APPLANIX	70
QUADRO 04	DENSIDADE DE PONTOS LIDAR NAS ÁREAS DE PESQUISA	70
QUADRO 05	PARÂMETROS DO FILTRO ALTIMÉTRICO POR POLÍGONO	88
QUADRO 06	VARIÁVEIS DA DETERMINAÇÃO DOS DELIMITADORES DE RETA	92
QUADRO 07	FILTROS ALTIMÉTRICOS POR POLÍGONO	113
QUADRO 08	ÁREAS DE ESTUDO E FOTOGRAFIAS UTILIZADAS EFETIVAMENTE	123
QUADRO 09	DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG POR ÁREA DE ESTUDO.....	124

LISTA DE SIGLAS

ASPRS – Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
CG – Computação Gráfica
CIELUV – Espaço de Cores L, U e V da Comissão Internacional de Iluminação
CP – Centro Perspectivo
DBM – Modelo Digital de Construções (*Digital Building Model*)
EMQ – Erro Médio Quadrático
ERT – Elemento de Resolução do Terreno
GPS – Sistema de Posicionamento Global
Groundel – Elemento de Terreno (*Ground Element*)
INS – Sistema de Navegação Inercial
ISPRS – Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LADAR – *LASER Detection and Ranging*
LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
LIDAR – *Light Detection And Ranging*
MDE – Modelo Digital do Terreno
MDT – Modelo Digital do Terreno
MDS – Modelo Digital de Superfície
MDSn – Modelo Digital de Superfície Normalizado
MET – Modelo de Elevações do Terreno
MNFT – Modelo Numérico de Feições do Terreno
MNT – Modelo Numérico do Terreno
MMQ – Método dos Mínimos Quadrados
PAQG – Pontos de Avaliação da Qualidade Geométrica
PDI – Processamento Digital de Imagens
PIXEL – Elemento de Imagem (*Picture Element*)
POE – Parâmetros de Orientação Exterior
POI – Parâmetros de Orientação Interior
RGB – Sistema de Cores Vermelho (*Red*), Verde (*Green*) e Azul (*Blue*)
SIG – Sistema de Informações Geográficas
TIN – Rede de Triângulos Irregulares

RESUMO

A presente tese de doutoramento apresenta o desenvolvimento metodológico para a geração de ortoimagens verdadeiras com base em modelos digitais do terreno e de superfície, obtidos a partir de um conjunto de pontos com origem em um levantamento LIDAR em ambiente urbano. Inicialmente, foram desenvolvidos métodos de reconstrução de edificações, com base em segmentos de reta e plano ajustados com emprego da média móvel restrita. Para a detecção de oclusões foi desenvolvido o método denominado de *H-Buffer*. Para detectar as bordas das edificações, e retificar suas coberturas, foi desenvolvida uma técnica que utiliza os pontos de maior relevância em uma borda, determinados a partir de um processamento iterativo, que procura eliminar pontos situados fora de limites pré-estabelecidos, com emprego do ajustamento das observações. De posse do modelo digital de superfície, com as edificações retificadas, são geradas as ortoimagens verdadeiras pelo método inverso. Por fim, com base em um conjunto de pontos de verificação as exatidões das edificações retificadas e das ortoimagens verdadeiras geradas foram determinadas, possibilitando que a exatidão dos processos fosse obtida.

Palavras chave: ortoimagem verdadeira, retificação de imagem, detecção de oclusão, Z Buffer, LIDAR, reconstrução de edificações

ABSTRACT

This doctoral thesis shows the methodologies for true orthophotos generation, using digital terrain and digital surface model, obtained from an urban LIDAR survey. First the methodology for building reconstruction was developed, using straight line segments and planes that are computed by the mathematic procedure entitle “restrict mean changeable”. To detect photogrammetric occlusion was developed the procedure called “H-Buffer”. The building roofs were reconstructed by the mathematic procedure that uses the building borders. The building borders are computed by the iterative process that selects the most relevance points of the building borders. Using pre-defined limits and lest square adjustment, the relevance points are detected by a mathematic procedure. Using the digital surface model and the urban building model that were previously reconstructed, the true orthophotos are generated by the inverse method. Finally, the accuracies of the reconstructed buildings and true orthophotos generated were performed by the statistic method, using a set of ground check-points. Then, the accuracies of processes were obtained.

Key words: true orthophoto, H-Buffer, Z-Buffer, LIDAR, building reconstructed

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos modelos matemáticos utilizados na retificação de imagens possibilita que os processos produtivos existentes sejam aperfeiçoados e inovados de forma a atender situações que não encontram solução satisfatória nas tradicionais técnicas empregadas, possibilitando a geração de produtos mais adequados a complexidade tecnológica existente.

A produção de ortoimagens na Fotogrametria digital é um processo automatizado com elevada precisão geométrica. A técnica de ortorretificação mais empregada atualmente é a retificação diferencial, que forma a imagem ortorretificada a partir da retificação de elementos infinitesimais da fotografia aérea.

No entanto, essa automação somente encontra uma situação plenamente favorável quando representa ambientes rurais, pois o modelo representativo do terreno, de uma forma geral, não apresenta descontinuidades significativas. As técnicas fotogramétricas de aquisição das informações que reconstroem esses modelos são a restituição manual (tradicional), a restituição semi-automatizada (medição manual de pontos espaçados regular ou irregularmente) ou automatizada (medição automática de pontos espaçados).

Em um ambiente urbano as deformações geométricas presentes em uma fotografia aérea são provocadas pela geometria de sua aquisição (projeção central) e pela variação da altitude do relevo, formado pelo terreno (natural) e pelas edificações (artificiais). A variação acentuada da altura dos elementos, que se encontram presentes na superfície terrestre, provoca o surgimento de porções dessa superfície que não são visíveis, quando vistas do centro perspectivo (CP) da fotografia aérea. Essas porções são denominadas de áreas oclusas, ou simplesmente de oclusões, e acabam não sendo representadas na fotografia aérea.

Se forem geradas ortoimagens em ambientes urbanos, utilizando modelos que somente representem o terreno, as edificações não serão retificadas corretamente, mantendo a representação inclinada existente na própria fotografia aérea, o que a caracteriza como um produto que não representa fielmente o modelo da retificação ortogonal de imagens.

Uma ortoimagem em ambiente urbano deve representar todas as edificações existentes, empregando fielmente a projeção ortogonal sobre o plano da ortoimagem, sem conter qualquer informação sobre suas componentes verticais (paredes laterais, janelas, varandas encobertas, etc.). Essa ortoimagem vem sendo denominada pela comunidade científica internacional de ortoimagem verdadeira (*true orthophoto*).

Quando se geram ortoimagens verdadeiras utilizando modelos que representam o terreno e as edificações, surge outro problema, chamado duplo mapeamento, que vem a ser a repetição de um mesmo *pixel* na ortoimagem em locais distintos. Ele ocorre justamente nas áreas oclusas e sua causa é a competição de dois, ou mais, *pixels* na ortoimagem por um mesmo *pixel* na fotografia aérea.

Por isso, a detecção de oclusões é um fator importante na geração de ortoimagens verdadeiras, sendo uma das principais componentes que influenciam sua qualidade geométrica. Outra consequência do duplo mapeamento é que os *pixels* repetidos devem ser substituídos por outros, selecionados nas fotografias aéreas adjacentes, que recobrem a mesma porção do terreno. Deve-se verificar que as porções do terreno oclusas em uma fotografia não necessariamente o são nas fotografias adjacentes.

Nos primeiros artigos que trataram especificamente da geração de ortoimagens verdadeiras, de autoria de AMHAR e ECKER (1996), AMHAR et al. (1998) e SCHICKLER e THORPE (1998), a restituição fotogramétrica manual foi utilizada como técnica de reconstrução do terreno e das edificações, o que fez com que suas bordas ficassem bem definidas e delimitadas. A automação foi utilizada na detecção das oclusões, no caso de AMHAR et al. (1998), e no processo de substituição e preenchimento dos *pixels* das áreas oclusas, no caso de SCHICKLER e THORPE (1998).

O desenvolvimento dos sistemas LIDAR (*Light Detection And Ranging*) na década de 1990, baseado em tecnologia LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), capazes de medir milhares de pontos com elevada precisão e gerar modelos de superfície com melhor exatidão, possibilitou que fossem realizados estudos visando a reconstrução automática das edificações. No entanto, a distribuição desses milhares de pontos, cujo conjunto é denominado de *nuvem de pontos*, possui caráter sub-randômico, o que impossibilita a seleção de alvos específicos durante a execução do levantamento.

Essa característica dos levantamentos LIDAR faz com que as bordas das edificações não sejam bem definidas diretamente no conjunto de pontos, o que exige a adoção de algoritmos capazes de reconstruir as edificações. O uso de modelos representativos da superfície terrestre gerados a partir desses levantamentos na geração de ortoimagens verdadeiras afeta diretamente a correta detecção de áreas oclusas e, por conseguinte, a qualidade geométrica da ortoimagem verdadeira gerada.

No processo de geração de ortoimagem utiliza-se uma malha regular para modelar a superfície terrestre, formada a partir do conjunto de pontos LIDAR. Nessa malha, as bordas das edificações não possuem forma bem definida, o que gera uma irregularidade nas bordas das áreas oclusas correspondentes.

Percebe-se que a modelagem da superfície, que representa o terreno com suas edificações, constitui a base fundamental para a geração de ortoimagens verdadeiras.

Nesse contexto, a presente Tese de Doutorado propõe uma metodologia de reconstrução das edificações presentes em um espaço geográfico, que detecte as áreas oclusas, e possibilite a geração de ortoimagens verdadeiras com base em modelos representativos oriundos de levantamentos LIDAR.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa consiste no desenvolvimento de metodologias necessárias para a geração de ortoimagens verdadeiras com emprego de um conjunto de pontos irregularmente distribuídos, que representa a superfície terrestre, e de fotografias aéreas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos a serem atingidos são os seguintes:

- a) propor metodologia de retificação de bordas e de coberturas de edificações representados por um conjunto de pontos irregularmente distribuídos, oriundo de levantamento LIDAR;
- b) propor um método de detecção de oclusões;
- c) propor metodologia de compatibilização de modelos representativos da superfície terrestre que representem a mesma porção dessa superfície;
- d) avaliar a qualidade geométrica das edificações retificadas pela metodologia proposta; e
- e) avaliar a qualidade geométrica das ortoimagens verdadeiras geradas a partir dos modelos que contém as edificações retificadas.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento científico da geração de ortoimagens verdadeiras possibilita identificar que é necessária a existência de um modelo representativo no qual as edificações existentes sejam fidedignas, o emprego de um método de detecção de oclusões eficiente e o uso de algoritmos de ortorretificação e de processamento digital de imagens. Pode-se resumir esse desenvolvimento, então, a quatro elementos principais: algoritmo ortorretificador, modelo representativo fidedigno, método de detecção de oclusões e técnicas de processamento digital de imagens (PDI).

As pesquisas realizadas desde 1996, quando AMHAR e ECKER (1996) propuseram seu método de geração de ortoimagens verdadeiras, caminharam no

sentido de estabelecer um método de detecção de oclusões confiável e utilizar modelos com edificações fidedignas. Essas últimas eram obtidas no início por métodos manuais que foram, ao longo do tempo, mesclados com métodos automáticos e semiautomáticos.

Nesse ponto é que se encontra a oportunidade de criar algoritmos capazes de reconstruir as edificações de forma automática a partir de um conjunto de pontos LIDAR. A partir dessa ideia é proposta a primeira hipótese dessa pesquisa, a de que é possível gerar ortoimagens verdadeiras acuradas a partir de modelos representativos de ambientes urbanos obtidos a partir de processos automáticos de reconstrução de edificações.

Como os dados primários serão obtidos por levantamentos LIDAR é possível desenvolver algoritmos de detecção de oclusão que utilizem os modelos representativos do terreno e de superfície em conjunto, de forma a obter um método mais eficiente para a geração de ortoimagens verdadeiras. Dessa observação surge a segunda hipótese, a de que é possível identificar as áreas oclusas com mais eficiência a partir do emprego conjunto de modelos representativos do terreno e da superfície. Os focos, então, se fixam nos segundo e terceiro elementos (modelo representativo fidedigno e método de detecção de oclusões).

Essas duas hipóteses justificam a pesquisa realizada, dando prosseguimento aos estudos realizados por outros pesquisadores, na direção de automatizar os processos envolvidos na geração de ortoimagens verdadeiras.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura proposta consiste de seis capítulos. No Capítulo 1 são apresentadas a Introdução, os Objetivos a serem atingidos e a Justificativa da presente proposta. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais conceitos utilizados no presente trabalho. No Capítulo 3 são descritos os materiais e a metodologia proposta. No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos experimentos e realizadas as discussões desses resultados. O Capítulo 5 apresenta as considerações finais obtidas durante a realização da pesquisa e as recomendações derivadas, e no Capítulo 6 são apresentadas as Referências Bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES

Antes de iniciar a fundamentação teórica é interessante uniformizar a nomenclatura utilizada no presente trabalho para que não haja dúvida em sua leitura.

O termo *fotografia aérea* será utilizado para designar a imagem obtida por meio de vôo fotogramétrico, independente do meio e forma de seu armazenamento (papel, filme fotográfico, vidro ou digital). Já o termo *ortoimagem* será utilizado para designar as fotografias aéreas ortorretificadas, também independentemente do meio e forma de armazenamento.

Isso facilitará o entendimento de que fotografia aérea se refere ao produto original, não manipulado nem retificado, e que ortoimagem se refere ao produto final retificado.

2.2 MODELOS REPRESENTATIVOS DA SUPERFÍCIE TERRESTRE

2.2.1 Definições

A modelagem digital do terreno apareceu pela 1ª vez em 1958 quando Miller e Laflamme, pesquisadores do Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), propuseram um projeto de estradas computadorizado (ACKERMANN, 1996).

Atualmente existem inúmeros termos que designam a representação da superfície terrestre, tais como, Modelo Digital do Terreno (MDT), Modelo Digital de Elevação (MDE), Modelo Numérico do Terreno (MNT), Modelo de Elevações do Terreno (MET), Modelo Numérico de Feições do Terreno (MNFT), etc. ARNAULT (2001, pág. 23-25) apresenta uma análise detalhada das semelhanças e diferenças desses termos.

Não existe uma padronização conceitual para o termo MDT. Por exemplo, para OSTAMN¹ (1987), citado por MITISHITA (1997), MDT é um conjunto de pontos amostrados da superfície real, com coordenadas espaciais (X,Y,Z) determinadas num dado referencial e algoritmos que possibilitem construir um modelo matemático que reproduza da melhor maneira possível o comportamento altimétrico da superfície real. Para AMHAR et al. (1998) o MDT é um modelo de elevação que descreve a superfície do terreno com ou sem vegetação. Para MENDONÇA JÚNIOR (2002) MDT é o modelo numérico computacional que representa o terreno. Para NIELSEN (2004) um MDT é a representação do contorno da Terra, sem edificações nem vegetação. Para ARAKI (2005) um MDT é uma grade regular que representa a superfície topográfica acrescida de elevações de feições significativas que melhoram a caracterização da forma do terreno.

MDE é outro termo, utilizado muitas vezes como sinônimo de MDT (ACKERMANN, 1996). Para MAUNE (1996) o termo MDE é usado genericamente para a representação cartográfica digital da Terra em qualquer forma, malhas ou grades retangulares, rede de triângulos irregulares, pontos de elevação irregulares e linhas de quebra. Para MIKHAIL et al. (2001) um MDE representa digitalmente a superfície da Terra como um conjunto de pontos, cujo formato mais comum é a malha regular. Para ARAKI (2005), um MDE é uma grade regular que representa a superfície topográfica.

Modelo Digital de Edificações (DBM - *Digital Building Model*) é um termo que vem sendo utilizado pelos diversos pesquisadores na geração de ortoimagens, como AMHAR e ECKER (1996), AMHAR et al. (1998), RAU et al. (2000), NIELSEN (2004) e CHEN et al. (2007), como um modelo que representa a superfície dos objetos construídos pelo homem.

¹ OSTMAN, A. A Quality Control and Accuracy Estimation of Digital Elevation Models. **Papers on Digital Elevation, Image Correlation, and Map Maintenance**. Stockholm, Sweden, 1987. The Royal Institute of Technology – Department of Photogrammetry.

Modelo Digital de Superfície (MDS) é um termo que representa toda a superfície de uma região observada (AMHAR et al., 1998), incluindo terreno, edificações e vegetação (NIELSEN, 2004). Os artigos que tratam da geração de ortomagens verdadeiras se referem a um MDS toda vez que o modelo representativo da superfície tem origem em um levantamento LIDAR, como, por exemplo, AMHAR et al., 1998; RAU et al., 2002; BRAUN, 2003; BANG et al., 2007, SHENG, 2007; HABIB et al., 2007 e CHEN et al., 2007.

Para evitar a confusão de definições, decidiu-se adotar somente três termos no presente trabalho: MDT, MDS e Modelo Digital de Superfície Normalizada (MDSn). MDT será utilizado para representar os dados numéricos que contenham as informações do terreno, sem quaisquer informações adicionais de elementos artificiais sites acima dele, como edificações e pontes. MDS será utilizado quando o MDT for complementado com essas informações. MDSn será utilizado quando for obtida a diferença entre o MDS e o MDT.

2.2.2 Estruturação

As estruturas mais comuns empregadas na modelagem digital do terreno são as grades retangular e triangular, com distribuição de pontos regular e irregular, respectivamente, sendo que o processo de geração do modelo compreende a construção de uma malha (regular ou irregular) e a definição das funções interpolantes (FELGUEIRAS, 2001).

Uma grade retangular regular, ou grade regular, ou malha regular de pontos é uma estrutura matricial, na qual a relação entre os pontos vizinhos é implícita ao modelo. A determinação das coordenadas planimétricas (X , Y) de um ponto é função das coordenadas planimétricas do 1º elemento da grade, das coordenadas matriciais desse ponto (coluna, linha) e do espaçamento dos elementos básicos em cada eixo de coordenadas (Δx , Δy). É comum nos artigos que tratam da geração de ortomagens verdadeiras e da detecção de áreas oclusas como, por exemplo, em RAU et al. (2000), MACHADO et al. (2005) e HABIB et al. (2007), o uso do termo *groundel* como elemento básico, ou menor elemento, da grade regular que representa o modelo digital da superfície terrestre. Dessa forma, pode-se caracterizar *groundel* como sendo o *pixel* da grade regular.

O termo Rede de Triângulos Irregulares (TIN) é o mais utilizado para se referir ao modelo de grade triangular irregular (FELGUEIRAS, 2001). A TIN é uma estrutura na qual os pontos que modelam o terreno são irregularmente espaçados (MIKHAIL et al., 2001), o que remonta ao fato de que esses pontos foram adquiridos de forma individual (ACKERMAN, 1996).

Um critério muito utilizado na geração das TIN é a triangulação de Delaunay. Sua aplicação em um conjunto de pontos gera triângulos cujos lados não cruzam com nenhum outro lado dos demais triângulos, e todos os pontos desse conjunto são vértices de pelo menos um triângulo de Delaunay.

A maior vantagem da estrutura TIN é sua capacidade de representar o terreno com a mesma precisão e com um número significativamente menor de pontos (MIKHAIL et al., 2001).

2.3 ORTORRETIFICAÇÃO DE IMAGENS

2.3.1 Definição de Ortoimagem e Ortoimagem Verdadeira

Existem diversas definições para ortoimagem. Alguns autores a definem relacionando sua disposição geométrica à cartografia. Para ASPRS (1980) uma ortofotografia é uma fotografia que possui as mesmas propriedades de uma projeção ortográfica. Para ANDRADE (1998) ortoimagens são imagens digitais em projeção cartográfica. Para LILLESAND e KIEFER (2000) ortoimagens são fotomapas. Para MIKHAIL et al. (2001) uma ortoimagem é uma imagem baseada em uma projeção ortográfica. Para BIASION et al. (2003) ortoimagem é uma representação fotográfica com correção métrica do território, com a mesma precisão do mapa topográfico tradicional. Outros autores relacionam a ortoimagem à correta posição dos objetos representados no terreno. Para WOLF (1974) uma ortofoto é uma fotografia que mostra imagens de objetos em sua posição ortográfica verdadeira e para KRAUS (1992) uma ortoimagem é uma fotografia de projeção central convertida em uma “foto correta” (*correct photo*). Uma definição do autor para ortoimagem é: “é uma imagem cuja projeção central foi retificada para a projeção ortogonal, eliminando as distorções decorrentes da tomada da própria fotografia e da variação do relevo”.

Neste trabalho, apenas para facilitar a diferenciação de termos, será usado o termo ortoimagem convencional para tratar da ortoimagem.

Em relação à definição de ortoimagem verdadeira pode-se agrupar os autores em dois grupos. O primeiro relaciona a ortoimagem com sua correção geométrica. Para AMHAR et al. (1998) uma ortoimagem verdadeira é uma ortofoto na qual os elementos não incluídos no MDT também são retificados para a projeção ortogonal. Para BANG et al. (2007) o termo ortoimagem verdadeira é geralmente usado para ortofotos nas quais os elementos que não estão presentes no MDT são retificados. O segundo grupo a relaciona com seu processo produtivo. Para SHENG et al. (2003) ortoimagem verdadeira é o processo de produção de ortoimagens com a remoção dos deslocamentos devido a coberturas dos objetos. Para KUZMIN et al. (2004) ortoimagem verdadeira é uma técnica de processamento que compensa os efeitos do duplo mapeamento causados pelas áreas oclusas. Para o autor deste trabalho uma definição de ortoimagem verdadeira (*true orthophoto*) deve contemplar as correções geométricas de uma ortoimagem convencional e as das imperfeições decorrentes da presença de objetos acima do MDT, ficando da forma: “é uma imagem gerada com a utilização de algoritmos capazes de retificar a projeção central em ortogonal e corrigir as imperfeições geométricas decorrentes da tomada da própria fotografia, da variação do relevo e da presença de objetos situados acima do terreno”.

2.3.2 Geração de Ortoimagens

Os primeiros métodos de retificação de fotografias foram desenvolvidos pelo austríaco Theodor Scheimpflug (1865 - 1911) e utilizaram como princípios básicos a continuidade do terreno e sua possível representação por planos de extensão limitada.

Scheimpflug propôs dois métodos que diferiam na forma como o terreno era dividido em pequenas porções. Se os limites eram obtidos por meio do enquadramento do terreno por vários poliedros (3, 4, 5... lados), esse era o Método Poliédrico. Por outro lado, se o terreno era dividido em porções fixas esse era o Método Zonal. Esses métodos foram muito utilizados até os anos 1950 e receberam a denominação genérica de retificação fotográfica diferencial (BLACHUT e BURKHARDT, 1989).

O desenvolvimento tecnológico fez com que as porções do terreno ficassem cada vez menores, infinitesimais, que ao serem retificadas de forma iterativa, contínua e ajustada, acabavam transformando a perspectiva central da fotografia em uma perspectiva ortogonal. A partir desse momento é que surge o termo ortofotografia, sendo este método denominado de Retificação Diferencial.

A retificação era feita por elementos de área, que definiam a porção do terreno a ser ortorretificada, sobre a qual se passava uma fenda *mecânica*, cuja dimensão era função da variação do relevo, reprojetoando a imagem a partir do modelo orientado. A ortoimagem final era formada pelo agrupamento dessas pequenas porções, com a ocorrência de falhas de continuidade dos elementos ortorretificados.

Na atualidade, a teoria da ortorretificação de imagens, ou geração de ortoimagens, é conhecida e difundida, sendo descrita em diversos livros como, por exemplo, WOLF (1974), ASPRS (1980), KRAUS (1992), ANDRADE (1998), LILLESAND e KIEFER (2000) e MIKHAIL et al. (2001).

Além da distorção provocada pela projeção central da câmera aérea, existe outra distorção que é provocada pela variação do relevo. Sua consequência é a não constância da escala da fotografia aérea em toda sua área (MIKHAIL et al., 2001).

Para que uma fotografia aérea seja retificada é necessário que os Parâmetros de Orientação Interior (POI) da câmera fotogramétrica e os Parâmetros de Orientação Exterior (POE) da própria fotografia sejam conhecidos. Também é necessário se conhecer as informações do terreno, por meio de um modelo digital que o represente. Como esse modelo é formado por pontos referenciados a um sistema geodésico, ou a um sistema de projeção cartográfica, uma consequência da ortorretificação é que a nova imagem fica referenciada a esse sistema (ANDRADE, 1998).

Outro fato importante é que a ortoimagem digital é um rearranjo dos pixels da fotografia aérea original, o que muitas vezes, exige que técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) sejam aplicadas com o objetivo de prover informações radiométricas, ou apenas melhorá-las em seu aspecto visual (ANDRADE, 1998). Por fim, por ser uma projeção ortogonal, a escala de uma ortoimagem é constante em toda sua extensão, diferentemente da fotografia aérea original que não possui escala constante (MIKHAIL et al., 2001). A Figura 01

apresenta a diferença entre as projeções de um objeto em uma fotografia aérea e uma ortoimagem.

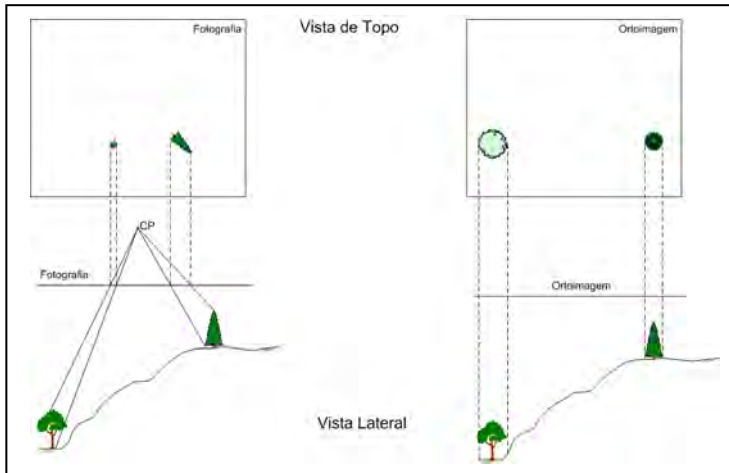


FIGURA 01 – COMPARAÇÃO ENTRE PROJEÇÕES DA PERSPECTIVA CENTRAL E ORTOGONAL
 FONTE: Adaptado de Lillesand e Kiefer (2000)

O modelo matemático que relaciona a ortoimagem à fotografia aérea é a equação de colinearidade. A Figura 02 apresenta a condição de colinearidade e as equações de colinearidade, de colinearidade inversa e da matriz de rotação são dadas pelas Equações 01, 02 e 03, respectivamente.

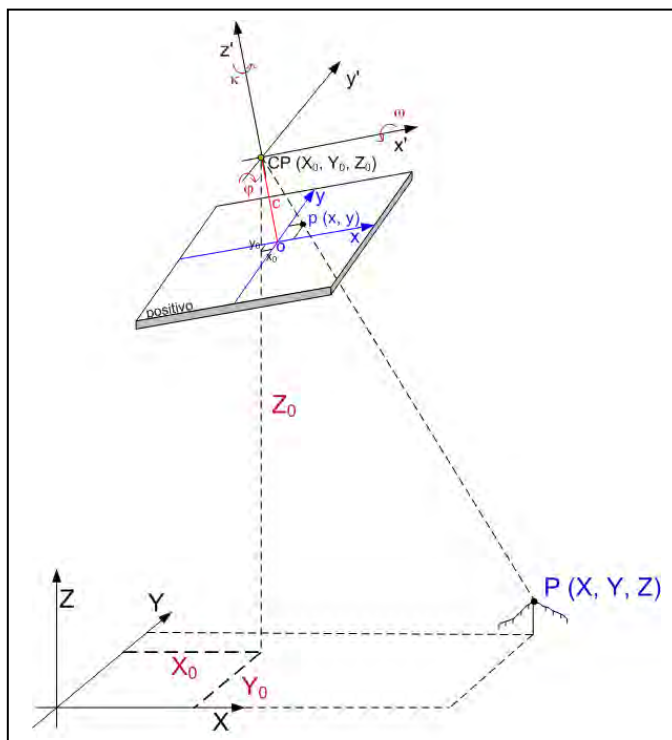


FIGURA 02 – CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE
 FONTE: Adaptado de Lillesand e Kiefer (2000)

$$\begin{aligned} x' &= x_0 - c \frac{M_{11}(X - X_0) + M_{12}(Y - Y_0) + M_{13}(Z - Z_0)}{M_{31}(X - X_0) + M_{32}(Y - Y_0) + M_{33}(Z - Z_0)} \\ y' &= y_0 - c \frac{M_{21}(X - X_0) + M_{22}(Y - Y_0) + M_{23}(Z - Z_0)}{M_{31}(X - X_0) + M_{32}(Y - Y_0) + M_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (01)$$

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{M_{11}x' + M_{21}y' - M_{31}c}{M_{13}x' + M_{23}y' - M_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{M_{12}x' + M_{22}y' - M_{32}c}{M_{13}x' + M_{23}y' - M_{33}c} \end{aligned} \quad (02)$$

$$M = R_x R_y R_z \quad (03)$$

$$R_x = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{vmatrix} \quad R_y = \begin{vmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{vmatrix} \quad R_z = \begin{vmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

onde:

- (X, Y, Z) coordenadas no referencial geodésico;
- (X₀, Y₀, Z₀) coordenadas do Centro Perspectivo da Fotografia no referencial geodésico;
- c é a distância focal calibrada;
- (x, y) coordenadas no referencial fiducial;
- (x', y', c) coordenadas no referencial fotogramétrico;
- (κ, φ, ω) são os ângulos que definem a atitude da câmera no instante da tomada da fotografia;
- (x₀, y₀) são as coordenadas do ponto principal no referencial fiducial.

Existem duas abordagens básicas para a geração de ortoimagens: o método direto e o método inverso (MIKHAIL et al., 2001; SHENG et al., 2003; BANG et al., 2007), que utilizam as equações de colinearidade e colinearidade inversa, respectivamente. Existe ainda outra abordagem, que combina os dois métodos, denominada método híbrido (DAL POZ e SANTOS, 1999). No processo direto, utilizando-se as equações de colinearidade inversa, parte-se de um *pixel* na imagem

original e determina-se seu correspondente na imagem ortorretificada (MIKHAIL et al., 2001; SHENG et al., 2003). Como se deseja determinar as coordenadas geodésicas do ponto (X , Y e Z), dispo de somente duas equações (X e Y) e das coordenadas fotogramétricas (x , y), é necessário o conhecimento prévio do modelo que representa o terreno, que fornecerá a coordenada Z , permitindo que o sistema tenha solução através de um processo iterativo (DAL POZ e SANTOS, 1999), conforme é apresentado na Figura 03. A Figura 04 ilustra o método direto de ortorretificação e a Figura 05 apresenta sua sequência de transformações.

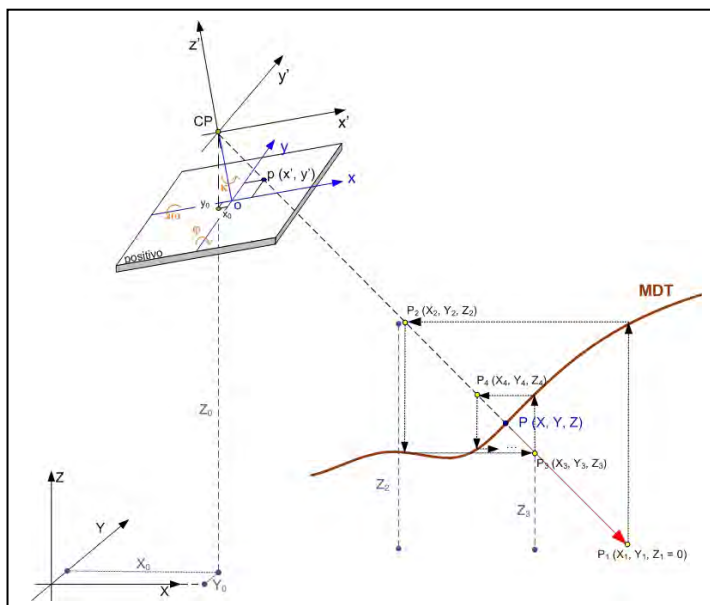


FIGURA 03 – PROCESSO ITERATIVO DE DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS
FONTE: O Autor (2010)

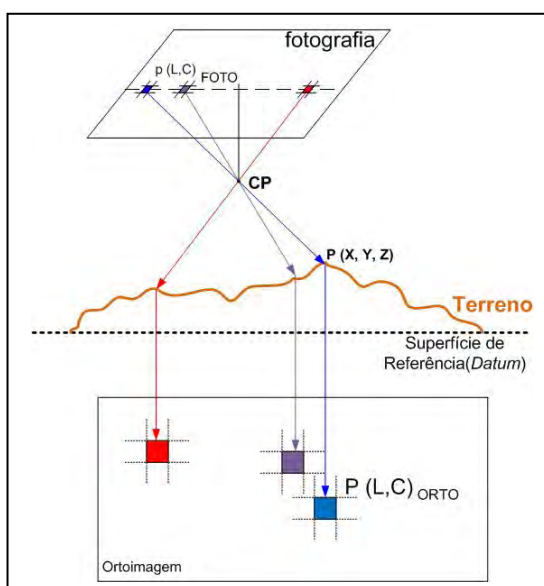


FIGURA 04 – PROCESSO DIRETO DE ORTORRETIFICAÇÃO
FONTE: Adaptado de Mikhail et al. (2001)

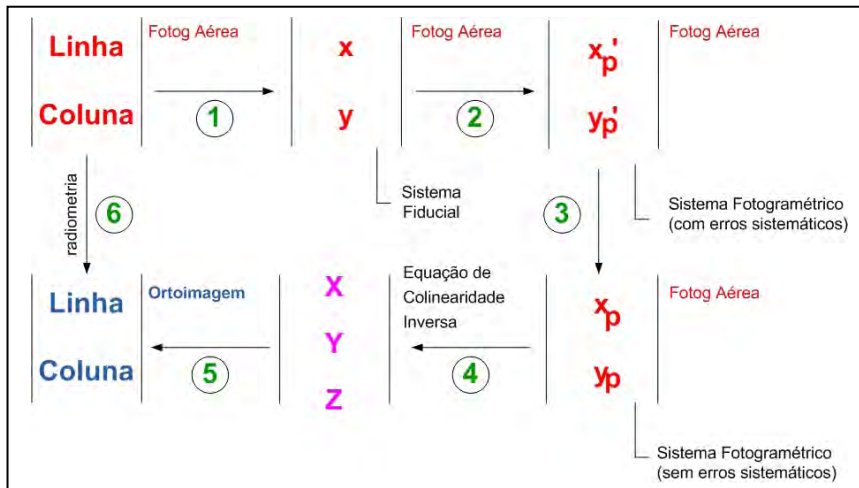


FIGURA 05 - SEQUÊNCIA DE TRANSFORMAÇÕES (MÉTODO DIRETO)
 FONTE: O Autor (2009)

No método inverso, utilizando as equações de colinearidade direta, parte-se de um *pixel* da imagem ortorretificada e procura-se na imagem original o *pixel* correspondente (MIKHAIL et al., 2001; SHENG et al., 2003; BANG et al., 2007). É um processo mais simples e rápido, que exige menos esforço computacional, pois as coordenadas geodésicas (X, Y, Z) são conhecidas. As coordenadas fotogramétricas (x, y) são determinadas pela aplicação da Equação 01. A Figura 06 ilustra o método inverso de ortorretificação e a Figura 07 apresenta a sequência de transformações. Em ambos os métodos existe a necessidade de realizar reamostragens na passagem da resolução radiométrica da fotografia aérea para a ortomagem (etapa 6 das Figuras 05 e 07).

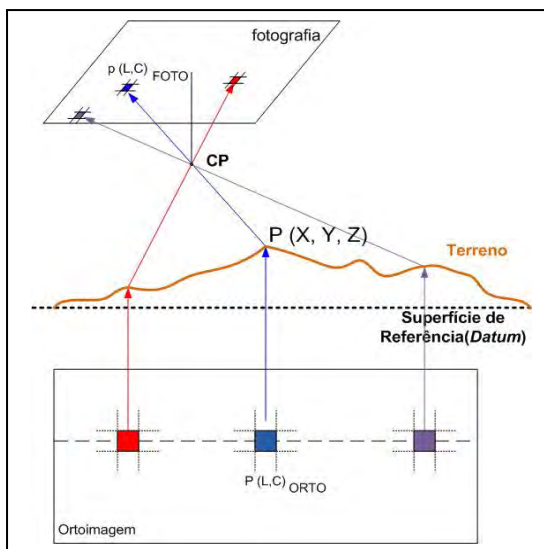


FIGURA 06 – PROCESSO INVERSO DE ORTORRETIFICAÇÃO
 FONTE: Adaptado de Mikhail et al. (2001)

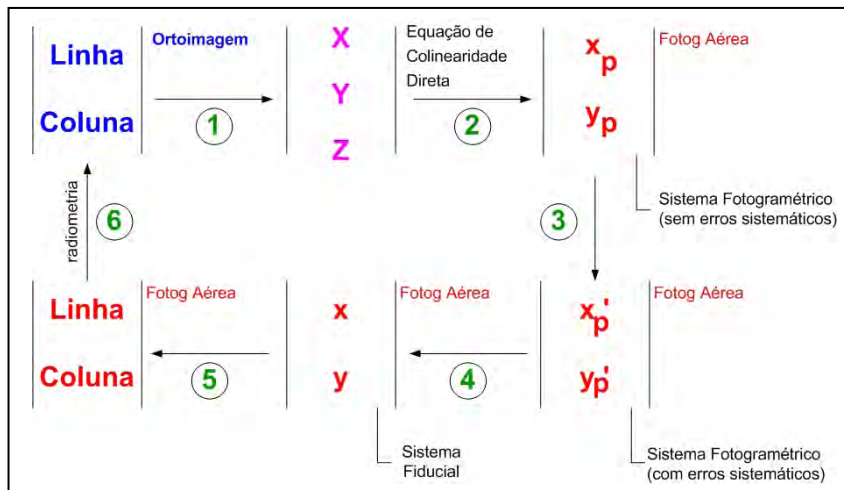


FIGURA 07 – SEQÜÊNCIA DE TRANSFORMAÇÕES (MÉTOD0 INVERSO)
 FONTE: O Autor (2010)

2.3.2.1 Fatores que Influenciam a Precisão da Ortoimagem

Os fatores que tem influência direta na precisão da ortomagem são os parâmetros de orientação interior e exterior (POI e POE) e o modelo representativo da superfície terrestre (MDT ou MDS) (BIASION et al., 2003; WIESEL² (1985) citado por SHENG et al. (2003)).

Um fator que tem elevada influência na precisão final de uma ortomagem é a precisão do MDS, pois a existência de erro altimétrico no modelo se transforma em erro planimétrico na fotografia aérea, que ao transferir sua radiometria para o *pixel* da ortomagem, acaba, indiretamente, transmitindo esse erro planimétrico (BRITO, 1997; SHENG et al., 2003). A Figura 08 apresenta essa influência no processo de ortorretificação e a Equação 04 a formulação matemática, adaptada de KRAUS (1992) para obtenção do valor do erro inserido na fotografia.

² WIESEL, J. Digital Image Processing for Orthophoto Generation. **Photogrammetria**. V. 40(2). Pp. 69-76. 1985

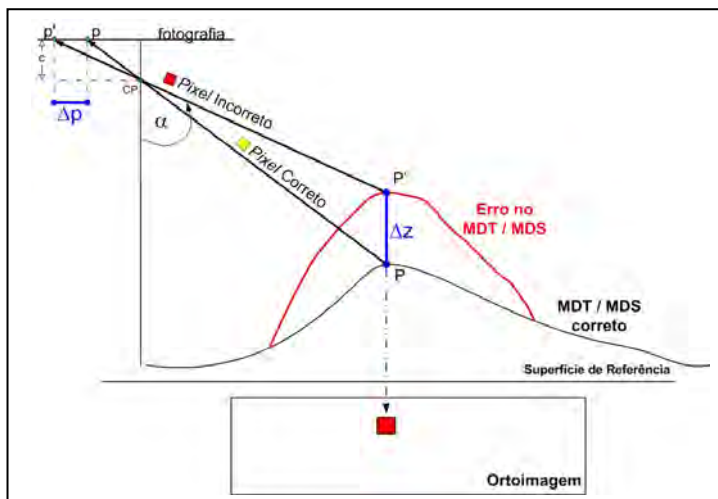


FIGURA 08 – INFLUÊNCIA DO ERRO DO MDS NA ORTORRETIFICAÇÃO
 FONTE: Adaptado de Kraus (1992)

$$\Delta p = \Delta Z \times \operatorname{tg} \alpha \times E_{\text{fotog}} \quad (04)$$

onde:

- Δp é a projeção do erro do MDT/MDS na fotografia vertical;
- ΔZ é o erro altimétrico do MDT/MDS;
- α é o ângulo formado pela vertical do lugar, que passa pelo CP da fotografia aérea, e a reta $CP - P'$;
- E_{fotog} é a escala média da fotografia aérea.

2.3.3 Geração de Ortoimagens Verdadeiras

2.3.3.1 Introdução

O processo de geração de ortoimagens verdadeiras é bastante similar ao da geração de ortoimagens convencionais. Os insumos utilizados são os POI (c , x_0 , y_0 , k_1 , k_2 , k_3 , P_1 e P_2), os POE (X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , φ , κ) e o MDS da área (AMHAR et al., 1998; RAU et al., 2000; BRAUN, 2003; BIASION et al., 2003). O modelo matemático empregado é o mesmo da geração de ortoimagens, ou seja, utiliza as equações de colinearidade descritas em Equação 01 e 02 e a matriz de rotação da Equação 03. Os métodos que podem ser usados são o direto, o inverso e o híbrido.

O uso do MDS na geração de ortoimagens faz com que erros geométricos apareçam, exigindo que correções adicionais sejam implementadas com a finalidade de melhorar a qualidade do produto final (SHENG et al., 2003). Esses erros são conhecidos genericamente como imagens fantasmas, ou duplo mapeamento (BRAUN, 2003; BANG et al., 2007), cuja causa é a existência de áreas oclusas na fotografia aérea (KUZMIN et al., 2004).

É necessário assim, que as áreas oclusas em uma fotografia aérea sejam identificadas. Posteriormente, deve-se utilizar uma estratégia para seleção da informação que a substituirá, advindo de outras ortoimagens do mesmo bloco. A área oclusa em uma ortomagem não necessariamente está oclusa nas outras, o que permite que a informação disponível seja utilizada para substituir a oclusa. As áreas não oclusas devem ser ortorretificadas normalmente, sem qualquer adaptação no método escolhido.

2.3.3.2 Estado da Arte da Geração de Ortoimagens Verdadeiras

A primeira proposta para geração de ortoimagens em ambientes urbanos foi realizada por AMHAR e ECKER (1996). Nele é descrito um método para geração de ortoimagens, chamada por eles de ortofoto correta (*correct orthophoto*), no qual foram utilizados dois modelos separados, um representativo do terreno e outro das edificações.

Os primeiros trabalhos a empregar a terminologia ortomagem verdadeira foram apresentados no Simpósio da Comissão IV da Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS) “*GIS – Between Visions and Applications*” realizado em 1998 na cidade de Stuttgart (Alemanha) por AMHAR et al. (1998), que utilizou o termo *true orthophoto*, e SCHICKLER e THORPE (1998), que utilizou o termo *true orthophotography*.

Cabe ressaltar que BALTSAVIAS (1996) faz uma série de considerações sobre a potencialidade de emprego das ortoimagens digitais em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), e cita em suas considerações que um problema básico da geração de ortoimagens digitais nos sistemas comerciais era a correção dos deslocamentos radiais devido aos objetos acima do terreno. Em nenhum momento nesse artigo o termo *true orthophoto* é citado.

Uma consideração especial deve ser realizada em relação à diferença entre os algoritmos de geração das ortoimagens verdadeira e convencional. O princípio matemático é o mesmo em ambas as aplicações. Para SHENG (2007) a diferença entre elas está na capacidade do algoritmo de geração de ortomagem verdadeira em detectar oclusões. Para CHEN et al. (2007) a diferença está no fato de que na ortomagem convencional o modelo utilizado só contempla informações do terreno enquanto que na ortomagem verdadeira os objetos situados acima do terreno são considerados. Ou seja, a diferença está no fato de que a ortomagem verdadeira se propõe a corrigir as imperfeições geométricas decorrentes da presença de objetos, artificiais e naturais, situados acima do terreno, o que não ocorre na ortomagem convencional.

O problema que mais afeta a geração de ortoimagens verdadeiras é a existência de áreas oclusas decorrentes, principalmente, da presença de edificações e pontes (RAU et al., 2000 e BRAUN, 2003), que impedem a visualização do terreno a partir do ponto de vista do Centro Perspectivo (CP) da câmera aérea (oclusão). A existência de sombras e penumbras nas fotografias é um problema que afeta tanto a geração de ortoimagens verdadeiras quanto a de ortoimagens convencionais e deve-se ao impedimento da visibilidade, total ou parcial, de porções do terreno do ponto de vista do sol.

Segundo BANG et al. (2007) o método de detecção de oclusões mais utilizado é o Método *Z-Buffer* utilizado na Computação Gráfica (AMHAR et al., 1998; RAU et al., 2000; RAU et al., 2002; SHENG et al., 2003 e SHENG, 2007). Outro método adaptado, também da Computação Gráfica (CG) é o *Ray-tracing* (MACHADO et al., 2005 e LI et al., 2005).

Alguns autores apresentam inovações em relação ao tema. BRITO (1997) apresenta solução para o problema através do uso da teoria da probabilidade, VOLOTÃO (2001) apresenta uma solução que determina as oclusões através da medição de distâncias a partir da semelhança de triângulos, KUZMIN et al. (2004) apresenta solução que utiliza vetores da base cartográfica projetados na fotografia aérea ou imagem orbital de alta resolução, ALBERTZ e WOLF (2004) apresentam uma solução baseada unicamente na análise da projeção das edificações, não utilizando informações altimétricas do terreno, HABIB et al. (2007) apresenta solução baseada na comparação dos ângulos de retas que passam pelo CP (vertical do lugar e reta que une o próprio CP aos objetos no terreno) e CHEN et al. (2007) utiliza

informações de um modelo representativo das edificações e sua projeção na imagem orbital.

Os modelos representativos do terreno e dos objetos situados acima dele proveem principalmente da restituição fotogramétrica manual (SCHICKLER e THORPE, 1998; AMHAR et al., 1998; RAU et al., 2000; RAU et al., 2002). Outros métodos usam a medição automática de pontos por correlação automática de imagens (SHENG et al., 2003; SHENG, 2007) e levantamentos com LIDAR (GONG et al., 2000; HABIB et al., 2007). Por fim, BAZARETTI et al. (2007) e GÜNAY et al. (2007) apresentam soluções mistas, que utilizam as bordas das edificações provenientes da base cartográfica existente e de restituição fotogramétrica manual, respectivamente, e dentro dos limites das edificações os pontos de levantamentos LIDAR foram densificados com uso do interpolador vizinho mais próximo. O uso de levantamentos LIDAR é a hipótese sugerida por HABIB et al. (2007) para automatizar o processo de reconstrução automática de edificações e agilizar a geração de ortoimagens.

2.3.3.3 Áreas Oclusas

Genericamente pode-se definir área oclusa (ou oclusão) como sendo a porção da superfície terrestre não visível, a partir de um ponto de vista, em uma imagem de sensoriamento remoto (BRITO, 1997). No caso da presente pesquisa, na qual a principal fonte de trabalho são as fotografias aéreas, pode-se definir área oclusa como sendo a porção do terreno oculta pela projeção dos feixes perspectivos na superfície do objeto ocluser quando da tomada da fotografia aérea, a partir do CP da câmera. Cabe ressaltar que para toda área oclusa existe uma área oclusora, responsável por sua não visibilidade.

A presença de áreas oclusas e sombras nas fotografias aéreas é a maior fonte de imperfeições nas ortoimagens verdadeiras (RAU et al., 2000; BRAUN, 2003). A causa principal da ocorrência desses problemas é a existência de descontinuidades bruscas no terreno, com incidência elevada em ambientes urbanos (devido à presença de edificações). A Figura 09 apresenta as áreas oclusas e suas respectivas áreas oclusoras.

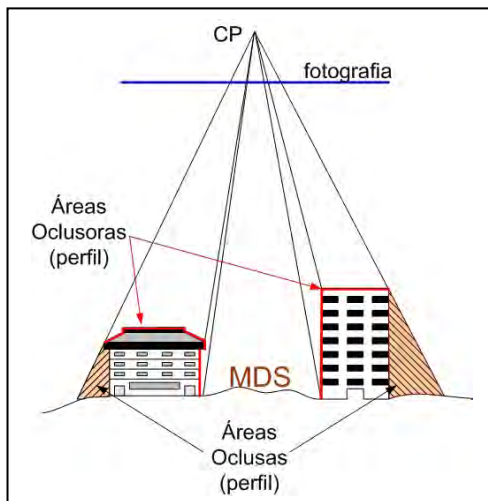


FIGURA 09 – ÁREAS OCLUSAS E OCLUSORAS
 FONTE: O Autor (2010)

2.3.3.4 Duplo Mapeamento

No caso da ortorretificação de fotografias aéreas, em ambientes urbanos, com a utilização de um MDS em vez de um MDT, ocorre o fenômeno conhecido como duplo mapeamento, que pode ser visualizado na cúpula da edificação presente na Figura 10.



FIGURA 10 – EXEMPLO DE DUPLO MAPEAMENTO
 FONTE: Nielsen (2004)

Existem duas condicionantes para que o duplo mapeamento ocorra. A primeira é o uso do MDS, que contém a informação altimétrica do terreno e das edificações, e a segunda é a existência de áreas oclusas no terreno (do ponto de vista do CP da fotografia aérea).

Na Figura 11 é possível verificar que a projeção cônica faz com que a edificação, ao ser projetada na fotografia aérea, seja representada de forma inclinada, com as linhas \overline{AB} , que representa a lateral da edificação, e \overline{BD} , que representa seu telhado, se deformando. Deve-se verificar que toda a linha \overline{EG} , presente no terreno, não teve sua informação projetada na fotografia aérea devido a oclusão provocada pela edificação (linhas \overline{AB} e \overline{BD}).

Ao se gerar a ortoimagem, projetando os pontos “C” e “F”, com localização distinta no terreno (método inverso), na fotografia aérea é possível verificar que eles buscam a informação no mesmo *pixel*, repetindo no ponto “F” a mesma informação do ponto “C”, causando o duplo mapeamento.

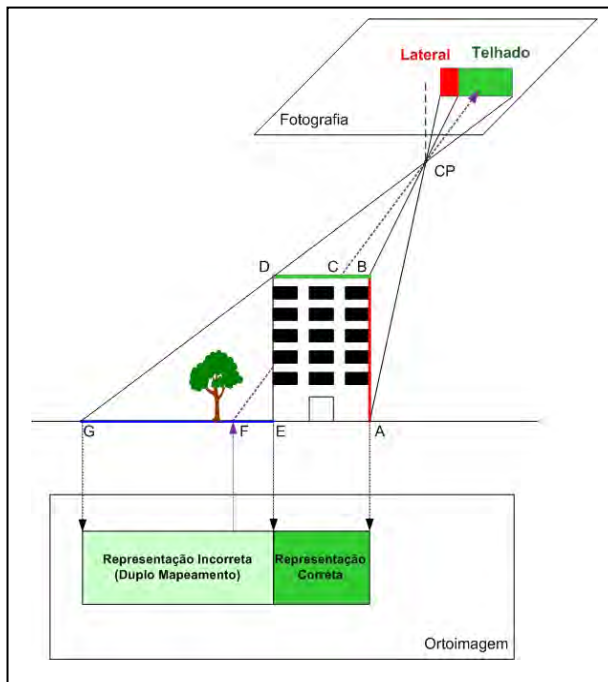


FIGURA 11 – DUPLO MAPEAMENTO

FONTE: O Autor (2010)

Verifica-se assim que o duplo mapeamento é uma consequência da existência de áreas oclusas. Para que esse fenômeno seja corrigido é necessário determinar as áreas oclusas para cada fotografia através de algoritmos específicos de detecção de oclusões. Como exemplo, a Figura 12 apresenta a tomada de uma fotografia em uma área com duas edificações (parte superior) e suas representações na ortoimagem verdadeira com o duplo mapeamento ainda existente e removido (parte inferior).

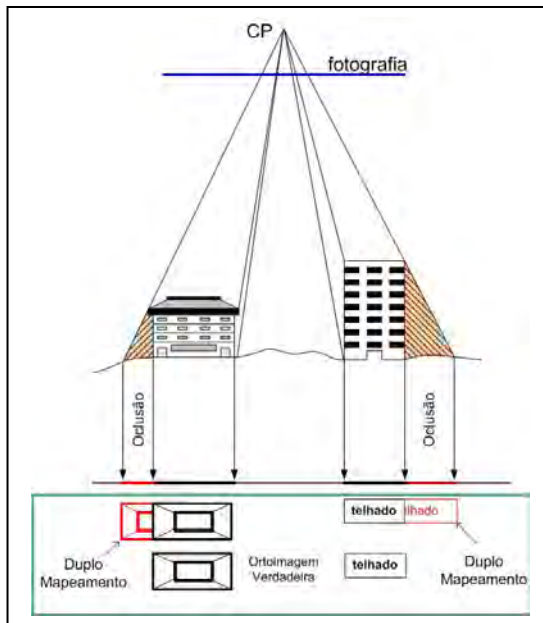


FIGURA 12 – ÁREAS OCLUSAS E DUPLO MAPEAMENTO
 FONTE: O Autor (2010)

2.3.3.5 Fluxograma da Geração de Ortoimagens Verdadeiras

A geração de ortomosaicos digitais é um processo consolidado (SHENG et al., 2003) e difundido em diversas publicações. RAU et al. (2000) apresenta um fluxograma para geração de ortomosaicos verdadeiros, que contempla todas as fases de sua geração, incluindo as tarefas relativas à identificação, manipulação e substituição das áreas ocluídas e sombreadas e o processamento digital de imagens (PDI), necessário para uniformização da imagem final. Nesse fluxograma é utilizado o termo imagens escravas, que são as outras imagens do bloco fotogramétrico, que representam o mesmo espaço geográfico da imagem principal (em todo ou parte dele), fornecendo as informações necessárias para substituição das não existentes nas áreas ocluídas. Esse fluxograma é apresentado na Figura 13.

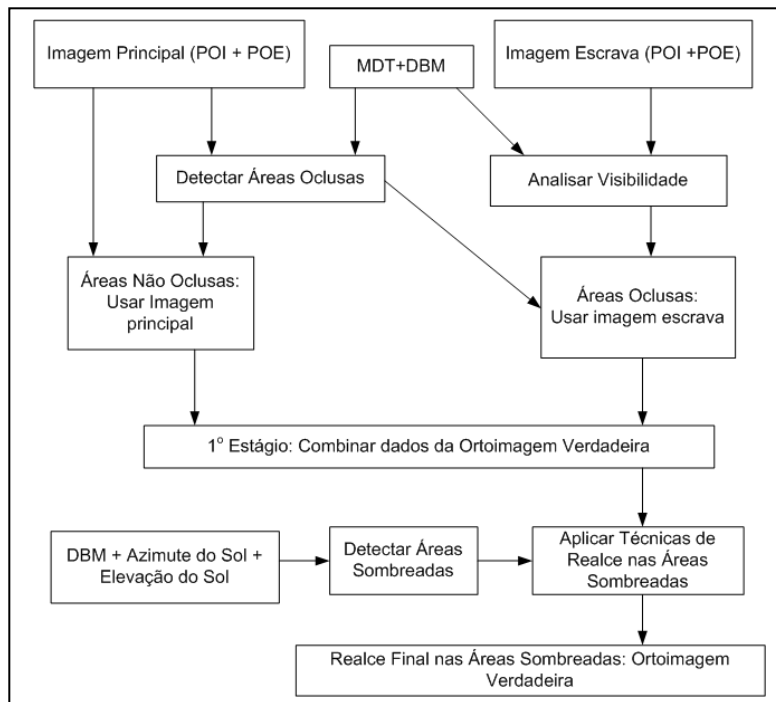


FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DE GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS VERDADEIRAS
 FONTE: Adaptado de Rau et al. (2000)

O fluxograma de RAU et al. (2000) pode ser condensado na execução das seguintes tarefas:

1 – Leitura dos Dados de Entrada:

- Fotografia Aérea (principal)
- Outras Fotografias Aéreas do Bloco Fotogramétrico (escravas)
- MDT/DBM
- POI ($c, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1$ e P_2)
- POE ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$)

2 – Identificação das Áreas Oclusas:

- Áreas não oclusas: ortorretificar
- Áreas oclusas: identificar

3 – Identificação das Áreas Sombreadas:

- Áreas sombreadas: realce

4 – Substituição das Áreas Oclusas:

- Identificar potenciais fontes de substituição da informação nas imagens escravas (superpostas)
- Selecionar a fonte substituta

5 – Montar a Ortoimagem Verdadeira:

- Áreas: fusão das áreas não oclusas, substitutas e sombreadas.
- Realce das áreas sombreadas

2.3.3.6 – Métodos de Detecção de Áreas Oclusas

A oclusão de regiões por objetos é um fato normal e de fácil percepção para o ser humano. A simples visualização de objetos no mundo real pelo olho permite identificar as oclusões e as áreas sombreadas. A sobreposição de objetos situados a distâncias diferentes do observador produz oclusões e apresenta, aos olhos do observador, uma imagem resultante, diferente da realidade.

Ao implementar algoritmos de detecção dessas áreas em imagens procura-se, com base em propriedades projetivas, estabelecer relações matemáticas entre o que é visível e o que não é, separando esses conjuntos em níveis distintos de informação. No caso de fotografias aéreas procura-se verificar a visibilidade do terreno a partir do centro perspectivo da própria fotografia.

Existem diversas implementações que utilizam princípios diferenciados, como o probabilístico (BRITO, 1997), a semelhança de triângulos e comparação de distâncias (VOLOTÃO, 2001), a projeção da base vetorial na fotografia aérea (KUZMIN et al., 2004; CHEN et al., 2007), a comparação de projeções em imagens de varredura linear (ALBERTZ E WOLF, 2004) e na comparação de ângulos entre objetos subseqüentes (HABIB et al., 2007). MACHADO et al. (2005) e LI et al. (2005) implementaram adaptações do método *Ray-tracing* da Computação Gráfica (CG). No entanto, o método de detecção de oclusões mais utilizado é o *Z-Buffer*, também da CG. Diversas adaptações foram implementadas por AMHAR et al. (1998), RAU et al. (2000), RAU et al. (2002), SHENG et al. (2003), BANG et al. (2007) e SHENG (2007).

BANG et al. (2007) apresenta uma comparação entre 7 métodos de detecção de oclusão (retificação diferencial tradicional, 4 variações do *Z-Buffer*

(tradicional, baseado em altura, modificado e com MDS ordenado) e 2 variações do *Ray-tracing* (baseadas na comparação de ângulos e na de altura)). A seguir será realizada uma apresentação do princípio do método *Z-Buffer* e do método Baseado em Ângulo.

2.3.3.6.1 Método *Z-Buffer*

O algoritmo *Z Buffer* tem sua criação atribuída, normalmente, a Edwin Catmull, embora, Wolfgang Straßer tenha descrito seu princípio básico em 1974. É um dos mais simples algoritmos para visualização de superfícies (FOLEY et al., 2001) e está presente nas principais bibliotecas gráficas disponíveis no mercado, como a OPENGL e a Direct3D (FERGUSON, 2001).

Seu princípio de determinação se baseia no fato de que os pontos situados à frente obstruem os situados atrás, provocando uma *competição* entre dois, ou mais, pontos do terreno pelo mesmo *pixel* na fotografia aérea (HABIB et al., 2007).

Na Figura 14 é possível verificar a *competição* entre os *pixels* da ortoimagem por um mesmo *pixel* da fotografia aérea. Por exemplo, os conjuntos de *pixels* da ortoimagem (3 e 7), (4 e 8) e (5 e 9) competem, dentro de cada par, por um mesmo *pixel* na fotografia aérea. O algoritmo *Z-Buffer* identifica que os *pixels* 3, 4 e 5 obstruem os *pixels* 7, 8 e 9, respectivamente, fazendo com que estes últimos sejam identificados como pertencentes a uma área oclusa.

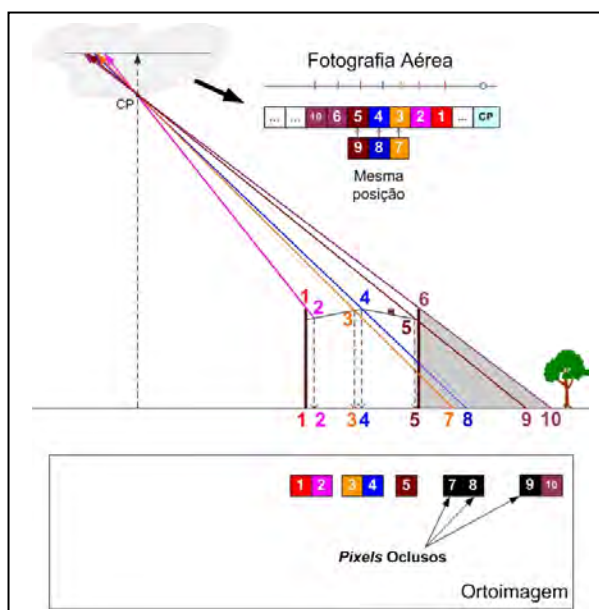


FIGURA 14 – COMPETIÇÃO ENTRE *PIXELS*
 FONTE: O Autor (2010)

A determinação da visibilidade de um *pixel* na fotografia é feita com o uso de uma matriz de distâncias (*Z-Buffer*) que armazena as distâncias entre os objetos no terreno e o CP da câmera, comparando-as à medida que se percorre a ortoimagem. O *pixel* visível é aquele que apresenta a menor distância. Por exemplo, no caso da Figura 14, a distância $\overline{CP-4}$ é menor do que a distância $\overline{CP-8}$, o que indica que o *pixel* 4 é o *pixel* visível e o *pixel* 8 é o ocluso.

Existe ainda uma variação desse método (*Z-Buffer*), denominado Método Altura-Buffer (BANG et al., 2007), que em vez de comparar a distância linear dos *pixels* ao CP, utiliza apenas a altura dos *groundels* no terreno como fator de comparação. Entre dois *pixels*, o mais alto é o ocluser e o mais baixo é o ocluso. No caso da Figura 14, a altura do *pixel* 4 é maior do que a do *pixel* 8, indicando que o *pixel* 8 é ocluído pelo *pixel* 4.

RAU et al. (2000) apresentam uma estrutura de dados composta por 03 matrizes: Matriz A (*Z-Buffer*), Matriz B (*Frame Buffer*) e um Mapa Índice. A Matriz A, com a mesma dimensão da fotografia aérea, armazena as distâncias entre o CP e os *pixels* da ortoimagem (quando há competição entre *pixels* a menor distância é armazenada). A Matriz B, também com a mesma dimensão da fotografia aérea, armazena as informações para o caso da troca de visibilidade entre *pixels* (isto ocorre quando um *pixel* da ortoimagem é sinalizado como visível e necessita-se trocá-lo para não-visível). O Mapa Índice tem a mesma dimensão da ortoimagem e sinaliza a visibilidade de cada *pixel* (visível ou não visível).

A principal falha do Método *Z-Buffer* (RAU et al., 2000; RAU et al., 2002; SHENG et al., 2003; HABIB et al., 2007) é denominada de Porção M. Além dela, existem outros dois problemas, conhecidos como Diferença de Resolução e Erro de Arredondamento, que estão presentes na maioria dos métodos de detecção de oclusões, inclusive no Método *Z-Buffer*.

Para definir o que é a Porção M é interessante dividir uma área oclusa nas componentes vertical, inclinada e horizontal, classificadas de acordo com os componentes do causador da oclusão (edificação), como visto na Figura 15. Assim, pode-se definir Porção M como sendo a projeção no MDS da componente vertical da oclusão no plano horizontal da ortoimagem. A não identificação da Porção M no processo de ortorretificação leva a representação da lateral da edificação na área correspondente a ela.

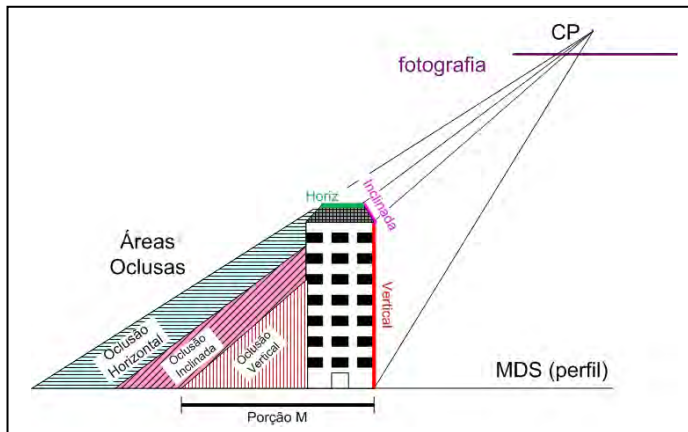


FIGURA 15 – PORÇÃO M
 FONTE: O Autor (2010)

O problema da Porção M ocorre porque o Método *Z-Buffer*, no caso da utilização de malhas regulares, é incapaz de detectar que a componente altimétrica de obstáculos verticais provoca oclusão em elementos no plano horizontal. Além disso, ele também é incapaz de detectar oclusões entre quinas de edificações (Figura 16).

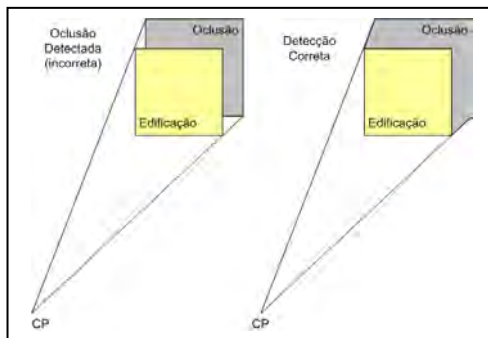


FIGURA 16 – PORÇÃO M (QUINA)
 FONTE: Adaptado de Habib et al. (2007)

Para solucionar o problema, RAU et al. (2000) propõe uma solução em duas passagens, onde na 1ª etapa a Porção M é identificada e na 2ª etapa são introduzidos falsos *groundels* no MDS como medida para corrigir o problema.

Quando a resolução geométrica da ortoimagem é diferente da fotografia aérea pode ocorrer a falsa detecção de oclusões. Na Figura 17 é possível verificar que cinco *pixels* da fotografia aérea (em azul e vermelho) correspondem a sete *pixels* na ortoimagem, o que pode fazer com que algum *pixel* na ortoimagem não

seja analisado, ou que, até mesmo, seja analisado duas vezes. Os *pixels* na ortomagem verdadeira identificados com a letra “A” (em amarelo) foram analisados no processo, e o com a letra “NA” não. Pode-se verificar também que os terceiro e sexto *pixels* (da esquerda para a direita) foram analisados duas vezes. Essa diferença de resolução pode fazer com que falsas oclusões sejam detectadas, ou que oclusões reais não sejam. A solução proposta por SHENG et al. (2003) e HABIB et al. (2007) para a Diferença de Resolução é a mesma da Porção M, ou seja, a inserção de falsos *groundels* no MDS.

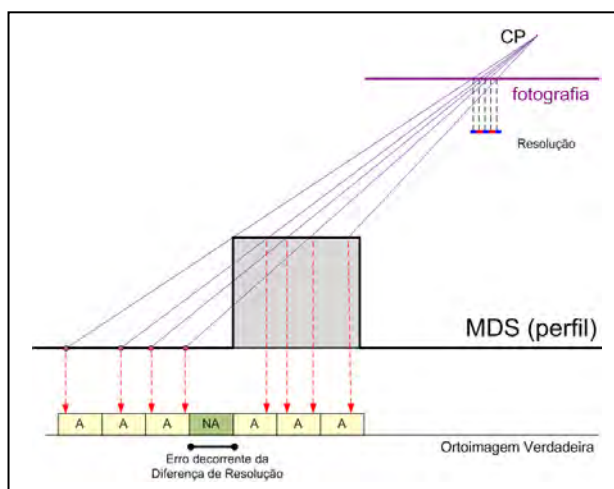


FIGURA 17 – DIFERENÇA DE RESOLUÇÃO GEOMÉTRICA
FONTE: O Autor (2010)

O problema decorrente do Erro de Arredondamento se deve às diversas transformações de unidades envolvidas no processo (RAU et al., 2000), que fazem com que *pixels* vizinhos da ortomagem sejam projetados no mesmo *pixel* da fotografia aérea (método inverso), indicando falsamente que um *pixel* oclui o outro. As sequências de transformações dos métodos direto e inverso de ortorretificação apresentadas nas Figuras 05 e 07 permitem verificar que erros de arredondamento podem ocorrer. Por exemplo, no método inverso têm-se as seguintes conversões: $(\text{Linha, Coluna})_{\text{ortomagem}} \rightarrow (X, Y, Z)_{\text{metro}} \rightarrow (x, y)_{\text{milímetro}} \rightarrow (\text{Linha, Coluna})_{\text{fotografia aérea}}$.

A consequência dos erros de arredondamento é a análise incorreta da visibilidade do *pixel* da ortomagem e o surgimento de *pixels* isolados sinalizados como oclusos, quando na realidade são não oclusos, e vice-versa. A solução é o uso de filtros de eliminação de ruídos, e sua causa é decorrente do método de ortorretificação e não é exclusividade do Método *Z-Buffer*. Na Figura 18 exemplifica-se esse problema com uma edificação. Os *pixels* na cor laranja mostram os *pixels*

identificados como oclusos pelo método, e os em branco os não oclusos. É possível verificar que existem inúmeros *pixels* isolados na figura que foram considerados incorretamente como oclusos, devido ao erro de arredondamento. Esse erro também pode ocorrer no sentido contrário, ou seja, de identificar um *pixel* ocluso como não o sendo, conforme exemplificado pelo *pixel* em branco próximo a palavra Oclusão.

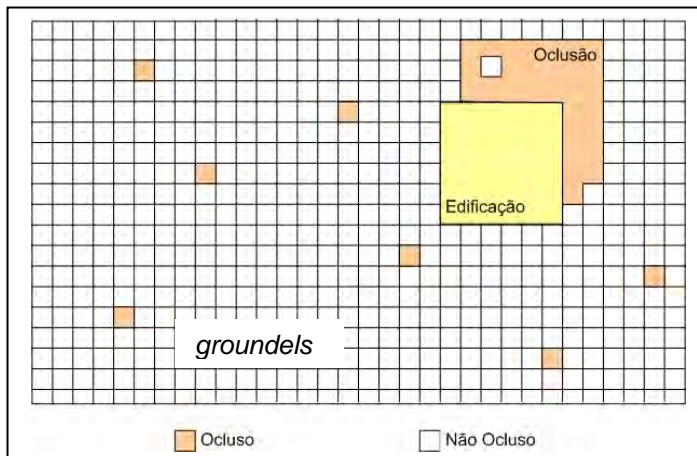


FIGURA 18 – PROBLEMA DE ARREDONDAMENTO
 FONTE: O Autor (2010)

2.3.3.6.2 Método Baseado em Ângulos

HABIB et al. (2007) apresenta um método de detecção de áreas oclusas baseado na comparação de ângulos. O princípio do método está no fato de que as distorções da projeção central têm direção radial, com origem no CP. Isso possibilita que as discontinuidades existentes no MDS, que provocam o surgimento de áreas oclusas, sejam identificadas pela análise sequencial, na direção radial, de dois ângulos α consecutivos.

Esse ângulo (α) é definido por duas retas que passam pelo CP (vértice): a primeira é a vertical do lugar que passa pelo próprio CP e segunda é a reta que une o CP ao centro do *groundel* do MDS. Ao se comparar dois ângulos consecutivos é possível identificar, por sua variação, se o *groundel* seguinte é visível ou ocluso. Por exemplo, na Figura 19 é possível verificar que da posição A para a B existe um acréscimo nos ângulos α ($\alpha_B > \alpha_A$), o que indica que B é visível. Ao passar para a posição C ocorre um decréscimo ($\alpha_C < \alpha_B$), o que indica oclusão. Seguindo de C para D verifica-se um acréscimo ($\alpha_D > \alpha_C$), mas como C é ocluso, ele não serve

como parâmetro de comparação. Deve-se então comparar a posição D com a última visível, no caso B. Como ($\alpha_D > \alpha_B$), isso indica que D é visível.

Deve-se reparar que esse método é essencialmente um método comparativo e sequencial, onde a análise da visibilidade de um *groundel* é baseada na análise dos *groundels* anteriores, o que pode propagar erros indesejados. A primeira análise de visibilidade é realizada no *groundel* que corresponde à projeção vertical do CP, considerado sempre como visível por não haver distorções (HABIB et al., 2007).

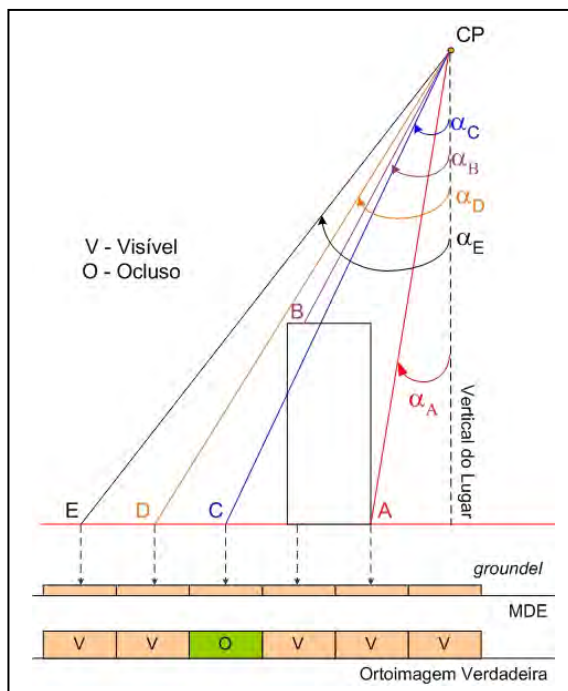
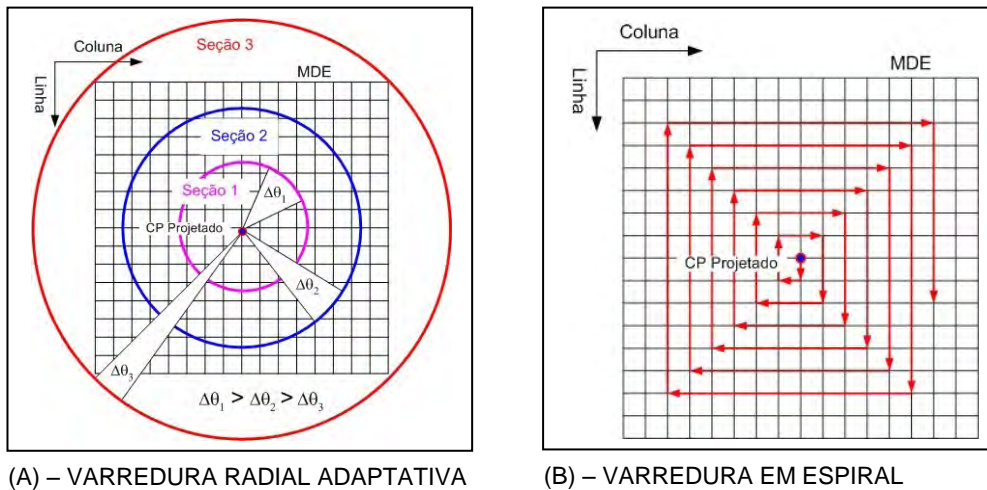


FIGURA 19 – MÉTODO BASEADO EM ÂNGULO
 FONTE: Habib et al. (2007)

HABIB et al. (2007) apresenta duas implementações do método: Varredura Radial Adaptativa e Varredura em Espiral. A diferença entre os métodos é a forma na qual a análise comparativa se realiza. Na primeira define-se um azimute inicial, varrendo-se essa linha do centro para as extremidades. Posteriormente, soma-se uma pequena variação angular ($\Delta\theta$) ao azimute inicial e repete-se o processo até que o azimute inicial seja alcançado novamente. Para evitar que algum *groundel* não seja analisado, o autor dividiu a imagem em setores circulares e diminuiu o valor de $\Delta\theta$ à medida que a análise se afasta da projeção do CP. Na segunda varre-se a imagem em movimento espiral. A Figura 20 (A e B) ilustra essas implementações do método.



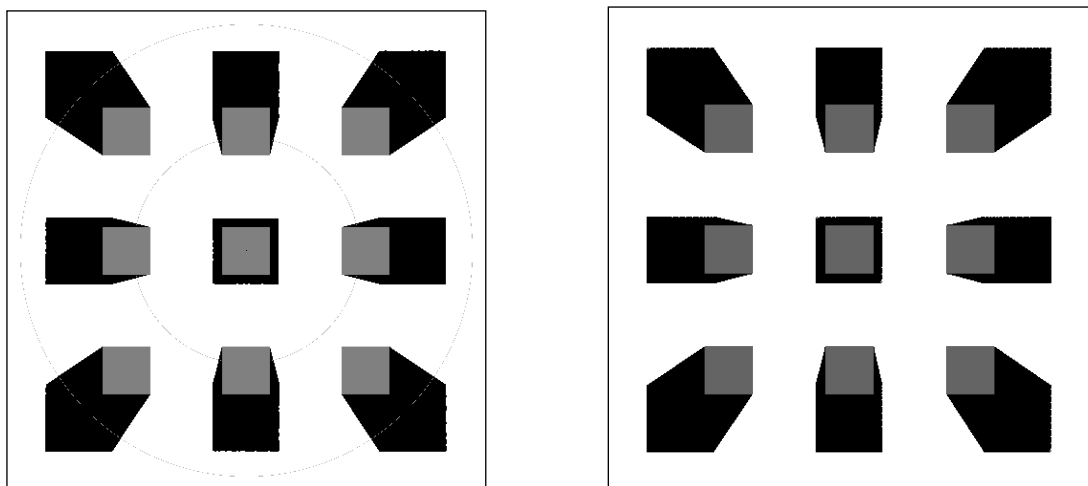
(A) – VARREDURA RADIAL ADAPTATIVA

(B) – VARREDURA EM ESPIRAL

FIGURA 20 – IMPLEMENTAÇÕES DO MÉTODO BASEADO EM ÂNGULOS

FONTE: Habib et al. (2007)

Segundo HABIB et al. (2007) esse método independe da relação de resolução geométrica entre o MDS e a fotografia aérea e também não requer o uso de falsos *groundels* para solucionar o problema da Porção M. A Figura 21 apresenta um exemplo da detecção de áreas oclusas pela implementação em varredura radial adaptativa (A) e em varredura em espiral (B). Verifica-se que a Porção M é detectada plenamente nas duas implementações.



(A) – VARREDURA RADIAL ADAPTATIVA

(B) – VARREDURA EM ESPIRAL

FIGURA 21 – EXEMPLO DE DETECÇÃO DE ÁREAS OCLUSAS – MÉTODO BASEADO EM ÂNGULO

FONTE: Habib et al. (2007)

2.4 LIDAR

2.4.1 Introdução

O sistema LIDAR, também conhecido como LADAR (*LASER Detection and Ranging*), *laserscanning* ou varredura LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), é um sistema de sensoriamento remoto ativo que determina as coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície por meio da geração, emissão e captura de pulsos LASER, integrados com dados do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e do Sistema de Navegação Inercial (INS) (WEHR e LOHR, 1999; LILLESAND e KIEFER, 2000; MIKHAIL et al., 2001; DALMOLIN e SANTOS, 2004).

O início de seu desenvolvimento ocorreu nas décadas de 1970 e 1980 (ACKERMANN, 1999; LILLESAND e KIEFER, 2000) e no final da década de 1990 já havia mais de 40 empresas em todo o mundo prestando serviços de levantamento com LIDAR (BALTSAVIAS, 1999a). O grande salto para a empregabilidade do LIDAR foi o desenvolvimento do GPS, que resolveu o problema crítico do posicionamento do sensor (ACKERMANN, 1999).

Um sistema LIDAR fornece resultados geométricos em termos de distância, atitude, posição e coordenadas (ACKERMANN, 1999), mas o sistema não é capaz de levantar objetos específicos devido ao caráter sub-randômico do levantamento (AXELSONN, 1999).

Um típico sistema LIDAR é composto por Plataforma de Navegação, Sistema de Processamento e Armazenamento de Dados, Sistema de Posicionamento e Navegação e Sistema LASER. A Plataforma de Navegação pode ser terrestre, aérea ou orbital, dependendo do ambiente no qual se deseje realizar o levantamento. O Sistema de Processamento e Armazenamento é o responsável por armazenar a imensa quantidade de dados gerados e por processar as informações decorrentes dos Sistemas de Posicionamento e Navegação e LASER. A Figura 22 apresenta os componentes de um sistema LIDAR.

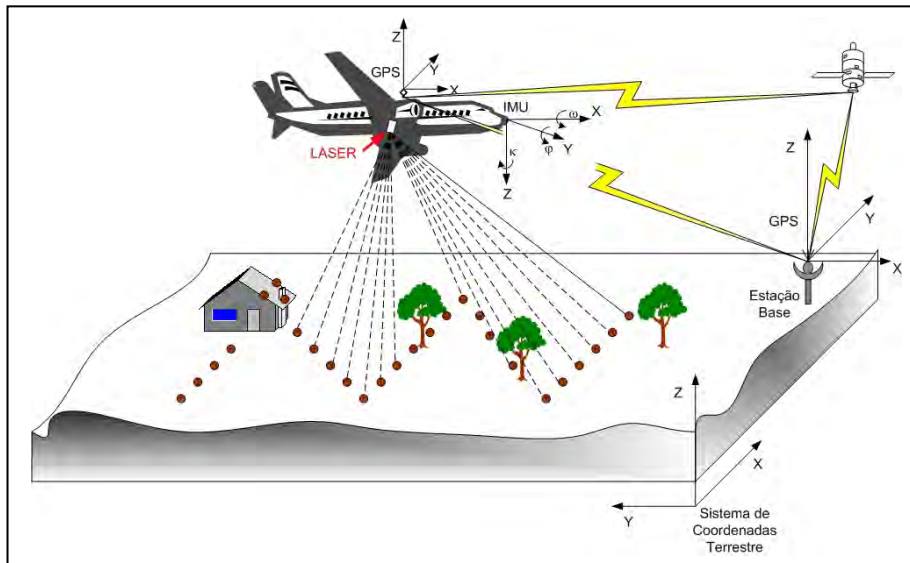


FIGURA 22 – COMPONENTES DO SISTEMA LIDAR

FONTE: Adaptado de Lillesand e Kiefer (2000)

O princípio de funcionamento de um sistema LIDAR é a determinação contínua de coordenadas de pontos no terreno a partir da emissão de pulsos LASER e da captura dos sinais de retorno desses mesmos pulsos.

Para determinar as coordenadas de um pulso de retorno é necessário o conhecimento da posição do Sistema LASER, da direção e comprimento do vetor Sistema LASER - alvo e do vetor que liga a antena do rastreador GPS ao Sistema LASER.

O cálculo da distância (D), que separa o sensor do alvo, é feito com a utilização da diferença de tempo entre a emissão e a recepção de cada pulso LASER (t_L) multiplicada pela velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s) (WEHR e LOHR, 1999; BALTSAVIAS, 1999b; LILLESAND e KIEFER, 2000).

A projeção do pulso LASER no alvo é conhecida como *pegada (footprint)* e seu tamanho é função das características físicas de divergência do pulso à medida que se propaga (DALMOLIN e SANTOS, 2004). Um pulso LASER de alta divergência possui um ângulo de divergência da ordem de 1,0 mrad enquanto que em um de baixa divergência o ângulo é da ordem de 0,2 mrad (BRANDALIZE, 2002).

2.4.2 Estrutura de Dados LIDAR Proposta por MACHADO (2006)

MACHADO (2006) propõe uma estrutura dos dados LIDAR que consiste na divisão da nuvem de pontos com emprego de uma supermatriz, conforme apresentado na Figura 23. Nessa estrutura a unidade de trabalho é a célula da supermatriz, para a qual é escolhida *a priori*, pelo usuário, uma quantidade média de pontos.

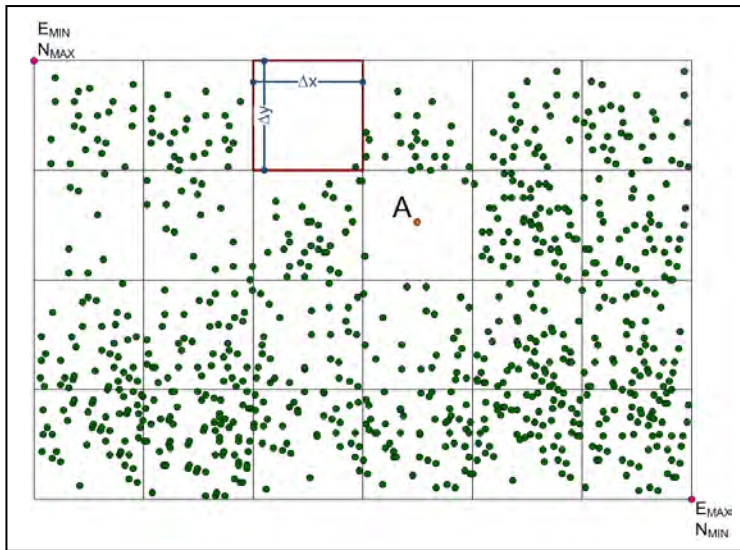


FIGURA 23 – SUPERMATRIZ PARA ESTRUTURAÇÃO DE DADOS LIDAR
 FONTE: Adaptado de Machado (2006)

A primeira tarefa é a definição das dimensões da supermatriz, que são obtidas a partir da definição de quantos pontos, em média, estarão contidos em cada célula. As Equações 05 e 06 apresentam a modelagem matemática para determinação das dimensões Δx e Δy .

$$\Delta x = \frac{(E_{MAX} - E_{MIN} + dE)}{ToAgX} \quad (05)$$

$$\Delta y = \frac{(N_{MAX} - N_{MIN} + dN)}{ToAgY}$$

onde:

- E_{MAX} e E_{MIN} são as coordenadas planimétricas máxima e mínima da direção X de todos os pontos da nuvem de pontos;
- N_{MAX} e N_{MIN} são as coordenadas planimétricas máxima e mínima da direção Y de todos os pontos da nuvem de pontos;
- Δx é o tamanho de cada célula na direção X (metros);
- Δy é o tamanho de cada célula na direção Y (metros);
- dE e dN são elementos finitos que garantem que os intervalos são fechados à esquerda e abertos à direita (metros);
- $ToAgX$ é o número de células da supermatriz na dimensão X; e
- $ToAgY$ é o número de células da supermatriz na dimensão Y.

$$ToAgX = \text{int}\left(\sqrt{\frac{N}{PtAgX}}\right) \quad (06)$$

$$ToAgY = \text{int}\left(\sqrt{\frac{N}{PtAgY}}\right)$$

onde:

- N é o número total de pontos na nuvem de pontos;
- $PtAgX$ é o numero de pontos desejado por célula na dimensão X; e
- $PtAgY$ é o numero de pontos desejado por célula na dimensão Y.

As coordenadas de um ponto A (Figura 24) no sistema de coordenadas da supermatriz (linha, coluna) são obtidas com as Equações 07.

$$\text{Col} = \text{int}\left[\left(\frac{(E - E_{MIN})}{\Delta x}\right) + 1\right] \quad (07)$$

$$\text{Lin} = \text{int}\left[\left(\frac{(N - N_{MIN})}{\Delta y}\right) + 1\right]$$

onde:

- E e N são as coordenadas planimétricas do ponto A;
- Lin e Col são as coordenadas do ponto A no sistema de coordenadas da supermatriz.

2.5 RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES A PARTIR DE LEVANTAMENTOS LIDAR

A reconstrução automática de edificações em terceira dimensão é um trabalho que vem sendo alvo de esforços de diversos pesquisadores ao redor do mundo com o objetivo de minimizar o trabalho manual realizado por restituidores, disponibilizando as informações tridimensionais das edificações presentes na superfície terrestre. MACHADO (2006, pg. 36-44) apresenta um resumo das diversas metodologias de extração automática e semiautomática de edificações existentes.

As aplicações desse produto em terceira dimensão vêm sofrendo forte incremento nos últimos anos com a popularização do uso de sistemas de informações geográficas na rede mundial de computadores (internet), disponíveis em diversos sítios e programas e, também, nos equipamentos de navegação terrestre. Essa popularização vem gerando uma demanda cada vez maior por mapas digitais com edificações em terceira dimensão e a restituição manual não apresenta solução satisfatória devido à complexidade de sua execução, o que eleva os custos de produção.

Na reconstrução de edificações com uso de levantamentos LIDAR, pode-se determinar os limites das edificações a partir da análise dos limites de todas as faces que formam a edificação (VOSSSELMAN, 1999). Posteriormente, o ajuste das retas, que formam os lados dessas faces, possibilita definir a orientação dessa edificação.

O operador Sobel pode ser aplicado na detecção das bordas externas de uma área que corresponde a uma edificação. A Equação 08 apresenta o operador Sobel nas direções X e Y, a Equação 09 a magnitude do vetor gradiente e a Equação 10 a direção do vetor gradiente.

$$G_Y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad G_X = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (08)$$

$$\nabla f = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (09)$$

$$\alpha(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (10)$$

Para eliminar os *pixels* redundantes nas bordas realiza-se um afinamento das bordas por supressão não-máxima. A estratégia básica da supressão não-máxima é manter um *pixel* somente se sua magnitude for maior ou igual à dos *pixels* vizinhos na direção do gradiente (perpendicular à direção da borda) (TOMMASELLI, 1999). A Figura 24 apresenta um exemplo de direções de pesquisa adotado na supressão não-máxima, para um ponto “A” qualquer.

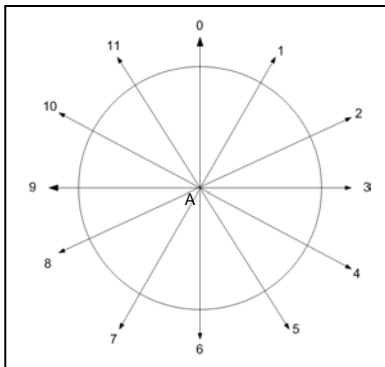


FIGURA 24 – DIREÇÕES DE PESQUISA DA SUPRESSÃO NÃO-MÁXIMA
 FONTE: Adaptado de Tommaselli (1999)

Diversas técnicas têm sido empregadas na reconstrução das coberturas das edificações, mas o ajuste de planos é uma solução comumente empregada em diversos trabalhos. LEMMENS et al. (1997) optou por ajustar planos horizontais com altura constante. VOSSSELMAN (1999), ROTTENSTEINER e BRIESE (2002), SANHUEZA (2007) e BOTELHO (2007) dividiram as coberturas de acordo com as diversas águas existentes, ajustando planos inclinados de forma a melhor representar as coberturas das edificações.

Um problema recorrente na definição dos limites das edificações é a presença de vegetação. Dependendo da extensão, forma e proximidade da edificação, a vegetação pode dificultar, ou impedir, o reconhecimento da forma da própria edificação, aglutinando-se a ela. MACHADO (2006) propôs um método para

eliminar a vegetação pela análise da cor, no sistema de cores CIELUV, de cada *pixel* presente na fotografia aérea. BOTELHO (2007), de posse de um MDS oriundo de levantamento LIDAR na forma de malha regular, utilizou uma imagem do sensor Quickbird (bandas 3 e 4) como meio de detecção de vegetação *pixel a pixel* nesse MDS.

2.6 IDENTIFICAÇÃO DA VEGETAÇÃO PROPOSTA POR MACHADO (2006)

MACHADO (2006, pág. 123 a 125) propôs um método de identificação da cor verde de um *pixel* da fotografia aérea (se é verde ou não) no espaço de cores CIELUV. Parte-se da radiometria do *pixel* da fotografia aérea no espaço RGB, determina-se a correspondente cor no espaço CIELUV e, por fim, faz-se a classificação da cor do *pixel* (verde ou não verde).

A transformação do espaço RGB para o espaço CIELUV é realizada em duas etapas. Na primeira é feita a transformação para o espaço XYZ e, depois, desse espaço para o CIELUV. A modelagem matemática dessas transformações é apresentada nas Equações 11 a 18.

$$\begin{aligned} R^N &= R / 255 \\ G^N &= G / 255 \\ B^N &= B / 255 \end{aligned} \tag{11}$$

Se $R^N > 0,04045$

$$R^* = 100 * \left[\frac{R^N + 0,055}{1,055} \right]^{2,4}$$

(12)

Se não

$$R^* = 100 * \left[\frac{R^N}{12,92} \right]$$

Se $G^N > 0,04045$

$$G^* = 100 * \left[\frac{G^N + 0,055}{1,055} \right]^{2,4}$$

(13)

Se não

$$G^* = 100 * \left[\frac{G^N}{12,92} \right]$$

Se $B^N > 0,04045$

$$B^* = 100 * \left[\frac{B^N + 0,055}{1,055} \right]^{2,4}$$

(14)

Se não

$$B^* = 100 * \left[\frac{B^N}{12,92} \right]$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R^* \\ G^* \\ B^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

Se $Y > 0,08856$

$$L = 116 * [Y]^{1/3} - 16$$

(16)

Se não

$$L = 903,3^Y$$

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

(17)

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

$$U = 13 \times L \times (u' - 0,1978) \quad (18)$$

$$V = 13 \times L \times (v' - 0,4683)$$

A relação do domínio $R \equiv [0 \ 255]$, $G \equiv [0 \ 255]$ e $B \equiv [0 \ 255]$ tem contradomínio $L \equiv [0 \ 100]$, $U \equiv [-83,079751 \ 175,053036]$ e $V \equiv [-134,116076 \ 107,401365]$.

MACHADO (2006) definiu então a região da cor Verde no espaço CIELUV por meio do ajuste de retas ($V = a \cdot U + b$), determinando valores de variação das variáveis L (faixa de luminosidade), a (coeficiente angular) e b (coeficiente linear), conforme apresentado na Tabela 01. A determinação é feita enquadrando-se as variáveis U e V no gráfico da Figura 25 em uma das retas, de acordo com seu índice L . Se o ponto de coordenadas (U, V) ficar acima da reta correspondente, a cor verde do *pixel* é confirmada, sendo classificado como vegetação.

TABELA 01 – LUMINOSIDADE CIELUV E PARÂMETROS DE RETAS

FAIXA DE LUMINOSIDADE (L)	COEFICIENTE ANGULAR (a)	COEFICIENTE LINEAR (b)	Número da Reta na Figura 25
[15 a 50]	1,172291	23,402487	1
(50 a 70]	1,497580	63,752759	2
(70 a 85]	1,382398	124,997724	3
(85 a 90]	1,383178	145,080374	4

FONTE: MACHADO (2006)

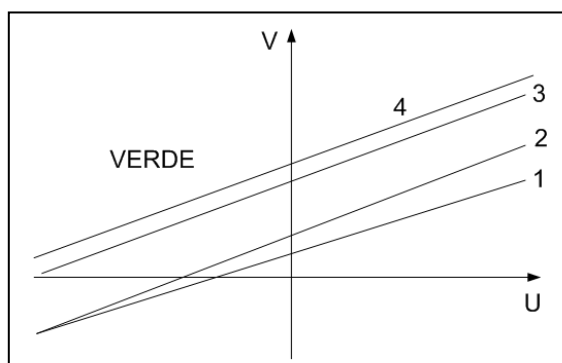


FIGURA 25 – RETAS DELIMITADORAS DA COR VERDE NO ESPAÇO CIELUV

FONTE: Machado (2006)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 RECURSOS DE EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS

O Laboratório de Fotogrametria, do Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, disponibilizou um computador Core 2 Duo, com processador T5550, memória RAM de 4,00 GB e disco rígido de 160 GB para uso exclusivo na execução da presente proposta de pesquisa.

O sistema operacional utilizado é o Windows Vista[®] e o programa no qual serão desenvolvidos os algoritmos é o MATLAB, versão 5.3. Além dele, serão utilizados os programas SURFER (v. 8.0) para visualização dos modelos de superfície, ERDAS ViewFinder (v. 2.1) para visualização das ortoimagens e medição de coordenadas de seus *pixels*, Microsoft Office 2007, para escrituração e geração de planilhas e apresentações, e XNVIEW (v. 1.90) para visualização e manipulação de imagens.

3.2 ÁREAS DE ESTUDO

As áreas utilizadas como elemento de pesquisa foram selecionadas a partir de dois levantamentos realizados pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), sendo que cada levantamento foi composto por dois recobrimentos, sendo um fotogramétrico e o outro LIDAR.

Desses levantamentos foram selecionadas cinco áreas de pesquisa, sendo que suas escolhas foram decorrentes da disponibilidade dos dados à época da realização dos estudos, das especificações dos levantamentos e das características dos objetos artificiais (edificações) presentes em cada área.

O primeiro levantamento foi executado sobre a região do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, cidade de Curitiba - Paraná com recobrimento realizado em Agosto de 2004. O bloco fotogramétrico (Bloco Centro Politécnico) era composto por seis fotografias aéreas, sendo que apenas um par de fotografias foi utilizado. Do levantamento LIDAR estavam disponíveis dois arquivos de texto, cada um contendo as coordenadas planialtimétricas e a intensidade de retorno do primeiro e do último pulso LASER, respectivamente.

Nessa fotografia foi selecionada uma área que continha uma edificação elevada, com geometria regular, áreas planas no seu entorno e localizada na extremidade da fotografia. Essa área foi denominada de ESCOLA e é apresentada em destaque na fotografia aérea 023 pela Figura 26 e ampliada na Figura 27.



FIGURA 26 – ÁREA ESCOLA NA FOTOGRAFIA 023 (VERMELHO)

FONTE: O Autor (2010)



FIGURA 27 – ÁREA ESCOLA (FOTOGRAFIA 23)

FONTE: O Autor (2010)

O segundo levantamento compreende um trecho do bairro Bacacheri, cidade de Curitiba (Paraná), com recobrimento realizado em dezembro de 2006, sendo formado por 21 fotografias aéreas (numeradas de 30 a 50), sendo denominado de Bloco Bacacheri. Nessa região foram selecionadas quatro áreas, todas cobertas por mais de uma fotografia aérea, denominadas DUPLA, VILA, ARQUIT e QUADRA.

A seleção da área DUPLA foi decorrente da altura das edificações, da semelhança existente entre elas e da ocorrência de cobertura com pequenas edificações. A área VILA foi selecionada em decorrência do fato de existirem diversas edificações com propriedades geométricas (orientação geral, área, profundidade e comprimento) semelhantes agrupadas em um pequeno espaço geográfico. A seleção da área ARQUIT ocorreu devido a existência de duas edificações de elevada altura, recortadas e com bordas não lineares. Por fim, a área QUADRA foi selecionada por representar uma porção geográfica urbana típica da região recoberta pelo levantamento, com presença de edificações de pequeno porte, isoladas ou agrupadas, cobertas por vegetação e, também, pela presença de duas edificações de grande porte.

A Figura 28 apresenta as áreas no contexto do Bloco Bacacheri, o Quadro 01 descreve a relação de fotografias que recobrem cada área e as que foram utilizadas na presente pesquisa e as Figuras 29 a 32 apresentam essas áreas de forma isolada e ampliada.

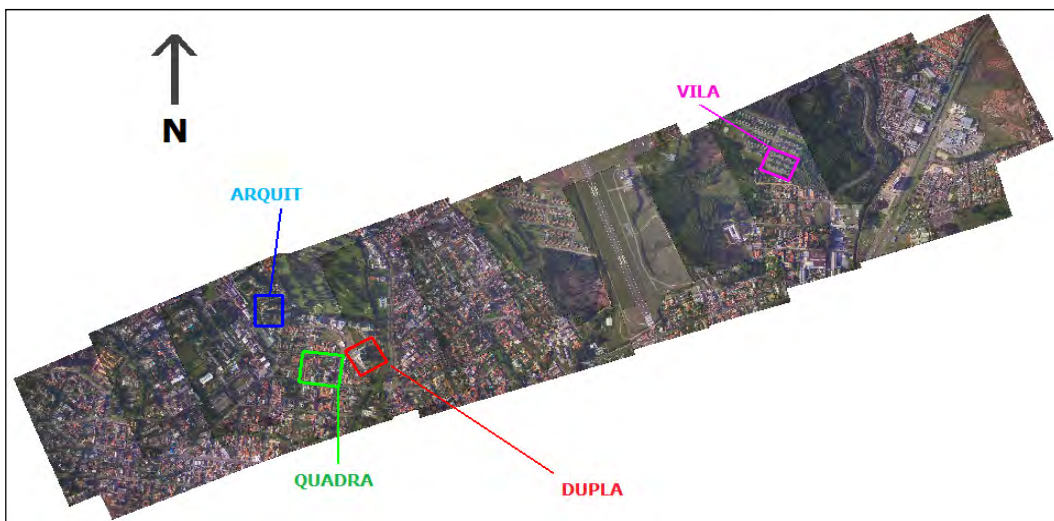


FIGURA 28 – BLOCO BACACHERI COM ÁREAS EM DESTAQUE
 FONTE: O Autor (2010)

Nome Área de Estudo	Quantidade de Fotografias Que Recobrem a Área	Número das Fotografias Que Recobrem a Área
DUPLA	04	36, 37, 42 e 43
VILA	05	30, 31, 32, 48 e 49
ARQUIT	03	41, 42 e 43
QUADRA	05	37, 38, 41, 42 e 43

QUADRO 01 – ÁREAS DO BLOCO BACACHERI
 FONTE: O Autor (2010)

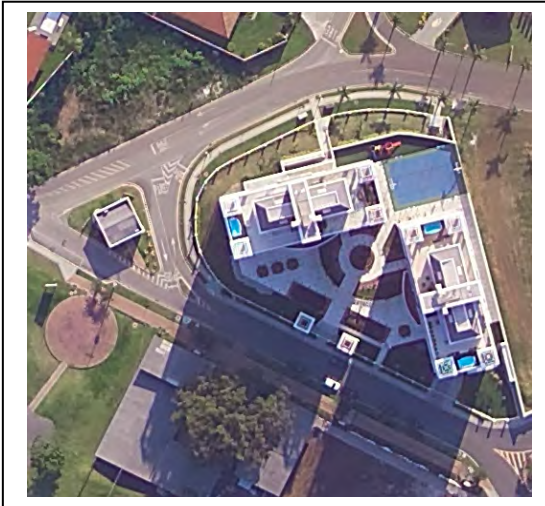


FIGURA 29 – ÁREA DUPLA (FOTOGRAFIA 37)
FONTE: O Autor (2010)



FIGURA 30 – ÁREA VILA (FOTOGRAFIA 48)
FONTE: O Autor (2010)

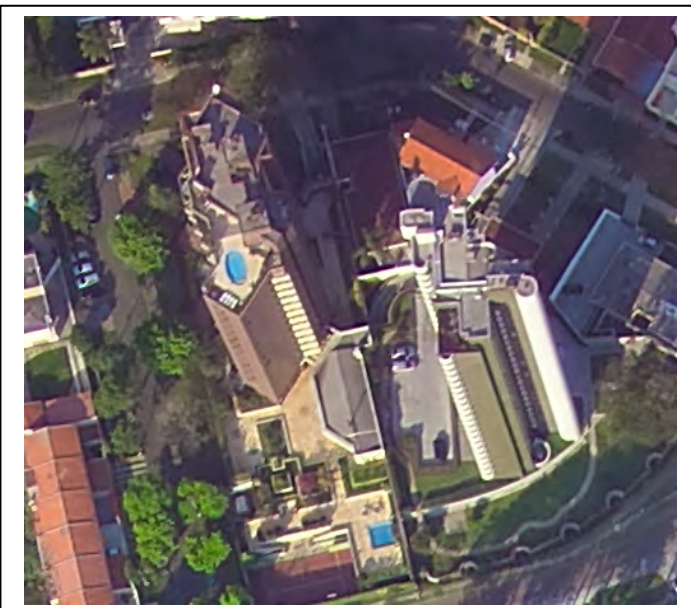


FIGURA 31 – ÁREA ARQUIT (FOTOGRAFIA 41)
FONTE: O Autor (2010)

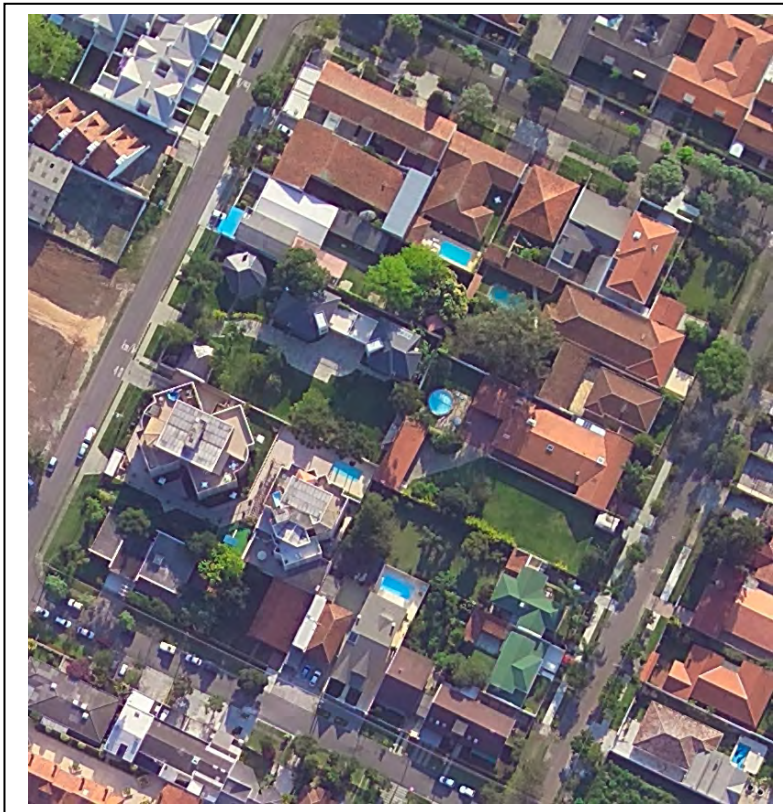


FIGURA 32 – ÁREA QUADRA (FOTOGRAFIA 43)
FONTE: O Autor (2010)

A câmera fotográfica digital utilizada em ambos os levantamentos foi a KODAK Professional DCS PRO 14n Digital Câmera, sendo que em cada voo fotogramétrico foi utilizado um conjunto de lentes com focais nominais diferentes (50 mm e 35 mm, respectivamente). A Figura 33 e o Quadro 02 apresentam a câmera e seus principais dados técnicos. Os parâmetros de orientação interior (POI) de cada voo fotogramétrico são apresentados nas Tabelas 02 e 03, sendo determinados por SANTOS JÚNIOR (2007) e CORTÊS (2007), respectivamente.



FIGURA 33 – CÂMERA KODAK DCS PRO 14N
FONTE: <http://www.boadica.com.br/dica/287/dcs-pro-14n>

Câmera	Kodak Digital SLR
Lentes	Nikon F
Tipo Sensor	CMOS sensor
Área Sensor	36 x 24 mm
Total de <i>pixels</i>	13,89 milhões (4560 x 3048)
Total de <i>pixels</i> úteis	13,7 milhões (4536 x 3024)
Resolução Geométrica	7,9 x 7,9 μ m
Tamanhos Disponíveis	4536 x 3024 / 3024 x 2016 / 2268 x 1512 / 1134 x 765

QUADRO 02 – KODAK DCS PRO 14N

FONTE: <http://www.dpreview.com/reviews/kodakdcs14n/page2.asp>

TABELA 02 – POI BLOCO CENTRO POLITÉCNICO

Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão
c	51,902 mm	0,032 mm
x0	+ 0,033 mm	0,022 mm
y0	- 0,070 mm	0,012 mm
K1	$-3,8430896 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-2}$	$1,715 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-2}$
K2	$+1.1695517 \times 10^{-8} \text{ mm}^{-4}$	$5,180 \times 10^{-9} \text{ mm}^{-4}$
K3	0,00	0,00
P1	$-4,2651702 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-2}$	$2,513 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-2}$
P2	0,00	0,00

FONTE: Santos Júnior (2007)

TABELA 03 – POI BLOCO BACACHERI

Parâmetro	Valor	Desvio-Padrão
c	35,9348 mm	0,0074 mm
x0	0,1525 mm	0,0069 mm
y0	0,1391 mm	0,0035 mm
K1	$-6,6060369 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-2}$	$9,59 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-2}$
K2	$5,7049916 \times 10^{-8} \text{ mm}^{-4}$	$2,22 \times 10^{-9} \text{ mm}^{-4}$
K3	0,00	0,00
P1	0,00	0,00
P2	0,00	0,00

FONTE: Côrtes (2007)

Os parâmetros de orientação exterior (POE) das fotografias aéreas foram determinados em ambos os voos por meio de aerotriangulações. Para determinar os POE (X_0 , Y_0 , Z_0 , κ , φ , ω) das fotografias do Bloco Centro Politécnico foi realizada, pelo autor, uma aerotriangulação utilizando duas fotografias (23 e 24). Já os POE do Bloco Bacacheri foram determinados em uma aerotriangulação realizada por CÔRTEZ (2007). A Tabela 04 apresenta os POE das duas fotografias (23 e 24) do Bloco Centro Politécnico e a Tabela 05 os POE das fotografias 30, 31, 32, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 48 e 49, que recobrem as áreas de pesquisa do Bloco Bacacheri.

TABELA 04 – POE FOTOGRAFIAS DO BLOCO CENTRO POLITÉCNICO

Fotografia	Parâmetros		Desvio-Padrão	Fotografia	Parâmetros		Desvio-Padrão
23	X0	677657,32 m	0,703 m	24	X0	677739,13 m	0,136 m
	Y0	7183905,96 m	1,164 m		Y0	7184063,28 m	0,087 m
	Z0	2253,81 m	0,054 m		Z0	2254,89 m	0,014 m
	ω	-0,073088692 rad	0,003 rad		ω	-0,080002791 rad	0,000 rad
	φ	0,041680785 rad	0,002 rad		φ	0,045240938 rad	0,001 rad
	κ	1,190632140 rad	0,000 rad		κ	1,194059682 rad	0,001 rad

FONTE: O Autor (2010)

TABELA 05 – POE FOTOGRAFIAS DO BLOCO BACACHERI

Fotografia	Parâmetros		Desvio-Padrão	Fotografia	Parâmetros		Desvio-Padrão
30	X0	679253,41 m	0,703 m	41	X0	676135,42 m	0,208 m
	Y0	7189103,57 m	1,164 m		Y0	7188200,57 m	0,472 m
	Z0	1921,81 m	0,054 m		Z0	1926,73 m	0,020 m
	ω	0,009059352 rad	0,003 rad		ω	0,016021750 rad	0,001 rad
	φ	0,044266192 rad	0,002 rad		φ	-0,032926081 rad	0,001 rad
	κ	3,449469768 rad	0,000 rad		κ	0,420257521 rad	0,000 rad
31	X0	678905,98 m	0,396 m	42	X0	676483,18 m	0,348 m
	Y0	7188975,72 m	0,762 m		Y0	7188347,84 m	0,366 m
	Z0	1921,74 m	0,028 m		Z0	1926,58 m	0,017 m
	ω	0,021863860 rad	0,002 rad		ω	0,004991944 rad	0,001 rad
	φ	0,049219632 rad	0,001 rad		φ	-0,029436154 rad	0,001 rad
	κ	3,458609643 rad	0,000 rad		κ	0,394208252 rad	0,000 rad
32	X0	678563,59 m	0,346 m	43	X0	676829,96 m	0,192 m
	Y0	7188843,96 m	0,554 m		Y0	7188487,72 m	1,188 m
	Z0	1923,85 m	0,016 m		Z0	1926,81 m	0,026 m
	ω	0,020285883 rad	0,002 rad		ω	0,022262817 rad	0,004 m
	φ	0,050997652 rad	0,001 rad		φ	-0,024646759 rad	0,001 rad
	κ	3,447789026 rad	0,000 rad		κ	0,373468222 rad	0,000 rad
36	X0	677167,09 m	0,178 m	48	X0	678608,27 m	0,471 m
	Y0	7188331,92 m	0,286 m		Y0	7189150,86 m	1,368 m
	Z0	1920,85 m	0,011 m		Z0	1920,88 m	0,050 m
	ω	0,015010806 rad	0,001 rad		ω	-0,005975683 rad	0,004 rad
	φ	0,044480876 rad	0,000 rad		φ	-0,047351654 rad	0,001 rad
	κ	3,472414617 rad	0,000 rad		κ	0,441208644 rad	0,000 rad
37	X0	676815,18 m	0,001 m	49	X0	678957,12 m	0,211 m
	Y0	7188204,02 m	0,001 m		Y0	7189299,13 m	0,364 m
	Z0	1918,69 m	0,000 m		Z0	1921,12 m	0,011 m
	ω	0,014764608 rad	0,224 rad		ω	0,013531951 rad	0,001 rad
	φ	0,049138770 rad	0,409 rad		φ	-0,040938610 rad	0,001 rad
	κ	3,483299003 rad	0,013 rad		κ	0,442315496 rad	0,000 rad
38	X0	676464,44 m	0,708 m				
	Y0	7188066,62 m	0,808 m				
	Z0	1918,12 m	0,115 m				
	ω	0,019028423 rad	0,044 rad				
	φ	0,058796894 rad	0,038 rad				
	κ	3,462114935 rad	0,006 rad				

FONTE: Côrtes (2007)

O levantamento LIDAR foi realizado com uso do sistema LIDAR OPTECH ALTM 2050/INS GPS APPLANIX do LACTEC, apresentado na Figura 34. O Quadro 03 descreve suas principais características.



FIGURA 34 – SISTEMA LIDAR OPTECH ALTM 2050

FONTE: http://www.gisdevelopment.net/magazine/malaysia/2006/july-sep/22_1.htm

Fabricante	OPTECH
Freqüência de Repetição dos Pulsos (PRF)	50.000 pulsos
Freqüência de Perfilamento	até 35 Hz
Ângulo de Abertura	0° a ± 20°
Altura Máxima	2000 m
Dados Gravados	1° Pulso Último Pulso Intensidade

QUADRO 03 – CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA LIDAR OPTECH ALTM2050/INS GPS APPLANIX

FONTE: Adaptado de Machado (2006) e Santos Júnior (2007)

Os produtos finais dos dois levantamentos foram dois conjuntos de pontos, contendo os primeiros e os últimos sinais de retorno. O Quadro 04 apresenta a densidade de pontos LIDAR de cada área de pesquisa, e as Figuras 35 a 39, a distribuição dos pontos nessas áreas.

Área	Total de Pontos LIDAR	Área (m ²)	Densidade (pontos / m ²)
PRÉDIO	6.783	5.040	1,34
DUPLA	61.560	27.966	2,20
VILA	160.787	52.891	3,04
ARQUIT	85.937	30.544	2,81
QUADRA	151.108	76.626	1,97

QUADRO 04 – DENSIDADE DE PONTOS LIDAR NAS ÁREAS DE PESQUISA

FONTE: O Autor (2010)

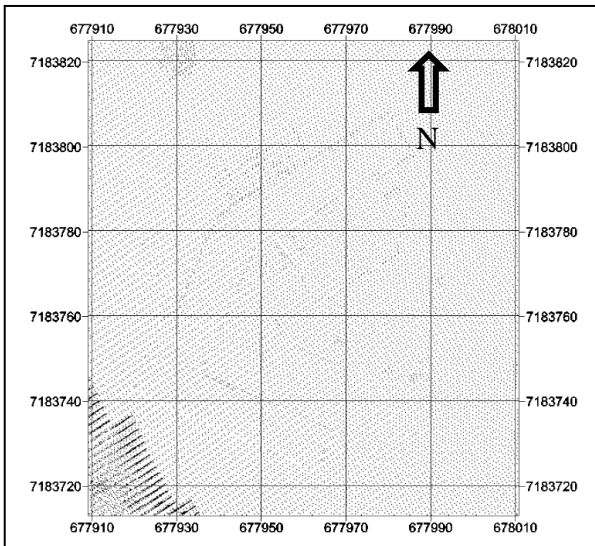


FIGURA 35 – DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA ESCOLA)
 FONTE: O Autor (2010)

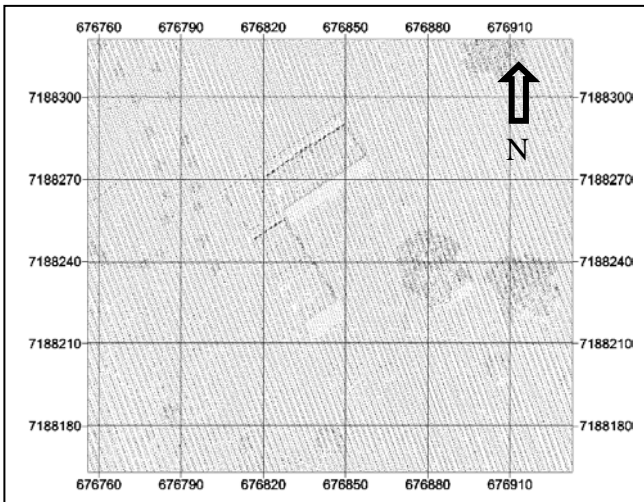


FIGURA 36 – DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA DUPLA)
 FONTE: O Autor (2010)

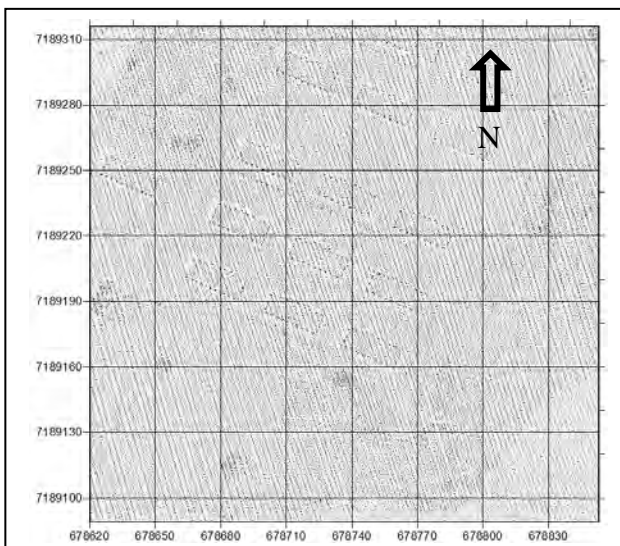


FIGURA 37 – DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA VILA)
 FONTE: O Autor (2010)

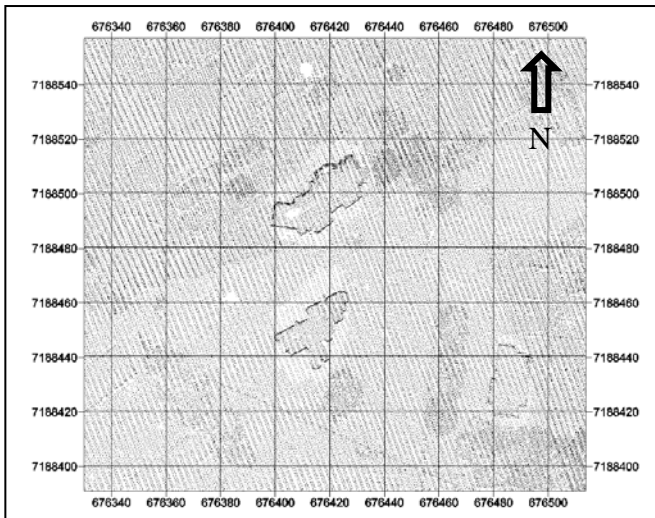


FIGURA 38 – DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA ARQUIT)
 FONTE: O Autor (2010)

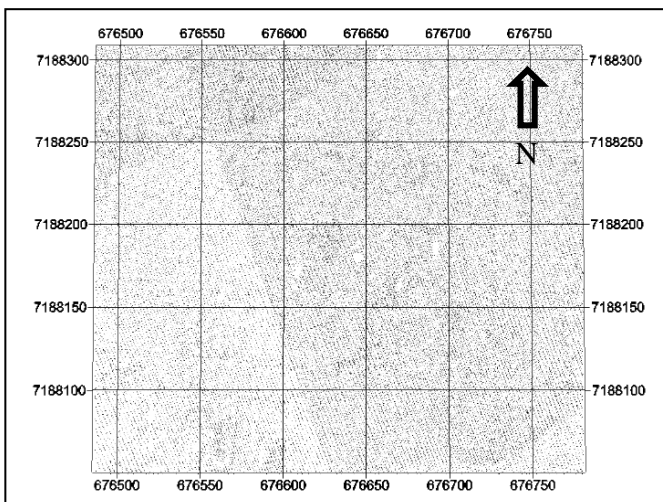


FIGURA 39 – DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS LIDAR (ÁREA QUADRA)
 FONTE: O Autor (2010)

Posteriormente, apenas para a região do Bloco Bacacheri, foi realizada a geração do MDT, obtido a partir da extração das edificações do conjunto de pontos do levantamento original dessa região. O programa utilizado foi o Terrascan, desenvolvido pela empresa finlandesa Terrasolid Ltda. Esse processo foi realizado pelo LACTEC e o Laboratório de Fotogrametria recebeu os arquivos já manipulados. Com isso, para a região do Bloco Bacacheri estavam disponíveis dois conjuntos de pontos LIDAR, um contendo o conjunto de pontos original, que representava o MDS, e outro manipulado que representava o MDT.

3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Introdução

A metodologia proposta na presente pesquisa tem por objetivo principal a reconstrução de edificações, obtidas a partir de levantamentos LIDAR, para posterior geração de ortoimagens verdadeiras com a detecção das áreas oclusas. Não está presente nessa metodologia a substituição dos *pixels* oclusos das ortoimagens verdadeiras por outros *pixels* não oclusos, provenientes de ortoimagens verdadeiras adjacentes, nem a aplicação de técnicas de ajuste radiométrico para homogeneização dos *pixels*. Essa etapa posterior consta nas propostas de prosseguimento da pesquisa.

Deve-se ressaltar que a reconstrução das edificações não é uma etapa da geração de ortoimagens verdadeiras. Ela é sim, uma condição necessária para que o produto final ortomagem verdadeira apresente qualidade geométrica. Uma característica importante da metodologia proposta é a busca pela simplicidade como mecanismo de minimização do esforço computacional. Com isso, as tarefas que apresentavam possibilidade de serem divididas o foram, desde que não houvesse prejuízo da qualidade geométrica do produto final.

A Figura 40 apresenta a sequência da metodologia proposta, contendo as etapas referentes à reconstrução das edificações (em azul) e a geração das ortoimagens verdadeiras (em verde). As etapas assinaladas com um “x” (etapas 10 e 11) não foram realizadas na presente metodologia, sendo incluídas nas sugestões para realização de pesquisas futuras.

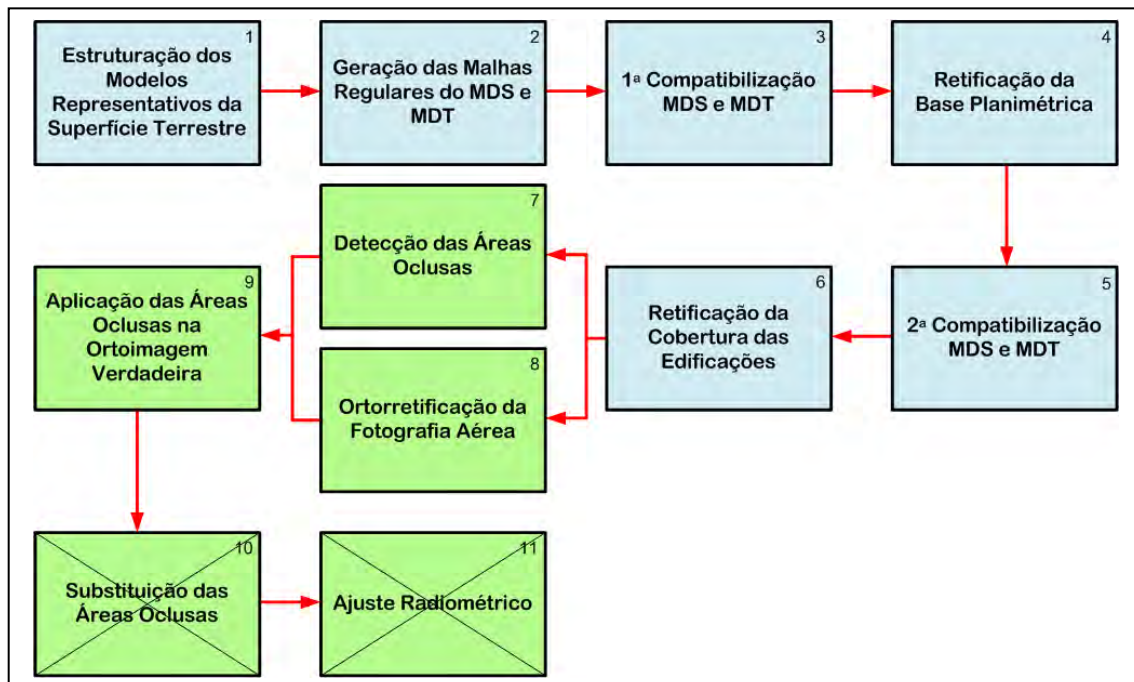


FIGURA 40 – METODOLOGIA PROPOSTA
 FONTE: O Autor (2010)

3.3.2 Estruturação dos Modelos Representativos da Superfície Terrestre

Como estrutura dos dados representativos do terreno escolheu-se a estrutura proposta por MACHADO (2006), descrita no item 2.4.2, que divide a nuvem de pontos do levantamento LIDAR em uma supermatriz. Essa estruturação teve por objetivo facilitar o acesso aos pontos originais do levantamento LIDAR, minimizando o esforço computacional. A partir das células da supermatriz criadas, os pontos LIDAR foram acessados e utilizados na criação das malhas regulares do MDS e do MDT, conforme o caso.

3.3.3 Geração das Malhas Regulares dos Modelos Digitais de Superfície e do Terreno

Para se gerar uma ortofimagem verdadeira existe a necessidade de se utilizar os modelos representativos do terreno na forma de malhas regulares. Na metodologia proposta, a geração das malhas ocorre antes da geração das ortofotogramas verdadeiras, de forma que os dados regulares possam ser manipulados

e retificados, criando condições para que as ortoimagens apresentem propriedades geométricas mais fidedignas com as fotografias aéreas e com o terreno.

A partir dos dados estruturados, os pontos que formam as malhas regulares que representam o MDS e o MDT foram gerados a partir de diferentes conjuntos de pontos do levantamento LIDAR e com o emprego de diferentes métodos de interpolação. A malha regular do MDS foi gerada a partir de todo o conjunto de pontos do levantamento LIDAR e a do MDT a partir desse mesmo conjunto de pontos sem as edificações (extraídas com auxílio do programa Terrascan).

No caso do MDS optou-se por utilizar o método de interpolação do Vizinho Mais Próximo com a finalidade de se manter as propriedades originais das bordas das edificações, evitando a ocorrência de zonas de declividade constante, ou quase constante, nas regiões de acentuada declividade, situadas entre as bordas das edificações e o terreno. Nele a altitude do ponto A (figura 41) recebe a altitude do ponto k, mais próximo de A (menor distância euclidiana no plano XY), conforme as Equações 19 e 20.

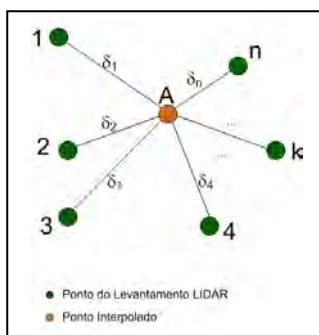


FIGURA 41 – INTERPOLAÇÃO DA ALTITUDE DO PONTO A (VIZINHO MAIS PRÓXIMO)
 FONTE: O Autor (2010)

$$\delta_{i_{min}} = \left(\sqrt{(X_i - X_A)^2 + (Y_i - Y_A)^2} \right), \text{ para todo } i \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (19)$$

$$h_A = h_k \quad (20)$$

onde:

- δ_i é a distância de um ponto “i” qualquer ao ponto A;
- h_k é a altitude do Ponto “k” mais próximo de A (com menor δ_i);
- h_A é a altitude do Ponto A.

No caso do MDT optou-se por utilizar a interpolação de pontos a partir dos triângulos formados pelos vértices dos Triângulos de Delaunay, com o objetivo de se suavizar o declive do terreno, conforme apresentado na Figura 42. As coordenadas desconhecidas do ponto P (X_P , Y_P , h_P) em um triângulo qualquer, podem ser determinadas a partir das coordenadas conhecidas dos vértices A (X_A , Y_A , h_A), B (X_B , Y_B , h_B) e C (X_C , Y_C , h_C) por meio da aplicação das Equações 21 e 22. Em ambas as malhas, o elemento de resolução do terreno (ERT) utilizado foi o mesmo da fotografia aérea. Essa ação minimiza as possibilidades de ocorrerem erros decorrentes da Diferença de Resolução (conforme apresentado no item 2.3.3.6.1 Método *Z-Buffer*).

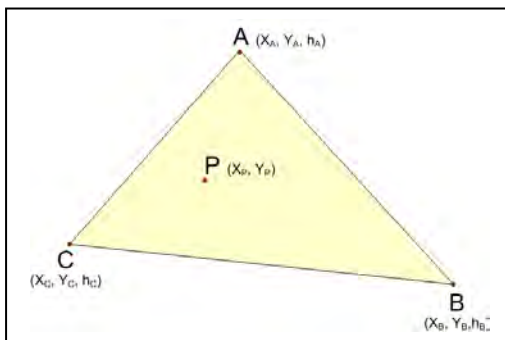


FIGURA 42 – PONTO P EM UM TRIÂNGULO QUALQUER
 FONTE: O Autor (2010)

$$H = \begin{bmatrix} X_P & Y_P & h_P & 1 \\ X_A & Y_A & h_A & 1 \\ X_B & Y_B & h_B & 1 \\ X_C & Y_C & h_C & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\det H = 0 \quad (22)$$

Os limites das malhas regulares de cada área são determinados pela aplicação da equação de colinearidade inversa (Equação 02) nos limites dos trechos das fotografias aéreas, conforme apresentado na Figura 43. O recorte de cada área em diversas fotografias fez com que fossem calculados mais de um limite para cada área. Como solução optou-se por utilizar, para cada área, o valor do conjunto das coordenadas dos cantos superior esquerdo e inferior direito de forma que todas as áreas determinadas por todas as fotografias fossem enquadradas, conforme

apresentado na Figura 44. Esses limites foram utilizados na geração das malhas regulares, sendo iguais para as malhas do MDS e do MDT de cada área.

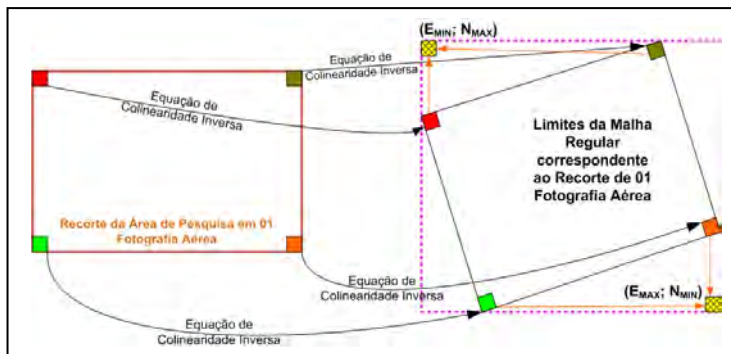


FIGURA 43 – DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DA MALHA REGULAR A PARTIR DO RECORTE DE UMA FOTOGRAFIA ÀEREA

FONTE: O Autor (2010)

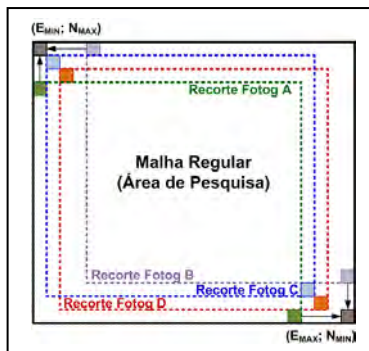


FIGURA 44 – DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DA MALHA REGULAR FINAL A PARTIR DOS LIMITES PARCIAIS DE MAIS DE UMA MALHA REGULAR

FONTE: O Autor (2010)

3.3.4 Primeira Compatibilização entre o MDS e o MDT

Devido ao fato das malhas regulares do MDT e do MDS serem geradas com o emprego de interpoladores diferentes, os pontos dessas malhas, com as mesmas coordenadas planimétricas (i,j) , que deveriam obrigatoriamente ter as mesmas coordenadas altimétricas (i,j) , tais como, os pontos do terreno, acabam não a tendo, o que gera a necessidade de correção dessas distorções nos modelos.

Existem casos nos quais essa não igualdade ocorre, e isso é que diferencia os próprios modelos, como no caso das edificações. Esse é o objetivo da utilização das malhas do MDS e do MDT, qual seja, de possuir dois modelos, um com as edificações e o terreno e outro somente com o terreno.

Com isso, é verifica-se que o objetivo dessa etapa de trabalho é o de harmonizar as duas malhas regulares, obrigando que as entidades presentes no espaço geográfico, comuns a ambos os modelos, como o terreno, por exemplo, apresentem as mesmas coordenadas planialtimétricas.

Por fim, procura-se realizar uma filtragem na vegetação existente no MDS, substituindo sua informação altimétrica pela do terreno disponível no MDT. O filtro utilizado foi o proposto por MACHADO (2006), conforme descrito no item 2.6 Identificação da Vegetação Proposta por MACHADO (2006).

Pode-se exemplificar o processo com a apresentação da Figura 45. Nela o terreno é representado como um plano de altitude constante na cor verde na malha regular do MDT. Já na malha regular do MDS, o mesmo terreno é representado por outro plano, também de altitude constante, mas com altitude diferente (na cor laranja). Essa diferença de altitude entre os planos ocorre devido ao uso de interpoladores diferentes na geração dos dois modelos. Após a primeira Compatibilização, o terreno apresenta a mesma altitude nas duas malhas. No caso das edificações A e B, cujas altitudes são diferentes nas malhas regulares do MDS e do MDT não existe modificação a ser realizada. As altitudes dessas edificações presentes no MDS representam suas coberturas e no MDT suas bases. No caso da vegetação C, procura-se, com a aplicação do filtro proposto por MACHADO (2006), identificar a vegetação existente no MDS, atribuindo a altitude do MDT a essas regiões.

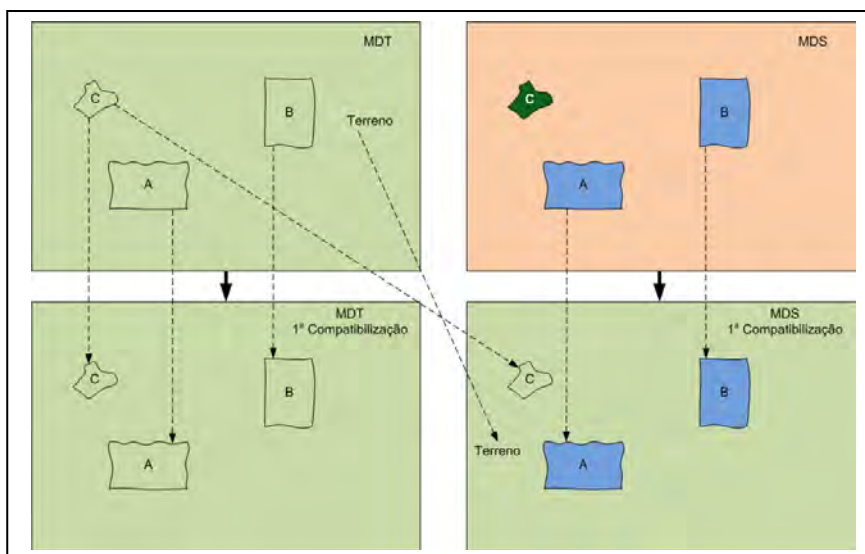


FIGURA 45 – 1ª COMPATIBILIZAÇÃO ENTRE O MDS E O MDT

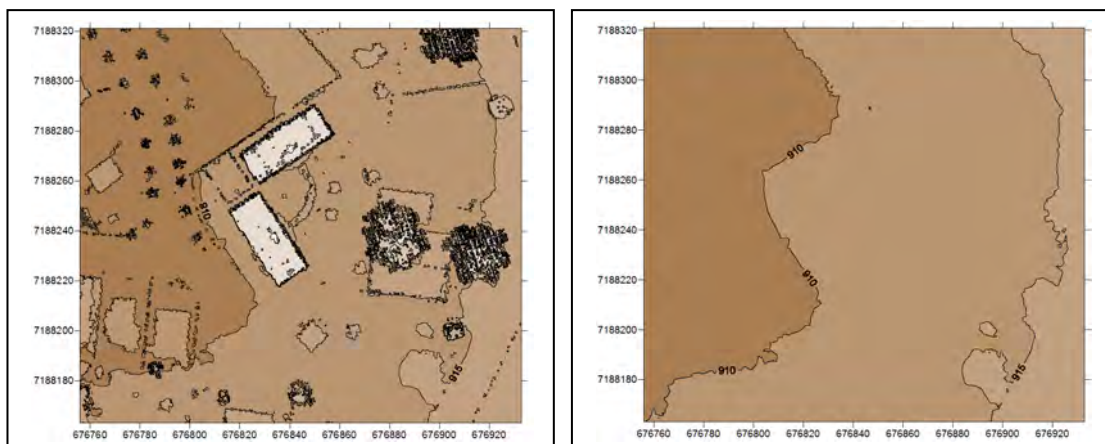
A implementação da primeira compatibilização foi realizada com o auxílio da malha regular do modelo digital de superfície normalizado (MDSn), decorrente da subtração da malha regular do MDT a partir da malha regular do MDS, e de um filtro altimétrico, denominado Filtro de Terreno. Se o valor absoluto da componente altimétrica do elemento $MDSn(i,j)$ é inferior ao do Filtro de Terreno, isso indica que esse elemento pertence ao terreno. Como resultado, o elemento $MDS(i,j)$ recebe a mesma altitude do elemento $MDT(i,j)$. Essa operação possibilita que os pontos do terreno possuam as mesmas coordenadas altimétricas nos dois modelos (MDS e MDT). O algoritmo abaixo apresenta essa rotina.

- Para $MDSn(i,j)$:

- Se $Abs(MDSn(i,j)) < \text{Filtro de Terreno}$

Então $MDS(i,j) = MDT(i,j)$

As Figuras 46 e 47 apresentam o MDS e o MDT de um mesmo espaço geográfico, antes e depois da primeira compatibilização. Nesse exemplo foi utilizado um Filtro de Terreno de 5 metros.



(A) MDS ANTES DA 1ª HARMONIZAÇÃO

(B) MDT ANTES DA 1ª HARMONIZAÇÃO

FIGURA 46 – MODELOS DIGITAIS ANTES DA 1ª COMPATIBILIZAÇÃO ENTRE O MDS E O MDT
 FONTE: O Autor (2010)

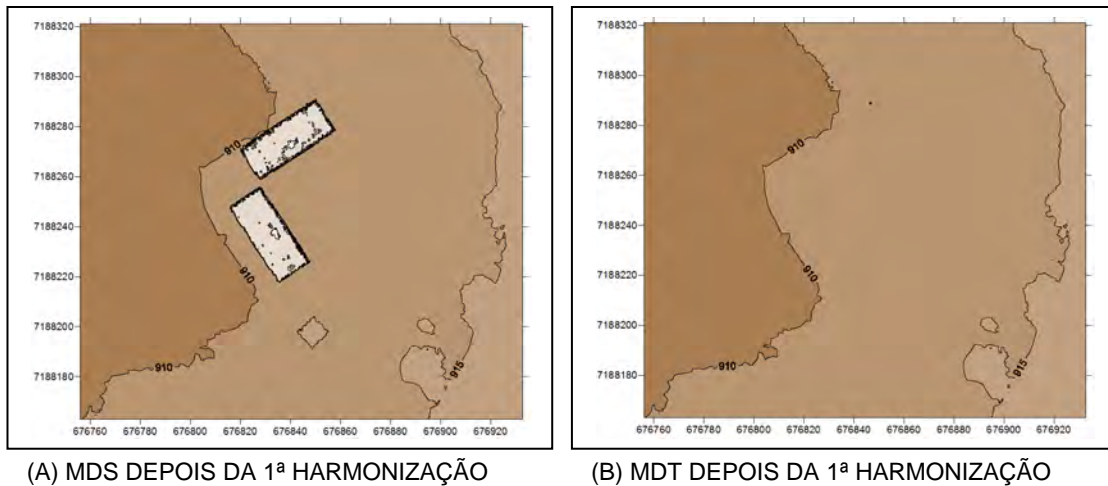


FIGURA 47 – MODELOS DIGITAIS DEPOIS DA 1ª HARMONIZAÇÃO ENTRE O MDS E O MDT
 FONTE: O Autor (2010)

3.3.5 Retificação da Base Planimétrica

De posse das duas malhas regulares harmonizadas inicia-se a retificação das bases das edificações presentes no MDS. Essa retificação visa, essencialmente, restabelecer as bordas das edificações existentes no espaço geográfico a ser trabalhado, com o emprego de técnicas de ajustamento de retas, segmentação de imagens, morfologia matemática e aplicação de filtros sobre as imagens.

A metodologia prevê que a retificação da base planimétrica seja realizada em duas fases distintas, sendo que na primeira é feita a detecção das bordas dos polígonos e na segunda essas bordas são ajustadas e os vértices dos novos polígonos determinados. O produto final dessa etapa é uma imagem binária da área, com as bordas retificadas das entidades estabelecidas, que representa a base planimétrica da área, similar a um original de restituição da planimetria no processo fotogramétrico tradicional de aquisição de dados.

Uma característica importante da metodologia é a busca da retificação das edificações com base na análise de cada entidade isolada, na qual se procura adaptar as diversas variáveis envolvidas nos processos para as situações e condições específicas de cada edificação.

3.3.5.1 Detecção das Bordas das Edificações

A detecção das bordas das edificações compreende uma série de ações que visam gerar uma imagem binária, denominada Imagem de Desnível. Ela contém as bordas não retificadas das edificações e de outras entidades espaciais, e que será a base para o ajustamento das bordas e determinação dos vértices das edificações na fase seguinte.

O elemento primário de trabalho é uma imagem gerada a partir do MDSn da área de trabalho, denominada Imagem de Desnível Provisória. Essa imagem é manipulada e processada de forma a eliminar as entidades espaciais com área inferior a um padrão estabelecido, e minimizar o efeito da vegetação ainda existente na reconstrução das edificações.

O processo é executado em duas etapas, sendo que, na primeira as bordas provisórias das edificações são estabelecidas a partir de um filtro altimétrico padrão. Na segunda, esse filtro altimétrico é ajustado para os padrões de altura de cada edificação. Essa adaptação minimiza o efeito da vegetação aglutinada à própria edificação na detecção de suas bordas finais não ajustadas. A Figura 48 apresenta a sequência de trabalho da metodologia na detecção das bordas das edificações.

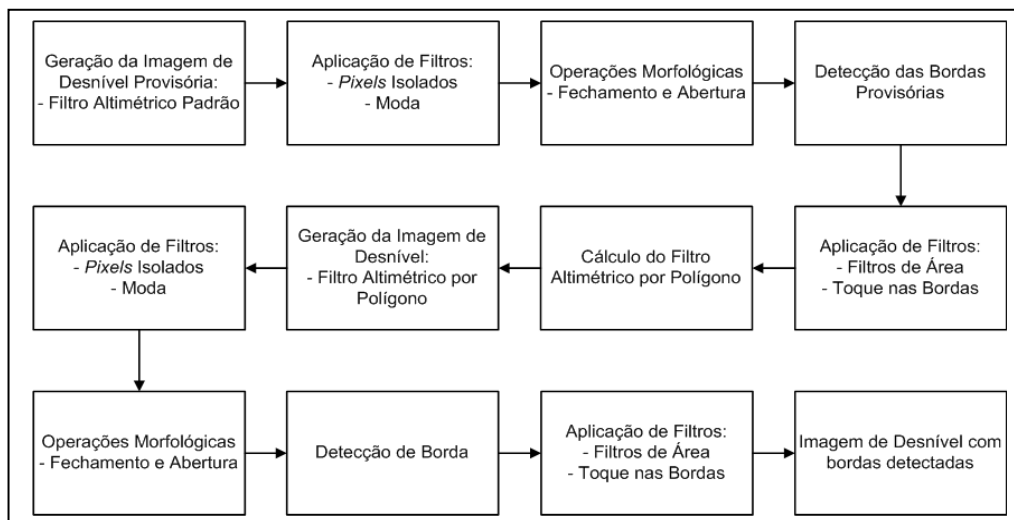


FIGURA 48 – SEQUÊNCIA DA DETECÇÃO DE BORDA DAS EDIFICAÇÕES

FONTE: O Autor (2010)

A geração da Imagem de Desnível Provisória se inicia com a geração de uma malha regular do MDSn, resultante da subtração do MDT a partir do MDS. Essa malha regular é, posteriormente, transformada em uma imagem binária (“0” e “1”), onde “0” representa as entidades do terreno com altura nula (iguais a zero) e “1”

representa as entidades com altura não nula (e superior ao filtro altimétrico padrão). A Figura 49 apresenta a imagem de desnível provisória gerada a partir do MDSn de uma área de pesquisa.

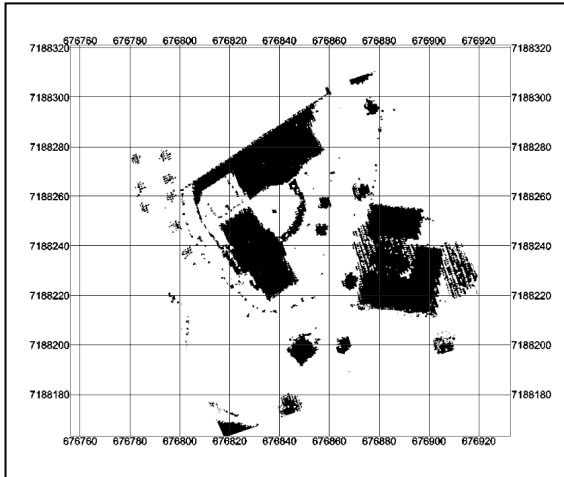


FIGURA 49 – GERAÇÃO DA IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA
 FONTE: O Autor (2010)

A aplicação dos filtros Eliminação de *Pixels* Isolados e Moda, nessa ordem, têm por objetivo minimizar a ocorrência de *pixels* isolados na imagem de desnível. O filtro Elimina *Pixels* Isolados é uma matriz de dimensões “3 x 3”, cujos elementos “ a_{ij} ” são analisados e definem o valor do elemento “P”, conforme descrito na Equação 23. Sua principal característica é a manutenção das bordas das edificações presentes na Imagem de Desnível Provisória. A estatística Moda representa o elemento “0” ou “1” que mais aparece em uma matriz variável, de dimensões “N x N” (N ímpar), que recebe a denominação de Filtro Moda. Com base nessa maioria, atribuí-se ao elemento “P” da própria matriz o valor da Moda determinada, conforme apresentado na Equação 24. A Figura 50 apresenta a Imagem de Desnível Provisória da Figura 49, após a aplicação dos filtros Elimina *Pixels* Isolados (EPI) e Moda, respectivamente.

$$EPI = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & P & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Se todos } a_{ij} = 1 \Rightarrow P = 1 \\ \text{Se } a_{ij} = 0 \Rightarrow P = 0 \end{array} \quad (23)$$

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & \dots & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & P & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Se } moda_M = 1 \Rightarrow P = 1 \\ \text{Se } moda_M = 0 \Rightarrow P = 0 \end{array} \quad (24)$$

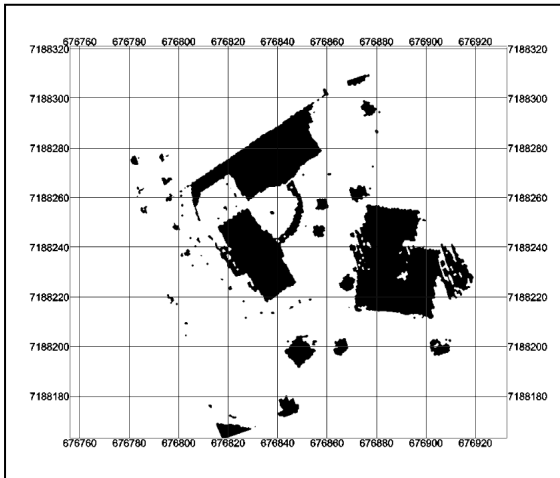


FIGURA 50 – IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA APÓS A APLICAÇÃO DOS FILTROS ELIMINA *PIXELS* ISOLADOS E MODA

FONTE: O Autor (2010)

As operações morfológicas de Fechamento e Abertura têm por objetivo minimizar a existência de istmos e de quebras nas extremidades das “manchas” das entidades presentes no espaço geográfico, suavizando seus contornos (GONZALEZ e WOODS, 2000). A Equação 25 apresenta a formulações de fechamento e abertura, sequencialmente.

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (25)$$

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$$

onde:

- A é a imagem a ser manipulada; e
- B é o elemento estruturante.

Durante as pesquisas foi verificado que o elemento estruturante em forma de diamante, em uma matriz “7 x 7”, atendia com eficiência o objetivo desejado nessa operação. A Equação 26 apresenta o elemento estruturante B.

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

O principal objetivo da aplicação das Operações Morfológicas é evitar que a rotulação dos polígonos determinados na detecção de borda seja interrompida por descontinuidades, sobreposição ou istmos nos segmentos de reta que formam a borda do polígono. A Figura 51 apresenta a Imagem de Desnível Provisória após a operação de Fechamento e Abertura.

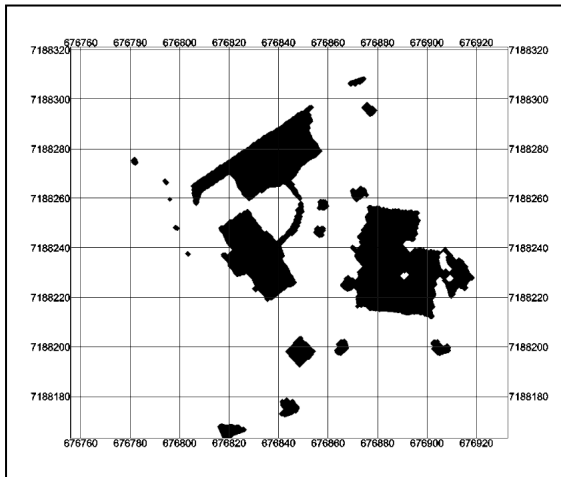


FIGURA 51 – IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA APÓS FECHAMENTO E ABERTURA
FONTE: O Autor (2010)

A seguir é realizada a detecção das bordas provisórias com o operador Sobel, conforme apresentado na Figura 52.

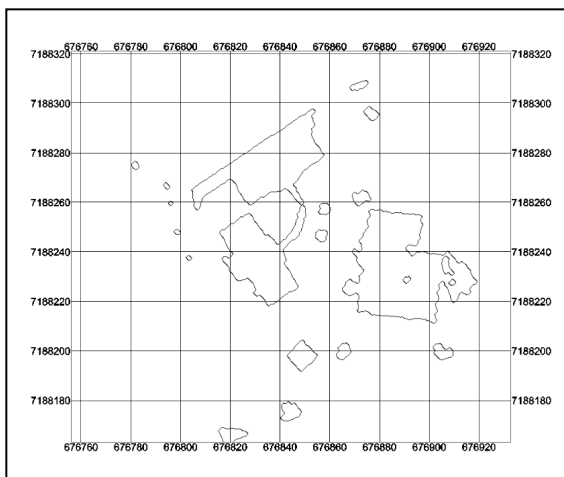


FIGURA 52 – IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA APÓS DETECÇÃO DAS BORDAS PROVISÓRIAS
FONTE: O Autor (2010)

A partir desse ponto utiliza-se um algoritmo de rotulação que identifica os diversos polígonos presentes na Imagem de Desnível Provisória (que é uma imagem binária), listando as coordenadas (linha, coluna) de todos os *pixels* que formam cada polígono. Esse algoritmo será utilizado em diversas etapas posteriores.

O algoritmo de rotulação inicia com a detecção do ponto inicial, situado mais ao norte e, dentre estes, o mais a oeste do polígono. A seguir, o algoritmo segue um padrão de movimento horário, identificando os *pixels* da borda e anotando suas coordenadas. Como exemplo da metodologia proposta, o polígono presente na Figura 53 será rotulado.

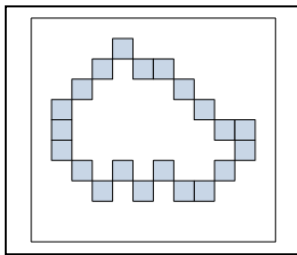


FIGURA 53 – EXEMPLO DE ROTULAÇÃO DE POLÍGONOS
FONTE: O Autor (2010)

A primeira ação a ser realizada é a detecção do ponto inicial (Ponto A), situado mais ao norte e, dentre esses, o mais a oeste, conforme a Figura 54. Após essa detecção as coordenadas (linha e coluna) do Ponto A são escritas em uma matriz denominada Lista de Pontos, de dimensões “N x 2” (onde N é o número de pontos que formam a borda do polígono e 2 o número de coordenadas (linha e coluna)).

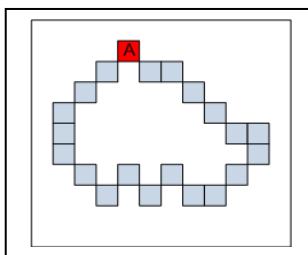


FIGURA 54 – PONTO INICIAL DO EXEMPLO DE ROTULAÇÃO DE POLÍGONOS
FONTE: O Autor (2010)

Sobre o Ponto A é sobreposta uma máscara bidimensional “3 x 3”. Sua primeira dimensão fornece os *pixels* ocupados, e a segunda o gradeamento numerado. O *pixel* selecionado é o que possui menor valor, dentre os ocupados. No caso do exemplo, as posições ocupadas da máscara são a “6” e “8”. Como o número “6” tem precedência sobre o da posição “8”, o segundo ponto (Ponto B) é

determinado, conforme apresentado na Figura 55. Suas coordenadas (linha, coluna) são escritas na Lista de Pontos e a Figura 56 apresenta o ponto B determinado. Para evitar que a rotulação retorne à um *pixel* de borda já identificado anteriormente, foi inserida uma rotina que verifica se o *pixel* destino pertence a Lista de Pontos. Sendo a resposta positiva, o *pixel* não é considerado no processo.

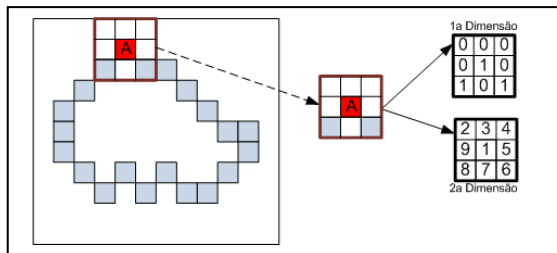


FIGURA 55 – DETERMINAÇÃO DO SEGUNDO PONTO DO EXEMPLO DE ROTULAÇÃO DE POLÍGONOS

FONTE: O Autor (2010)

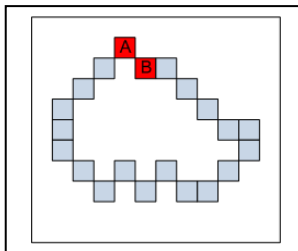


FIGURA 56 – PRIMEIRO E SEGUNDO PONTO DO EXEMPLO DE ROTULAÇÃO DE POLÍGONOS

FONTE: O Autor (2010)

O processo é então repetido até que o ponto inicial seja novamente alcançado e o polígono seja completamente rotulado, conforme apresentado na Figura 57.

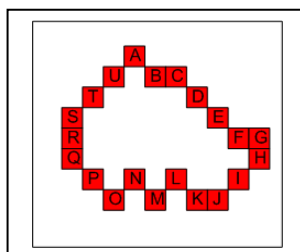


FIGURA 57 – POLÍGONO ROTULADO

FONTE: O Autor (2010)

Após a rotulação dos polígonos da Imagem de Desnível Provisória são aplicados filtros de área e de toque na borda. Os filtros de área visam eliminar os polígonos com área inferior a um valor limítrofe pré-estabelecido. Foram implementados dois filtros de área, um com base na própria área do polígono e outro com base em seu perímetro. A conversão entre esses valores foi determinada com

uso de uma circunferência equivalente, da qual foram determinados seu raio e seu correspondente perímetro, conforme as Equações 27 e 28.

$$raio_{\min} = \sqrt{\frac{Área_{\min}}{\pi}} \quad (27)$$

$$perimetro_{\min} = 2 \times \pi \times raio_{\min} \quad (28)$$

onde:

- $Área_{\min}$: área mínima de polígono a ser retificado;
- $raio_{\min}$: raio de uma circunferência de área igual à $área_{\min}$ e
- $perimetro_{\min}$: é o perímetro equivalente ao polígono de área mínima a ser retificado.

O Filtro Toque nas Bordas foi implementado com o objetivo de eliminar as entidades que não se encontram integralmente representadas na fotografia aérea a ser ortorretificada. Utilizando a Equação de Colinearidade (Equação 01), os *pixels* rotulados das bordas provisórias foram projetados nas fotografias aéreas. Se qualquer *pixel* pertencesse a borda da fotografia, o polígono era eliminado. A Figura 58 apresenta a Imagem de Desnível Provisória da Figura 52 após a aplicação dos Filtros de Área (com área mínima de 40 m²) e Toque na Borda.

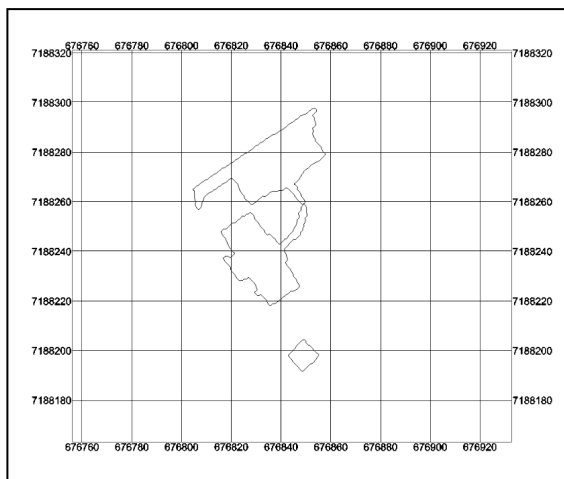


FIGURA 58 – IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA APÓS A APLICAÇÃO DOS FILTROS DE ÁREA E TOQUE NAS BORDAS

FONTE: O Autor (2010)

A tarefa seguinte é o cálculo do Filtro Altimétrico por Polígono. Esse filtro foi introduzido com o objetivo de minimizar a influência da presença de pequenos objetos e de vegetação nas cercanias das edificações, cujas alturas são superiores ao filtro altimétrico padrão, e que terminam por alterar a forma da base das edificações. Procura-se, com isso, refinar a borda de cada edificação, calculando um filtro específico com altura apropriada, de forma a evitar que tais elementos tenham influencia nas edificações retificadas e, por conseguinte, na ortoimagem verdadeira.

O cálculo do filtro altimétrico de cada polígono inicia-se com o cálculo de sua altura média aritmética, conforme a Equação 29. Nesse cálculo utilizam-se todos os *pixels* que pertencem ao polígono, inclusive os internos.

$$h_{m\acute{e}dia} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_N}{N} \quad (29)$$

onde:

- $h_{m\acute{e}dia}$ é a altura média aritmética do polígono, obtida a partir da subtração do MDT do MDS para os *groundels* pertencentes a cada polígono;
- h_i são as alturas dos *pixels* do polígono e
- N é o número total de *pixels* do polígono.

Com base na altura média aritmética de cada polígono estabelece-se o valor de seu Filtro Altimétrico por Polígono. A correlação desses valores foi estabelecida com base nos experimentos realizados, e encontra-se condensada no Quadro 05. Deve-se ressaltar que a Imagem de Desnível resultante desse processo pode diferir substancialmente da Imagem de Desnível Provisória, ocorrendo a divisão, ou a fusão, de edificações. A Figura 59 apresenta a Imagem de Desnível, obtida a partir da aplicação do Filtro Altimétrico por Polígono nos polígonos, provenientes da Imagem de Desnível Provisória.

Altura Média Aritmética do Polígono	Filtro Altimétrico por Polígono
Média ≤ 5 m	3 m
5 m < Média ≤ 10 m	4 m
Média > 10 m	6 m

QUADRO 05 – PARÂMETROS DO FILTRO ALTIMÉTRICO POR POLÍGONO
 FONTE: O Autor (2010)

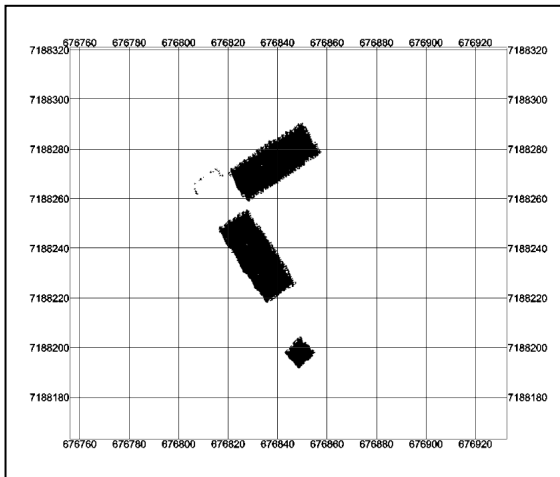


FIGURA 59 – IMAGEM DE DESNÍVEL OBTIDA A PARTIR DA IMAGEM DE DESNÍVEL PROVISÓRIA

FONTE: O Autor (2010)

Por fim, a mesma sequência de aplicação de filtros (Filtros de Eliminação de *Pixels*, Moda, Área e Toque nas Bordas), de operações morfológicas e do Operador Sobel realizada sobre a Imagem de Desnível Provisória é feita sobre a Imagem de Desnível, com o objetivo de detectar as bordas finais das entidades (usando os mesmos limiares). A Figura 60 apresenta as bordas detectadas a partir da Imagem de Desnível.

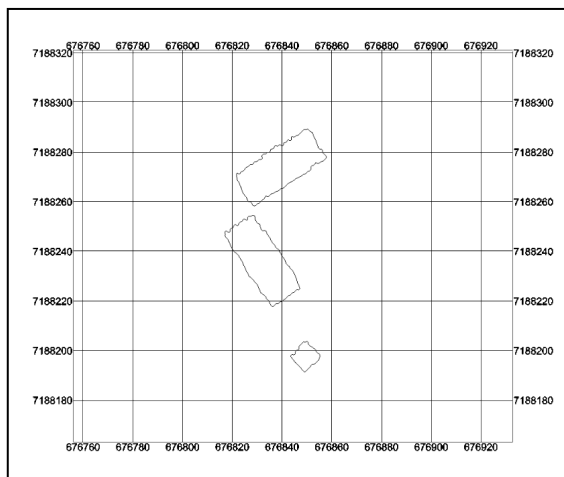


FIGURA 60 – IMAGEM DE DESNÍVEL COM BORDAS DETECTADAS

FONTE: O Autor (2010)

3.3.5.2 Retificação das Bordas e Detecção dos Vértices dos Polígonos

Com as bordas dos polígonos detectadas a tarefa seguinte é sua retificação no espaço 2D. Essa retificação é iniciada com a divisão dos diversos *pixels* das bordas dos polígonos em segmentos de *pixels*. Posteriormente, os componentes de cada segmento são utilizados como observações, sendo determinados os parâmetros dessas retas com o emprego de técnicas de ajustamento das observações. A seguir, os novos vértices do polígono são determinados a partir das diversas equações de reta. Por fim, os vértices são conectados fisicamente, definindo as novas bordas ajustadas dos polígonos. A Figura 61 apresenta essa sequência de trabalho.

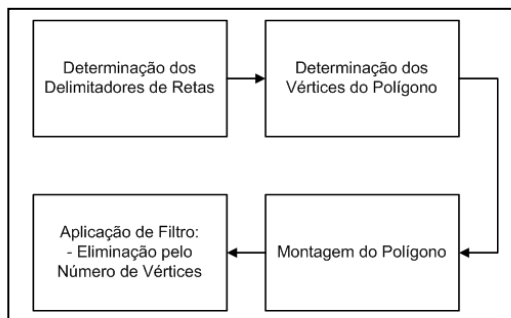


FIGURA 61 – SEQUÊNCIA DA RETIFICAÇÃO DAS BORDAS E DA DETECÇÃO DOS VÉRTICES DOS POLÍGONOS

FONTE: O Autor (2010)

3.3.5.2.1 Determinação dos Delimitadores de Retas

A primeira etapa é a determinação dos delimitadores de retas. Ela visa, essencialmente, determinar os *pixels* do polígono que o dividirão em segmentos de *pixels*. Cabe ressaltar que os delimitadores de retas não são, nem equivalem, aos vértices das edificações, cuja determinação ocorrerá posteriormente.

As equações das retas ajustadas são determinadas no sistema de coordenadas do espaço objeto, e são determinadas pelo emprego do modelo combinado do Método dos Mínimos Quadrados. As Equações 30 e 31 apresentam as transformações entre as coordenadas dos *pixels* no sistema de coordenadas da Imagem de Desnível (linha, coluna) e as coordenadas planimétricas no sistema de coordenadas do espaço objeto e vice-versa, respectivamente.

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (\text{coluna} - 1) \times \Delta x \\ Y &= Y_0 + (\text{linha} - 1) \times \Delta y \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \text{Coluna} &= \text{int}\left(\frac{X - X_0}{\Delta x}\right) + 1 \\ \text{Linha} &= \text{int}\left(\frac{Y - Y_0}{\Delta y}\right) + 1 \end{aligned} \quad (31)$$

onde:

- (X, Y) são as coordenadas planimétricas do *pixel* no sistema de coordenadas do espaço objeto;
- (X₀, Y₀) são as coordenadas planimétricas do canto superior esquerdo da Imagem de Desnível no sistema de coordenadas do espaço objeto;
- (linha, coluna) são as coordenadas do *pixel* no sistema de coordenadas da Imagem de Desnível;
- (Δx, Δy) são as resoluções geométricas da Imagem de Desnível no sistema de coordenadas do espaço objeto;
- int(i) representa o inteiro mais próximo do número real “i”.

A equação geral da reta é apresentada pela Equação 32. Como as observações e os parâmetros são implícitos ao modelo, a solução utilizada é a do modelo combinado do ajustamento das observações pelo Método dos Mínimos Quadrados (Equações 33 a 36).

$$ax + by + c = 0 \quad (32)$$

$$F(X_a, L_a) = 0 \quad (33)$$

$$L_a = L_b + V \quad (34)$$

$$X_a = X_a^0 + X \quad (35)$$

$$AX + BV + W = 0 \quad (36)$$

onde:

- X_a é o vetor dos parâmetros a, b e c que definem a reta ajustada;
- L_a é o vetor das observações ajustadas;
- L_b é o vetor das observações;

- V é o vetor dos resíduos;
- X_a^0 é o vetor de parâmetros aproximados;
- A é a matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros;
- B é a matriz das derivadas parciais em relação às observações; e
- W é a matriz do erro de fechamento.

Basicamente o processo consiste em percorrer todos os *pixels* da borda do polígono, no sentido horário, calculando o ângulo formado por retas ajustadas a partir desse *pixel* e utilizando dois conjuntos de pontos, sendo um posterior e outro anterior a ele. Esse processo é iterativo e termina quando os *pixels* delimitadores selecionados obedecem a condições pré-definidas no sistema.

Com o objetivo de controlar, facilitar e acelerar o processo foram introduzidas algumas variáveis, que acabam por estabelecer as condições que devem ser satisfeitas pelos Delimitadores de Retas. O Quadro 06 apresenta essas variáveis.

Variável	Descrição
Pontos Para Ajustamento	Define o número de pontos do conjunto de <i>pixels</i> (posteriores e anteriores) a serem utilizados na determinação dos Potenciais Delimitadores de Reta (1ª iteração).
Limite Angular	Define os limites inferior e superior do ângulo, formado pelas retas ajustadas, em cada <i>pixel</i> , a serem classificados como “Potenciais Delimitadores de Reta” e “Delimitadores de Reta”.
Delta Ângulo	Valor numérico utilizado para diminuir o Limite Angular
Delta Distância	Distância mínima (em número de <i>pixels</i>) entre dois Potenciais Delimitadores de Reta

QUADRO 06 – VARIÁVEIS DA DETERMINAÇÃO DOS DELIMITADORES DE RETA

FONTE: O Autor (2010)

O processo iterativo é dividido em duas etapas distintas. Na primeira etapa, que corresponde a primeira iteração, o algoritmo inicia pelo *pixel* mais ao norte, e dentre estes o mais a oeste. A variável “Pontos Para Ajustamento” indica a quantidade de *pixels* que será utilizada na determinação do ângulo que se forma a partir desse ponto. Por exemplo, se forem utilizados 5 *pixels*, o sistema selecionará automaticamente o ponto em análise mais cinco *pixels*, da borda do polígono, anteriores a ele. Com base nas coordenadas no sistema objeto desses *pixels* uma reta é ajustada e seus parâmetros são determinados. A seguir, o sistema seleciona o *pixel* em análise mais cinco *pixels* posteriores a ele e repete o processo, determinando os parâmetros da reta ajustada. De posse das equações das duas retas ajustadas determina-se o ângulo formado por elas. Se o valor obtido estiver dentro dos limites (inferior e superior) estabelecido pela variável “Limite Angular”

esse *pixel* é selecionado como um “Potencial Delimitador de Reta”. Essa análise é repetida para todos os *pixels* do polígono. Ao final dessa primeira iteração uma lista com todos os “Potenciais Delimitares de Reta” é formada.

A segunda etapa, que corresponde as demais iterações, somente analisa os “Potenciais Delimitadores de Reta”. O processo é, basicamente, o mesmo da primeira iteração. Para cada “Potencial Delimitador de Reta” são analisadas as retas ajustadas determinadas a partir dos *pixels* do segmento anterior e posterior, também delimitadas por outros “Potenciais Delimitadores de Retas”. O ângulo formado com base nesse potencial delimitador é analisado e, se estiver dentro do estabelecido pelo “Limite Angular” ele continua como “Potencial Delimitador de Reta”. Caso contrário ele é descartado do processo. A iteratividade termina quando os Potenciais Delimitadores se repetem em duas iterações consecutivas, transformando-se em “Delimitadores de Retas”.

Como mecanismo de controle e aceleração do processo foram introduzidas duas variáveis, sendo a primeira denominada “Delta Distância”. Após cada iteração ela analisa a distância entre dois “Potenciais Delimitadores de Reta” consecutivos. Se essa distância for inferior ao limite estabelecido, os dois Potenciais Delimitadores são descartados e um novo Delimitador é criado, localizando-se na metade do segmento formado pelos dois Potenciais Delimitadores descartados. Essa variável é, particularmente, importante para evitar que dois Potenciais Delimitadores se agrupem nas quinas dos polígonos.

A segunda variável é denominada “Delta Ângulo”, e tem por objetivo diminuir a variável “Limite Angular”. Ela altera os valores da variável “Limite Angular”, aumentando seu limite inferior e diminuindo seu limite superior. Seu emprego se justifica no fato de que a cada iteração os segmentos de *pixels* são delimitados por “Potenciais Delimitadores de Retas” mais significativos, que representam com maior fidedignidade os futuros vértices do polígono.

Os experimentos realizados permitiram verificar que valores entre 6 e 8 *pixels* para a variável “Pontos Para Ajustamento”, 50° e 130° para a variável Limite Angular, 5 *pixels* para a variável “Delta Distância” e 10° para a variável “Delta Ângulo” possibilitam utilizar os algoritmos em modo automático.

A fim de exemplificar o processo, as Figuras 62-1 a 62-10 apresentam a primeira iteração do processo. Nesse caso específico foi utilizado um polígono com forma triangular, visando facilitar o entendimento do processo.

A primeira ação é a identificação do *pixel* inicial (*pixel* A), situado mais ao norte, e dentre estes o mais a oeste. A seguir são selecionados 6 *pixels* anteriores, e 6 posteriores (provenientes da variável “Pontos para Ajustamento”). As duas retas são ajustadas, seus parâmetros determinados e o ângulo entre elas é calculado. Se estiver dentro dos valores definidos pela variável “Limite Angular” (50° e 130°) esse *pixel* será selecionado como “Potencial Delimitador de Reta”. A seguir, o segundo *pixel* (*pixel* B), definido pelo sentido horário, é analisado, com o processo se repetindo. O processo se repete até o último *pixel* (*pixel* U). Ao final da primeira etapa os *pixels* selecionados como “Potenciais Delimitadores de Reta” são os *pixels* A, B, F, G, H, J, K, M, O, P e S.

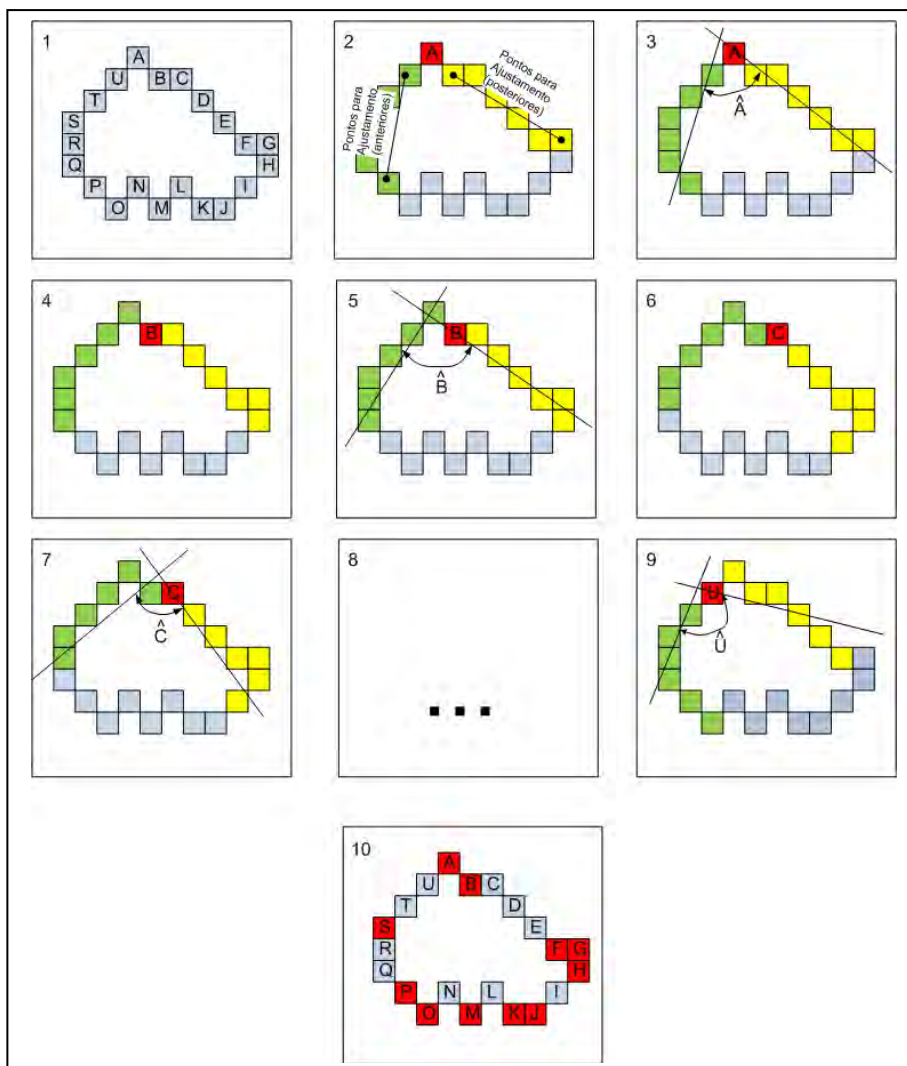


FIGURA 62 – PRIMEIRA ETAPA DA DETECÇÃO DE POTENCIAIS DELIMITADORES DE RETA
 FONTE: O Autor (2010)

Antes de iniciar a segunda iteração as distâncias entre os “Potenciais Delimitadores de Reta” são analisadas. Como a figura do exemplo é pequena, foi utilizado um valor de 1 *pixel* para a variável “Delta Distância” (apenas para esse exemplo). Os dois primeiros *pixels* da lista “Potenciais Delimitadores de Reta” (*pixels* “A” e “B”) são analisados e é constatado que a distância entre eles é de 1 *pixel*. Como esse valor é igual ao da variável Delta Distância os dois *pixels* são descartados. Um novo *pixel* médio é calculado e inserido como Potencial Delimitador. Nesse caso, em face da figura do exemplo, o próprio *pixel* A substitui os antigos *pixels* A e B. O processo se repete e analisa os demais Delimitadores Potenciais. Ao final dessa análise, somente os *pixels* A, G, J, M, O e S continuam sendo “Potenciais Delimitadores de Reta”. A Figura 63 apresenta os Potenciais Delimitadores de Reta resultantes dessa fase.

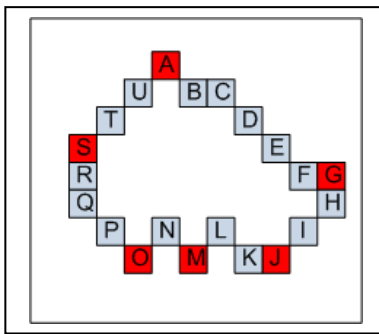


FIGURA 63 – PRIMEIRA CORREÇÃO DO DELTA DISTANCIA
 FONTE: O Autor (2010)

Após a análise anterior, também antes de iniciar a segunda iteração, os limites angulares inferior e superior, da variável “Limite Angular”, são alterados pela variável “Delta Angular”, que diminui o limite superior e aumenta o inferior. Como delta angular é igual a 10° , os limites angulares passam para 60° e 120° , respectivamente. O processo iterativo reinicia e, somente, termina quando os pontos Delimitadores de Retas são determinados, que no caso são os *pixels* A, J e O. A Figura 64 apresenta a sequência final do processo.

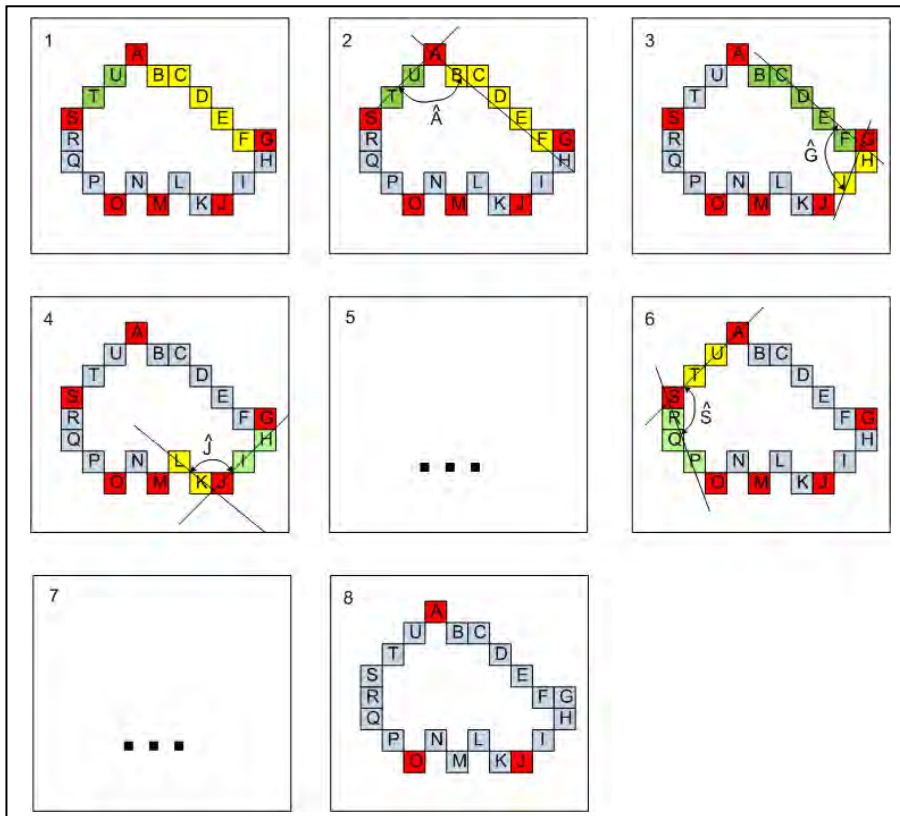


FIGURA 64 – SEGUNDA ETAPA DA DETECÇÃO DE POTENCIAIS DELIMITADORES DE RETA
 FONTE: O Autor (2010)

3.3.5.2.2 Determinação dos Vértices do Polígono

A determinação dos vértices do polígono é uma sequência de operações que se inicia a partir dos segmentos de *pixels* definidos pelos Delimitadores de Reta. Para cada segmento de *pixels* é realizado um novo ajustamento e os parâmetros da reta são determinados. Com base no cruzamento de duas retas consecutivas são determinados vértices provisórios do polígono. A partir daí, os lados do novo polígono, formados pelos vértices provisórios, são analisados, e podem se transformar em vértices finais, ou serem substituídos por outros vértices, obtidos a partir dos vértices provisórios.

Uma técnica de refinamento do processo de ajustamento das retas foi incluída de forma a minimizar, ou eliminar, a influência de objetos externos situados nas proximidades da edificação, sendo denominada de Média Móvel Restritiva. Esse refinamento consiste em realizar um processo iterativo, com ajustamentos consecutivos, no qual um conjunto de observações iniciais é seguidamente

analisado, refinado e ajustado, até que os pontos finais sejam os mais relevantes para a correta representação da borda da edificação. As Equações 37 a 39 são à base desse processo.

$$d_i = \frac{|ax_0 + y_0 + b|}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (37)$$

onde:

- d_i é a distância do *pixel* “i” à reta ajustada;
- (x_0, y_0) são as coordenadas do *pixel* “i” no sistema do espaço objeto; e
- a e b são os coeficientes angular e linear da reta ajustada.

$$d_{media} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_N}{N} \quad (38)$$

onde:

- d_{media} é a distância média dos *pixels* à reta ajustada; e
- N é o número de pontos utilizados na determinação da reta ajustada.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - d_{media})^2}{N - 1}} \quad (39)$$

onde:

- s é o desvio-padrão do conjunto de pontos utilizados na determinação da reta ajustada.

O processo consiste nas seguintes ações:

- De posse dos *pixels* de um segmento realizar o ajustamento das observações e determinar os parâmetros da reta ajustada;
- Calcular a distância de cada *pixel* do segmento à reta ajustada com o emprego da Equação 37;
- Calcular a média aritmética e o desvio-padrão das distâncias dos *pixels* à reta ajustada (Equações 38 e 39);
- Formar um novo conjunto de pontos a partir da eliminação dos pontos cujas distâncias se encontram fora dos limites do intervalo $(d_{media} - \sigma \leq d_i \leq d_{media} + \sigma)$;

- Repetir o processo até que dois conjuntos de pontos consecutivos sejam formados pelos mesmos elementos, sem que haja nenhuma eliminação de pontos e
- Ajustar os parâmetros finais da reta na última iteração.

Por exemplo, uma borda de edificação contém pontos da própria edificação aglutinados com as bordas de vegetação, anexa a essa edificação, conforme apresentado na Figura 65. Determinando-se a reta ajustada desses pontos, tem-se a Reta Ajustada – Pontos Iniciais, também, na Figura 65. A minimização dos efeitos da presença da vegetação na borda é realizada com emprego do processo iterativo, como apresentado nas Figuras 66 a 69. A cada iteração os pontos mais afastados do conjunto mais significativo de pontos são eliminados do processo, sendo possível determinar uma reta ajustada mais compatível com a borda da edificação. Como comparação, na Figura 70 são apresentados o conjunto de pontos iniciais e as cinco retas ajustadas no exemplo.

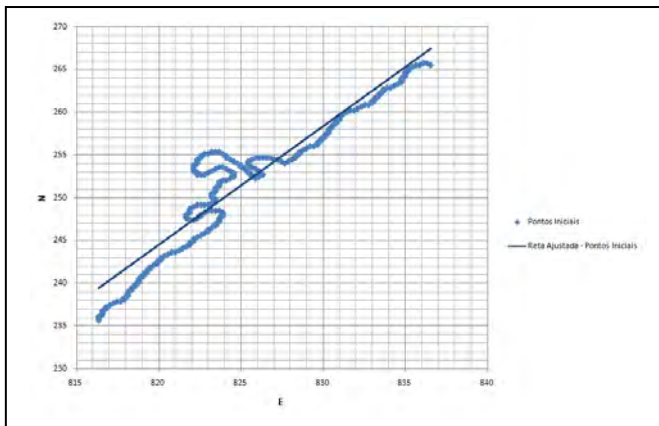


FIGURA 65 – EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – PONTOS INICIAIS
 FONTE: O Autor (2010)

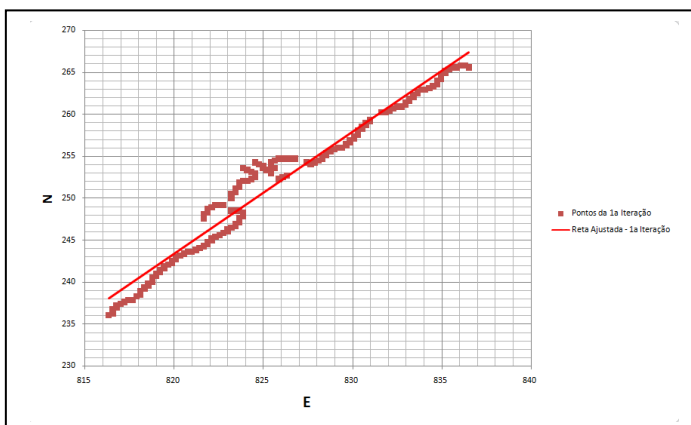


FIGURA 66 – EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – 1ª ITERAÇÃO
 FONTE: O Autor (2010)

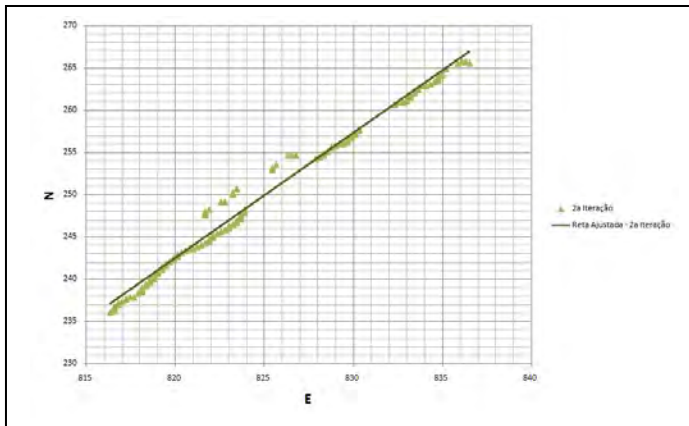


FIGURA 67 – EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – 2ª ITERAÇÃO
 FONTE: O Autor (2010)

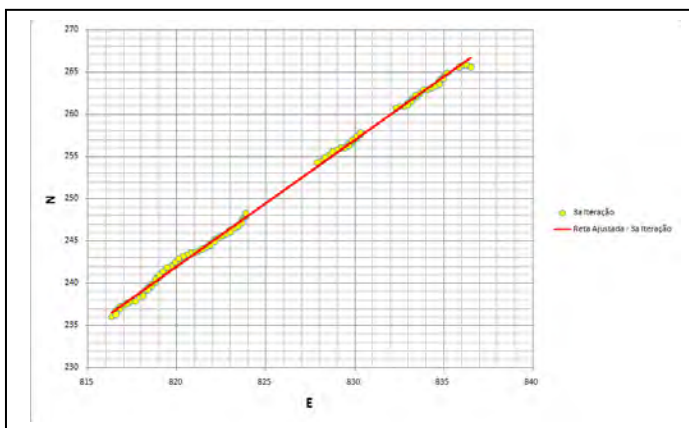


FIGURA 68 – EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – 3ª ITERAÇÃO
 FONTE: O Autor (2010)

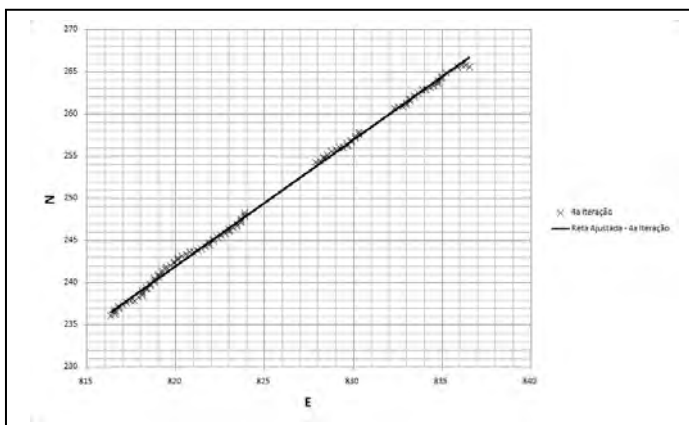


FIGURA 69 – EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – 4ª ITERAÇÃO
 FONTE: O Autor (2010)

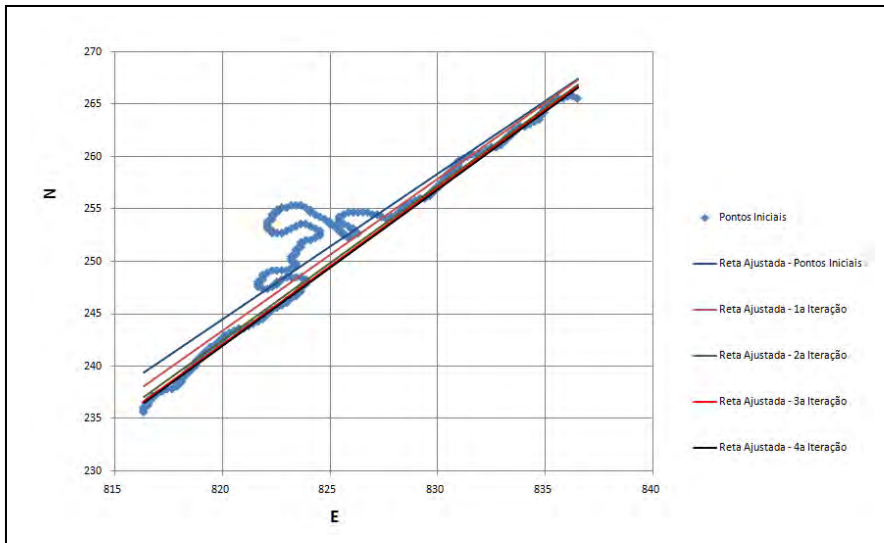


FIGURA 70 – EXEMPLO DO PROCESSO ITERATIVO DE RETIFICAÇÃO DA BORDA – PONTOS INICIAIS COM RETAS AJUSTADAS

FONTE: O Autor (2010)

As coordenadas dos vértices provisórios são calculadas no sistema de coordenadas do espaço objeto e, posteriormente, transformadas para o sistema de imagem (com o emprego da Equação 31). A Figura 71 apresenta esse processo, como continuação da Figura 64, no qual os *pixels* “1”, “2” e “3” são os vértices provisórios do polígono original.

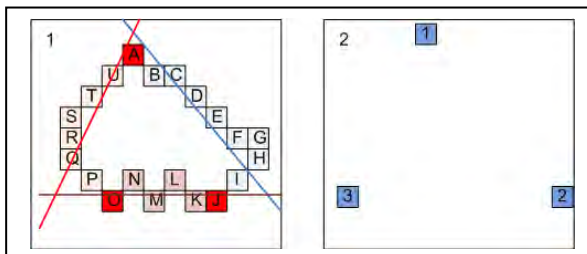


FIGURA 71 – DETERMINAÇÃO DOS VÉRTICES PROVISÓRIOS

FONTE: O AUTOR (2010)

Para definir os vértices finais do polígono, os vértices provisórios são submetidos a três análises que visam melhorar sua representação final. Esses vértices provisórios podem ser alterados em uma, ou duas, análises, ou ainda não sofrer qualquer alteração de posição. Ao final dessas análises têm-se os vértices do polígono (finais).

A primeira análise, que é automática, é realizada somente em polígonos que possuem quatro lados. Os ângulos internos do quadrilátero são calculados, a partir das coordenadas dos vértices provisórios. Se eles apresentarem valores próximos a 90° (com variação de $\pm 5^\circ$), o sistema impõe que o quadrilátero tenha ângulos

internos retos. Os novos vértices são determinados a partir dos lados determinados pelos vértices provisórios. Caso contrário, nada é realizado no quadrilátero.

O sistema utiliza como base um conjunto formado por dois lados opostos (grupo base), que fornecem a direção geral, adequando os outros dois lados ao primeiro par. Os vértices provisórios são numerados de “1” a “4”, sendo “1” o vértice mais a Norte, e, dentre estes, o mais a Oeste. A partir dele os demais vértices provisórios são numerados no sentido horário. O sistema adota por padrão (*default*) o grupo formado pelas retas dos vértices $\overline{12}$ e $\overline{34}$, mas pode utilizar o grupo dos vértices $\overline{23}$ e $\overline{41}$, se necessário (Figura 72).

O sistema calcula o azimute médio dos dois lados que formam o grupo base, sendo este o novo azimute desses dois lados. O azimute dos demais lados (grupo auxiliar) é obtido somando, ou subtraindo, um ângulo reto do azimute do grupo base. Os novos vértices são determinados pela interseção das retas que formam os novos lados, sendo estes determinados a partir da rotação dos lados antigos sobre seus pontos médios. A Figura 72 apresenta, como exemplo, a determinação dos novos vértices de um quadrilátero (com ângulos internos exagerados), e as Equações 40 e 41 o cálculo dos novos azimutes.

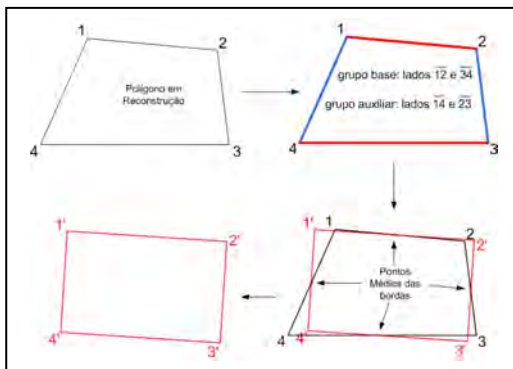


FIGURA 72 – RECONSTRUÇÃO DE POLÍGONOS COM 4 LADOS

FONTE: O Autor (2010)

$$AzGera_{grupo\ base} = \frac{(Az\overline{12} + Az\overline{43})}{2} \quad (40)$$

$$AzGera_{grupo\ auxiliar} = AzGera_{grupo\ base} \pm 90^\circ \quad (41)$$

A segunda análise, também automática, é realizada em polígonos com cinco, ou mais, lados. O sistema analisa os azimutes dos lados e seleciona aqueles que apresentam valores próximos, dentro de um intervalo pré-estabelecido (Equação 42). Esses lados são separados e um azimute médio é calculado (Equação 43). Esse novo azimute médio é imposto a todos os lados cujos azimutes pertencem ao intervalo pela rotação das bordas antigas sobre seus pontos médios.

$$\text{LimiteInferior}_i = \text{AzLado}_i - \text{Delta Angulo} \quad (42)$$

$$\text{LimiteSuperior}_i = \text{AzLado}_i + \text{Delta Angulo}$$

onde:

- AzLado_i é o azimute do lado do polígono em análise;
- LimiteInferior_i e LimiteSuperior_i determinam os limite inferior, e superior, do intervalo que define quais os lados possuem azimutes próximos;
- DeltaAngulo é o valor que define o intervalo de busca dos azimutes próximos.

$$\text{AzMedio} = \frac{\sum \text{AzConjunto}_i}{N} \quad (43)$$

onde:

- AzMedio é o Azimute Médio dos lados cujos azimutes estão dentro do intervalo;
- $\sum \text{AzConjunto}_i$ é o somatório de todos os azimutes pertencentes ao intervalo e
- N é o número de lados que possuem azimutes dentro do intervalo.

A Figura 73 exemplifica a segunda análise, a partir do polígono representado na Figura 73-1. O sistema identifica que os lados $\overline{12}$ e $\overline{34}$ (cor azul) possuem azimutes próximos, o mesmo ocorrendo com os lados $\overline{23}$ e $\overline{51}$ (cor vermelha), sendo apresentados na Figura 73-2. O azimute médio, para cada conjunto, é então calculado e lados com novos azimutes são inseridos (Figura 73-3), rotacionando os antigos sobre seus pontos médios. Por fim, a edificação tem seus novos vértices (1', 2', 3', 4' e 5') determinados na Figura 73-4.

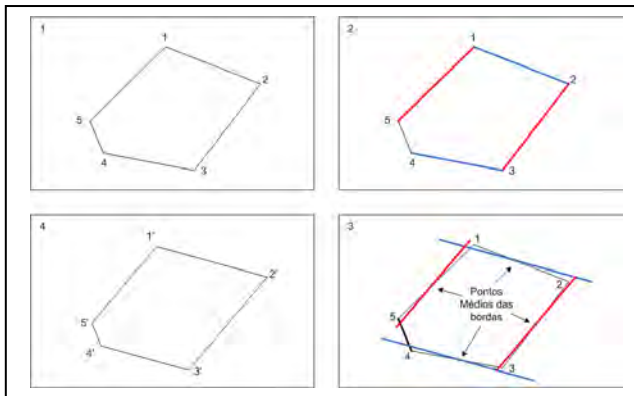


FIGURA 73 – EXEMPLO DA EXECUÇÃO DA SEGUNDA ANÁLISE
 FONTE: O Autor (2010)

A terceira análise é realizada com intervenção humana, sendo, portanto, semi-automática. Ela é utilizada quando se deseja empregar uma direção base para o alinhamento dos lados de mais de um polígono. Pode-se exemplificar o emprego dessa injunção quando se deseja alinhar as edificações com o arruamento, ou quando existem diversas edificações construídas segundo um mesmo padrão (como no caso de conjuntos habitacionais). Nessa análise os polígonos são rotacionadas em torno dos pontos centrais de cada lado, de acordo com o ângulo formado entre a direção geral imposta pelo operador humano e cada lado do polígono. As Equações 44 e 45 apresentam as formulações dos ângulos de rotação das bordas da edificação e de seus novos azimutes, respectivamente.

$$AngRot = AzDirG - AzBorda_i \quad (44)$$

$$NvAz_i = AzBorda_i + AngRot \quad (45)$$

onde:

- AngRot é o ângulo de rotação a que devem ser submetidas as bordas da edificação;
- AzDirG é o azimute da direção que deve ser submetida à edificação;
- AzBorda_i é o azimute da borda em análise e
- NvAz_i é o novo azimute da borda em análise.

Como exemplo, pode-se verificar o polígono presente na Figura 74-1, que deve ser alinhada com a direção geral determinada. Na Figura 74-2 é determinado o ângulo de rotação “α” de cada polígono, que é implementado na Figura 74-3, com as

rotações de cada lado sobre seus pontos médios. Na Figura 74-4 são determinados os novos vértices 1', 2', 3' e 4' do polígono rotacionado.

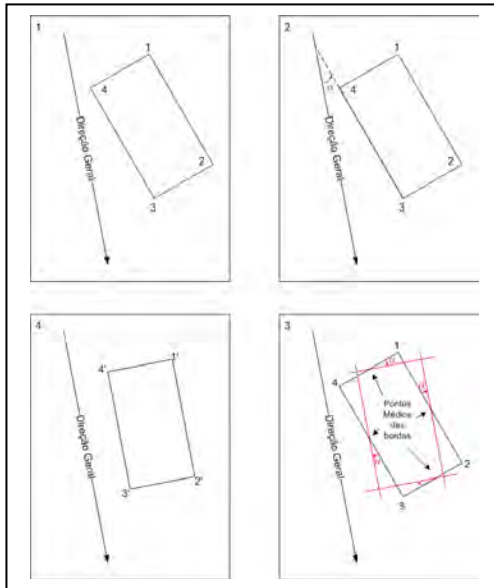


FIGURA 74 – EXEMPLO DA EXECUÇÃO DA TERCEIRA ANÁLISE
FONTE: O Autor (2010)

Após a execução das três análises os vértices resultantes são os vértices do polígono (finais). Apesar das análises realizadas utilizarem informações geométricas dos lados dos polígonos, somente, os vértices são identificados e implantados na Imagem de Desnível.

3.3.5.2.3 Montagem do Polígono

A Montagem do Polígono compreende as ações necessárias para a implantação física das bordas do polígono a partir de seus vértices determinados na etapa anterior cujas coordenadas (no sistema da imagem digital e no espaço objeto) são conhecidas.

A primeira ação é a determinação dos azimutes planos entre dois vértices consecutivos, como os vértices $\overline{12}$, $\overline{23}$ e $\overline{31}$ da Figura 71-2, com emprego da Equação 46. A seguir, esses vértices consecutivos são conectados com o emprego da Equação 47, formando a Base Planimétrica da edificação retificada.

$$Rumo_{\vec{12}} = \text{Arctg}\left(\frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1}\right)$$

Se $(X_2 > X_1)$ e $(Y_2 > Y_1)$ – 1º Quadrante

Então $Az\vec{12} = Rumo_{\vec{12}}$;

Se $(X_2 > X_1)$ e $(Y_2 < Y_1)$ – 2º Quadrante

Então $Az\vec{12} = 180^\circ - Rumo_{\vec{12}}$;

Se $(X_2 < X_1)$ e $(Y_2 < Y_1)$ – 3º Quadrante

Então $Az\vec{12} = 180^\circ + Rumo_{\vec{12}}$;

Se $(X_2 < X_1)$ e $(Y_2 > Y_1)$ – 4º Quadrante (46)

Então $Az\vec{12} = 360^\circ - Rumo_{\vec{12}}$;

Se $(Y_1 = Y_2)$

Então

Se $(X_2 > X_1)$

Então $Az\vec{12} = 90^\circ$;

Se $(X_2 < X_1)$

Então $Az\vec{12} = 270^\circ$;

Se $(X_2 = X_1)$

Então $Az\vec{12} = 00^\circ$;

$$D_{12} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (47)$$

$$X_2 = X_1 + D_{12} \text{sen}(Az\vec{12})$$

$$Y_2 = Y_1 + D_{12} \text{cos}(Az\vec{12})$$

onde:

- (X_1, Y_1) são as coordenadas no sistema objeto do vértice origem “1”;
- (X_2, Y_2) são as coordenadas no sistema objeto do vértice destino “2”;
- $Az\vec{12}$ é o azimute do vértice “1” para o vértice “2”;
- D_{12} é a distância entre os vértices “1” e “2”.
- $Rumo_{\vec{12}}$ é o rumo do vértice “1” para o vértice “2”.

A segunda ação é o preenchimento dos *pixels* internos do polígono na Imagem de Desnível, que com isso, passa a representar a base planimétrica das diversas entidades presentes no terreno. Como essa imagem possui as mesmas dimensões e resolução geométrica do MDS, do MDT e da ortoimagem verdadeira a ser gerada, a identificação dos *pixels* que pertencem às potenciais edificações (representadas pelos polígonos preenchidos) é facilitada. A Figura 75-1 apresenta as bordas do polígono formado a partir dos vértices da Figura 74-2, e a Figura 75-2 apresenta o polígono preenchido.

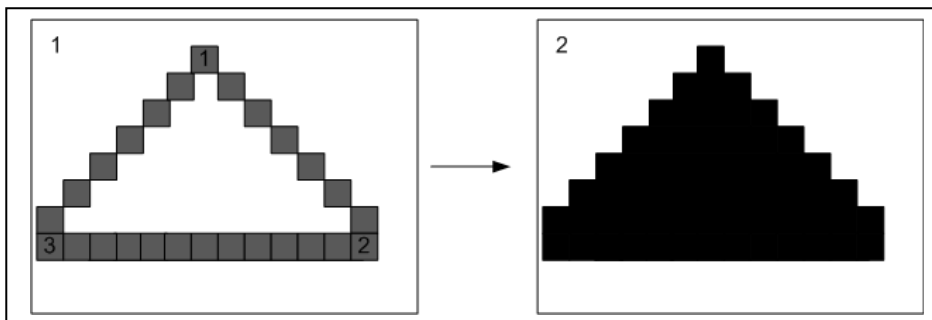


FIGURA 75 – POLÍGONO MONTADO

FONTE: O Autor (2010)

3.3.5.2.4 Aplicação do Filtro Eliminação pelo Número de Vértices

Após a retificação e a montagem dos polígonos é realizada uma última verificação da forma do polígono. Procura-se com isso, verificar a existência de polígonos amorfos, que representam vegetação, edificações mescladas com vegetação, ou ainda, edificações cujas formas não puderam ser retificadas satisfatoriamente. Se o polígono analisado não for eliminado pelo filtro ele passa a ser classificado, de acordo com a metodologia, como uma edificação. Esse filtro se mostrou particularmente importante ao analisar edificações de pequeno porte mescladas com vegetação em sua lateral e cobertura cujas representações não apresentam resultados satisfatórios.

A definição do que é polígono amorfo é dada por uma formulação empírica, baseada na observação dos trabalhos de reconstrução da presente tese. Ela consiste em se determinar uma razão entre o número de vértices de um polígono qualquer e o número total de *pixels* desse polígono, quando representado em uma imagem de desnível. Experimentos baseados nas especificações utilizadas nessa pesquisa mostraram que polígonos que possuem uma razão vértices/número de

pixels do polígono (total de *pixels* que representam as bordas do polígono) superior a 0,04 (ou 4%) ou representam uma área de vegetação ou partes não coerentes de uma edificação e, por isso, devem ser eliminados. A Equação 48 apresenta o filtro Eliminação Pelo Número de Vértices.

$$R = \frac{n}{N} \quad (48)$$

onde:

- R é a razão entre o número de vértices e o número total de pontos de um polígono;
- n é o número de vértices do polígono e
- N é o número de pontos (ou *pixels*) do polígono.

Para exemplificar a aplicação desse filtro deve se analisar as formas dos quatro polígonos presentes na Figura 76. Nela é possível verificar que o polígono A apresenta forma passível de representar uma edificação isolada, ou edificações aglutinadas. Calculando-se a razão entre o número de vértices, representados por quatro *pixels* amarelos, e o número total de *pixels* que formam as quatro bordas do polígono (duzentos e sessenta) encontra-se uma razão inferior a 0,04 ($R = 0,015$). O mesmo vale para o polígono B ($R = 0,02$). Para o polígono C tem-se uma forma que não é comum, mas é possível de existir, com $R = 0,037$. No polígono D a forma sugere que houve a aglutinação de mais de uma entidade, alterando significativamente sua forma ($R = 0,057$). Esse caso é muito comum em edificações de pequeno porte que possuem vegetação próxima, que ao ser levantada pelo LIDAR acaba alterando a forma da própria edificação. Nesses casos, como o objetivo da metodologia é a geração de ortoimagens verdadeiras, opta-se pela não representação dessa entidade na Imagem de Desnível, e conseqüentemente, no MDS e no MDT.

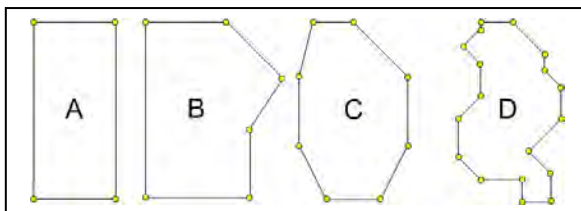


FIGURA 76 – EXEMPLOS DE FORMAS POLÍGONOS MONTADOS
FONTE: O Autor (2010)

3.3.6 Segunda Compatibilização entre o MDS e o MDT

Todas as tarefas realizadas até esse momento retificaram a base planimétrica das edificações na Imagem de Desnível (bordas, vértices e a base das edificações). Nessa etapa essas alterações serão repassadas para os modelos representativos do terreno (MDT) e da superfície (MDS). Além disso, será necessária a realização de uma nova compatibilização entre o MDS e o MDT, alterando as altitudes dos *groundels* situados nas áreas compreendidas entre as bordas retificadas (novas) e não retificadas (antigas) da edificação, de forma a torná-las coerentes com a nova realidade que se apresenta.

A importância dessa compatibilização é decorrente do fato de que as altitudes dos *groundels* situados nessas áreas ainda são incoerentes com a nova realidade, contendo, em alguns casos, informações do MDS quando deveriam conter informações do MDT, e informações do MDT quando deveriam conter as do MDS. Além disso, parte-se do princípio que a base das edificações no MDT deve ser representada por um plano de igual altitude, denominado de Plano da Base da Edificação (que corresponde à base da edificação no solo).

A Figura 77-1 apresenta a borda retificada (em vermelho) e a antiga (em preto) de uma edificação, e a Figura 77-2 apresenta as áreas do MDS que devem ser harmonizadas, sendo as representadas pela cor amarela as dos *groundels* externos à edificação, e pela cor azul às dos internos.

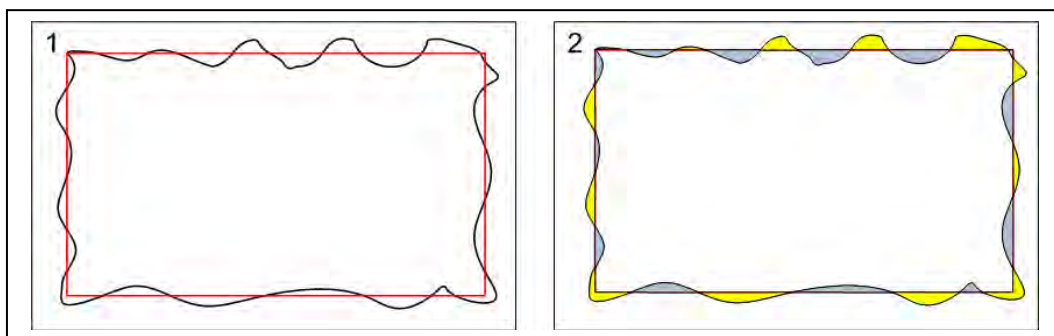


FIGURA 77 – EDIFICAÇÃO COM BORDAS NÃO-RETIFICADA E RETIFICADA (1) E COM ÁREAS EXTERNA (AMARELA) E INTERNA (AZUL) EM DESTAQUE (2)

FONTE: O Autor (2010)

Deve-se atentar para o fato de que as harmonizações realizadas procuram correlacionar o MDS e o MDT em suas áreas cujas informações geográficas devem ser iguais, quais sejam, nas regiões externas às edificações retificadas no processo. Em relação às áreas ocupadas pelas edificações, o MDS deve representá-las da forma mais fidedigna possível, com bordas lineares e coberturas retificadas, enquanto que o MDT deve representá-las pelo Plano da Base da Edificação.

No caso do MDS duas rotinas devem ser processadas, sendo uma referente aos *groundels* externos à edificação (*groundels* amarelos na Figura 77-1) e outra referente aos *groundels* internos (*groundels* azuis na Figura 77-1). As altitudes dos *groundels* externos devem ser substituídas pelas dos *groundels* correspondentes no MDT. As altitudes dos *groundels* internos devem ser determinadas novamente em virtude das antigas corresponderem à altitude do MDT e não do MDS. Utilizando somente os *groundels* da cobertura da edificação (internos ao polígono na Figura 77-2, excluindo os *groundels* em amarelo e azul), e o método de interpolação Vizinho Mais Próximo (Equações 19 e 20), determinam-se as novas altitudes desses *groundels*.

Com objetivo de melhor representar a área ocupada pela edificação no terreno optou-se por utilizar um plano de altitude constante, paralelo ao plano XY. Essa ação evita que a base da edificação apresente diversos planos inclinados diferentes, o que não representa fidedignamente o terreno sem a edificação. Esse plano foi denominado de Plano da Base da Edificação. A Equação 49 apresenta a equação de um plano π qualquer, a Equação 50 a equação de um plano Φ paralelo ao plano coordenado XY e a Figura 78 apresenta os planos π e Φ em um sistema de coordenadas.

$$aX + bY + cZ + d = 0 \quad (49)$$

$$eZ + f = 0 \quad (50)$$

onde:

- “a”, “b”, “c” e “d” são os coeficientes da equação geral do plano π e
- “e” e “f” são os coeficientes do plano Φ , paralelo ao plano coordenado XY.

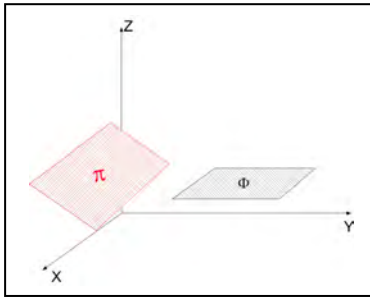


FIGURA 78 – PLANO π (QUALQUER) E PLANO Φ (PARALELO AO PLANO COORDENADO XY)
 FONTE: O Autor (2010)

A Equação 50 pode ser reescrita, simplificando os coeficientes “e” e “f” na forma apresentada na Equação 51, onde o coeficiente “h” passa a representar a altitude do plano Φ em relação ao plano coordenado XY.

$$Z = -\frac{f}{e} = h \quad (51)$$

A determinação da altitude do Plano da Base da Edificação foi realizada utilizando a Média Móvel Restritiva, também empregada no item 3.3.5.2.2 Determinação dos Vértices do Polígono, com base nas Equações 39 e 52. Esse processo foi denominado de Plano Médio Móvel Restritivo e consiste nas seguintes ações:

- De posse das altitudes dos *groundels* pertencentes a uma edificação deve-se determinar sua altitude média (Equação 52);
- Calcular o desvio-padrão desse conjunto de altitudes (Equação 39);
- Formar um novo conjunto de pontos a partir da eliminação dos pontos cujas altitudes se encontram fora dos limites do intervalo ($h_{media} - \sigma \leq h_i \leq h_{media} + \sigma$);
- Repetir iterativamente o processo até que dois conjuntos de pontos consecutivos sejam iguais, sem que haja nenhuma eliminação de pontos e
- A altitude do plano médio móvel, que no caso corresponde à base da edificação, é a altitude média do último conjunto de *groundels*.

$$h_{media} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_N}{N} \quad (52)$$

onde:

- h_{media} é a altitude média do conjunto de *groundels*;
- h_i é a altitude do *groundel* “i”; e
- N é o número de *groundels* que formam a edificação.

3.3.7 Retificação das Coberturas das Edificações

Nessa etapa as bordas retificadas das edificações já foram determinadas e implantadas no MDT e nas partes externas das edificações (área amarela da Figura 77-2) no MDS. Resta agora retificar as altitudes dos *groundels* das partes internas das edificações (área azul da figura 77-2), reconstruindo suas coberturas. A metodologia proposta consiste em reconstituir essas coberturas com o emprego de planos paralelos ao plano coordenado XY da Figura 78, determinados com emprego da Média Móvel Restritiva a partir de uma segmentação dos *groundels* com base em sua altitude e localização.

A primeira tarefa é o estabelecimento do Plano Mínimo da Cobertura da Edificação. Ele é um plano que corresponde à base da cobertura da edificação, e é calculado pelo algoritmo Plano Médio Móvel, baseado na Média Móvel Restritiva. Normalmente se utiliza todos os *groundels* internos aos limites da edificação, mas foi inserida uma opção na qual o operador humano pode escolher o percentual de pontos a ser utilizado a partir do ponto do *groundel* de menor altura da edificação. Com isso, se forem selecionados 20% dos *groundels*, os 20% dos pontos de menor altura serão utilizados. Se todos forem escolhidos, 100% dos *groundels* serão utilizados. Essa opção é particularmente importante quando a edificação a ser retificada é resultante da união de diversas edificações de menor porte. A altitude do Plano Mínimo da Cobertura da Edificação corresponde a altitude mínima da cobertura da edificação, ou do conjunto de edificações.

A seguir realiza-se uma segmentação dos *groundels* da cobertura, no qual se procura separar o conjunto de *groundels* de acordo com sua localização e altitude, criando grupamentos de *groundels* com propriedades semelhantes. Em um mesmo segmento podem coexistir diversos grupamentos de *groundels*, agrupados de acordo com suas propriedades localização e altitude. Posteriormente, cada grupamento transformar-se-á em um plano médio móvel formado por *groundels* de

igual altitude, e o conjunto desses planos constituirá a cobertura retificada da edificação. O número total de segmentos é determinado pela Equação 53.

$$nr_seg = \frac{h_{MAX} - h_{MCE}}{\sigma_h} \quad (53)$$

onde:

- nr_seg é o número de segmentos (planos) da cobertura da edificação a ser retificada;
- h_{MAX} é a altitude máxima do conjunto de *groundels*;
- h_{MCE} é a altitude do Plano Mínimo da Cobertura da Edificação; e
- σ_h é o desvio-padrão da altitude dos *groundels* da cobertura da edificação.

Para cada segmento são retificados tantos planos médios móveis quantos grupamentos existirem. A única exceção é o primeiro segmento, que sempre será representado pelo Plano Mínimo da Cobertura da Edificação.

Por exemplo, em uma cobertura formada por três segmentos, o primeiro segmento é formado por um plano único, o Plano Mínimo da Cobertura da Edificação. Se no segundo segmento existirem quatro grupamentos, serão retificados quatro diferentes planos médios móveis, sendo um para cada grupamento. Se no terceiro segmento houver um grupamento, um plano médio móvel será determinado. Os critérios de reconstrução dos planos médios móveis de cada grupamento são os mesmos apresentados no item 3.3.5 Retificação da Base Planimétrica, ou seja, cada grupamento de *groundels* é tratado como se fosse outra edificação isolada, somente tendo a propriedade de ser interior a edificação original. A união de todos os planos médios móveis, retificados a partir de cada grupamento, forma a cobertura retificada da edificação. A Figura 79 apresenta uma edificação com essas características.

Como mecanismo de filtragem de pequenas áreas não-significativas existentes na cobertura foram utilizados filtros de área de forma similar a utilizada no item 3.3.5 Retificação da Base Planimétrica. O critério automatizado de eliminação de pequenos elementos foi estabelecido com base na razão entre as áreas do grupamento em análise e do Plano Mínimo da Cobertura da Edificação, conforme apresentado na Equação 54. Eles foram estabelecidos a partir de resultados obtidos

durante a realização da presente pesquisa. Se a área do grupamento for inferior a área mínima prevista no Quadro 07, o grupamento não é retificado nem representado na cobertura da edificação.

$$R_{seg} = \frac{A_{Seg}}{A_{PlanoM\u00edni}} \quad (54)$$

onde:

- R_{seg} é a razão da área do segmento;
- A_{Seg} é a área do segmento (m^2) e
- A_{MCE} é a área do Plano Mínimo da Cobertura da Edificação (m^2).

Área do Plano Mínimo da Cobertura da Edificação (m^2)	Razão da Área do Segmento
$A_{MCE} \leq 200 m^2$	5 %
$200 m^2 < A_{MCE} \leq 300 m^2$	4 %
$300 m^2 < A_{MCE} \leq 500 m^2$	3 %
$500 m^2 < A_{MCE} \leq 800 m^2$	2,5 %
$A \geq 800 m^2$	1,5 %

QUADRO 07 – FILTROS ALTIMÉTRICOS POR POLÍGONO
 FONTE: O Autor (2010)

Como exemplo, a Figura 79 apresenta uma edificação (em vista isométrica) cuja base (azul claro) foi retificada e que necessita que sua cobertura o seja (azul escuro). Nesse caso, foram utilizados 100% dos *groundels* da edificação.

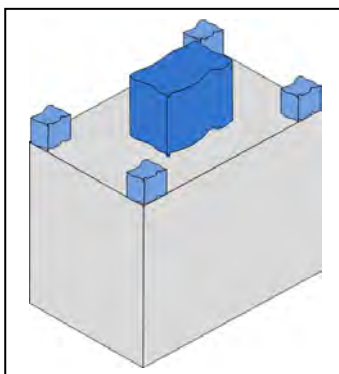


FIGURA 79 – EDIFICAÇÃO A TER SUA COBERTURA RETIFICADA
 FONTE: O Autor (2010)

A Figura 80 apresenta a cobertura segmentada (em 3 segmentos), na qual os grupamentos não retificados se encontram em sua parte esquerda, os retificados em sua parte central e a cobertura retificada e montada na parte direita (todos em vista superior). Deve-se notar que o 2º Segmento apresenta 4 grupamentos, os quais foram retificados de forma isolada (como se edificações isoladas o fossem). Por fim, a Figura 81 apresenta a edificação presente na Figura 79 com sua cobertura reconstruída.

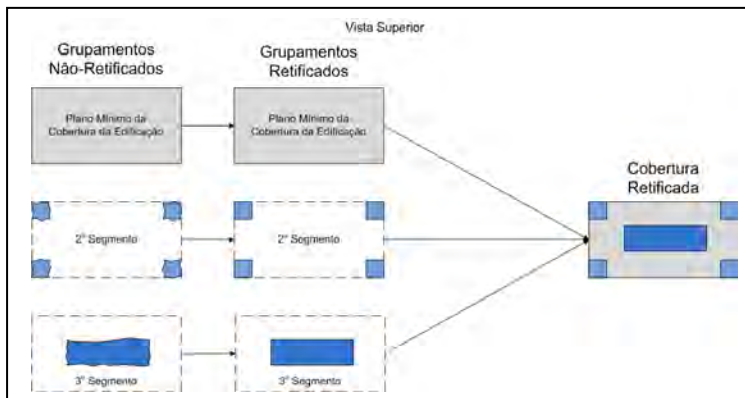


FIGURA 80 – RETIFICAÇÃO DE SEGMENTOS DE UMA COBERTURA
 FONTE: O Autor (2010)

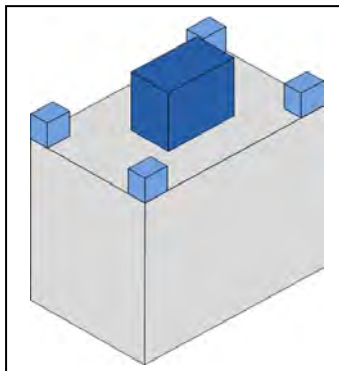


FIGURA 81 – EDIFICAÇÃO COM COBERTURA RECONSTRUÍDA
 FONTE: O Autor (2010)

A partir desse ponto considera-se que o MDS, formado pelo terreno e por todas as edificações retificadas e reconstruídas, está pronto para ser empregado na geração da ortoimagem verdadeira. Dois produtos são disponibilizados para as etapas seguintes. O primeiro é o próprio MDS na forma de malha regular, que será utilizado na geração da ortoimagem verdadeira e na detecção das áreas oclusas. A Figura 81 apresenta a vista isométrica da edificação retificada que corresponde ao MDS. O segundo é uma nova imagem de desnível, derivada da subtração do MDT a partir do MDS da região, na qual os pontos de altura nula recebem a código “0” e os *groundels* não nulos o código “1”. A partir desse ponto a Imagem de Desnível passa

a ser denominada de Base Planimétrica. A Figura 82 apresenta a Base Planimétrica correspondente a edificação reconstruída presente na Figura 81.

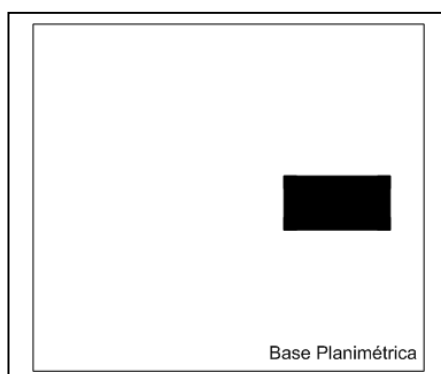


FIGURA 82 – EXEMPLO DA BASE PLANIMÉTRICA DERIVADA DA EDIFICAÇÃO DA FIGURA 81
FONTE: O Autor (2010)

3.3.8 Detecção das Áreas Oclusas

A detecção das áreas oclusas é uma tarefa que visa identificar os *groundels* do MDS que estão ocultos no terreno quando vistos a partir do CP da fotografia aérea. O produto resultante dessa etapa é uma imagem binária, denominada Mapa de Visibilidade, na qual os *groundels* podem ter dois estados, ocluso (código “1”) ou visível (código “0”).

O método *H-Buffer* proposto prevê que a detecção da oclusão é realizada em três etapas distintas, sendo na primeira etapa realizada a detecção da oclusão principal em terceira dimensão. Na segunda, é feita uma complementação à primeira etapa com emprego do algoritmo Elimina Porção-M (em duas dimensões). Por fim, é realizada a Atualização do Mapa de Visibilidade, pela execução da operação de subtração da Base Planimétrica do Mapa de Visibilidade.

3.3.8.1 Detecção da Oclusão Principal

No item 2.3.3.6.1 foi apresentado o método de detecção de oclusões *Z-Buffer*, no qual o critério de detecção de quem é o *groundel* ocluso e o oclisor é baseado em suas distâncias do centro perspectivo até suas respectivas projeções na fotografia aérea. Foi apresentada, também, uma variação desse método, denominado Método Altura-Buffer, no qual o critério de detecção é substituído pela comparação das alturas dos *groundels*, onde o mais alto é o oclisor do mais baixo.

A metodologia proposta no método *H-Buffer* prevê uma evolução desses dois métodos, na qual o MDS e o MDT são utilizados em conjunto para detectar quais são os *groundels* oclusos na região analisada. Nos *groundels* nos quais o MDS e o MDT possuem as mesmas coordenadas altimétricas, somente as informações do MDS são utilizadas, mas nos *groundels* nos quais elas diferem as duas altitudes são utilizadas, indicando que toda projeção vertical dessa área é oclusa. Isso ocorre, por exemplo, nas edificações e permite que parte da incapacidade do algoritmo em detectar as oclusões da componente vertical da edificação seja solucionada (*vide* item 2.3.3.6.1 Método *Z-Buffer*).

A Figura 83 apresenta graficamente a solução proposta (vista de perfil), com os locais onde o MDT e o MDS possuem mesma altitude em preto, e os locais onde não possuem altitude igual em vermelho (MDT) e azul (MDS). Ainda nessa figura é possível verificar que pelo método tradicional somente a área entre os pontos A'' e A' (em verde) seria detectada e com a introdução do MDT no processo, é possível identificar que a oclusão existente entre os pontos A'' e D' (em laranja) no Mapa de Visibilidade, solucionando, em parte, o problema do método *Z-Buffer*.

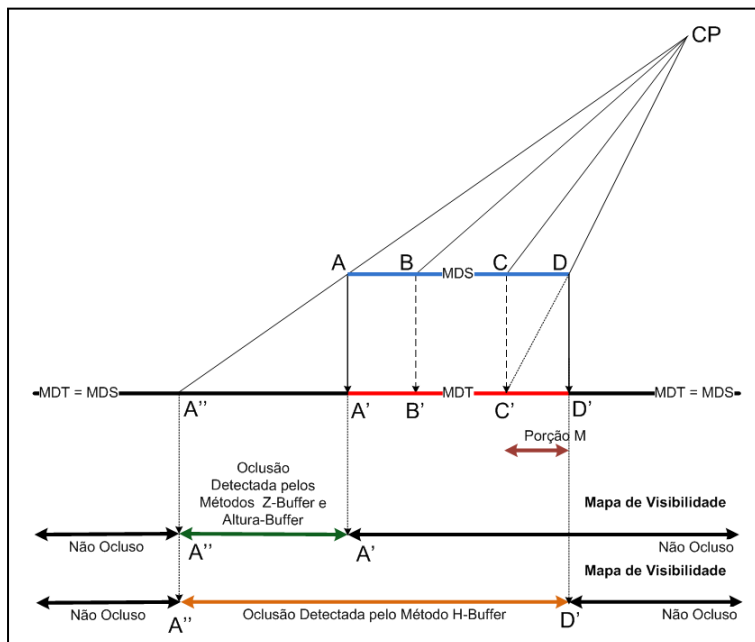


FIGURA 83 – DETECÇÃO DA OCLUSÃO PRINCIPAL

FONTE: O Autor (2010)

Uma consequência é que a Porção M, ou parte dela, pode assumir três estados diferentes para cada edificação, a saber: Não Representada, Interior e Separadora. O estado Não Representada é o mais simples, pois a Porção M

decorrente da componente vertical da edificação é totalmente eliminada. O polígono que representa a área oclusa é um polígono contínuo, com toda sua área interior oclusa (Figura 84). O estado Interior apresenta, também, um polígono contínuo, mas com uma pequena área interior que apresenta falsa visibilidade (“falso-positivo”). Sua causa é a presença de componentes verticais em pequenas construções na cobertura da edificação, conforme apresentado na Figura 85. Por fim, o estado Separadora é o mais complexo, pois a Porção M se interpõe no meio do que seria o polígono representativo da oclusão, criando dois polígonos diferentes para uma única edificação, conforme apresentado na Figura 86.

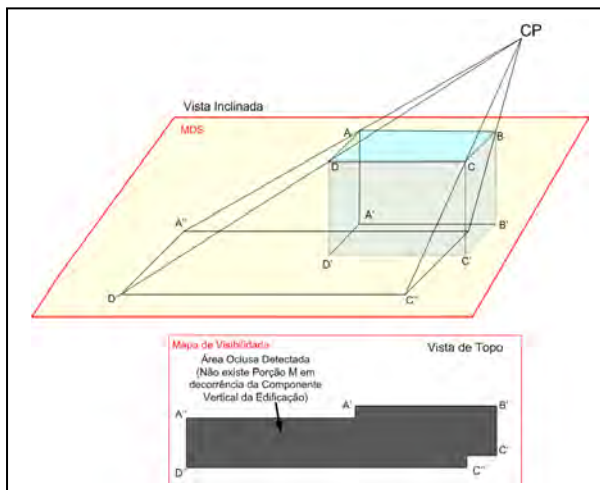


FIGURA 84 – PORÇÃO M NÃO REPRESENTADA
FONTE: O Autor (2010)

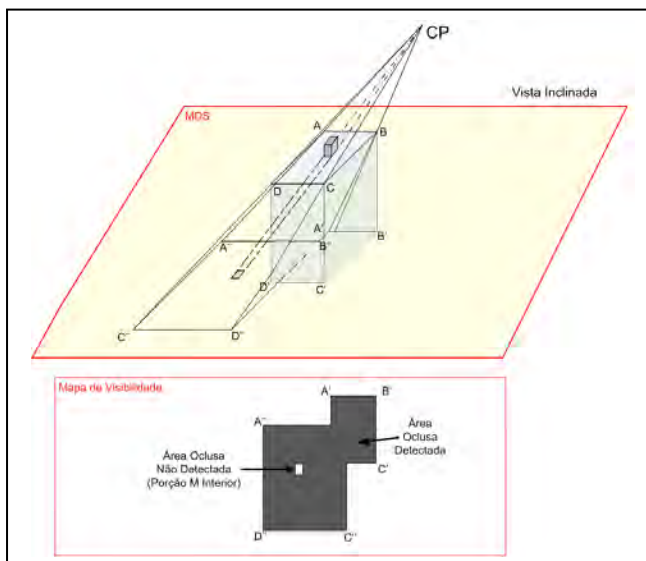


FIGURA 85 – PORÇÃO M INTERIOR
FONTE: O Autor (2010)

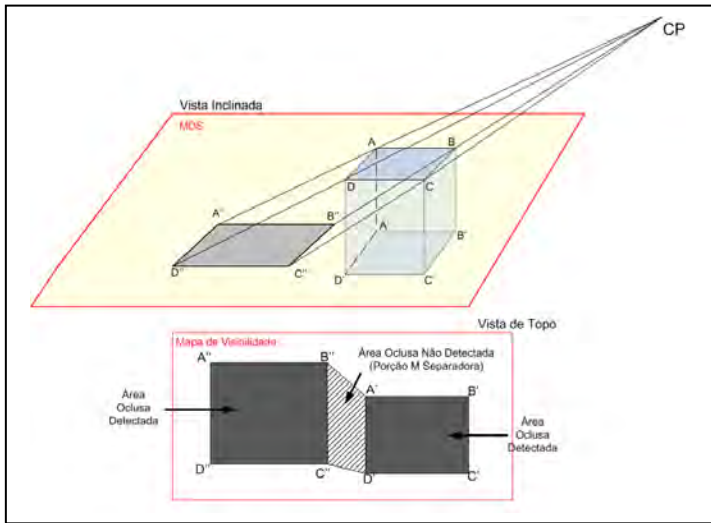


FIGURA 86 – PORÇÃO M SEPARADORA
 FONTE: O Autor (2010)

Antes de iniciar a etapa seguinte, os polígonos das oclusões existentes no Mapa de Visibilidade são reconstruídos, como se fossem edificações, conforme descrito no item 3.3.5 Retificação da Base Planimétrica. Isso possibilita que o sistema determine as equações das bordas de cada área oclusa e seus vértices, que serão utilizados na etapa seguinte.

Essa ação permite que o polígono interno que representa a Porção M no estado Interior (Figura 85) seja eliminado. O sistema identifica que existem dois polígonos, sendo um interior ao outro, e elimina o interior. Isso transforma o estado da Porção M de Interior para Não Representada, conforme apresentado na Figura 87.

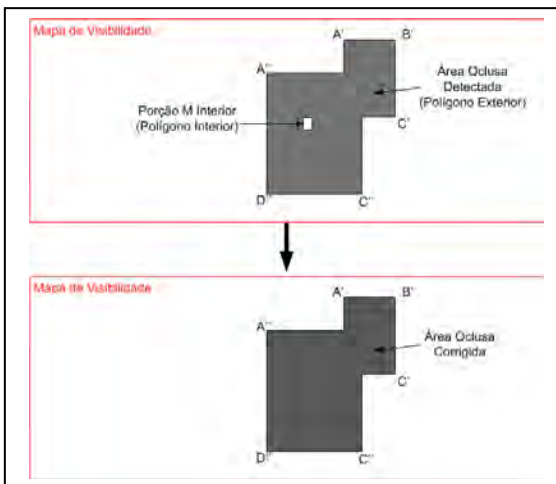


FIGURA 87 – TRANSFORMAÇÃO DO ESTADO DA PORÇÃO M DE INTERIOR PARA NÃO REPRESENTADA
 FONTE: O Autor (2010)

3.3.8.2 Algoritmo Elimina Porção M

A segunda etapa do Método *H-Buffer* consiste na supressão da Porção M existente no Mapa de Visibilidade, tanto a decorrente do estado Separadora do Algoritmo *H-Buffer* (Figura 86) quanto à Porção M Quina (Figura 16), que existe no Algoritmo *H-Buffer* de forma similar à do Método *Z-Buffer*.

A solução proposta em ambos os casos é baseada em uma propriedade na qual os pontos limítrofes da oclusão estão alinhados com o centro perspectivo da fotografia, conforme é possível verificar nas retas $\overline{CP-A-A''}$, $\overline{CP-C-C''}$ e $\overline{CP-D-D''}$ da Figura 84. A projeção desses pontos sobre o Plano XY permite verificar que, por exemplo, os azimutes planos das retas $\overline{CP-A'}$ e $\overline{CP-A''}$ são os mesmos, o que permite eliminar a Porção M pela introdução da reta $\overline{A'-A''}$ no Mapa de Visibilidade. O mesmo pode ser repetido para a reta $\overline{C'-C''}$. No caso desses dois pontos é possível identificar que essas retas são as que eliminam a Porção M porque os mesmos (pontos A', A'', C' e C'') são vértices do polígono de oclusão, o que não ocorre com os pontos B, e sua projeção B'', nem com o ponto D''. A Figura 88 apresenta a solução para a Porção M Quina existente na Figura 84, cujo estado é Não-Representada.

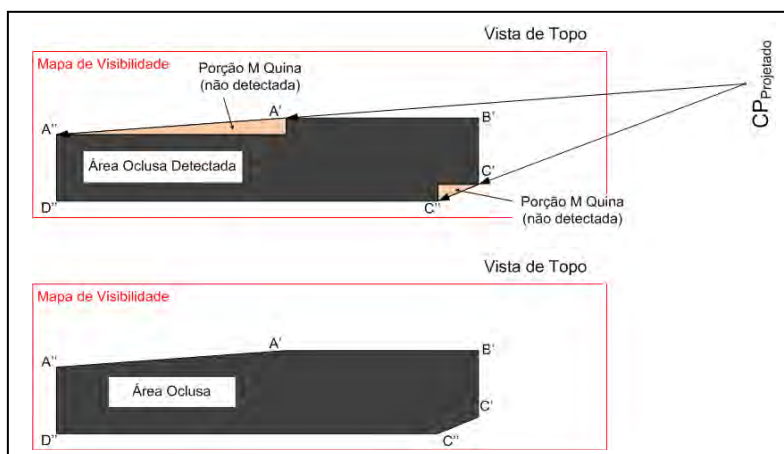


FIGURA 88 – ELIMINAÇÃO DA PORÇÃO M QUINA (ESTADO NÃO REPRESENTADA)

FONTE: O Autor (2010)

A solução para a Porção M Separadora é um pouco mais complexa, pois existe a necessidade de se estabelecer a conexão entre dois polígonos, e isso ocorre apenas no nível de implementação do algoritmo computacional. A propriedade é a mesma utilizada na Porção M Não Representada, ou seja, o uso de

azimutes iguais entre dois vértices e o CP Projetado. A Figura 89 apresenta essa solução para a edificação presente na Figura 86.

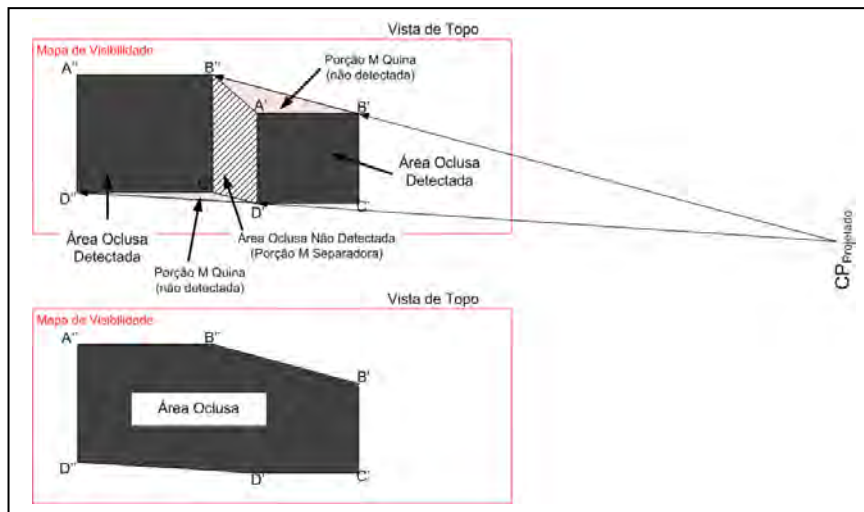


FIGURA 89 – ELIMINAÇÃO DA PORÇÃO M QUINA (ESTADO SEPARADORA)
 FONTE: O Autor (2010)

3.3.8.3 Atualização do Mapa de Visibilidade

Quando se utiliza os algoritmos *H-Buffer* e Elimina Porção M, determina-se a área total do terreno oclusa pela edificação. No entanto, é necessário retirar dessa área a parte que corresponde à cobertura da edificação (que é visível), para que a oclusão provocada pela edificação no terreno seja finalmente identificada. Essa operação é realizada com uma subtração matricial simples, com emprego de duas matrizes binárias, onde a Base Planimétrica (que contém a informação da cobertura da identificação) é retirada da área oclusa total (detectada nas duas etapas anteriores e presente no Mapa de Visibilidade). Essa operação corresponde a uma atualização do Mapa de Visibilidade, e é apresentada na Equação 55, e graficamente na Figura 90 (com base nas Figuras 86 e 89).

$$\text{Mapa de Visibilidade Atualizado} = \text{Mapa de Visibilidade} - \text{Base Planimétrica} \quad (55)$$

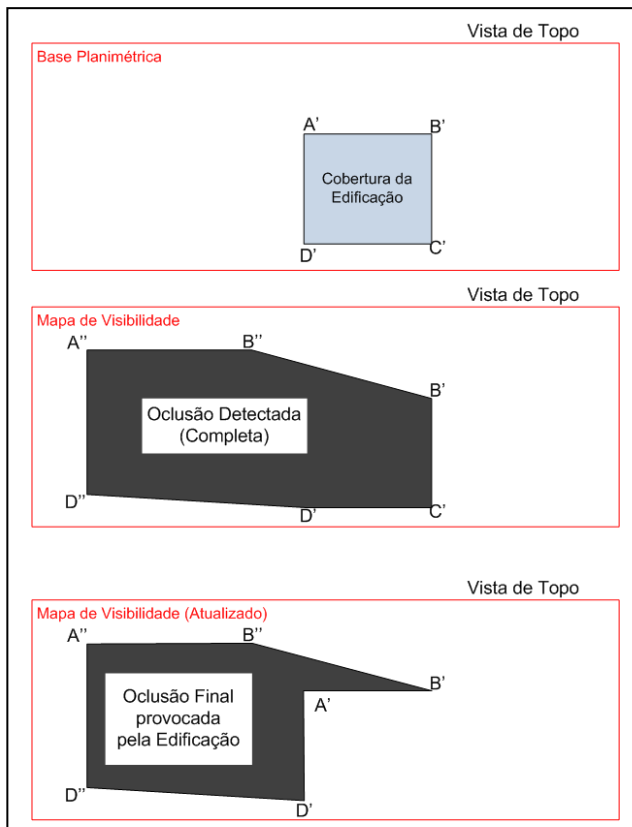


FIGURA 90 – ATUALIZAÇÃO DO MAPA DE VISIBILIDADE
 FONTE: O Autor (2010)

3.3.9 Ortorretificação da Fotografia Aérea

A geração da ortoimagem verdadeira foi implementada com o emprego do método inverso de ortorretificação de imagens, descrito no item 2.3.2 Geração de Ortoimagens. Esse método necessita do conhecimento prévio das coordenadas planialtimétricas de todos os *pixels* da ortoimagem a ser gerada. Não foi feita nenhuma adaptação especial para a metodologia proposta, visto que o algoritmo derivado do método escolhido já apresenta solução satisfatória para a retificação da fotografia aérea. O produto final dessa etapa é uma imagem ortorretificada no sistema de cores RGB.

3.3.10 Aplicação das Áreas Oclusas nas Ortoimagens Verdadeiras

Nessa fase ocorre a unificação dos produtos decorrentes da ortorretificação da fotografia aérea e da detecção das oclusões das edificações. A metodologia prevê que as áreas oclusas identificadas sejam transferidas para a ortoimagem, destacando-as. A implementação desse algoritmo é facilitada pelo emprego de matrizes com dimensões iguais ($N \times M$), tanto na ortoimagem quanto a do Mapa de Visibilidade. A transmissão dessa informação é realizada com base no algoritmo apresentado abaixo.

```

Para "i" variando de 1 até N
  Para "j" variando de 1 até M
    Se Mapa de Visibilidade (i,j) = 0 (não ocluso)
      Então
        Ortoimagem Verdadeira(i,j,:) = Ortoimagem (i,j,:)
      Senão
        Ortoimagem Verdadeira(i,j,:) = Identificador
    Fim
  Fim

```

onde:

- N e M são as dimensões (linha e coluna) das matrizes da ortoimagem e do Mapa de Visibilidade;
 - Ortoimagem é a imagem formada a partir da ortorretificação da fotografia aérea (realizada no item 3.3.9 Ortorretificação da Fotografia Aérea);
 - Mapa de Visibilidade é a matriz binária que contém as informações de visibilidade dos *groundels* do MDS, sendo "0" a de que o *groundel* é visível e "1" a de que é ocluso;
 - Ortoimagem Verdadeira (i,j,:) é a ortoimagem sobreposta das áreas oclusas;
- e
- Identificador é a cor que identifica os *pixels* da ortoimagem verdadeira que estão oclusos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de dois levantamentos (fotogramétrico e LIDAR) de duas regiões diferentes permitiu que cinco áreas de pesquisa fossem selecionadas. Nessas cinco áreas foram realizados experimentos que consistiram em gerar ortoimagens verdadeiras, com emprego dos modelos representativos do terreno e da superfície e das fotografias aéreas orientadas.

A elevada disponibilidade de fotografias aéreas para cada área de pesquisa possibilitou que fossem selecionadas somente algumas fotografias do conjunto total. Deve-se ressaltar que essa redução na quantidade de fotografias utilizadas somente foi possível devido a presente pesquisa não contemplar a substituição dos pixels das ortoimagens oclusos por outros pixels não oclusos das imagens adjacentes. Se essa etapa fosse realizada, a redução da quantidade de fotografias não seria possível. Assim, o conjunto inicial apresentado no item 3.2 Áreas de Estudo foi reduzido ao apresentado no Quadro 08.

Bloco	Área de Estudo	Fotografias
Centro Politécnico	ESCOLA	23
Bacacheri	DUPLA	42 e 43
Bacacheri	VILA	30
Bacacheri	ARQUIT	41, 42 e 43
Bacacheri	QUADRA	38 e 42

QUADRO 08 – ÁREAS DE ESTUDO E FOTOGRAFIAS UTILIZADAS EFETIVAMENTE

FONTE: O Autor (2010)

4.2 PONTOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE GEOMÉTRICA

Com a finalidade de avaliar a qualidade geométrica dos modelos representativos da superfície e do terreno e das ortoimagens verdadeiras geradas foi realizado o levantamento de campo de um conjunto de pontos, distribuídos no topo das diversas edificações reconstruídas ao longo das cinco áreas de estudo, denominados Pontos de Avaliação da Qualidade Geométrica (PAQG).

Para determinar as coordenadas dos pontos de avaliação foram implantadas, nas áreas de estudo, diversas estações Base, com as respectivas estações de Ré, cujas coordenadas foram determinadas pelo método Cinemático em Tempo Real

(RTK). A partir dessas estações foram realizados diversos irradiamentos simples, com emprego de uma estação total. O Quadro 09 apresenta a distribuição do número de PAQG por área de estudo e a Tabela 06 as coordenadas das estações Base e Ré utilizadas na determinação de suas coordenadas no sistema SAD-69, Fuso 22. As Figuras 91 a 98 a distribuição dos PAQG nas respectivas áreas de Estudo e a Tabela 07 suas coordenadas no sistema SAD-69 na projeção UTM fuso 22.

Bloco	Área de Estudo	Quantidade de Pontos de Avaliação
Centro Politécnico	ESCOLA	20
Bacacheri	DUPLA	24
Bacacheri	VILA	36
Bacacheri	ARQUIT	16
Bacacheri	QUADRA	36
Total		132

QUADRO 09 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG POR ÁREA DE ESTUDO

FONTE: O AUTOR (2010)

TABELA 06 – ESTAÇÕES BASE E RÉ DOS PAQG NO REFERENCIAL UTM (FUSO 22)

Área de Estudo	Estações	Coordenadas			Desvio-Padrão		
		E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)
ESCOLA	P01	677874,46	7183784,51	925,24	0,006	0,004	0,014
	P02	677884,62	7183807,15	925,29	0,005	0,004	0,015
	P03	678001,88	7183743,43	925,49	0,005	0,005	0,012
	P04	677985,12	7183703,92	926,44	0,004	0,006	0,010
DUPLA	D01	676877,68	7188292,26	919,77	0,005	0,010	0,033
	D02	676876,73	7188279,31	920,21	0,005	0,010	0,033
	D03	676775,59	7188297,36	915,87	0,003	0,019	0,008
	D04	676767,21	7188312,48	915,59	0,005	0,006	0,024
VILA	V01	678698,30	7189170,51	908,71	0,008	0,009	0,019
	V02	678701,84	7189206,39	911,00	0,006	0,006	0,016
	V03	678663,88	7189247,76	912,71	0,001	0,001	0,001
	V04	678693,74	7189285,83	912,95	0,008	0,008	0,020
	V05	678700,20	7189327,24	912,49	0,013	0,018	0,039
ARQUIT	A01	676277,77	7188564,53	910,34	0,005	0,021	0,048
	A02	676259,95	7188586,58	910,80	0,006	0,022	0,047
	A03	676474,51	7188468,79	909,11	0,006	0,022	0,047
	A04	676459,17	7188396,46	909,73	0,007	0,022	0,057
QUADRA	Q01	676736,35	7188184,50	914,47	0,007	0,013	0,038
	Q02	676738,24	7188207,03	913,32	0,005	0,011	0,031
	Q03	676727,50	7188083,55	915,02	0,018	0,048	0,074
	Q04	676706,74	7188092,57	914,82	0,006	0,010	0,031
	Q05	676589,78	7188103,31	910,19	0,005	0,011	0,031
	Q06	676706,74	7188092,57	914,82	0,006	0,0012	0,035
	Q07	676565,48	7188206,94	908,17	0,006	0,014	0,038
	Q08	676577,40	7188246,02	909,00	0,004	0,009	0,024
	Q09	676669,06	7188247,15	909,16	0,011	0,015	0,039
	Q10	676577,43	7188246,02	909,00	0,06	0,009	0,037

Fonte: O Autor (2010)

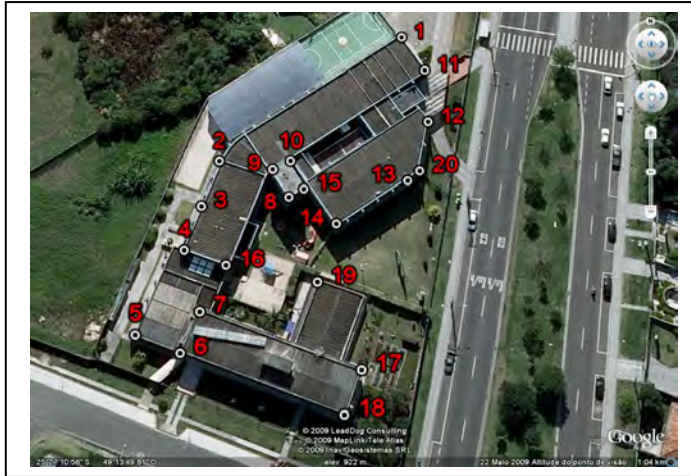


FIGURA 91 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: MODIFICADO DE GOOGLE (2009)



FIGURA 92 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA DUPLA
 FONTE: MODIFICADO DE GOOGLE (2009)

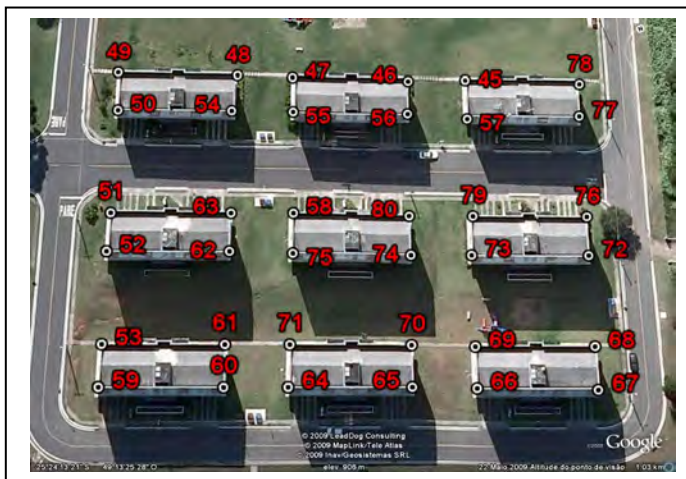


FIGURA 93 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA VILA
 FONTE: MODIFICADO DE GOOGLE (2009)

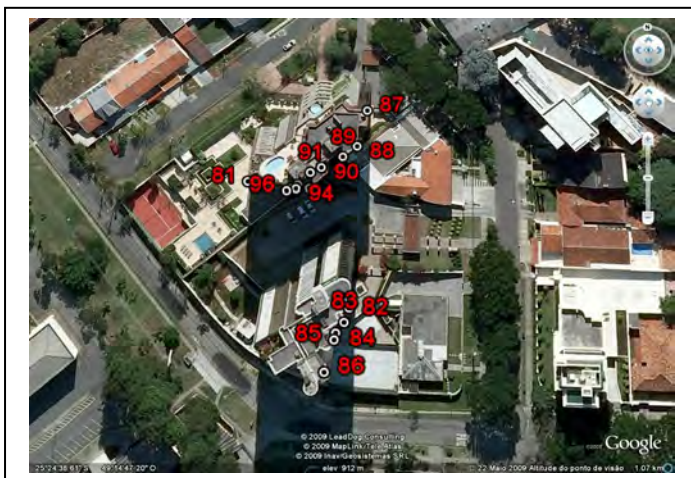


FIGURA 94 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA ARQUIT
 FONTE: MODIFICADO DE GOOGLE (2009)

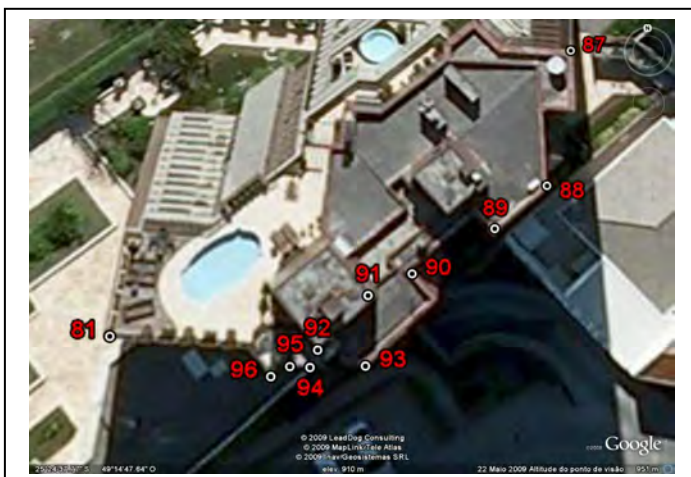


FIGURA 95 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA ARQUIT (PARTE NORTE)
 FONTE: MODIFICADO DE GOOGLE (2009)

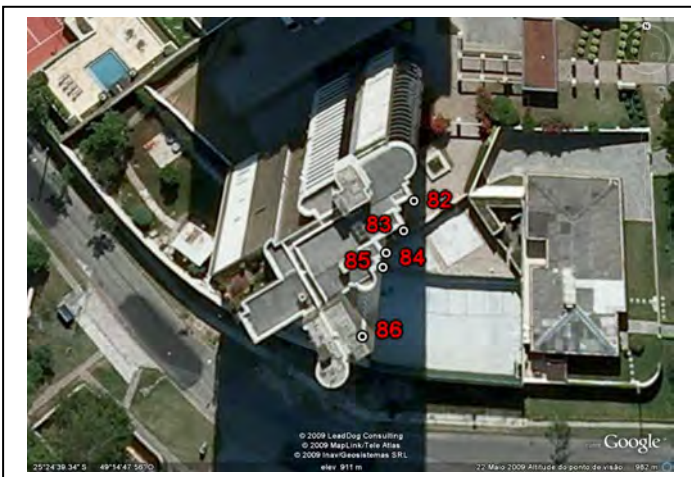


FIGURA 96 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA ARQUIT (PARTE SUL)
 FONTE: MODIFICADO DE GOOGLE (2009)



FIGURA 97 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA QUADRA
 FONTE: MODIFICADO DE GOOGLE (2009)



FIGURA 98 – DISTRIBUIÇÃO DOS PAQG DA ÁREA QUADRA (PARTE SUDESTE)
 FONTE: MODIFICADO DE GOOGLE (2009)

TABELA 07 – PAQG NO SISTEMA SAD-69 REFERENCIAL UTM (FUSO 22)

Área de Estudo	Ponto	Coordenadas			Área de Estudo	Ponto	Coordenadas		
		E (m)	N(m)	h(m)			E(m)	N(m)	h(m)
ESCOLA	01	677979,35	7183807,88	934,81	VILA	67	678758,97	7189159,34	923,29
	02	677936,69	7183780,15	934,84		68	678762,60	7189167,66	923,59
	03	677932,53	7183770,39	934,85		69	678739,13	7189177,95	923,59
	04	677928,35	7183760,67	934,83		70	678726,89	7189183,30	923,46
	05	677918,28	7183743,32	931,30		71	678703,47	7189193,55	923,46
	06	677928,63	7183738,98	933,44		72	678770,12	7189184,89	924,24
	07	677932,32	7183747,51	933,45		73	678746,66	7189195,18	924,25
	08	677952,06	7183770,23	937,87		74	678734,48	7189200,54	925,59
	09	677948,07	7183777,03	937,83		75	678710,98	7189210,82	925,64
	10	677951,75	7183779,24	937,94		76	678773,74	7189193,15	924,26
	11	677985,28	7183798,08	934,84		77	678782,85	7189213,96	924,22
	12	677984,70	7183786,23	934,27		78	678786,46	7189222,23	924,22
	13	677978,80	7183772,66	934,21		79	678750,30	7189203,42	924,30
	14	677962,33	7183763,68	934,24		80	678738,09	7189208,76	925,63
	15	677955,82	7183772,50	937,95		81	676398,10	7188488,41	955,89
	16	677938,95	7183756,19	934,81		82	676425,41	7188457,19	979,72
	17	677966,01	7183733,08	933,44		83	676424,16	7188453,65	979,70
	18	677962,34	7183724,57	933,46		84	676421,58	7188450,00	979,72
	19	677958,23	7183752,37	930,64		85	676421,12	7188448,60	979,72
	20	677981,02	7183774,78	934,20		86	676418,52	7188440,87	982,51
DUPLA	21	676849,56	7188290,43	946,94	ARQUIT	87	676432,98	7188509,13	958,19
	22	676857,29	7188278,71	949,90		88	676429,33	7188497,80	958,87
	23	676844,31	7188270,01	956,09		89	676424,85	7188494,31	958,86
	24	676840,74	7188267,62	956,07		90	676418,59	7188492,02	958,35
	25	676815,70	7188247,80	949,87		91	676416,19	7188491,03	962,55
	26	676827,39	7188255,60	946,89		92	676412,13	7188487,84	962,54
	27	676836,13	7188242,50	956,12		93	676415,13	7188485,62	958,37
	28	676838,53	7188238,92	956,11		94	676412,39	7188485,99	960,47
	29	676847,22	7188225,88	949,95		95	676410,31	7188486,25	960,46
	30	676827,81	7188247,59	950,07		96	676408,54	7188484,84	955,26
	31	676839,98	7188229,32	950,08		97	676724,55	7188224,15	916,55
	32	676836,35	7188230,33	954,02		98	676722,11	7188204,04	916,96
	33	676827,37	7188243,83	954,01		99	676716,95	7188204,60	921,25
	34	676836,48	7188281,87	956,73		100	676708,21	7188190,14	922,81
	35	676832,94	7188279,51	956,73		101	676712,20	7188174,50	920,57
	36	676845,03	7188284,97	950,72		102	676714,90	7188167,51	919,57
	37	676826,81	7188272,81	950,73		103	676716,11	7188156,06	917,32
	38	676830,51	7188272,36	954,57		104	676686,32	7188167,82	927,99
	39	676843,99	7188281,33	954,58		105	676692,26	7188167,16	927,99
	40	676819,86	7188270,77	947,56		106	676698,32	7188159,68	928,00
	41	676827,65	7188259,14	950,52		107	676682,38	7188141,64	927,99
	42	676824,40	7188234,90	956,76		108	676682,98	7188135,46	930,66
	43	676826,76	7188231,40	956,74		109	676670,63	7188136,77	930,66
VILA	44	676835,52	7188218,26	947,48	QUADRA	110	676672,24	7188130,36	932,92
	45	678762,98	7189232,43	923,87		111	676689,74	7188154,76	932,90
	46	678750,75	7189237,79	925,18		112	676688,73	7188133,83	928,00
	47	678727,35	7189248,04	925,21		113	676687,41	7188120,98	927,99
	48	678715,08	7189253,42	926,22		114	676679,50	7188114,42	928,00
	49	678691,63	7189263,66	926,22		115	676669,54	7188115,47	927,98
	50	678687,99	7189255,43	926,22		116	676681,32	7188119,89	930,97
	51	678678,94	7189234,64	926,26		117	676664,64	7188136,36	927,98
	52	678675,31	7189226,41	926,27		118	676624,13	7188119,53	918,06
	53	678667,77	7189209,17	923,00		119	676592,25	7188135,89	917,71
	54	678711,48	7189245,18	926,22		120	676585,03	7188125,12	914,80
	55	678723,71	7189239,83	925,21		121	676579,84	7188125,63	916,24
	56	678747,19	7189229,58	925,18		122	676578,23	7188162,04	914,83
	57	678759,39	7189224,23	923,89		123	676583,43	7188161,50	916,28
	58	678714,63	7189219,06	925,29		124	676592,81	7188154,93	916,36
	59	678664,19	7189200,93	923,06		125	676593,36	7188160,51	916,82
	60	678687,62	7189190,64	923,06		126	676609,93	7188158,82	916,81
	61	678691,23	7189198,90	923,06		127	676580,96	7188181,64	911,93
	62	678698,83	7189216,14	926,31		128	676585,10	7188181,23	913,11

TABELA 07 – PAQG NO SISTEMA SAD-69 REFERENCIAL UTM (FUSO 22)

Área de Estudo	Ponto	Coordenadas			Área de Estudo	Ponto	Coordenadas		
		E (m)	N(m)	h(m)			E(m)	N(m)	h(m)
	63	678702,42	7189224,40	926,30		129	676588,85	7188188,81	914,07
	64	678699,82	7189185,30	923,18		130	676583,61	7188210,87	915,06
	65	678723,28	7189175,02	923,15		131	676584,92	7188222,82	915,07
	66	678735,58	7189169,63	923,33		132	676655,79	7188224,86	914,30

Fonte: O Autor (2010)

4.3 EXPERIMENTOS

4.3.1 Experimento 01 - Área ESCOLA

A área ESCOLA pertence ao Bloco Centro Politécnico e contém uma série de edificações com diversas coberturas planas com diferentes alturas, unidas por um, ou mais, de seus lados, formando um único conjunto arquitetônico. Seus lados são formados por segmentos de reta, unidos por vértices bem definidos. Os objetivos desse experimento são analisar o comportamento da metodologia em reconstruir esse tipo de edificação, avaliar a capacidade de detecção de oclusões pelo Método *H-Buffer*, avaliar a qualidade geométrica da ortoimagem verdadeira gerada, verificar a existência de tendenciosidade nos erros decorrentes da reconstrução da edificação e da geração da ortoimagem verdadeira, e verificar melhoria na exatidão do uso de ortofotografias verdadeiras em vez de ortofotografias convencionais em ambiente urbano.

4.3.1.1 Reconstrução da Edificação

Como foi mencionado no item 3.2 Áreas de Estudo, nessa área estavam disponíveis apenas as informações do primeiro e do último pulso do levantamento LIDAR, o que fez com que, inicialmente, somente o MDS pudesse ser reconstruído. Isso ocorreu porque a lista de pontos dessa área de pesquisa não foi manipulada pelo programa Terrascan. Foi necessária, então, a execução de uma etapa prévia para filtrar os pontos do MDS pertencentes às edificações, o que permitiu que os pontos que formam o MDT da área fossem disponibilizados.

Essa filtragem consistiu de uma eliminação simples dos pontos do MDS que pertenciam às áreas dos objetos identificados como potenciais edificações. Como o foco principal do presente estudo é a geração de ortoimagens verdadeiras, procurou-se apenas eliminar os pontos com o emprego de um algoritmo simples, sem a realização de análises mais complexas do conjunto de pontos.

Sobre a Malha Regular do MDS realizou-se a detecção das bordas dos objetos pela aplicação do algoritmo Sobel. Após isso, os objetos com perímetro inferior a 100 pixels foram eliminados. A seguir, os pontos pertencentes ao interior dos objetos restantes foram eliminados da lista original de pontos, sendo criada uma lista de pontos que formou o MDT da área. Ambas as malhas regulares (MDS e MDT) foram geradas de acordo com a metodologia proposta, com resolução geométrica de 0,205 m. As Figuras 99 e 100 apresentam as malhas regulares do MDS e do MDT geradas, sendo possível observar na Figura 99 a presença de algumas entidades representadas por pequenos “picos” na porção central do modelo e, na Figura 100, que a base da edificação é formada por planos irregulares.

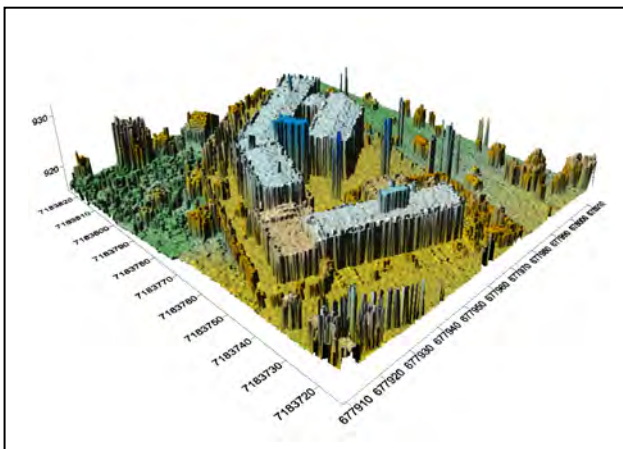


FIGURA 99 – MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

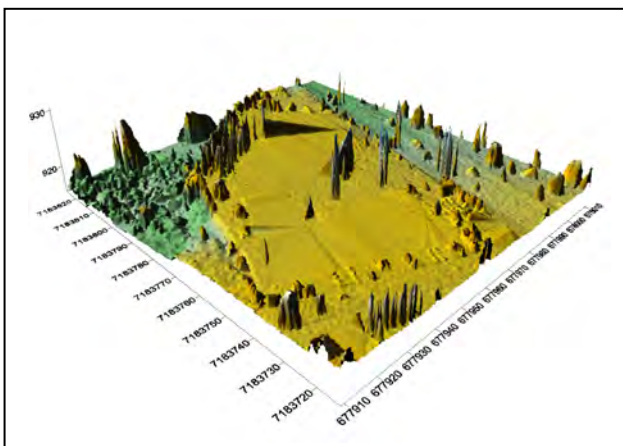


FIGURA 100 – MALHA REGULAR MDT ORIGINAL DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

Com base nessas duas malhas foi realizada a 1ª Compatibilização dos modelos (item 3.3.4). Nesse experimento específico, como houve a necessidade de se obter o MDT a partir do MDS com procedimentos simples, essa Compatibilização teve pouco nas duas malhas, conforme pode ser visualizado nas Figuras 101 e 102.

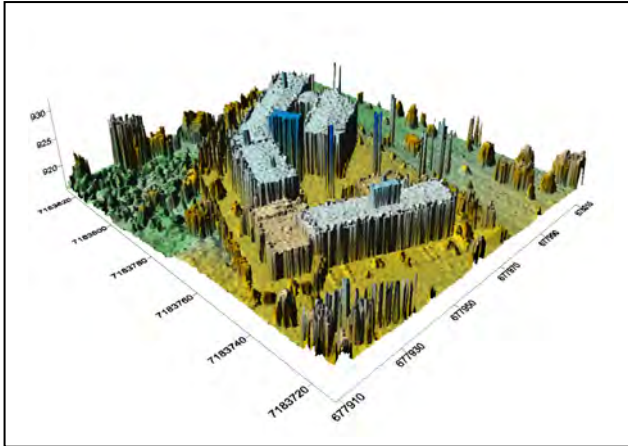


FIGURA 101 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

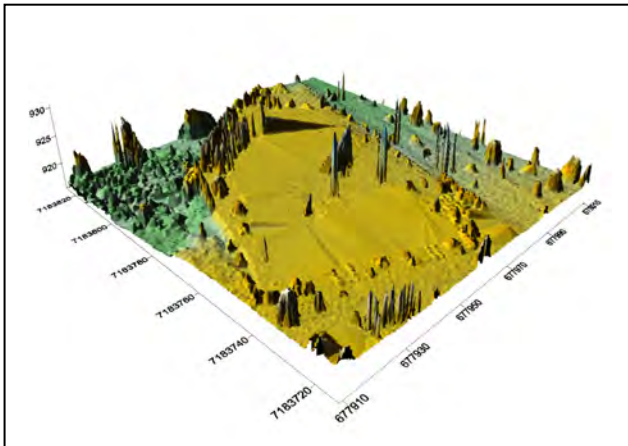


FIGURA 102 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

A etapa seguinte é a retificação da base planimétrica (item 3.3.5). Aplicando os procedimentos previstos na metodologia, descrito na Figura 40, foi possível obter as bordas da base da edificação, que foram retificadas. A Figura 103 apresenta essas bordas antes (em vermelho), e depois (em azul), da retificação. Nela é possível verificar que a borda irregular da edificação (em vermelho), originária dos dados LIDAR, foi retificada por segmentos de retas ajustadas (em azul), cujos vértices determinados delimitam esses segmentos. A Figura 104 apresenta, como outra visualização das bordas retificadas, a sobreposição da base planimétrica da edificação sobre um extrato da imagem hipsométrica do levantamento LIDAR.

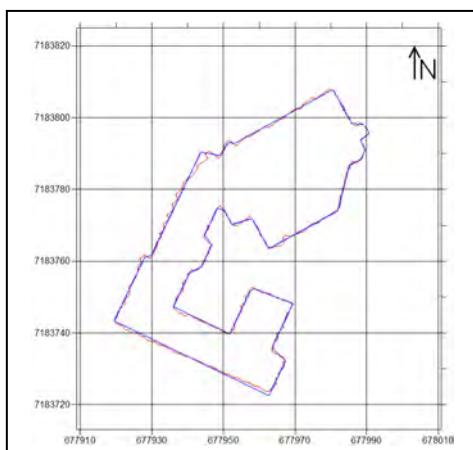


FIGURA 103 – EDIFICAÇÃO ANTES (VERMELHO) E DEPOIS (AZUL) DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA
 FONTE: O Autor (2010)



FIGURA 104 – BORDA RETIFICADA DA EDIFICAÇÃO SOBRE A IMAGEM HIPSOMÉTRICA
 FONTE: O Autor (2010)

A 2ª Compatibilização (item 3.3.6) tem por objetivos a correção das altitudes dos *groundels* do MDT e do MDS no entorno da edificação e, também, a representação da base da edificação no MDT por um plano médio. Comparando, visualmente, as Figuras 105 e 101 é possível verificar que a borda da edificação está mais bem definida na Figura 105, bem como, seu entorno. Na Figura 106 verifica-se que a base da edificação é representada pelo Plano da Base da Edificação, de altitude constante, destacando-se da representação do relevo em seu entorno.

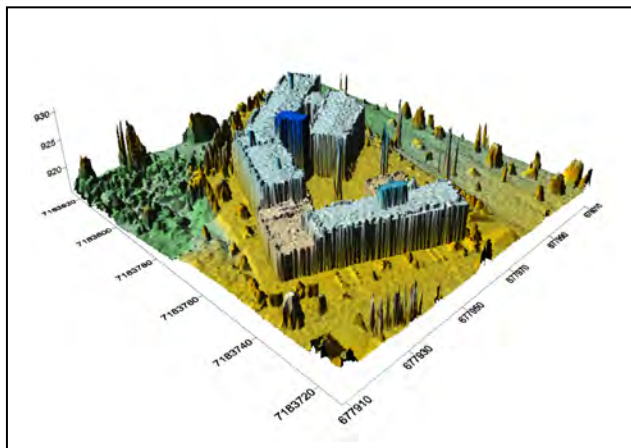


FIGURA 105 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

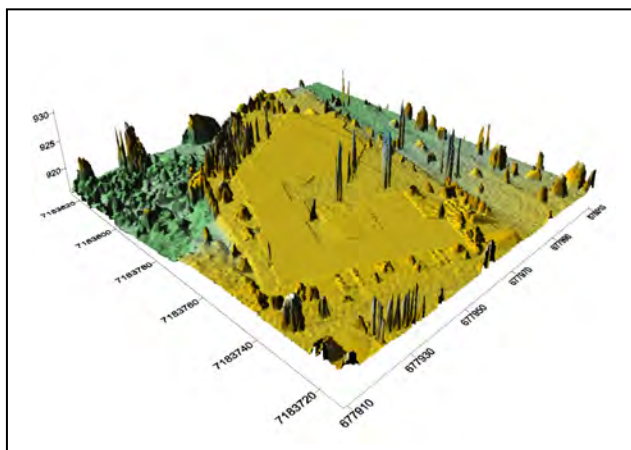


FIGURA 106 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

A Retificação da Cobertura da Edificação é realizada na etapa seguinte. A metodologia proposta conseguiu representar essa edificação, formada por diversos planos com alturas diferentes, sem que houvesse perda significativa de elementos. A depressão existente na parte central da edificação foi representada corretamente, bem como, a porção mais baixa em sua parte noroeste. Nesse experimento houve a necessidade de se iniciar a retificação da cobertura utilizando somente 20% dos pontos mais baixos, conforme opção apresentada no item 3.3.7 Retificação das Coberturas das Edificações. Uma falha nessa reconstrução foi que a pequena construção, situada na parte central da edificação mais ao sul (em azul na Figura 105), foi eliminada no processo, seguindo os parâmetros definidos no Quadro 07. As Figuras 107, com o MDS da área, e 108, com o MDS_n, apresentam a cobertura retificada da edificação.

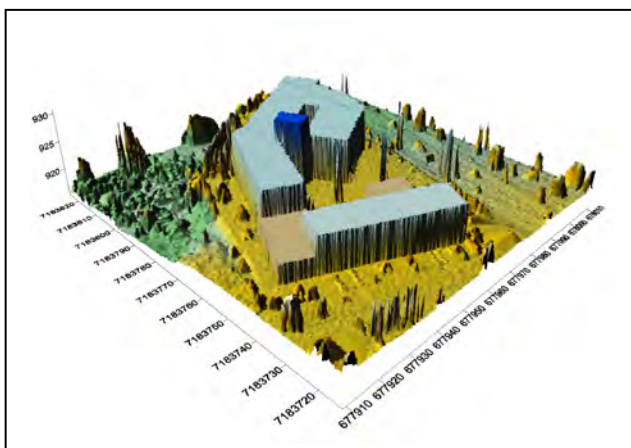


FIGURA 107 – MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DA COBERTURA DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

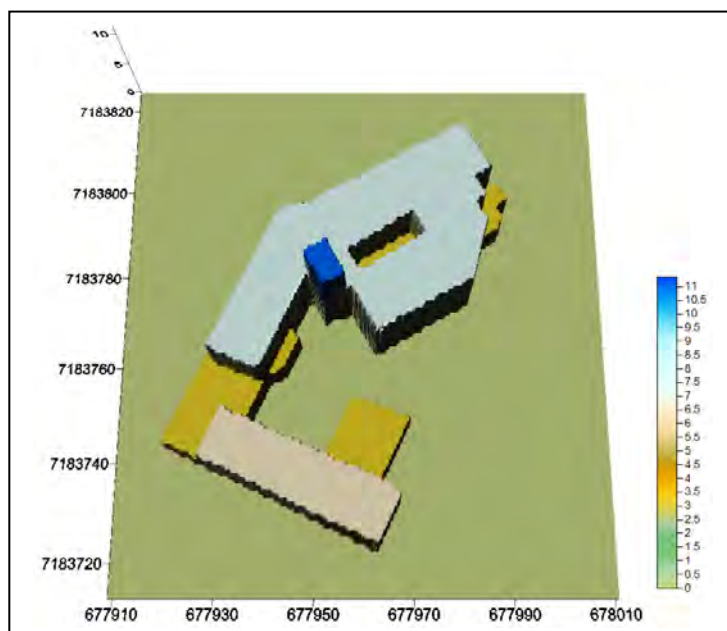


FIGURA 108 – MALHA REGULAR MDSn DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

Os PAQG permitem realizar a análise da exatidão da edificação reconstruída, comparando as coordenadas medidas no terreno com as medidas no MDS, que resultaram nas estatísticas apresentadas nas Tabelas 08 e 09 e no gráfico da Figura 109. No caso específico da reconstrução não foi possível identificar todos os vinte pontos apresentados na Tabela 07. Essa impossibilidade se deve à localização dos pontos 2, 3 e 13 (Figura 91), situados sobre colunas intermediárias da borda da edificação.

TABELA 08 – EXATIDÃO POSICIONAL DA EDIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO ESCOLA

Ponto	Coordenadas de Campo			Coordenadas do Modelo			Diferença		
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
01	677979,35	7183807,88	934,81	677980,24	7183808,05	934,09	-0,89	-0,17	0,72
04	677928,35	7183760,67	934,83	677928,30	7183760,84	934,09	0,05	-0,17	0,74
05	677918,28	7183743,32	931,30	677919,18	7183742,12	929,79	-0,90	1,20	1,51
06	677928,63	7183738,98	933,44	677928,27	7183738,69	932,99	0,36	0,29	0,45
07	677932,32	7183747,51	933,45	677932,37	7183746,67	932,99	-0,05	0,84	0,46
08	677952,06	7183770,23	937,87	677952,72	7183769,57	937,79	-0,65	0,66	0,08
09	677948,07	7183777,03	937,83	677948,97	7183776,62	937,79	-0,90	0,41	0,04
10	677951,75	7183779,24	937,94	677952,66	7183778,88	937,79	-0,91	0,36	0,15
11	677985,28	7183798,08	934,84	677986,28	7183798,14	934,09	-1,00	-0,06	0,75
12	677984,70	7183786,23	934,27	677985,26	7183786,66	934,09	-0,56	-0,43	0,18
14	677962,33	7183763,68	934,24	677962,88	7183763,38	934,09	-0,55	0,30	0,15
15	677955,82	7183772,50	937,95	677956,56	7183772,35	937,79	-0,74	0,15	0,16
16	677938,95	7183756,19	934,81	677939,13	7183755,91	934,09	-0,18	0,27	0,72
17	677966,01	7183733,08	933,44	677967,21	7183733,17	932,99	-1,20	-0,09	0,45
18	677962,34	7183724,57	933,46	677963,12	7183723,54	932,99	-0,78	1,03	0,47
19	677958,23	7183752,37	930,64	677958,61	7183752,02	929,79	-0,38	0,35	0,85
20	677981,02	7183774,78	934,20	677981,98	7183774,37	934,09	-0,97	0,41	0,11
Média							-0,55	0,29	0,47
Desvio-Padrão							0,43	0,44	0,38

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 09 – EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DA EDIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO ESCOLA

Ponto	Discrepâncias		
	Altimétrica (Δh)	Planimétrica ($\Delta E \Delta N$)	Planialtimétrica ($\Delta E \Delta N \Delta h$)
01	0,72	0,91	1,16
04	0,74	0,18	0,76
05	1,51	1,50	2,13
06	0,45	0,46	0,64
07	0,46	0,85	0,96
08	0,08	0,93	0,93
09	0,04	0,99	0,99
10	0,15	0,98	0,99
11	0,75	1,00	1,25
12	0,18	0,70	0,73
14	0,15	0,63	0,64
15	0,16	0,75	0,77
16	0,72	0,33	0,79
17	0,45	1,21	1,29
18	0,47	1,29	1,38
19	0,85	0,52	1,00
20	0,11	1,05	1,06
Média	0,47	0,84	0,78
Desvio-Padrão	0,38	0,35	0,36

Fonte: O Autor (2010)

onde:

$$\text{- Discrepância Altimétrica}_i = \sqrt{\Delta h_i^2} \quad (56)$$

$$\text{- Discrepância Planimétrica}_i = \sqrt{\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2} \quad (57)$$

$$\text{- Discrepância Planialtimétrica}_i = \sqrt{\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2 + \Delta h_i^2} \quad (58)$$

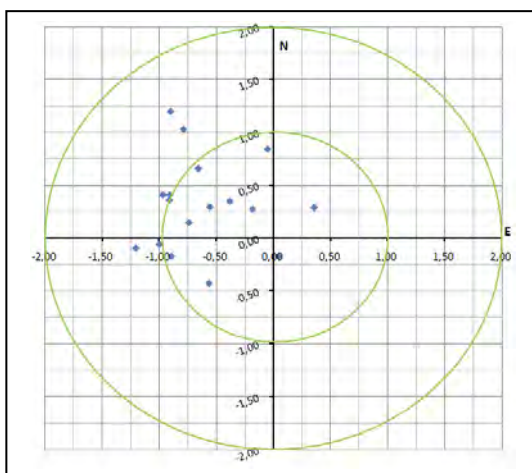


FIGURA 109 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

Em relação à forma da edificação é possível verificar, de acordo com as Figuras 103 e 104, que houve a manutenção da forma original externa e interna na reconstrução da edificação. A sobreposição da borda retificada sobre o extrato da imagem hipsométrica dos dados LIDAR (Figura 104) possibilita verificar a compatibilidade com os dados originais.

O cálculo da Discrepância Planimétrica apresenta quatro dos dezessete pontos com erro superior a 1 m, sendo seu valor médio de 0,84 m, com desvio-padrão de 0,35 m. A maior diferença no eixo “E” está presente no ponto 17 (1,20 m), e no eixo “N” no ponto 05 (1,20 m). Transformando os valores médios em unidades do modelo representativo (malha regular com groundel de 0,205 m), têm-se, de forma aproximada, Discrepância Planimétrica de 4 *groundels* com desvio-padrão, de 1,5 *groundels*.

A análise da Figura 109 possibilita verificar a existência de uma tendenciosidade dos erros na direção NO. Analisando a Figura 35, que apresenta a distribuição original dos pontos do levantamento LIDAR, é possível verificar que a direção geral de voo da aeronave é NO-SE, ou SE-NO, que é perpendicular a direção de distribuição dos pontos LIDAR NE-SO, ou SO-NE. Relacionando as duas direções gerais, do voo LIDAR com a dos erros planimétricos, é possível concluir que existe uma correlação entre elas.

O cálculo da Discrepância Altimétrica apresenta somente o ponto 05 (1,51 m) com erro superior a 1 m. A média foi de 0,47 m, com desvio-padrão de 0,38 m, ou seja, 2,3 e 1,8 *groundels*, respectivamente. A análise da tendenciosidade permite verificar que todos os dezessete pontos apresentaram resultados positivos, ou seja,

as alturas dos planos do modelo retificado foram inferiores a da edificação no terreno. Como essa edificação apresenta, no terreno, uma cobertura formada por vários planos, e como os PAQG se situam em sua borda, a provável causa desse erro é a existência de uma pequena platibanda, que foi desconsiderada no cálculo do plano médio, quando da reconstrução da cobertura.

A Discrepância Planialtimétrica média foi de 0,78 m, com desvio-padrão de 0,36 m, ou seja, aproximadamente, quatro *groundels* de média e, dois de desvio padrão. Essa informação é importante, pois representa o vetor de erro da reconstrução em um eixo tridimensional, que será considerado quando da análise da exatidão das ortoimagens geradas.

4.3.1.2 Geração da Ortoimagem Verdadeira

As ortoimagens da área ESCOLA foram geradas a partir da fotografia 23 do Bloco Centro Politécnico (Figura 27), conforme descrito no Quadro 08. Com emprego do programa ERDAS ViewFinder os vinte PAQG foram medidos nas ortoimagens convencional e verdadeira de forma a apresentar dados que possibilitem avaliar o erro que se comete ao gerar ortoimagens com uso do MDT em vez do MDS.

As Figuras 110 e 111 apresentam, respectivamente, as ortoimagens convencional e verdadeiras geradas a partir da Figura 27, com emprego do MDT e do MDS, respectivamente. Nelas é possível identificar as laterais da edificação (janelas) na Figura 110, e o duplo mapeamento na Figura 111, que corresponde à área oclusa. A Figura 112 apresenta essa área oclusa detectada (em amarelo), com emprego no método *H-Buffer*, que, se comparada com a edificação presente na Figura 111, permite comprovar a coincidência do duplo mapeamento com as oclusões.

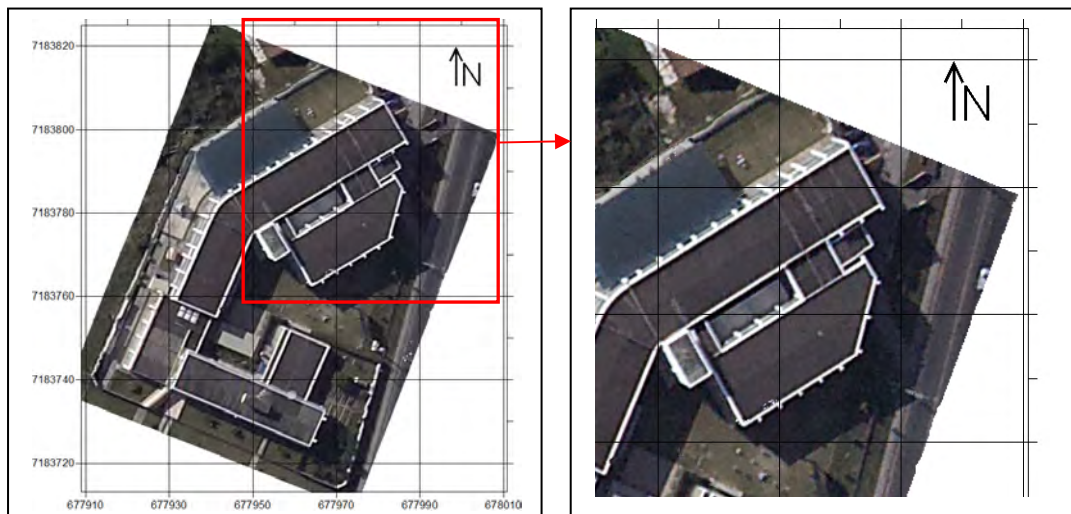


FIGURA 110 – ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

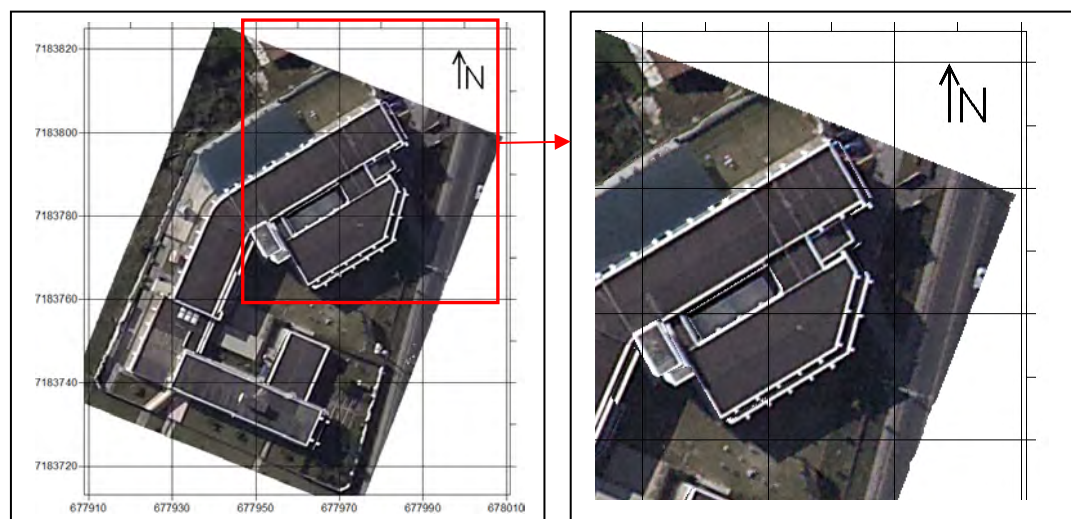


FIGURA 111 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES
 FONTE: O Autor (2010)

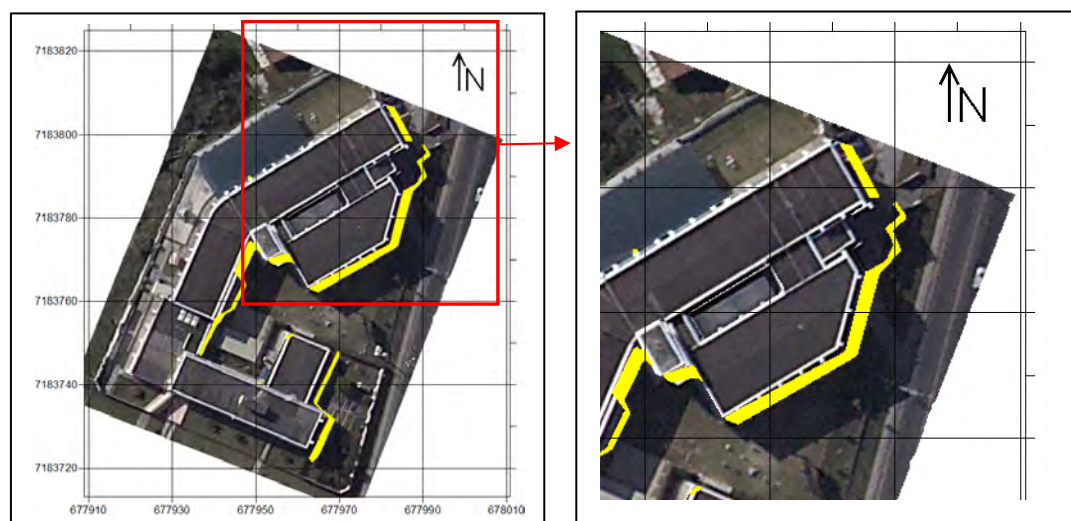


FIGURA 112 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES
 FONTE: O Autor (2010)

A Tabela 10 apresenta as estatísticas obtidas a partir da comparação das coordenadas dos vinte PAQG medidas no terreno e na ortomagem verdadeira, e a Figura 113 a distribuição espacial da exatidão posicional da área ESCOLA.

TABELA 10 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA DE ESTUDO ESCOLA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E \Delta N$ (m)
01	677979,35	7183807,88	677979,89	7183806,97	-0,54	0,91	1,06
02	677936,69	7183780,15	677937,27	7183779,41	-0,58	0,74	0,94
03	677932,53	7183770,39	677933,12	7183770,05	-0,59	0,34	0,68
04	677928,35	7183760,67	677928,09	7183760,68	0,26	-0,01	0,26
05	677918,28	7183743,32	677918,98	7183743,08	-0,70	0,24	0,74
06	677928,63	7183738,98	677929,28	7183738,95	-0,65	0,03	0,65
07	677932,32	7183747,51	677932,85	7183747,14	-0,53	0,37	0,64
08	677952,06	7183770,23	677952,51	7183770,11	-0,45	0,12	0,46
09	677948,07	7183777,03	677948,72	7183776,78	-0,65	0,25	0,70
10	677951,75	7183779,24	677952,39	7183778,66	-0,64	0,58	0,86
11	677985,28	7183798,08	677985,49	7183797,32	-0,21	0,76	0,79
12	677984,70	7183786,23	677984,77	7183785,73	-0,07	0,50	0,51
13	677978,80	7183772,66	677978,84	7183772,11	-0,04	0,55	0,55
14	677962,33	7183763,68	677962,57	7183763,28	-0,24	0,40	0,47
15	677955,82	7183772,50	677956,12	7183771,99	-0,30	0,51	0,59
16	677938,95	7183756,19	677939,59	7183755,85	-0,64	0,33	0,72
17	677966,01	7183733,08	677965,84	7183733,02	0,17	0,06	0,18
18	677962,34	7183724,57	677962,28	7183724,82	0,06	-0,25	0,25
19	677958,23	7183752,37	677958,66	7183751,51	-0,43	0,86	0,96
20	677981,02	7183774,78	677981,58	7183774,96	-0,56	-0,18	0,59
Média					-0,37	0,36	0,63
Desvio-Padrão					0,30	0,33	0,24

Fonte: O Autor (2010)

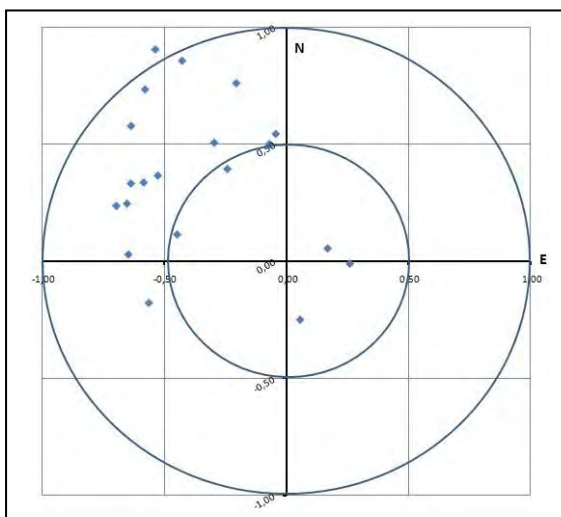


FIGURA 113 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA

FONTE: O AUTOR (2010)

A visualização dos resultados obtidos permite verificar que a edificação presente na área ESCOLA apresentou Discrepância Planimétrica média de 0,63 m, com desvio-padrão de 0,24 m, ou seja, aproximadamente, 3 *groundels* de média e 1 *groundel* de desvio-padrão. A comparação com a Discrepância Planialtimétrica da edificação reconstruída de 0,78 m, com desvio padrão de 0,36 m, apresentado na Tabela 09, permite verificar que o erro da reconstrução foi compensado por outros erros, provenientes, provavelmente, das orientações interior e exterior da fotografia aérea.

A análise da distribuição dos PAQG, com auxílio da Figura 113, permite verificar a existência de tendenciosidade nos erros planimétricos da ortoimagem verdadeira, com a maioria dos pontos apresentando erros concentrados na direção NO. Uma das causas dessa concentração é a posição da edificação em relação ao CP da fotografia aérea, que é SE, quando visto do CP, ou NO, quando visto da edificação, criando uma direção geral NO-SE. A Figura 114 apresenta o CP (em vermelho) e a área ESCOLA (em azul).

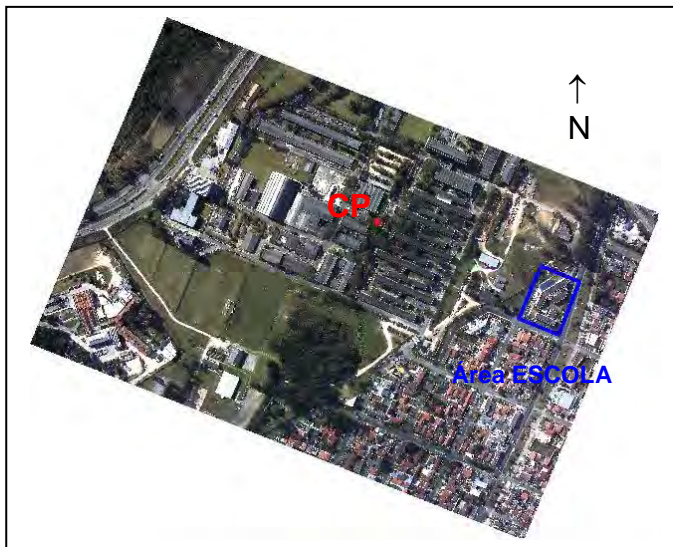


FIGURA 114 – POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 23 EM RELAÇÃO À ÁREA ESCOLA
 FONTE: O Autor (2010)

A comparação entre as Figuras 109 e 113 permite verificar que os erros geométricos presentes na edificação reconstruída e em sua representação na ortoimagem verdadeira, apresentam a mesma direção geral de tendenciosidade (NO-SE), estabelecendo, para esse experimento, uma ligação entre eles.

Para tentar correlacionar os erros do modelo reconstruído com as ortoimagens verdadeiras foi construído um gráfico que compara as exatidões (Discrepâncias Planimétrica e Planialtimétrica das Edificações Reconstruídas e Discrepância Planimétrica da Ortoimagem Verdadeira) dos dezessete PAQG, medidos tanto na edificação reconstruída quanto na ortoimagem verdadeira, conforme apresentado na Figura 115.

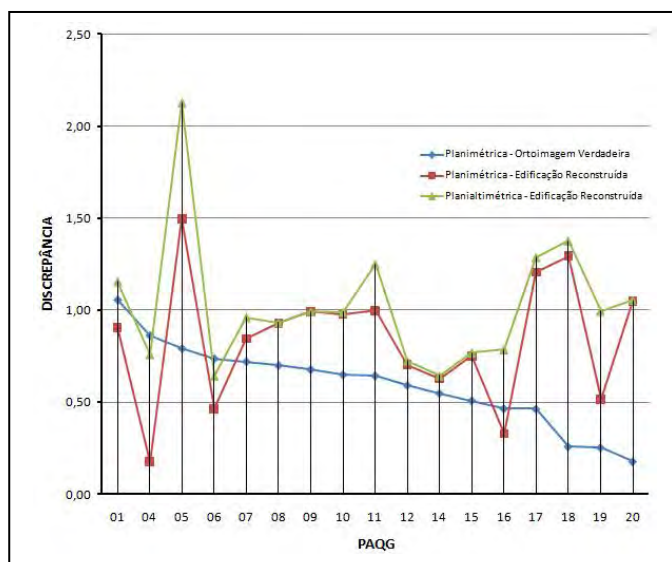


FIGURA 115 – COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DA EDIFICAÇÃO RECONSTRUÍDA E DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA

FONTE: O Autor (2010)

A comparação dos dados apresentados na figura 115 não permite concluir sobre a correlação entre as exatidões da edificação reconstruída e da ortoimagem verdadeira gerada. Não fica evidente no gráfico que os erros da ortoimagem verdadeira seguem o mesmo padrão de variação dos erros da edificação reconstruída.

É possível constatar que em quase todos os pontos, exceto nos pontos 04 e 06, os erros planimétricos das ortoimagens são inferiores aos erros planialtimétricos da edificação reconstruída. Isto ocorre, também com menor evidência, em relação ao erro planimétrico, que é menor em quatro dos dezessete pontos. A confirmação dessa propriedade nos próximos experimentos pode indicar um futuro indicador para estimativa das precisões das ortoimagens verdadeiras em relação à exatidão das edificações reconstruídas.

A provável causa da não correlação dos resultados pode estar relacionada com a boa aderência entre as bordas não retificadas e as retificadas da edificação, conforme apresentado na Figura 103. Isso fez com que outras fontes de erros, como

os provenientes das orientações interior e exterior e da medição das coordenadas no modelo reconstruído e na ortoimagem verdadeira, tivessem maior influência nos resultados obtidos.

A consequência da presença de erros no processo de geração de ortoimagens verdadeiras é a existência de alguns elementos característicos de uma ortoimagem convencional na ortoimagem verdadeira. Dentre eles pode-se destacar a presença de trechos das paredes laterais da edificação (porção A), a manutenção de duplo mapeamento na ortoimagem verdadeira (porção B) e o afastamento da oclusão identificada da borda da edificação (porção C), conforme indicado, por polígonos na cor vermelha, na Figura 116.

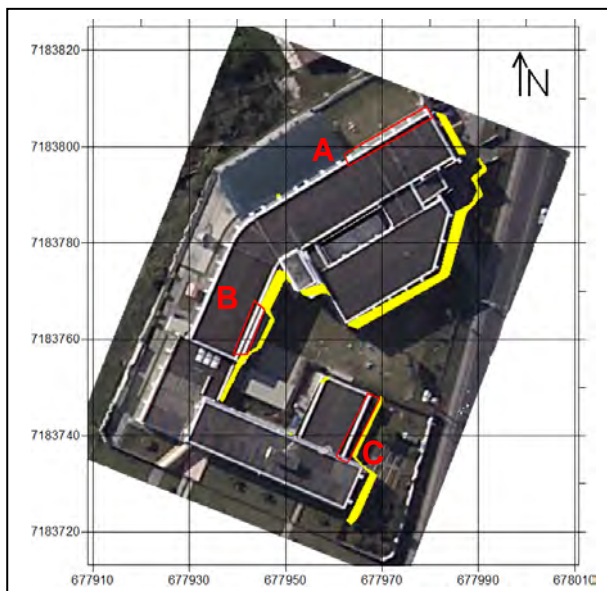


FIGURA 116 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA ESCOLA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES E INCORREÇÕES

FONTE: O Autor (2010)

A provável causa dos erros das porções A e C é um pequeno deslocamento do modelo representativo da edificação, que tem como consequência mostrar as janelas na parte da edificação mais próxima do CP e deslocar sua borda na parte mais afastada. Em relação à porção B o mais provável é que tenha ocorrido um erro na representação da edificação nesse local, pois a presença do duplo mapeamento indica que esta porção devia estar oculta (quando vista do CP). Esse erro pode ter se manifestado de duas formas, sendo uma delas a não existência dessa pequena cobertura na edificação, ou a segunda e mais provável, que sua altura tenha sido calculada de forma incorreta, tendo sido influenciada pelo Plano Mínimo da Cobertura da Edificação (que fornece a altura mínima da cobertura da edificação).

Outra análise que deve ser realizada é a proveniente da comparação das coordenadas dos PAQG nas ortoimagens convencional e verdadeira. A Tabela 11 apresenta as estatísticas entre as coordenadas dos PAQG medidos no terreno e na ortoimagem convencional.

TABELA 11 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA ÁREA DE ESTUDO ESCOLA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Convencional		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E \Delta N$ (m)
01	677979,35	7183807,88	677983,15	7183806,15	-3,80	1,73	4,17
02	677936,69	7183780,15	677940,50	7183777,99	-3,81	2,16	4,38
03	677932,53	7183770,39	677936,01	7183768,86	-3,48	1,53	3,80
04	677928,35	7183760,67	677930,90	7183759,30	-2,55	1,37	2,90
05	677918,28	7183743,32	677921,31	7183741,78	-3,03	1,54	3,40
06	677928,63	7183738,98	677932,07	7183737,56	-3,44	1,42	3,72
07	677932,32	7183747,51	677935,65	7183745,68	-3,33	1,83	3,80
08	677952,06	7183770,23	677956,57	7183768,43	-4,51	1,80	4,85
09	677948,07	7183777,03	677952,69	7183775,17	-4,62	1,86	4,98
10	677951,75	7183779,24	677956,55	7183776,83	-4,80	2,41	5,37
11	677985,28	7183798,08	677988,96	7183796,30	-3,68	1,78	4,09
12	677984,70	7183786,23	677988,35	7183784,57	-3,65	1,66	4,01
13	677978,80	7183772,66	677982,46	7183770,81	-3,66	1,85	4,10
14	677962,33	7183763,68	677965,88	7183761,92	-3,55	1,76	3,96
15	677955,82	7183772,50	677960,23	7183770,19	-4,41	2,31	4,98
16	677938,95	7183756,19	677942,64	7183754,42	-3,69	1,76	4,09
17	677966,01	7183733,08	677968,77	7183731,59	-2,76	1,49	3,14
18	677962,34	7183724,57	677965,29	7183723,03	-2,95	1,54	3,33
19	677958,23	7183752,37	677960,91	7183750,59	-2,68	1,78	3,22
20	677981,02	7183774,78	677985,15	7183773,79	-4,14	0,99	4,25
Média					-3,63	1,73	4,03
Desvio-Padrão					0,64	0,31	0,65

Fonte: O Autor (2010)

A comparação das médias e desvios-padrões das Discrepâncias Planimétricas das ortoimagens (Tabelas 10 e 11) permite verificar que seus valores são, aproximadamente, seis e três vezes maiores na ortoimagem convencional do que na verdadeira, respectivamente, fato este que justifica o uso de ortoimagens verdadeiras, em vez de ortoimagens convencionais, em ambientes urbanos.

4.3.2 Experimento 02 - Área DUPLA

A área Dupla pertence ao Bloco Bacacheri e contém duas edificações de grande altura, com bases e coberturas semelhantes entre si e entre ambas, com direções gerais que diferem, aproximadamente, em um ângulo reto. Em suas coberturas existem diversas construções que se assemelham a pequenas edificações, sendo algumas sobrepostas e outras não. Os objetivos desse experimento são avaliar o comportamento dos processos de reconstrução de edificações com essas características, avaliar a capacidade de detecção de oclusões do método *H-Buffer*, avaliar a qualidade geométrica das ortoimagens verdadeiras geradas, relacionar as tendências dos erros de reconstrução das edificações com a direção geral do voo do levantamento LIDAR, e de geração de ortoimagens verdadeiras com a posição do CP da fotografia aérea e quantificar o aumento na exatidão das ortoimagens verdadeiras em relação as convencionais em ambientes edificadas. Para atingir esses objetivos foram utilizadas duas fotografias aéreas do Bloco Bacacheri, que recobrem a área de estudo.

4.3.2.1 Reconstrução das Edificações

Para a construção das malhas regulares do MDS e do MDT estavam disponíveis as listas de coordenadas dos pontos que representam os dois conjuntos, sendo as mesmas geradas com resolução geométrica de 0,2218 m, conforme as Figuras 117 e 118.

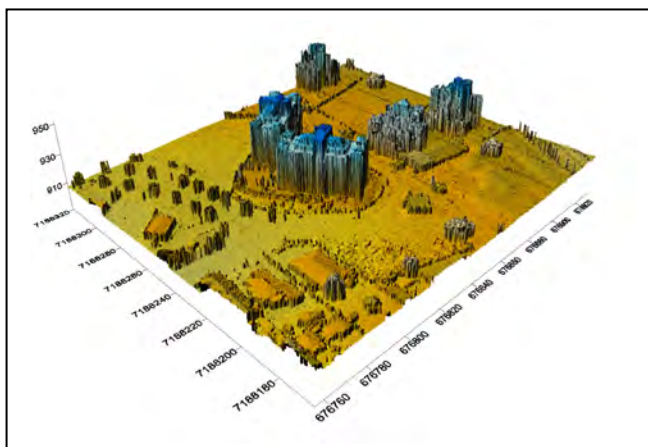


FIGURA 117 – MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA DUPLA

FONTE: O Autor (2010)

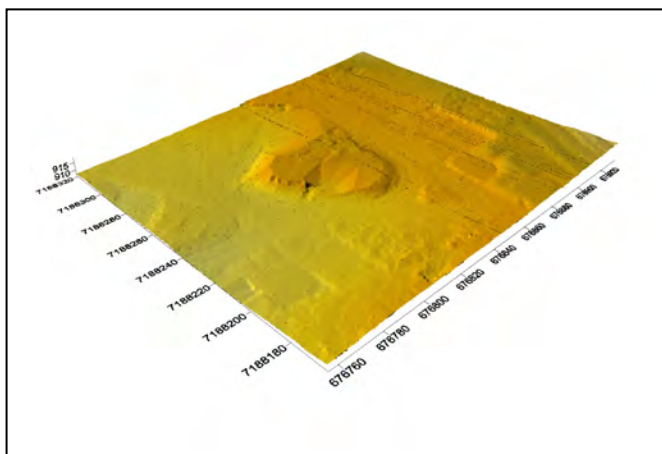


FIGURA 118 – MALHA REGULAR MDT ORIGINAL DA ÁREA DUPLA
 FONTE: O Autor (2010)

A 1ª Compatibilização corrige as discrepâncias entre as entidades comuns dos modelos e elimina parte da vegetação existente no MDS, conforme apresentado nas Figuras 119 e 120.

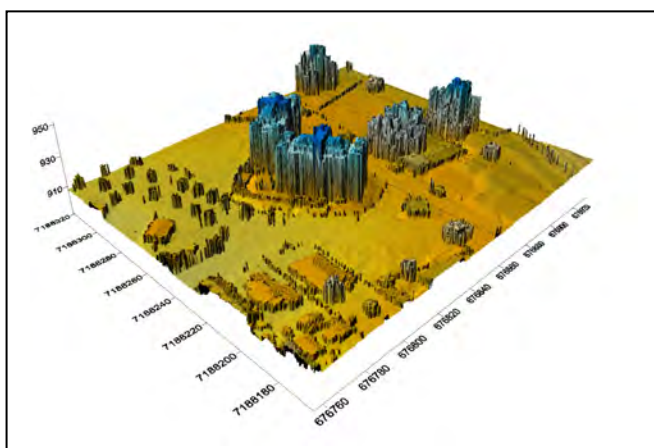


FIGURA 119 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA DUPLA
 FONTE: O Autor (2010)

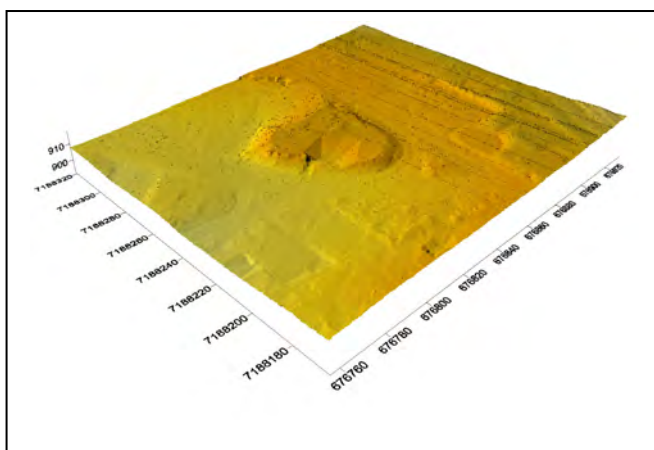
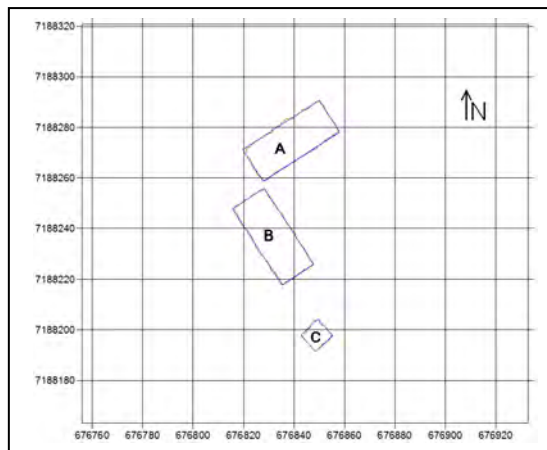


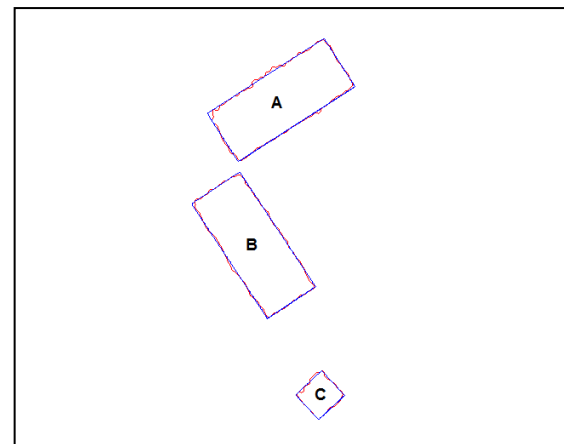
FIGURA 120 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA DUPLA
 FONTE: O Autor (2010)

A análise da Figura 119 permite verificar que o emprego do filtro proposto por Machado (2006) não foi suficiente para identificar toda a vegetação existente, mas mostrou resultados importantes ao eliminar parte da vegetação presente na porção S da área de estudo. A análise da Figura 120 possibilita observar que o terreno da área de estudo é plano, com pequena porção irregular em seu centro.

A etapa seguinte é a retificação das bordas das edificações. A Figura 121 apresenta, respectivamente, as designações das edificações e suas bordas retificadas (em azul) e as não-retificadas (em vermelho), e a Figura 122 as bordas retificadas sobre o extrato da imagem hipsométrica gerada a partir do levantamento LIDAR.



(A) MAPA DE EDIFICAÇÕES



(B) EDIFICAÇÕES COM BORDAS EM DESTAQUE

FIGURA 121 – EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO) E DEPOIS (AZUL) DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA

FONTE: O Autor (2010)

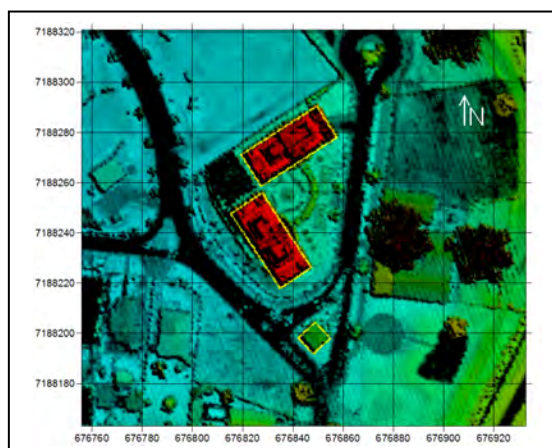


FIGURA 122 – BORDAS RETIFICADAS (EM AMARELO) DAS EDIFICAÇÕES SOBRE A IMAGEM HIPSOMÉTRICA

FONTE: O Autor (2010)

A análise das bordas retificadas permite verificar que os processos de retificação das bordas das três edificações foram capazes de determinar seus vértices e segmentos de borda de forma compatível com o existente no terreno (Figura 122). Como nesse experimento todas as edificações são quadriláteras, a tarefa de imposição, de que todos os lados formem ângulos retos foi empregada, fornecendo resultados válidos após análise visual.

Após a retificação da base planimétrica foi realizada a 2ª Compatibilização do MDS e do MDT, o que fez com que suas malhas regulares, fiquem como apresentadas nas Figuras 123 e 124.

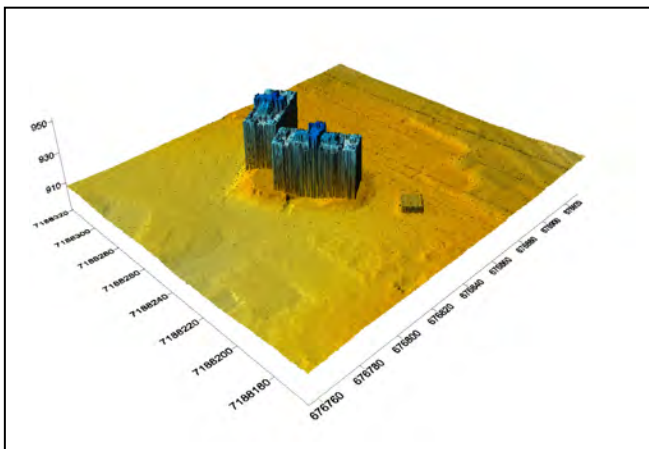


FIGURA 123 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA DUPLA
 FONTE: O Autor (2010)

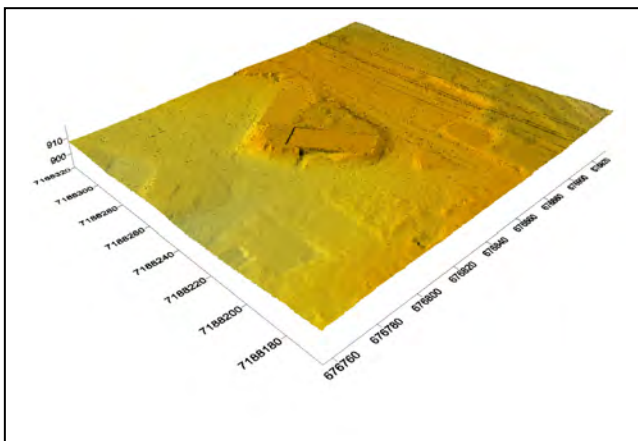


FIGURA 124 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA DUPLA
 FONTE: O Autor (2010)

Comparando as Figuras 119 e 123 é possível verificar que na 2ª Compatibilização todas as entidades, exceto as três edificações de interesse, como vegetação e partes de outras edificações, foram eliminadas do MDS e do MDT. As bases das três edificações, que eram representadas por vários planos irregulares,

foram retificadas e passaram a ser formadas por planos médios, respectivamente. Isso é, particularmente, visível quando se compara a base da edificação B nas Figuras 120 e 124.

A etapa seguinte é a retificação das coberturas das edificações, o que fez com que o MDS ficasse da forma vista na Figura 125. Outra forma de visualizar a edificação é empregando o MDSn da área, conforme a Figura 126.

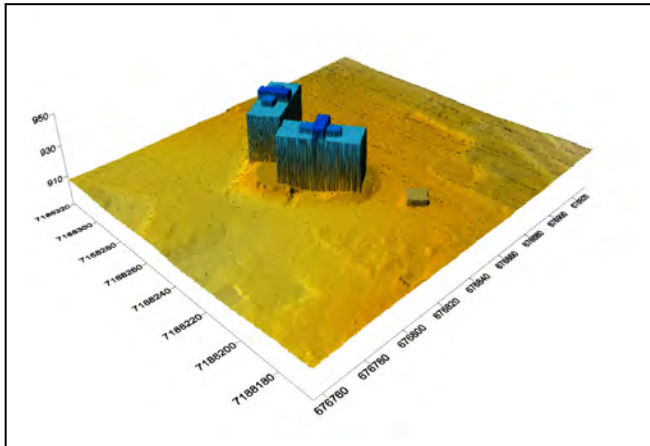


FIGURA 125 – MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DAS COBERTURAS DA ÁREA DUPLA
 FONTE: O Autor (2010)

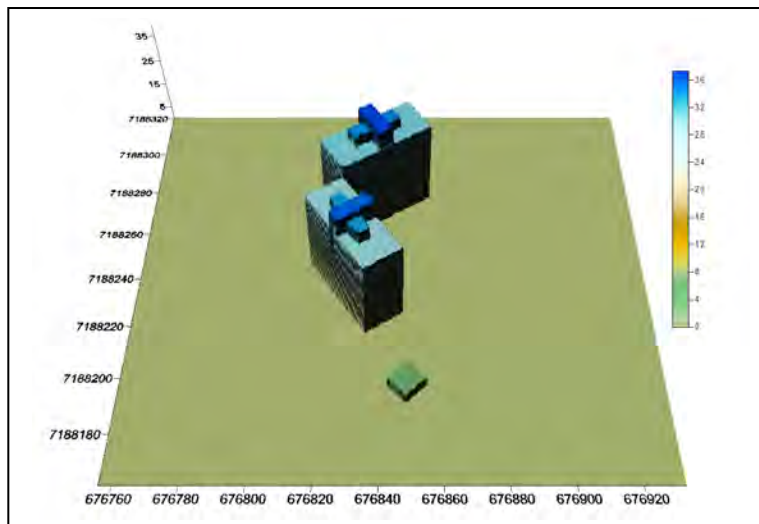


FIGURA 126 – MALHA REGULAR MDSn DA ÁREA DUPLA
 FONTE: O Autor (2010)

A análise da Retificação da Cobertura das Edificações permite verificar que nas edificações A e B foram reconstruídas pequenas construções em forma, aproximada, de cruz, que se localizam nas porções médias de suas coberturas. Comparando, visualmente, a Figura 125 com a Figura 117 (MDS Original do levantamento LIDAR), é possível constatar a existência dessas construções. No

entanto, verifica-se, também, que existem outras quatro pequenas edificações localizadas nos cantos das duas coberturas. Essas pequenas edificações foram eliminadas do processo devido a sua área ser inferior ao estabelecido no Quadro 07 – Filtros Altimétricos por Polígono.

Os PAQG permitem realizar análises sobre a exatidão das edificações reconstruídas, nos aspectos posicional e de área. Dos vinte e quatro PAQG apresentados na Tabela 07, somente quinze (pontos 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 35, 40, 41, 42, 43 e 44), localizados nas bordas das edificações A e B ou em suas construções internas, foram identificados na malha regular do MDS e medidos, resultando nos dados apresentados nas Tabelas 12 e 13 e na Figura 126. Os demais pontos, por localizarem-se em partes da cobertura da edificação de difícil identificação no MDS não foram utilizados nessa análise.

TABELA 12 – EXATIDÃO POSICIONAL DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Ponto	Coordenadas de Campo			Coordenadas do Modelo			Diferença		
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
21	676849,56	7188290,43	939,58	676849,97	7188290,69	939,87	-0,41	-0,26	-0,29
22	676857,29	7188278,71	939,57	676858,04	7188278,14	939,87	-0,75	0,57	-0,30
23	676844,31	7188270,01	945,76	676844,72	7188270,205	946,06	-0,42	-0,19	-0,30
24	676840,74	7188267,62	945,74	676840,07	7188267,322	946,06	0,67	0,30	-0,32
25	676815,70	7188247,80	939,54	676815,48	7188247,60	939,87	0,22	0,20	-0,33
26	676827,39	7188255,60	939,61	676827,97	7188255,86	939,87	-0,58	-0,26	-0,26
27	676836,13	7188242,50	945,79	676836,07	7188242,923	946,16	0,05	-0,43	-0,37
28	676838,53	7188238,92	945,78	676838,96	7188238,71	946,16	-0,43	0,21	-0,38
29	676847,22	7188225,88	939,62	676847,74	7188225,99	939,87	-0,52	-0,11	-0,25
35	676832,94	7188279,51	946,40	676832,75	7188279,078	946,06	0,20	0,43	0,34
40	676819,86	7188270,77	940,16	676819,57	7188271,15	939,87	0,29	-0,38	0,29
41	676827,65	7188259,14	940,19	676827,64	7188258,60	939,87	0,01	0,54	0,32
42	676824,40	7188234,90	946,43	676824,32	7188234,716	946,16	0,08	0,18	0,27
43	676826,76	7188231,40	946,41	676826,98	7188230,945	946,16	-0,22	0,46	0,25
44	676835,52	7188218,26	940,23	676835,25	7188217,73	939,87	0,27	0,53	0,36
Média							-0,10	0,12	-0,06
Desvio-Padrão							0,40	0,36	0,32

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 13 – EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Ponto	Discrepâncias		
	Altimétrica (Δh)	Planimétrica ($\Delta E \Delta N$)	Planialtimétrica ($\Delta E \Delta N \Delta h$)
21	0,29	0,48	0,56
22	0,30	0,94	0,98
23	0,30	0,46	0,55
24	0,32	0,73	0,80
25	0,33	0,29	0,44
26	0,26	0,64	0,69
27	0,37	0,43	0,57
28	0,38	0,48	0,62
29	0,25	0,53	0,59
35	0,34	0,47	0,58
40	0,29	0,47	0,56

TABELA 13 – EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Ponto	Discrepâncias		
	Altimétrica (Δh)	Planimétrica ($\Delta E \Delta N$)	Planialtimétrica ($\Delta E \Delta N \Delta h$)
41	0,32	0,54	0,63
42	0,27	0,20	0,34
43	0,25	0,51	0,56
44	0,36	0,59	0,70
Média	0,31	0,52	0,61
Desvio-Padrão	0,04	0,17	0,15

Fonte: O Autor (2010)

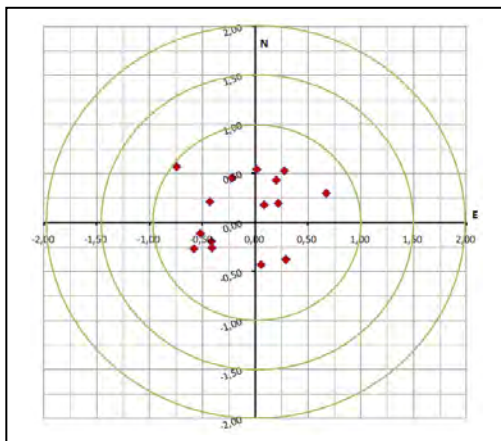


FIGURA 127 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA DUPLA
FONTE: O Autor (2010)

A Discrepância Planimétrica média calculada foi de 0,52 m, com desvio-padrão de 0,17 m, ou seja, aproximadamente 3 *groundels* e 1 *groundel*, respectivamente (malha com resolução de 0,2218 m). As diferenças planimétricas nos eixos coordenados “N” e “E” apresentaram valores inferiores a 1,00 m em todos os quinze PAQG. A análise da Figura 127 permite verificar que existe uma leve tendenciosidade dos erros na direção geral NE. Ao analisar a direção geral de voo do levantamento LIDAR, empregando a Figura 36, verifica-se que ela é de NE-SO, ou SO-NE. Relacionando as duas direções gerais, do voo LIDAR com a dos erros planimétricos, é possível supor que existe uma correlação entre elas, da mesma forma que a obtida na reconstrução da área ESCOLA.

Em relação à Discrepância Altimétrica média obteve-se um valor de 0,31 m, com desvio-padrão de 0,04 m. Não foi possível identificar nenhuma tendenciosidade clara nesse caso. Apenas é possível concluir que os planos médios calculados se ajustaram com boa exatidão à cobertura real da edificação no terreno. A Discrepância Planialtimétrica média forneceu resultados de 0,61 m, ou três *groundels*, com desvio-padrão de 0,15 m ou um *groundel*, mostrando que o modelo reconstruído apresenta coerência geométrica com a edificação no terreno.

Outra análise que é possível de ser realizada é a das áreas das edificações A e B, com base nos PAQG 21, 22, 25, 26, 29, 40, 41 e 44 (Figura 92) localizados em seus vértices, conforme apresentado na Tabela 14.

TABELA 14 – EXATIDÃO DE ÁREA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Edificação	Origem das Medições			
	Terreno (m ²)	Reconstruídas (m ²)	Diferença (m ²)	Diferença (%)
A	498,61	539,210	40,60	- 8,14
B	499,37	536,380	37,01	- 7,41

Fonte: O Autor (2010)

A análise das áreas das coberturas permite verificar que houve a propagação dos erros da planimetria, que refletiram na dimensão das áreas. As diferenças, na ordem de 8% entre a área existente no terreno e a área reconstruída, refletem essa propagação dos erros, indicando que os modelos reconstruídos provocaram uma deformação na representação das edificações, aumentando-as.

4.3.2.2 Geração das Ortoimagens Verdadeiras

Conforme apresentado no Quadro 08, as ortoimagens geradas na área DUPLA são extratos provenientes das fotografias 42 e 43 do Bloco Bacacheri, apresentadas nas Figuras 128 e 129. A partir delas foram gerados dois conjuntos de ortoimagens para cada fotografia, cada um contendo uma ortoimagem convencional, uma ortoimagem verdadeira e uma ortoimagem verdadeira com as oclusões identificadas.



FIGURA 128 – EXTRATO DA FOTOGRAFIA 42 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA DUPLA)

FONTE: O Autor (2010)

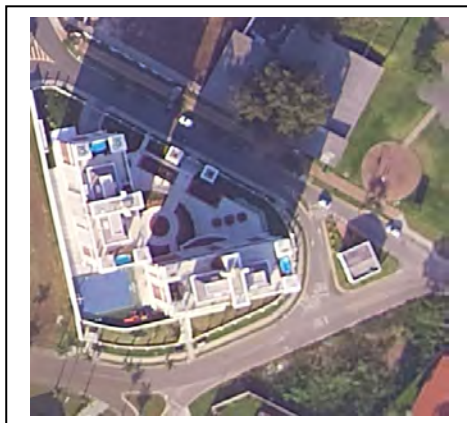


FIGURA 129 – EXTRATO DA FOTOGRAFIA 43 DO BLOCO BACACHERI (ÀREA DUPLA)
FONTE: O Autor (2010)

As Figuras 130 a 135 apresentam as ortoimagens convencionais e verdadeiras, sem e com detecção das oclusões (em amarelo) geradas com base nas Figuras 128 e 129.

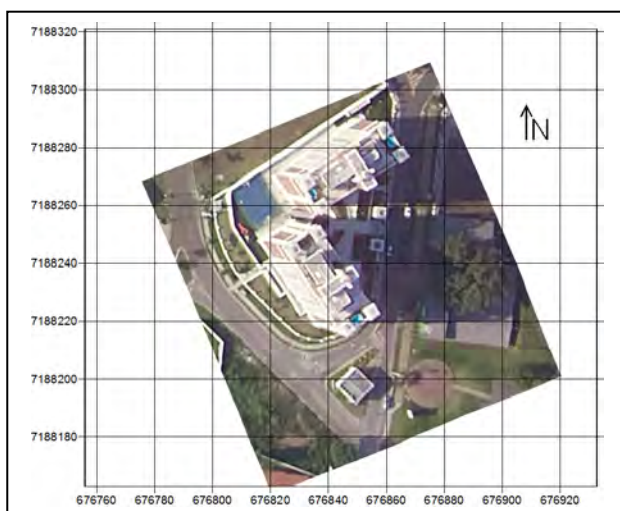


FIGURA 130 – ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DUPLA
FONTE: O Autor (2010)

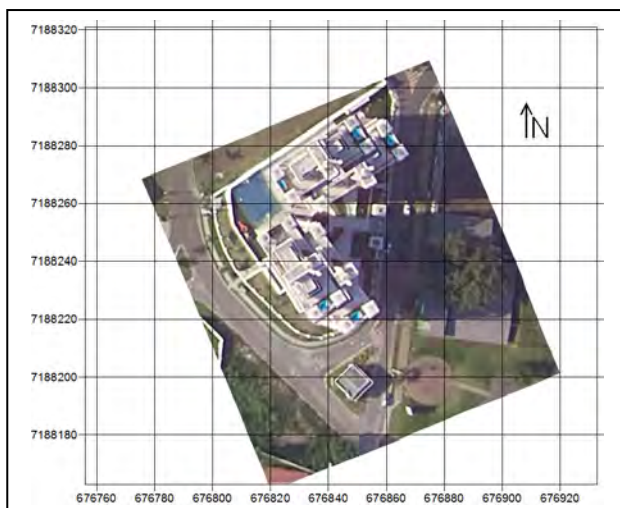


FIGURA 131 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42
DA ÁREA DUPLA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES
FONTE: O Autor (2010)

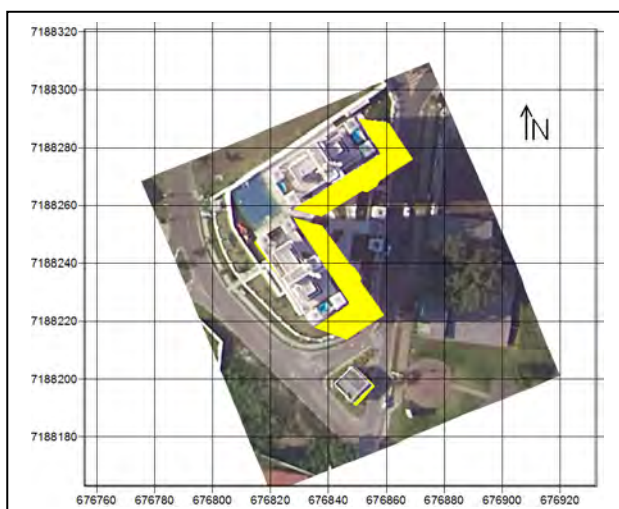


FIGURA 132 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DUPLA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)

FONTE: O Autor (2010)

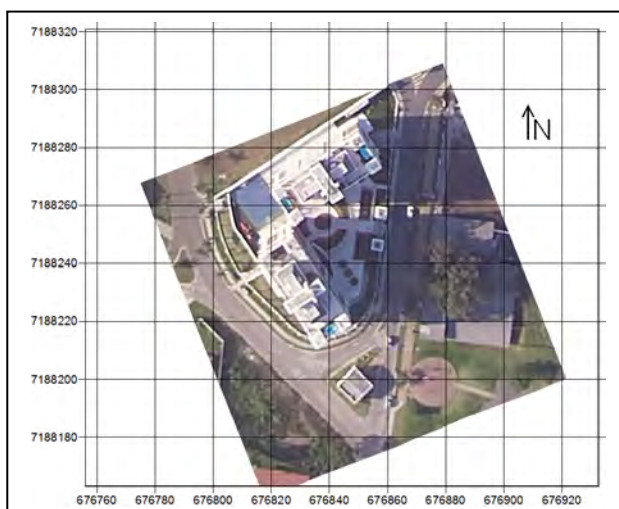


FIGURA 133 – ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DUPLA

FONTE: O Autor (2010)

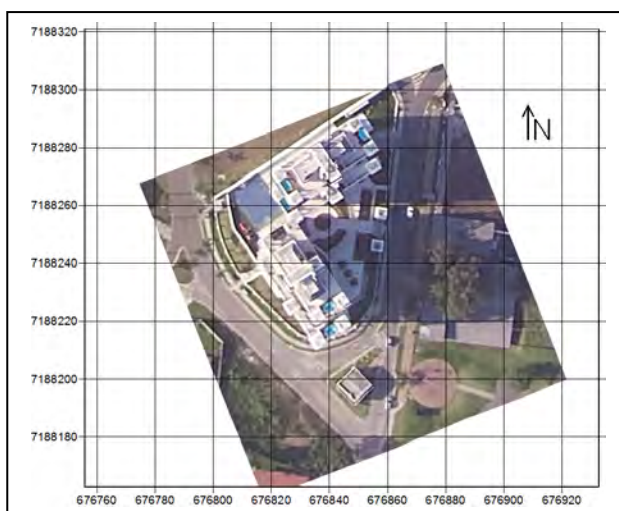


FIGURA 134 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DUPLA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES

FONTE: O Autor (2010)

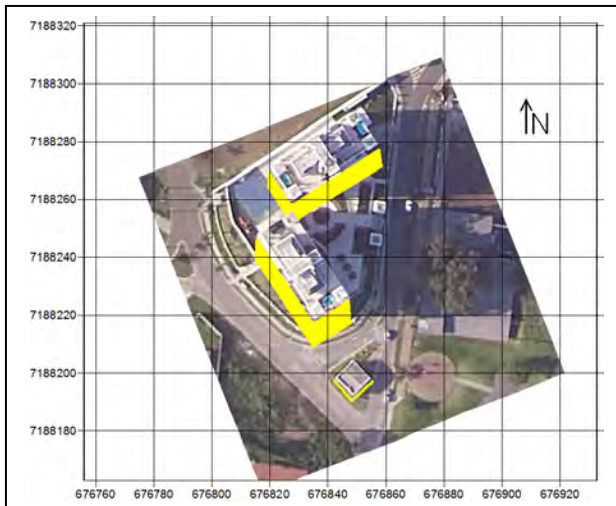


FIGURA 135 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DUPLA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)

FONTE: O Autor (2010)

A análise das ortofotografias verdadeiras geradas possibilita identificar as áreas oclusas pelo aparecimento do duplo mapeamento nas Figuras 131 e 134. Sua identificação foi realizada com emprego do Método *H-Buffer*, tendo sido apresentadas nas Figuras 132 e 135 na cor amarela. A análise visual dessa identificação das oclusões possibilita verificar que o método obteve resultados satisfatórios, tendo identificado todos os duplos mapeamentos e Porções M tipo Quina presentes nas ortofotografias verdadeiras.

Para avaliar a qualidade geométrica dos produtos gerados as coordenadas planimétricas dos vinte e quatro PAQG (Tabela 07) foram medidas nas ortofotografias verdadeiras das fotografias 42 e 43 com emprego do programa Erdas ViewFinder, e as Discrepâncias Médias calculadas, sendo apresentados na Tabela 15 e na Figura 136.

TABELA 15 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Convencional		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E \Delta N$ (m)
21	676849,56	7188290,43	676849,58	7188290,01	-0,02	0,42	0,42
22	676857,29	7188278,71	676857,31	7188278,54	-0,02	0,17	0,17
23	676844,31	7188270,01	676844,70	7188269,90	-0,39	0,11	0,41
24	676840,74	7188267,62	676840,69	7188266,65	0,05	0,97	0,97
25	676815,70	7188247,80	676816,12	7188247,77	-0,42	0,03	0,42
26	676827,39	7188255,60	676827,70	7188255,30	-0,31	0,30	0,43
27	676836,13	7188242,50	676836,05	7188242,07	0,08	0,43	0,43
28	676838,53	7188238,92	676839,01	7188238,60	-0,48	0,32	0,58
29	676847,22	7188225,88	676847,26	7188225,90	-0,04	-0,02	0,04
30	676827,81	7188247,59	676827,61	7188246,61	0,20	0,98	1,00

TABELA 15 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Convencional		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E\Delta N$ (m)
31	676839,98	7188229,32	676840,05	7188229,52	-0,07	-0,20	0,21
32	676836,35	7188230,33	676837,76	7188229,96	-1,41	0,37	1,45
33	676827,37	7188243,83	676827,40	7188244,24	-0,03	-0,41	0,42
34	676836,48	7188281,87	676837,11	7188281,67	-0,63	0,20	0,66
35	676832,94	7188279,51	676833,01	7188278,88	-0,07	0,63	0,63
36	676845,03	7188284,97	676844,96	7188284,94	0,07	0,02	0,07
37	676826,81	7188272,81	676826,65	7188272,88	0,16	-0,07	0,18
38	676830,51	7188272,36	676830,16	7188272,83	0,35	-0,47	0,59
39	676843,99	7188281,33	676843,84	7188281,65	0,15	-0,32	0,35
40	676819,86	7188270,77	676820,09	7188270,84	-0,23	-0,07	0,24
41	676827,65	7188259,14	676827,44	7188259,29	0,21	-0,15	0,26
42	676824,40	7188234,90	676824,96	7188234,67	-0,56	0,23	0,60
43	676826,76	7188231,40	676826,81	7188231,93	-0,05	-0,53	0,53
44	676835,52	7188218,26	676835,17	7188218,40	0,35	-0,14	0,38
Média					-0,13	0,12	0,48
Desvio-Padrão					0,38	0,40	0,32

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 16 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Convencional		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E\Delta N$ (m)
21	676849,56	7188290,43	676850,00	7188289,86	-0,44	0,57	0,72
22	676857,29	7188278,71	676857,69	7188279,09	-0,40	-0,38	0,56
23	676844,31	7188270,01	676844,87	7188270,00	-0,56	0,01	0,56
24	676840,74	7188267,62	676840,77	7188267,50	-0,03	0,12	0,12
25	676815,70	7188247,80	676816,89	7188248,11	-1,19	-0,31	1,23
26	676827,39	7188255,60	676828,16	7188255,48	-0,77	0,12	0,78
27	676836,13	7188242,50	676836,29	7188242,58	-0,16	-0,08	0,18
28	676838,53	7188238,92	676838,64	7188239,28	-0,11	-0,36	0,38
29	676847,22	7188225,88	676847,43	7188226,31	-0,21	-0,43	0,48
30	676827,81	7188247,59	676828,56	7188247,86	-0,75	-0,27	0,79
31	676839,98	7188229,32	676839,96	7188229,83	0,02	-0,51	0,51
32	676836,35	7188230,33	676837,25	7188230,56	-0,90	-0,23	0,93
33	676827,37	7188243,83	676827,79	7188244,34	-0,42	-0,51	0,67
34	676836,48	7188281,87	676837,17	7188281,87	-0,69	0,00	0,69
35	676832,94	7188279,51	676833,59	7188279,30	-0,65	0,21	0,68
36	676845,03	7188284,97	676845,23	7188284,95	-0,20	0,01	0,20
37	676826,81	7188272,81	676827,20	7188272,85	-0,39	-0,04	0,39
38	676830,51	7188272,36	676831,09	7188272,93	-0,58	-0,57	0,81
39	676843,99	7188281,33	676844,35	7188281,78	-0,36	-0,45	0,58
40	676819,86	7188270,77	676820,38	7188271,10	-0,52	-0,33	0,61
41	676827,65	7188259,14	676828,08	7188259,29	-0,43	-0,15	0,45
42	676824,40	7188234,90	676824,93	7188234,89	-0,53	0,01	0,53
43	676826,76	7188231,40	676827,06	7188230,19	-0,30	1,21	0,58
44	676835,52	7188218,26	676835,63	7188218,47	-0,11	-0,21	0,25
Média					-0,44	-0,11	0,57
Desvio-Padrão					0,29	0,39	0,26

Fonte: O Autor (2010)

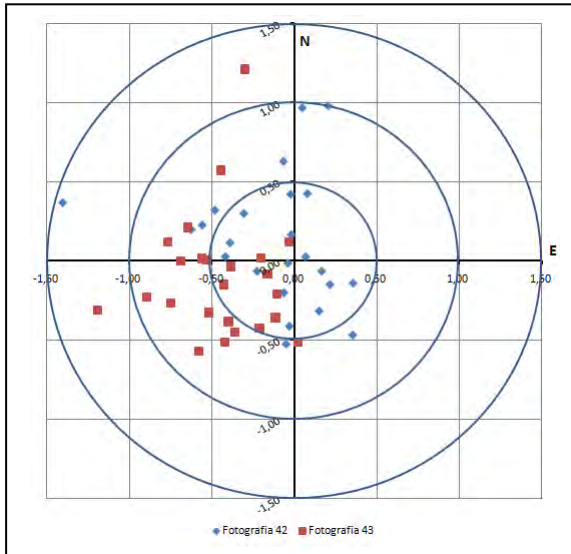


FIGURA 136 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS DA ÁREA DUPLA

FONTE: O Autor (2010)

As Discrepâncias Planimétricas médias, obtidas nas Tabelas 15 e 16, permitem verificar que foram alcançados valores 0,48 m (± 2 pixels), com desvio-padrão de 0,32 m ($\pm 1,5$ pixels), na ortofotografia da fotografia 42, e de 0,57 m (± 3 pixels), com desvio-padrão de 0,26 m (± 1 pixel), na ortofotografia da fotografia 43 (pixel com 0,2218 m de resolução geométrica em ambas as ortofotografias).

A análise da distribuição dos PAQG, com auxílio da Figura 136, permite verificar a existência de uma leve tendenciosidade, com direção geral NO, na ortofotografia verdadeira da fotografia 42 (diferença de -0,13 m no eixo E e de 0,12 m no eixo N), e uma tendenciosidade consistente, com direção geral SO, na da ortofotografia verdadeira da fotografia 43 (diferença -0,44 m no eixo E e de -0,11 m no eixo N).

No caso da ortofotografia verdadeira da fotografia 42, o CP fica a NO da área Dupla, ou a área Dupla fica à SE do CP, o que comprova a proposição de que a causa mais provável dessa tendenciosidade é a posição relativa entre a área e o CP da fotografia aérea. No entanto, para a fotografia 43, o CP fica ao N da área, ou a área fica ao S do CP. Como a tendenciosidade tem a direção geral SO, esse relacionamento não fica evidente, não confirmando a mesma proposição citada acima. As Figuras 137 e 138 apresentam esse posicionamento relativo.

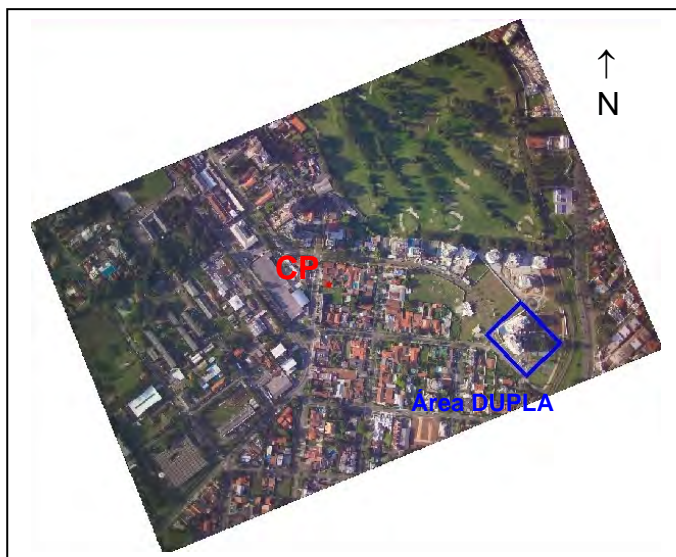


FIGURA 137 – POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 42 EM RELAÇÃO À ÁREA DUPLA
FONTE: O Autor (2010)

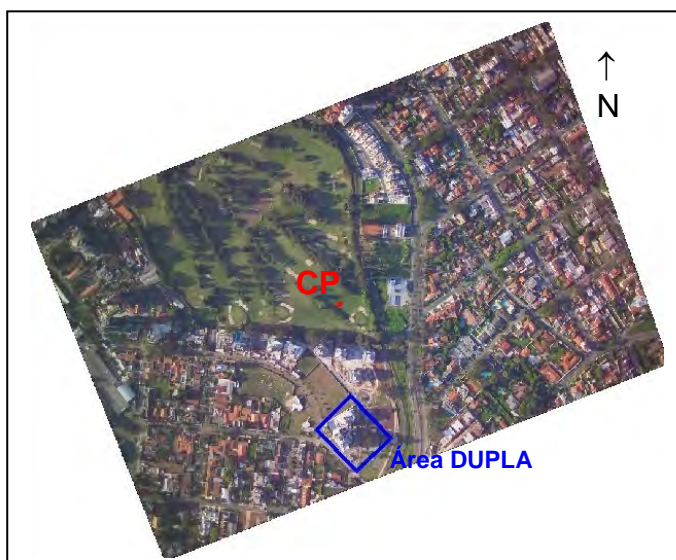


FIGURA 138 – POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 43 EM RELAÇÃO À ÁREA DUPLA
FONTE: O Autor (2010)

A Figura 139 apresenta o comportamento dos erros planimétricos e planialtimétricos da edificação reconstruída e dos erros planimétricos da ortoimagem verdadeira gerada para os quinze PAQG que foram medidos no MDS e na ortoimagem verdadeira.

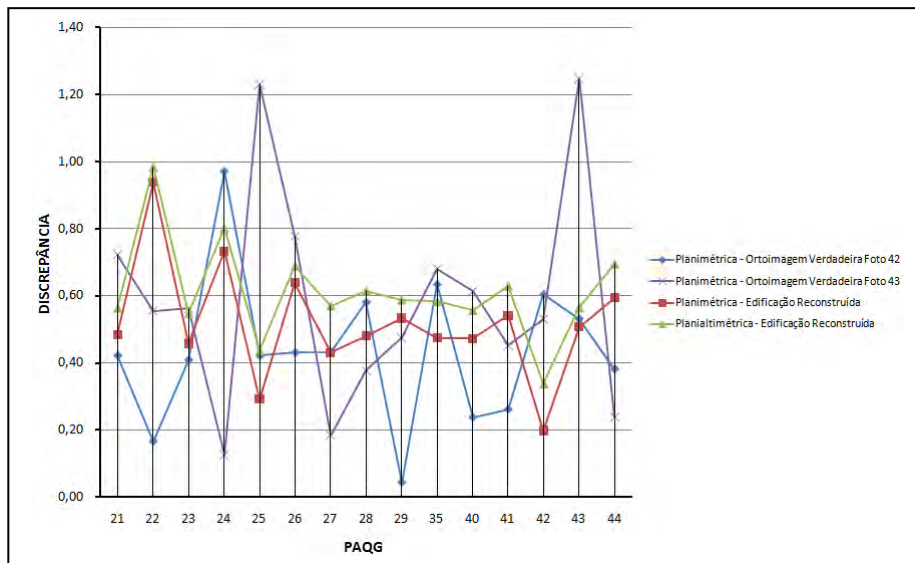


FIGURA 139 – COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DA EDIFICAÇÃO RECONSTRUÍDA E DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA DUPLA

FONTE: O Autor (2010)

A análise da distribuição dos PAQG presentes na Figura 139 não permite que se correlacione com clareza os erros geométricos da reconstrução das edificações com os erros presentes nas ortoimagens verdadeiras. A provável causa dessa não correlação é a influência das precisões das orientações interior e exterior das fotografias aéreas no processo de ortorretificação.

É possível perceber que os erros planimétricos de quatro PAQG (22, 24, 35 e 42) na ortoimagem verdadeira da fotografia 42 são superiores aos erros planialtimétricos da edificação reconstruída, e que isso ocorre em sete PAQG (21, 25, 26, 35, 40, 42 e 43) no caso da ortoimagem verdadeira da fotografia 43. Em relação ao erro planimétrico, verifica-se que seis pontos (24, 25, 28, 35, 42 e 43), medidos na ortoimagem verdadeira da fotografia 42, e que oito pontos (21, 23, 25, 26, 35, 40, 42 e 43), medidos na ortoimagem verdadeira da fotografia 43, apresentam erro planimétrico superior ao erro planimétrico da edificação reconstruída. Isso indica que a Discrepância Planialtimétrica das Edificações Reconstruídas pode ser um bom indicador da exatidão da ortoimagem verdadeira a ser gerada.

A ampliação das ortoimagens permite verificar o efeito da imprecisão dos diversos processos envolvidos, quais sejam o levantamento LIDAR, as orientações interior e exterior das imagens, a reconstrução das edificações e a geração das ortoimagens verdadeiras.

Na Figura 140, que apresenta a ampliação da representação da edificação B na ortoimagem verdadeira da fotografia 43 (Figura 134), é possível observar a presença de elementos que estão contidos no solo (piso marrom), e não na cobertura da edificação (coberturas brancas), o que indica que, na geração da ortoimagem verdadeira, houve a busca de informações radiométricas dos pixels em local inapropriado, o que acabou gerando uma falsa informação na ortoimagem verdadeira. A causa desse erro está relacionada com a qualidade geométrica da edificação reconstruída, que apresenta área maior do que a área da edificação real no terreno, o que fez com que o excesso dessa área fosse representado, na cobertura da edificação, por elementos pertencentes ao terreno.

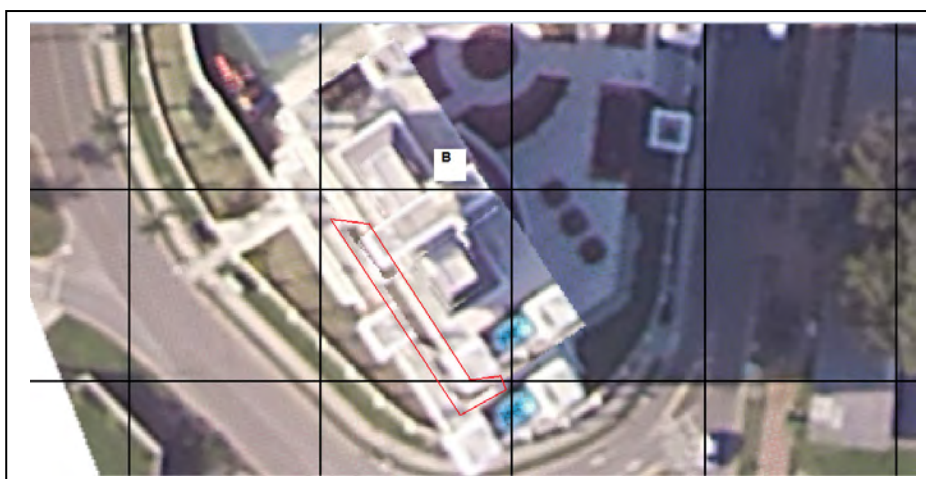


FIGURA 140 – AMPLIAÇÃO DA EDIFICAÇÃO B NA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DUPLA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES

FONTE: O Autor (2010)

Para comparar as exatidões das ortoimagens verdadeiras e convencionais foram realizadas medições dos PAQG nas ortoimagens convencionais das fotografias 42 e 43, de forma similar a realizadas nas ortoimagens verdadeiras, conforme apresentado nas Tabelas 17 e 18.

TABELA 17 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Convencional		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E \Delta N$ (m)
21	676849,56	7188290,43	676857,00	7188288,80	-7,44	1,63	7,62
22	676857,29	7188278,71	676864,48	7188277,80	-7,19	0,91	7,25
23	676844,31	7188270,01	676853,48	7188268,20	-9,17	1,81	9,35
24	676840,74	7188267,62	676850,11	7188266,08	-9,37	1,54	9,50
25	676815,70	7188247,80	676833,91	7188253,83	-6,52	1,77	6,75
26	676827,39	7188255,60	676845,20	7188240,13	-9,07	2,37	9,38

TABELA 17 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Convencional		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E \Delta N$ (m)
27	676836,13	7188242,50	676847,40	7188236,68	-8,87	2,24	9,15
28	676838,53	7188238,92	676854,58	7188223,56	-7,36	2,32	7,72
29	676847,22	7188225,88	676834,57	7188245,63	-6,76	1,96	7,04
30	676827,81	7188247,59	676846,66	7188227,52	-6,68	1,80	6,91
31	676839,98	7188229,32	676844,69	7188227,67	-8,34	2,66	8,75
32	676836,35	7188230,33	676835,45	7188241,74	-8,08	2,09	8,35
33	676827,37	7188243,83	676845,78	7188279,85	-9,30	2,02	9,51
34	676836,48	7188281,87	676842,78	7188277,66	-9,84	1,85	10,01
35	676832,94	7188279,51	676852,60	7188283,59	-7,57	1,38	7,70
36	676845,03	7188284,97	676834,35	7188271,06	-7,54	1,75	7,74
37	676826,81	7188272,81	676839,33	7188270,62	-8,82	1,74	8,99
38	676830,51	7188272,36	676852,75	7188279,78	-8,76	1,55	8,90
39	676843,99	7188281,33	676827,83	7188269,23	-7,97	1,54	8,12
40	676819,86	7188270,77	676834,35	7188257,35	-6,70	1,79	6,93
41	676827,65	7188259,14	676833,76	7188231,99	-9,36	2,91	9,80
42	676824,40	7188234,90	676835,96	7188228,77	-9,20	2,63	9,57
43	676826,76	7188231,40	676842,93	7188216,09	-7,41	2,17	7,72
44	676835,52	7188218,26	676857,00	7188288,80	-7,44	1,63	7,62
Média					-8,14	1,93	8,38
Desvio-Padrão					1,04	0,45	1,05

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 18 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DE ESTUDO DUPLA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Convencional		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E \Delta N$ (m)
21	676849,56	7188290,43	676850,70	7188286,08	-1,14	4,35	4,50
22	676857,29	7188278,71	676858,10	7188275,24	-0,81	3,47	3,56
23	676844,31	7188270,01	676845,42	7188264,83	-1,11	5,18	5,30
24	676840,74	7188267,62	676841,46	7188262,63	-0,72	4,99	5,04
25	676815,70	7188247,80	676828,19	7188250,83	-0,80	4,77	4,84
26	676827,39	7188255,60	676836,64	7188236,75	-0,51	5,75	5,77
27	676836,13	7188242,50	676839,11	7188232,80	-0,58	6,12	6,15
28	676838,53	7188238,92	676847,87	7188221,33	-0,65	4,55	4,60
29	676847,22	7188225,88	676828,08	7188243,32	-0,27	4,27	4,28
30	676827,81	7188247,59	676840,11	7188224,77	-0,13	4,55	4,55
31	676839,98	7188229,32	676837,46	7188224,77	-1,11	5,56	5,67
32	676836,35	7188230,33	676827,64	7188238,55	-0,27	5,28	5,28
33	676827,37	7188243,83	676836,77	7188276,56	-0,29	5,31	5,31
34	676836,48	7188281,87	676833,84	7188274,14	-0,90	5,37	5,44
35	676832,94	7188279,51	676845,57	7188280,81	-0,54	4,16	4,19
36	676845,03	7188284,97	676827,68	7188268,49	-0,87	4,32	4,41
37	676826,81	7188272,81	676831,27	7188267,39	-0,76	4,97	5,03
38	676830,51	7188272,36	676844,61	7188276,55	-0,62	4,78	4,82
39	676843,99	7188281,33	676820,57	7188266,88	-0,71	3,89	3,96
40	676819,86	7188270,77	676828,27	7188254,93	-0,62	4,21	4,25
41	676827,65	7188259,14	676824,79	7188228,07	-0,39	6,83	6,84
42	676824,40	7188234,90	676826,99	7188225,14	-0,23	6,26	6,27
43	676826,76	7188231,40	676835,89	7188212,71	-0,37	5,55	5,56
44	676835,52	7188218,26	676850,70	7188286,08	-1,14	4,35	4,50
Média					-0,63	4,98	5,03
Desvio-Padrão					0,29	0,81	0,80

Fonte: O Autor (2010)

As Discrepâncias Planimétricas dos PAQG medidos sobre as ortoimagens verdadeiras e convencionais forneceram médias de 0,48 m, com desvio-padrão de 0,32 m, e de 8,38, com desvio-padrão de 1,05 m, respectivamente, na fotografia 42 e de 0,57 m, com desvio-padrão de 0,25 m, e de 5,03, com desvio-padrão de 0,80 m, respectivamente, na fotografia 43. Essas diferenças indicam que se fosse utilizado o MDT em vez do MDS na geração das ortoimagens, ter-se-ia erros aproximados de dezessete vezes o erro obtido com uso do MDS na fotografia 42, e de sete vezes na fotografia 43. A Figura 141 apresenta a distribuição espacial dos erros planimétricos dos PAQG nessas ortoimagens convencionais.

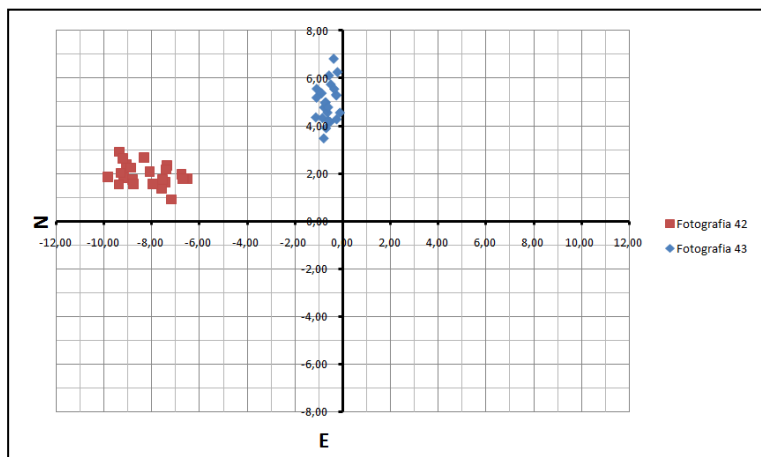


FIGURA 141 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DAS ORTOIMAGENS CONVENCIONAIS DA ÁREA DUPLA

FONTE: O Autor (2010)

A principal causa do elevado erro nas ortoimagens convencionais é a inexistência da informação altimétrica das edificações no MDT, o que faz com que sua representação mantenha o aspecto inclinado da própria fotografia aérea. Em relação à tendenciosidade dos erros, é possível constatar, conforme apresentado na Figura 141, que na ortoimagem convencional da fotografia 42 sua consistência na direção geral NO, enquanto que na ortoimagem da fotografia 43 ela ocorre na direção geral N. Outro fato importante é que todos os PAQG apresentam diferenças negativas no eixo E e positivas no eixo N (em ambas as ortoimagens). A causa dessa tendenciosidade se relaciona diretamente com a posição da edificação em relação ao CP das fotografias, que no caso da fotografia 42 se encontra a NO (Figura 137), e no caso da fotografia 43 à N (Figura 138).

4.3.3 Experimento 03 – Área VILA

A área VILA pertence ao Bloco Bacacheri e é composta por nove edificações que pertencem a um conjunto habitacional. Suas bases e coberturas apresentam, visualmente, o mesmo porte, sendo o quadrilátero o polígono que a melhor representa, não existindo construções em suas coberturas. Os objetivos desse experimento se relacionam, principalmente, a capacidade dos algoritmos de reconstrução das edificações em modelá-las, com formas semelhantes a partir de levantamento LIDAR, cuja distribuição de pontos não é igual em todas as edificações. Também são objetivos avaliar a capacidade de detecção das áreas oclusas pelo Método *H-Buffer*, avaliar a qualidade geométrica da ortomagem verdadeira gerada e relacionar a tendenciosidade dos erros de reconstrução das edificações com a direção geral do voo do levantamento LIDAR, e de geração de ortomagens verdadeiras com a posição do CP da fotografia. Para atingir esses objetivos foi utilizado um extrato de uma fotografia aérea do Bloco Bacacheri, que recobre a área de estudo.

4.3.3.1 Reconstrução das Edificações

Para reconstruir as edificações presentes na área de estudo VILA estavam disponíveis dois conjuntos de pontos, um representando o MDS e o outro o MDT. As malhas regulares originais desses modelos são apresentadas nas Figuras 142 e 143.

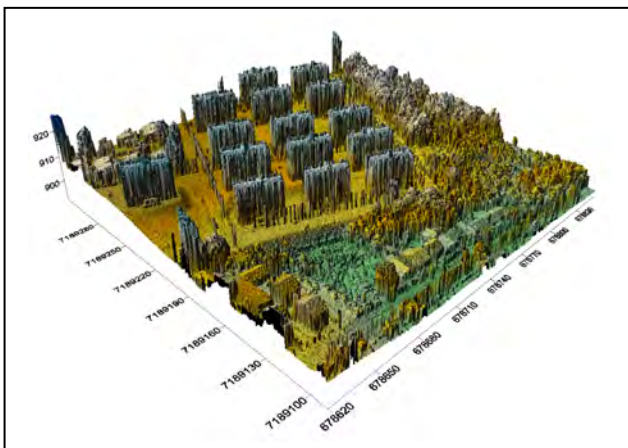


FIGURA 142 – MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA VILA
 FONTE: O Autor (2010)

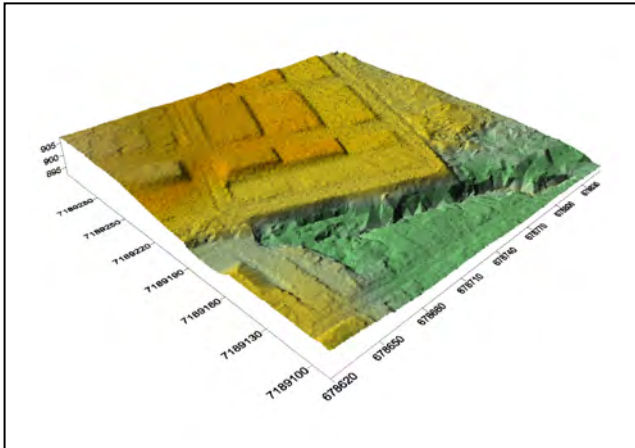


FIGURA 143 – MALHA REGULAR MDT ORIGINAL DA ÁREA VILA FONTE: O Autor (2010)

A análise das malhas regulares, geradas a partir dos pontos originais do levantamento LIDAR, permite verificar que a área é formada por diversas edificações semelhantes. É possível verificar a presença de vegetação à Leste e à Sudeste das edificações na Figura 142, e a existência de uma vala na porção Sul da Figura 143. Comparando as duas figuras é possível verificar que a vegetação presente no MDS (Figura 142) foi quase que totalmente eliminada quando da geração do MDT pelo LACTEC com emprego do programa Terrascan. A partir dessas duas malhas originais foi realizada a 1ª Compatibilização entre os modelos, que são apresentados nas Figuras 144 e 145.

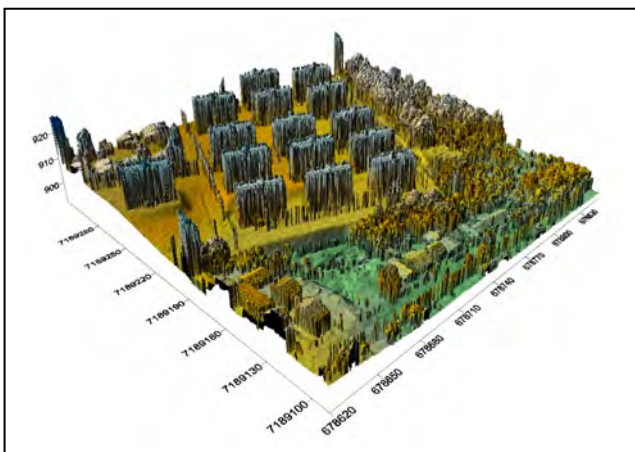


FIGURA 144 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA VILA FONTE: O Autor (2010)

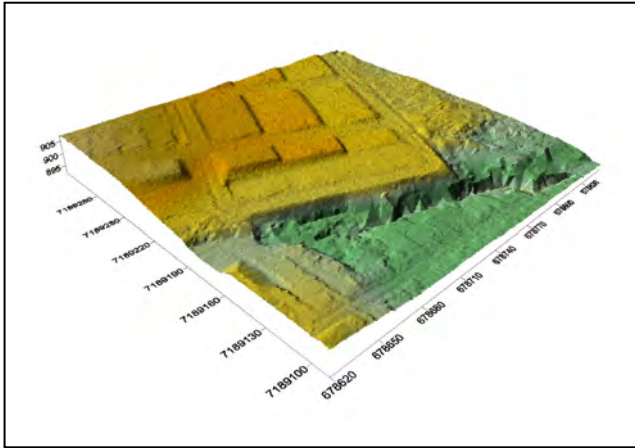
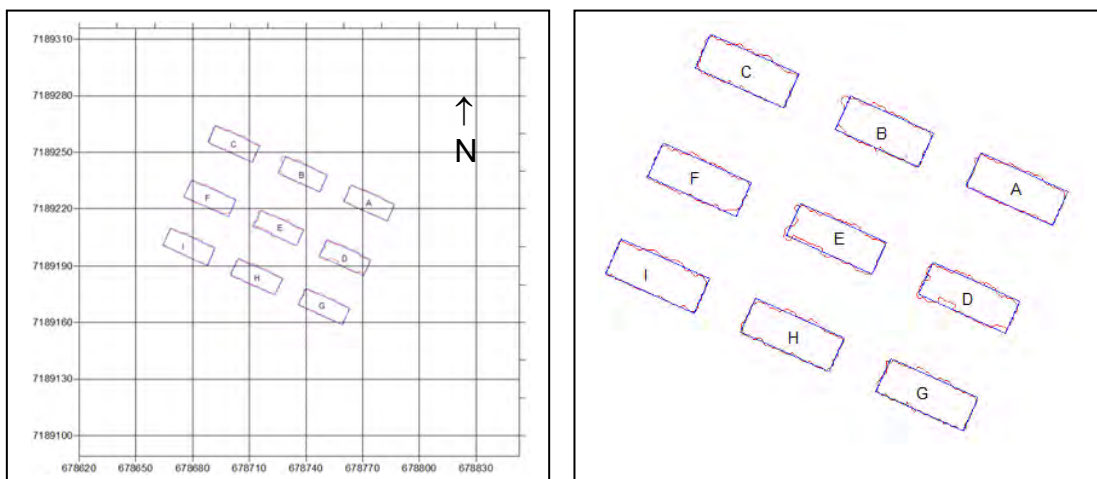


FIGURA 145 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA VILA
 FONTE: O Autor (2010)

A 1ª Compatibilização tenta eliminar pontualmente a vegetação pela identificação da cor verde nos *pixels* da fotografia aérea, atribuindo nos casos positivos às coordenadas altimétricas provenientes do MDT ao MDS. Nesse experimento especificamente, ao se comparar as Figuras 142 e 144, verifica-se a que os resultados dessa identificação não foram satisfatórios, e que a vegetação eliminada foi irrelevante. Deve-se notar que as bordas das edificações continuam irregulares, sendo somente corrigidas, nos modelos, quando da 2ª Compatibilização.

Após a compatibilização inicial, a etapa seguinte é a determinação e a retificação das bordas das edificações, que são apresentadas nas Figuras 146 e 147 contendo, respectivamente, as designações das edificações e suas bordas retificadas (em azul) e as não retificadas (em vermelho) e uma visualização das bordas retificadas sobre o extrato da imagem hipsométrica do levantamento LIDAR correspondente a área.



(A) Mapa das Edificações

(B) Ampliação das Edificações com Bordas em Destaque

FIGURA 146 – EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO) E DEPOIS (AZUL) DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA
 FONTE: O Autor (2010)

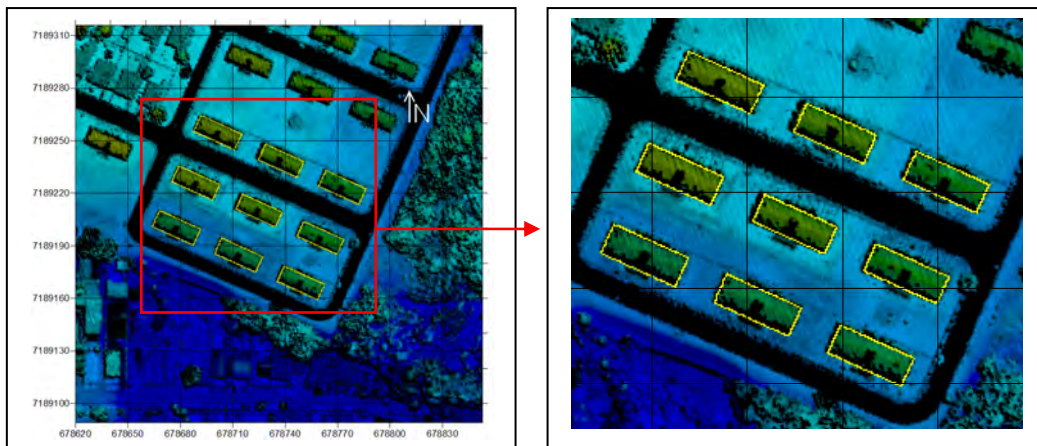


FIGURA 147 – BORDAS RETIFICADAS (EM AMARELO) DAS EDIFICAÇÕES SOBRE A IMAGEM HIPSONOMÉTRICA
 FONTE: O Autor (2010)

Analisando as bordas das edificações na Figura 146(A) é possível verificar que as nove edificações (“A” a “I”) são quadriláteros, o que fez com que fosse utilizada pelo sistema a imposição de que os quatro ângulos internos dos polígonos fossem retos. Nesse caso específico foi necessária, também, a utilização da análise das direções dos lados das edificações, com intervenção humana.

Essa intervenção foi necessária devido à irregularidade das bordas das edificações originais (em vermelho na Figura 146(B)). Analisando essas bordas originais constata-se que todas se apresentam com distribuição diferente uma das outras, sendo, particularmente, as com pior representação as das edificações B, E e D. Nesse caso foi utilizada como direção geral a obtida a partir da aplicação da Média Móvel Restritiva aos azimutes dos maiores segmentos das bordas das edificações, ou seja, calculou-se os azimutes dos maiores segmentos dos polígonos das nove edificações (dezoito segmentos no total, sendo 2 de cada polígono), e sobre esses azimutes determinou-se o azimute médio com emprego da Média Móvel Restritiva. Esse azimute foi, então, imposto a todas as edificações, sendo os vértices calculados, posteriormente, com a imposição automática de que os quatro ângulos internos deveriam ser retos. A fidedignidade dos resultados alcançados pode ser comprovada pela análise visual das bordas retificadas justapostas à imagem hipsométrica da área de estudo (Figura 147).

Com as bordas das edificações retificadas é possível realizar a 2ª Compatibilização entre o MDS e o MDT, fazendo com que suas malhas regulares ficassem como apresentadas nas Figuras 148 e 149.

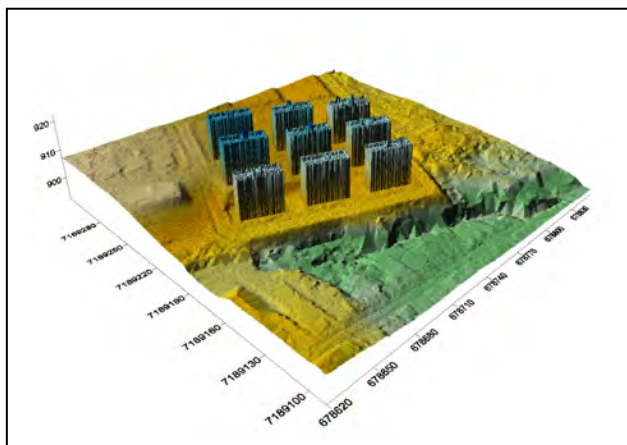


FIGURA 148 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA VILA
 FONTE: O Autor (2010)

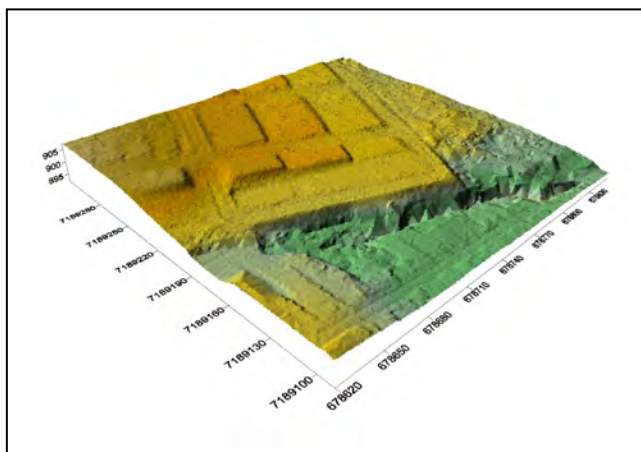


FIGURA 149 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA VILA
 FONTE: O Autor (2010)

Após a 2ª Compatibilização as laterais das edificações estão retificadas no MDS, e as bases das edificações são representadas por planos médios no MDT, conforme apresentado nas Figuras 148 e 149, respectivamente. A etapa seguinte é a retificação das coberturas das edificações, que é apresentada na Figura 150.

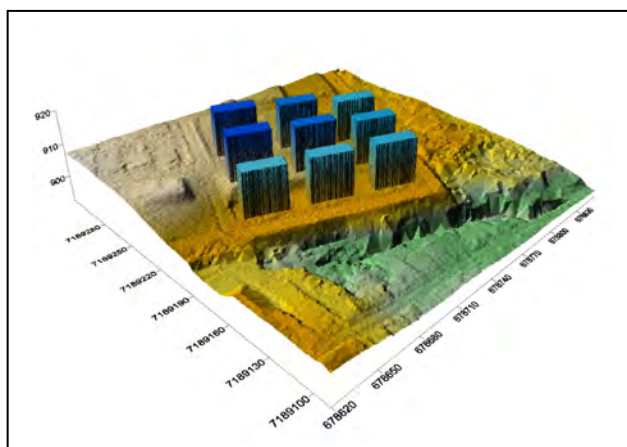


FIGURA 150 – MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DAS COBERTURAS DA ÁREA VILA
 FONTE: O Autor (2010)

As edificações apresentam cobertura sem nenhuma construção superior. Todas elas foram representadas por um plano único, calculado com o emprego da Média Móvel Restrita, conforme estabelece a metodologia. Comparando as coberturas das edificações presentes nas Figuras 148 e 149 é possível verificar, visualmente, a existência de uma platibanda, que foi eliminada com o emprego do plano único.

Nesse experimento foram utilizados os trinta e seis PAQG, previstos na Tabela 07 para essa área, em decorrência de suas localizações serem as quinas das nove edificações, facilitando sua identificação no MDS. As Tabelas 19 e 20, e a Figura 151, apresentam a precisão posicional dos PAQG nas edificações.

TABELA 19 – EXATIDÃO POSICIONAL DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO VILA

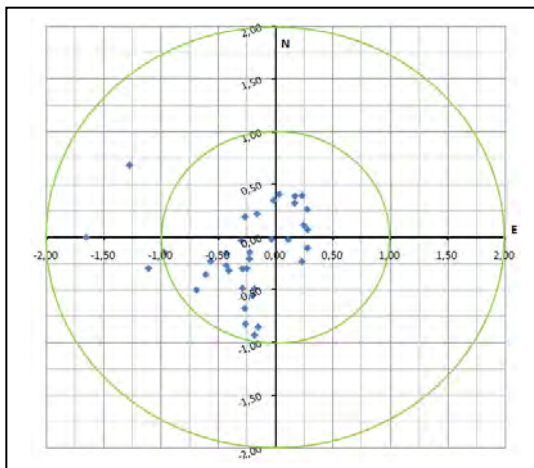
Ponto	Coordenadas de Campo			Coordenadas do Modelo			Diferença		
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
45	678762,98	7189232,43	913,54	678763,67	7189232,93	912,02	-0,69	-0,50	1,52
46	678750,75	7189237,79	914,85	678751,04	7189238,09	913,92	-0,29	-0,30	0,93
47	678727,35	7189248,04	914,88	678729,00	7189248,04	913,92	-1,65	0,00	0,95
48	678715,08	7189253,42	915,89	678715,26	7189253,90	914,92	-0,19	-0,49	0,97
49	678691,63	7189263,66	915,89	678691,78	7189264,51	914,92	-0,15	-0,85	0,96
50	678687,99	7189255,43	915,89	678687,72	7189255,53	914,92	0,27	-0,10	0,97
51	678678,94	7189234,64	915,93	678679,12	7189235,57	915,02	-0,19	-0,93	0,91
52	678675,31	7189226,41	915,94	678675,09	7189226,64	915,02	0,23	-0,23	0,92
53	678667,77	7189209,17	912,67	678668,04	7189210,00	911,52	-0,26	-0,82	1,15
54	678711,48	7189245,18	915,89	678711,20	7189244,92	914,92	0,27	0,27	0,97
55	678723,71	7189239,83	914,88	678724,98	7189239,15	913,92	-1,27	0,68	0,96
56	678747,19	7189229,58	914,85	678747,02	7189229,19	913,92	0,17	0,39	0,93
57	678759,39	7189224,23	913,56	678759,66	7189224,04	912,02	-0,27	0,19	1,53
58	678714,63	7189219,06	914,96	678715,74	7189219,36	914,12	-1,11	-0,30	0,84
59	678664,19	7189200,93	912,73	678663,91	7189200,86	911,52	0,28	0,07	1,21
60	678687,62	7189190,64	912,73	678687,39	7189190,25	911,52	0,23	0,39	1,21
61	678691,23	7189198,90	912,73	678691,52	7189199,39	911,52	-0,29	-0,48	1,21
62	678698,83	7189216,14	915,98	678698,59	7189216,02	915,02	0,24	0,11	0,96
63	678702,42	7189224,40	915,97	678702,62	7189224,95	915,02	-0,20	-0,55	0,95
64	678699,82	7189185,30	912,85	678699,71	7189185,32	911,72	0,11	-0,02	1,13
65	678723,28	7189175,02	912,82	678723,30	7189174,67	911,72	-0,02	0,35	1,10
66	678735,58	7189169,63	913,00	678735,74	7189169,41	911,92	-0,16	0,22	1,08
67	678758,97	7189159,34	912,96	678758,94	7189158,93	911,92	0,03	0,41	1,04
68	678762,60	7189167,66	913,26	678762,90	7189167,69	911,92	-0,30	-0,03	1,34
69	678739,13	7189177,95	913,26	678739,69	7189178,17	911,92	-0,57	-0,23	1,34
70	678726,89	7189183,30	913,13	678727,32	7189183,57	911,72	-0,43	-0,27	1,41
71	678703,47	7189193,55	913,13	678703,74	7189194,23	911,72	-0,27	-0,68	1,41
72	678770,12	7189184,89	913,91	678770,15	7189184,91	912,62	-0,04	-0,02	1,29
73	678746,66	7189195,18	913,92	678747,09	7189195,33	912,62	-0,43	-0,15	1,30
74	678734,48	7189200,54	915,26	678734,70	7189200,69	914,12	-0,23	-0,14	1,14
75	678710,98	7189210,82	915,31	678711,95	7189210,96	914,12	-0,97	-0,14	1,19
76	678773,74	7189193,15	913,93	678773,97	7189193,36	912,62	-0,23	-0,20	1,31
77	678782,85	7189213,96	913,89	678782,69	7189213,63	912,02	0,16	0,32	1,87
78	678786,46	7189222,23	913,89	678786,71	7189222,52	912,02	-0,25	-0,30	1,87
79	678750,30	7189203,42	913,97	678750,91	7189203,78	911,92	-0,61	-0,36	2,05
80	678738,09	7189208,76	915,30	678738,49	7189209,08	914,12	-0,41	-0,32	1,18
Média							-0,26	-0,14	1,20
Desvio-Padrão							0,44	0,38	0,29

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 20 – EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO VILA

Ponto	Discrepâncias		
	Altimétrica (Δh)	Planimétrica ($\Delta E \Delta N$)	Planialtimétrica ($\Delta E \Delta N \Delta h$)
45	1,51	0,85	1,74
46	0,93	0,42	1,02
47	0,95	1,65	1,91
48	0,97	0,52	1,10
49	0,96	0,87	1,30
50	0,97	0,29	1,01
51	0,91	0,95	1,32
52	0,92	0,32	0,98
53	1,15	0,87	1,44
54	0,97	0,38	1,04
55	0,96	1,44	1,73
56	0,93	0,42	1,02
57	1,53	0,33	1,57
58	0,84	1,15	1,43
59	1,21	0,29	1,25
60	1,21	0,45	1,30
61	1,21	0,56	1,34
62	0,96	0,27	0,99
63	0,95	0,59	1,11
64	1,13	0,11	1,13
65	1,10	0,35	1,16
66	1,08	0,27	1,11
67	1,04	0,41	1,12
68	1,34	0,30	1,37
69	1,34	0,61	1,47
70	1,41	0,51	1,49
71	1,41	0,73	1,58
72	1,29	0,04	1,29
73	1,30	0,46	1,38
74	1,14	0,27	1,17
75	1,19	0,98	1,55
76	1,31	0,31	1,35
77	1,87	0,36	1,90
78	1,87	0,39	1,91
79	2,05	0,71	2,17
80	1,18	0,52	1,29
Média	1,20	0,55	1,36
Desvio-Padrão	0,29	0,35	0,30

Fonte: O Autor (2010)

FIGURA 151 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA VILA
FONTE: O Autor (2010)

A Discrepância Planimétrica média calculada foi de 0,55 m, com desvio-padrão de 0,35 m, ou seja, aproximadamente 3 *groundels* e 2 *groundels*, respectivamente (malhas com resolução de 0,2218 m). As diferenças planimétricas nos eixos coordenados “E” e “N” apresentaram médias de -0,26 m e -0,14 m, respectivamente. A análise da Figura 151, e também das diferenças médias, possibilita verificar que existe uma tendenciosidade na direção geral SO. Ao analisar a direção geral de voo do levantamento LIDAR, empregando a Figura 37, constata-se que ela é de NE-SO, ou SO-NE. Relacionando essas direções gerais, do voo LIDAR e dos erros planimétricos, é possível verificar que existe uma correlação na direção geral SO-NE

Os PAQG que apresentam maiores erros planimétricos foram os pontos 47 (1,65 m), 55 (1,44 m), 58 (1,15 m) e 75 (0,98 m), sendo os dois primeiros localizados na edificação B, e os dois outros na E. Essas edificações são as que apresentaram pior representação das bordas quando de sua retificação, indicando a existência de uma correlação entre a qualidade do levantamento da edificação pelos pontos LIDAR e a exatidão das edificações reconstruídas no MDS.

A Discrepância Altimétrica média foi de 1,20 m, com desvio-padrão de 0,29 m. Analisando todas as diferenças altimétricas dos PAQG, verifica-se que todos apresentam diferença positiva, o que indica que os pontos no terreno estão mais altos do que seus correspondentes no modelo. Isso indica uma clara tendenciosidade dos dados e sua causa é a presença de platibanda nas edificações reais no terreno. Como a representação dessa platibanda no MDS não foi realizada, com a cobertura das edificações sendo representada por um plano único, houve o aparecimento dessa tendência de erro. A Discrepância Planialtimétrica média foi de 1,36 m, ou, aproximadamente, seis *groundels*, com desvio-padrão de 0,30 m, ou, aproximadamente, um *groundel* e meio.

A presença dos PAQG nas quinas das edificações possibilita que seja realizada, também, a análise de suas áreas, conforme apresentado na Tabela 21.

TABELA 21 – EXATIDÃO DE ÁREA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO VILA

Edificação	Origem das Medições			
	Terreno (m ²)	Reconstruídas (m ²)	Diferença (m ²)	Diferença (%)
A	230,12	246,66	-16,54	-7,19
B	229,34	236,02	-6,68	-2,91
C	230,36	254,12	-23,76	-10,31
D	230,78	235,50	-4,72	-2,05
E	230,59	229,82	0,77	0,33
F	230,77	252,65	-21,88	-9,48
G	231,88	244,77	-12,89	-5,56
H	230,99	252,84	-21,85	-9,46
I	230,38	258,32	-27,94	-12,13
Média	230,64	245,51	-14,87	-6,45
Desvio-Padrão	0,71	9,87	9,79	4,24

Fonte: O Autor (2010)

A análise das áreas das coberturas permite verificar que houve a propagação dos erros da planimetria, que refletiram na dimensão das áreas. A diferença das áreas, na média, foi da ordem de 6%, com desvio padrão de 4%. No entanto, esse resultado apresentou disparidade relativa, na medida em que a menor diferença foi de 3,33% e a maior de 12,13%. Esse resultado pode ser considerado similar ao obtido na reconstrução das edificações presentes na área de estudo DUPLA, que apresentaram diferenças na ordem de 8%.

Outra consideração que deve ser realizada se refere ao fato de que em oito, das nove, edificações, a área do modelo é maior do que a área real da edificação. Este fato, também, ocorreu nas duas edificações da área de estudo DUPLA. A causa provável dessa tendenciosidade se relaciona com a própria metodologia, que tende a direcionar os vértices das edificações, formadas por quatro lados, para o exterior das bordas das edificações detectadas a partir de dados dos levantamentos LIDAR.

4.3.3.2 Geração da Ortoimagem Verdadeira

As ortoimagens verdadeiras geradas na área VILA são provenientes do extrato da fotografia 30 do Bloco Bacacheri, conforme apresentado no Quadro 08, e na Figura 152. Da mesma forma que na área DUPLA foram gerados dois conjuntos de ortoimagens para cada fotografia, cada um contendo uma ortoimagem convencional, uma ortoimagem verdadeira sem a identificação das oclusões e uma ortoimagem verdadeira com essa identificação.



FIGURA 152 – EXTRATO DA FOTOGRAFIA 30 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA VILA)
FONTE: O Autor (2010)

As Figuras 153 a 155 apresentam as ortoimagens convencional, verdadeira sem a detecção de oclusões e verdadeira com a detecção de oclusões (em amarelo) do extrato da fotografia 30 da área VILA.

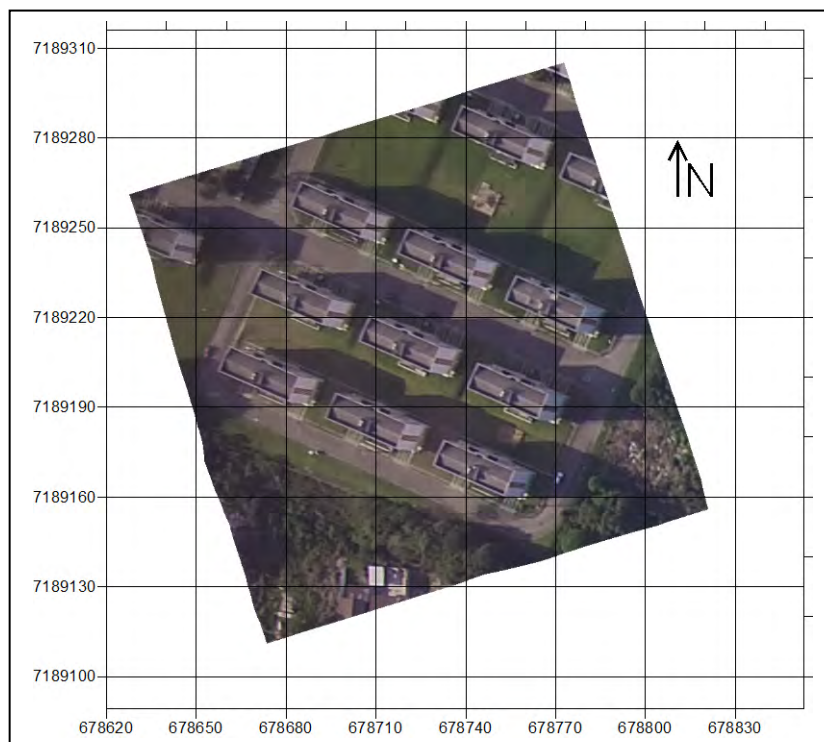


FIGURA 153 – ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 30 DA ÁREA VILA
FONTE: O Autor (2010)

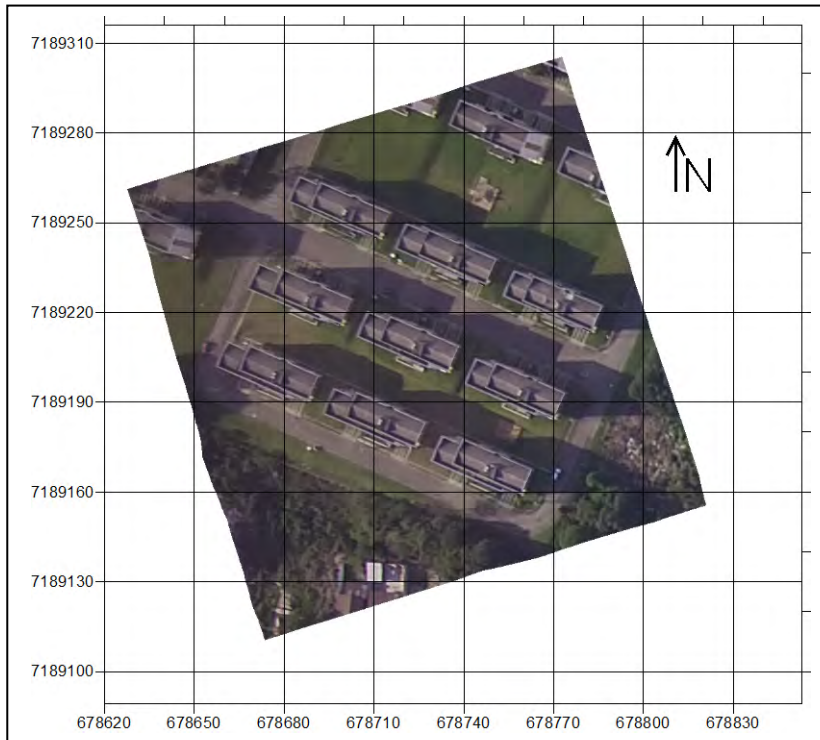


FIGURA 154 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 30 DA ÁREA VILA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES

FONTE: O Autor (2010)

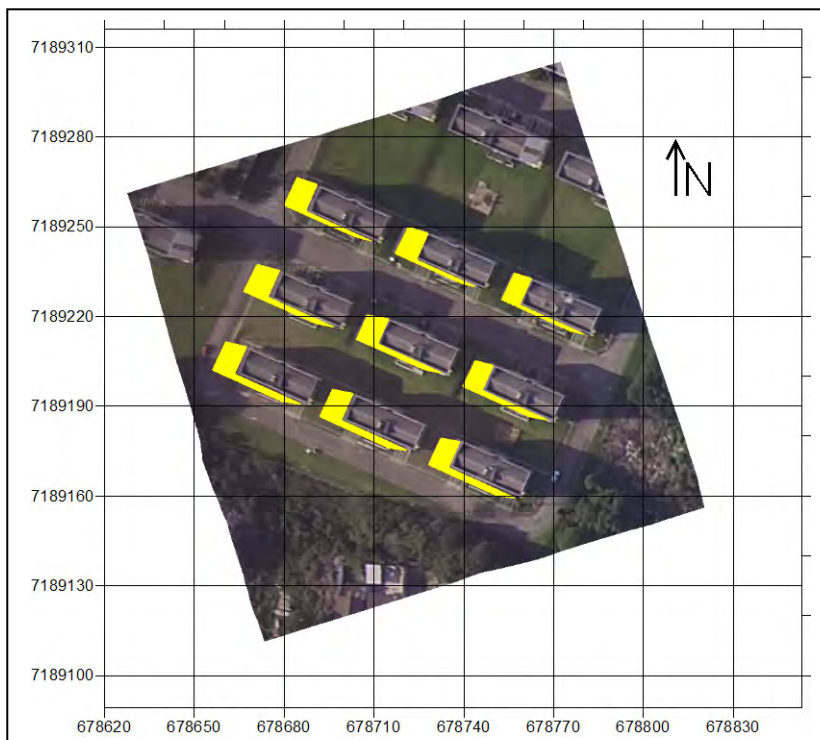


FIGURA 155 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 30 DA ÁREA VILA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)

FONTE: O Autor (2010)

A análise da ortoimagem convencional (Figura 153) permite verificar que as coberturas das edificações foram deslocadas na direção NO. Quando a ortoimagem verdadeira foi gerada (Figura 154) os duplos mapeamentos ocorreram nessa mesma direção. A aplicação do Método *H-Buffer* para detectar as áreas oclusas foi realizado, sendo apresentado na Figura 155, identificando os duplos mapeamentos e as Porções M tipo Quina. Visualmente é possível comprovar sua eficiência.

Para avaliar a qualidade geométrica das ortoimagens verdadeiras os PAQG foram medidos, com auxílio do programa Erdas ViewFinder, e, posteriormente, tiveram suas coordenadas comparadas com as medidas no terreno. A Tabela 22 mostra as estatísticas obtidas, e a Figura 156 a distribuição espacial das diferenças planimétricas.

TABELA 22 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 30 DA ÁREA DE ESTUDO VILA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E \Delta N$ (m)
45	678762,98	7189232,43	678763,66	7189232,52	-0,68	-0,09	0,68
46	678750,75	7189237,79	678751,21	7189237,94	-0,46	-0,15	0,48
47	678727,35	7189248,04	678728,85	7189247,32	-1,50	0,72	1,67
48	678715,08	7189253,42	678715,12	7189253,36	-0,04	0,06	0,07
49	678691,63	7189263,66	678691,80	7189263,58	-0,17	0,08	0,19
50	678687,99	7189255,43	678688,05	7189255,39	-0,06	0,04	0,07
51	678678,94	7189234,64	678678,98	7189234,94	-0,04	-0,30	0,31
52	678675,31	7189226,41	678675,23	7189226,31	0,08	0,10	0,13
53	678667,77	7189209,17	678667,93	7189209,38	-0,16	-0,21	0,26
54	678711,48	7189245,18	678711,47	7189244,84	0,01	0,34	0,34
55	678723,71	7189239,83	678725,20	7189239,01	-1,49	0,82	1,70
56	678747,19	7189229,58	678747,67	7189229,32	-0,48	0,26	0,55
57	678759,39	7189224,23	678759,91	7189223,79	-0,52	0,44	0,68
58	678714,63	7189219,06	678715,65	7189218,83	-1,02	0,23	1,04
59	678664,19	7189200,93	678664,22	7189200,71	-0,03	0,22	0,23
60	678687,62	7189190,64	678687,87	7189190,82	-0,25	-0,18	0,30
61	678691,23	7189198,90	678691,62	7189199,01	-0,39	-0,11	0,40
62	678698,83	7189216,14	678698,81	7189215,94	0,02	0,19	0,20
63	678702,42	7189224,40	678702,67	7189224,56	-0,25	-0,16	0,30
64	678699,82	7189185,30	678700,00	7189185,23	-0,18	0,07	0,19
65	678723,28	7189175,02	678723,85	7189174,76	-0,57	0,26	0,63
66	678735,58	7189169,63	678735,96	7189169,42	-0,39	0,21	0,44
67	678758,97	7189159,34	678759,13	7189158,57	-0,16	0,77	0,78
68	678762,60	7189167,66	678763,09	7189167,40	-0,49	0,26	0,56
69	678739,13	7189177,95	678740,04	7189177,68	-0,91	0,27	0,95
70	678726,89	7189183,30	678727,29	7189183,06	-0,40	0,24	0,47
71	678703,47	7189193,55	678703,97	7189193,49	-0,50	0,06	0,51
72	678770,12	7189184,89	678770,35	7189184,59	-0,23	0,30	0,38
73	678746,66	7189195,18	678747,35	7189195,00	-0,69	0,18	0,71
74	678734,48	7189200,54	678735,11	7189200,52	-0,64	0,02	0,64
75	678710,98	7189210,82	678712,21	7189210,85	-1,23	-0,03	1,23
76	678773,74	7189193,15	678774,21	7189192,98	-0,47	0,17	0,50
77	678782,85	7189213,96	678782,86	7189213,42	-0,01	0,54	0,54
78	678786,46	7189222,23	678786,91	7189222,20	-0,45	0,03	0,45
79	678750,30	7189203,42	678750,79	7189203,09	-0,49	0,33	0,59

TABELA 22 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 30 DA ÁREA DE ESTUDO VILA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica	
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E \Delta N$ (m)	
80	678738,09	7189208,76	678738,54	7189208,72	-0,46	0,04	0,46	
					Média	-0,44	0,17	0,55
					Desvio-Padrão	0,39	0,26	0,38

Fonte: O Autor (2010)

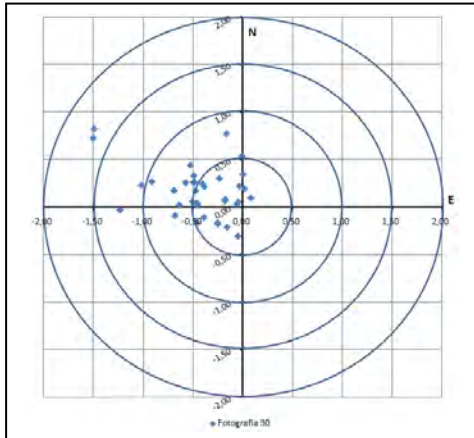


FIGURA 156 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA VILA

Fonte: O Autor (2010)

A Discrepância Planimétrica média apresentou resultados de 0,55 m (± 3 pixels), com desvio-padrão de 0,38 m (± 2 pixels), tendo os pixels resolução geométrica de 0,2218 m. A análise da distribuição das diferenças presentes na Figura 156, e do sinal das diferenças médias presentes na Tabela 22, permite identificar uma tendenciosidade dos erros na direção NO.

A causa dessa tendenciosidade é a posição das edificações em relação ao CP da fotografia 30, conforme apresentado na Figura 157. Nela é possível verificar que a área fica a NO do CP, o que correlaciona essa posição à direção dos erros planimétricos obtidos, comprovando, até o presente momento, a existência correlação entre a posição dos CP da fotografia aérea e a direção geral dos erros geométricos de uma ortofotografia verdadeira.



FIGURA 157 – POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 30 EM RELAÇÃO À ÁREA VILA
 FONTE: O Autor (2010)

A Figura 158 apresenta o comportamento dos erros planimétricos e planialtimétricos da edificação reconstruída e dos erros planimétricos da ortoimagem verdadeira. Nesse experimento foram utilizados trinta e seis PAQG, que foram medidos na edificação reconstruída e na ortoimagem verdadeira.

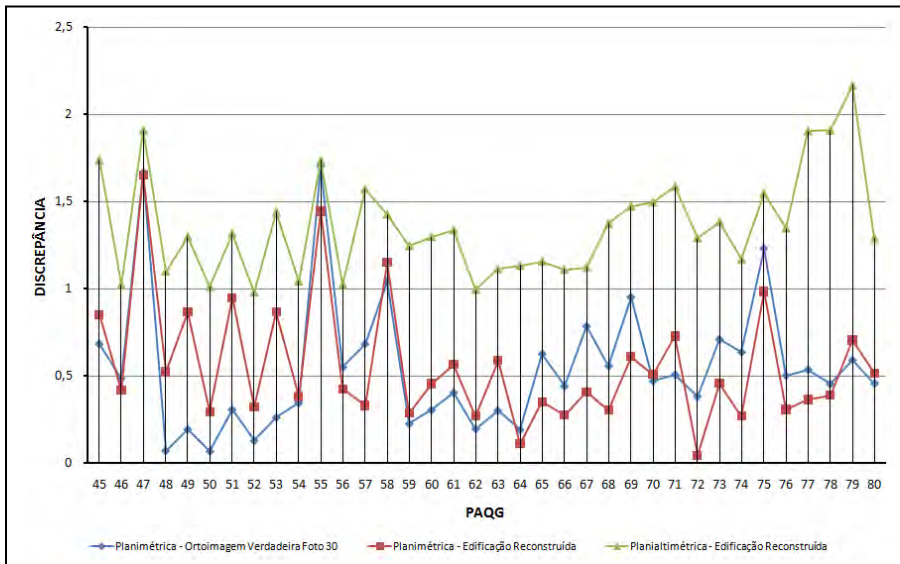


FIGURA 158 – COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DA EDIFICAÇÃO RECONSTRUÍDA E DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA ÁREA VILA

FONTE: O Autor (2010)

A análise da Figura 158 possibilita identificar uma leve tendência de correlação entre os comportamentos dos erros planimétricos presentes na ortoimagem verdadeira e os erros planialtimétricos presentes na edificação retificada. Todos os trinta e seis PAQG medidos na ortoimagem verdadeira

apresentaram erro planimétrico inferior ao erro planialtimétrico presente na edificação reconstruída. Por outro lado, somente vinte e três PAQG apresentaram erro planimétrico da ortoimagem inferior ao erro planimétrico da edificação reconstruída, o que reforça a indicação de que o erro planialtimétrico das edificações reconstruídas pode ser utilizado como indicador da exatidão da ortoimagem verdadeira.

Os PAQG que apresentam maiores erros planimétricos foram os pontos 55 (1,70 m), 47 (1,67 m), 75 (1,23 m) e 47 (1,65 m), que se localizam nas edificações B e E. Esses pontos são justamente aqueles que apresentaram maiores erros planimétricos na reconstrução das edificações, sendo eles de 1,44 m no ponto 55, 1,65 m no ponto 47, 1,15 m no ponto 58 e 0,98 m no ponto 75. Nesse experimento foi possível verificar que existe uma correlação entre as exatidões do modelo matemático, que representa o MDS, e a ortoimagem verdadeira.

4.3.4 Experimento 04 – Área ARQUIT

A área ARQUIT pertence ao Bloco Bacacheri e é composta por duas edificações de grande porte, sendo altura da maior superior a 70 m, e a da menor superior a 50 m. Suas coberturas são formadas por diversos segmentos de retas e curvas, com comprimento variado, formando um conjunto arquitetônico complexo e variado pela alternância de elementos estruturais diferenciados das demais edificações presentes nos outros experimentos.

Os objetivos desse experimento se relacionam com as análises da capacidade dos algoritmos de reconstrução das edificações em modelar construções com essas características, da influência na precisão geométrica das ortoimagens verdadeiras do emprego de um modelo de reconstrução linear em edificações com bordas não lineares, da capacidade de aplicação do algoritmo de detecção de oclusões *H-Buffer* em edificações de altura elevada, e relacionar a tendenciosidade dos erros de reconstrução das edificações com a direção geral do voo do levantamento LIDAR, e de geração de ortoimagens verdadeiras com a posição do CP da fotografia. Para atingir esses objetivos foram utilizados extratos de três fotografias aéreas do Bloco Bacacheri que recobrem a área de estudo.

4.3.4.1 Reconstrução das Edificações

Para reconstruir as edificações estavam disponíveis dois conjuntos de pontos, um representando o MDS, e o outro o MDT, da área ARQUIT. As malhas regulares originais, com resoluções de 0,2218 m, desses modelos são apresentadas nas Figuras 159 e 160.

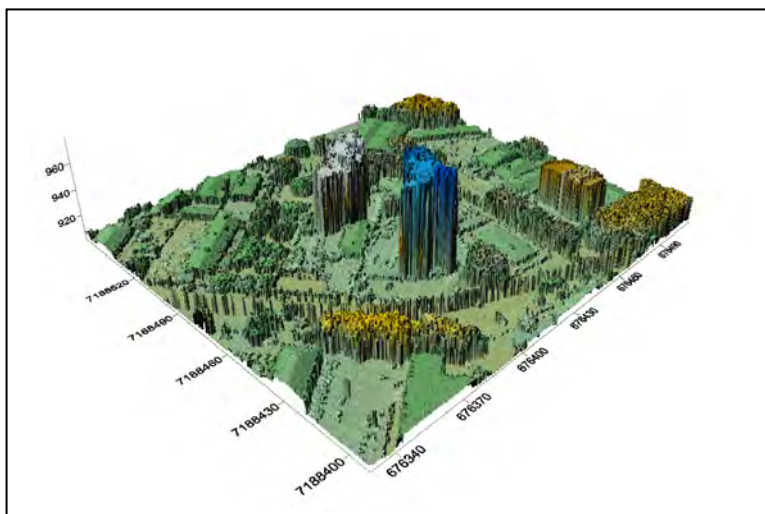
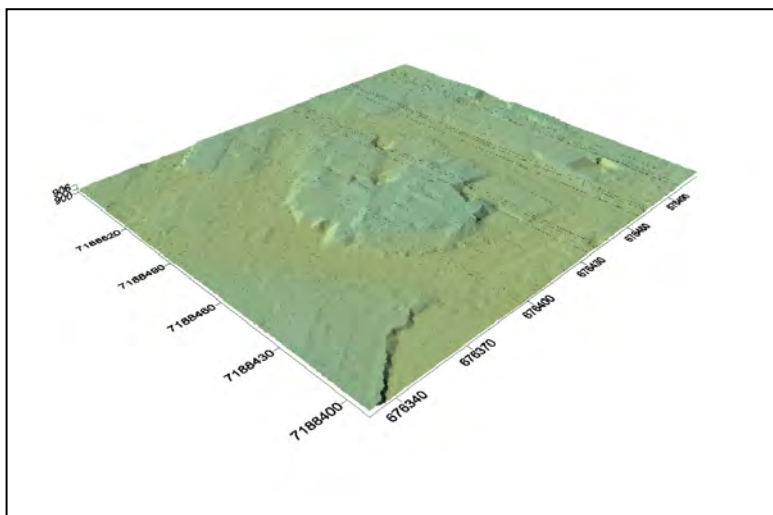


FIGURA 159 – MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA ARQUIT
FONTE: O Autor (2010)



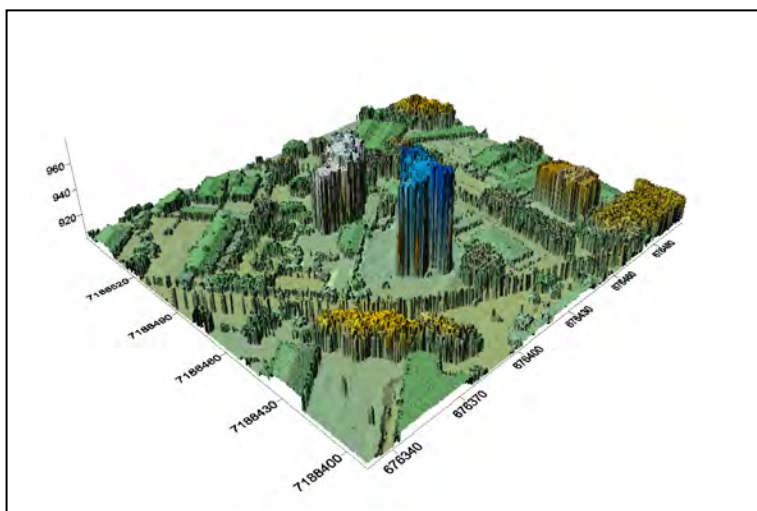


FIGURA 161 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ARQUIT
 FONTE: O Autor (2010)

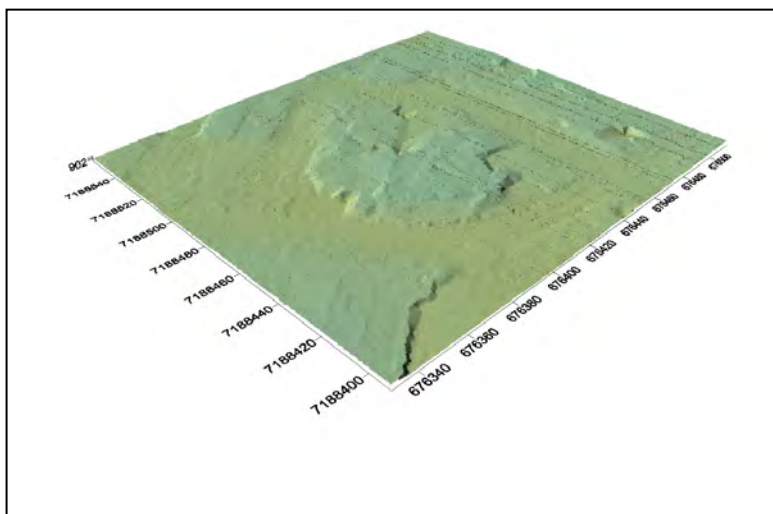


FIGURA 162 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ARQUIT
 FONTE: O Autor (2010)

A análise das Figuras 161 e 162 possibilita visualizar a pouca alteração no MDS em decorrência da 1ª Compatibilização. As altitudes de poucos *groundels*, que representam vegetação, foram substituídas pelas altitudes do MDT, após a aplicação do filtro proposto por Machado (2006) com auxílio das três fotografias aéreas. Na etapa seguinte foram realizadas a detecção das bordas irregulares e suas retificações com o emprego de retas. As Figuras 163 e 164 apresentam as bordas retificadas (em azul), e as não retificadas (em vermelho), e uma visualização das bordas retificadas sobre o extrato da imagem hipsométrica do levantamento LIDAR correspondente a área.

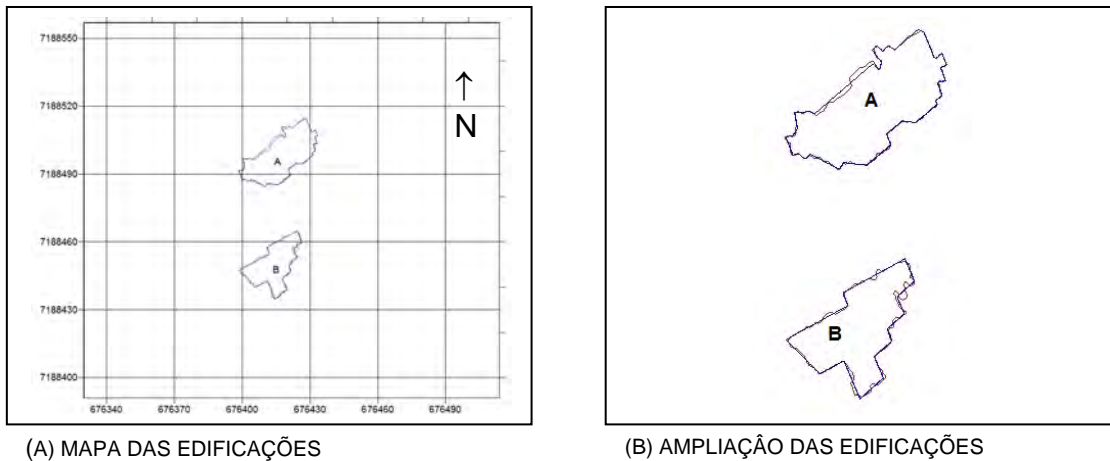


FIGURA 163 – EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO) E DEPOIS (AZUL) DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA
 FONTE: O Autor (2010)

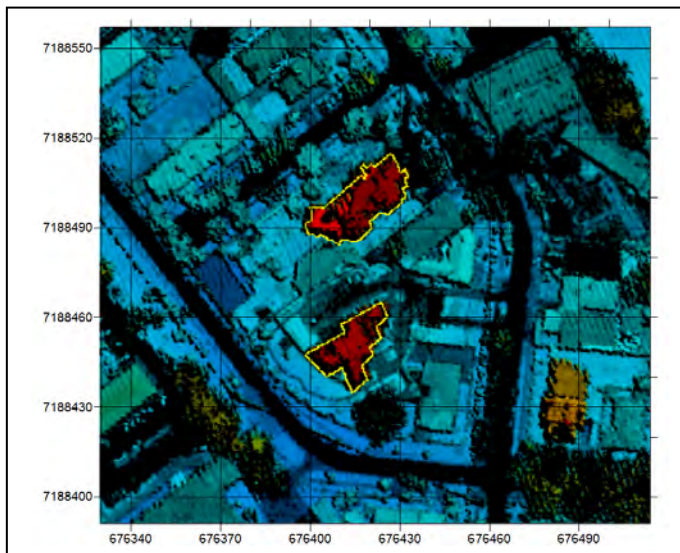


FIGURA 164 – BORDAS RETIFICADAS (EM AMARELO) DAS EDIFICAÇÕES SOBRE A IMAGEM HIPSOMÉTRICA
 FONTE: O Autor (2010)

A análise da borda da edificação A permite verificar que as bordas lineares das faces SE, SO e NE foram identificadas, e retificadas. Na face NO o processo não identificou um pequeno segmento que a dividia em duas retas, gerando uma única reta retificada. A edificação B apresenta, nas faces NE e SO, diversos segmentos de curvas que, ao serem retificados com o emprego de retas, foram suavizados. Nas demais faces a substituição das bordas irregulares por retas não acarretou em alterações significativas em sua forma. No geral foi possível verificar que a metodologia foi capaz de identificar os pequenos contornos das edificações, que foram ajustados por retas, mantendo as formas das duas edificações dentro de limites visuais aceitáveis.

Com os limites de cada construção estabelecidos foi realizada a 2ª Compatibilização entre o MDS e o MDT, fazendo com que suas malhas regulares ficassem como apresentadas nas Figuras 165 e 166.

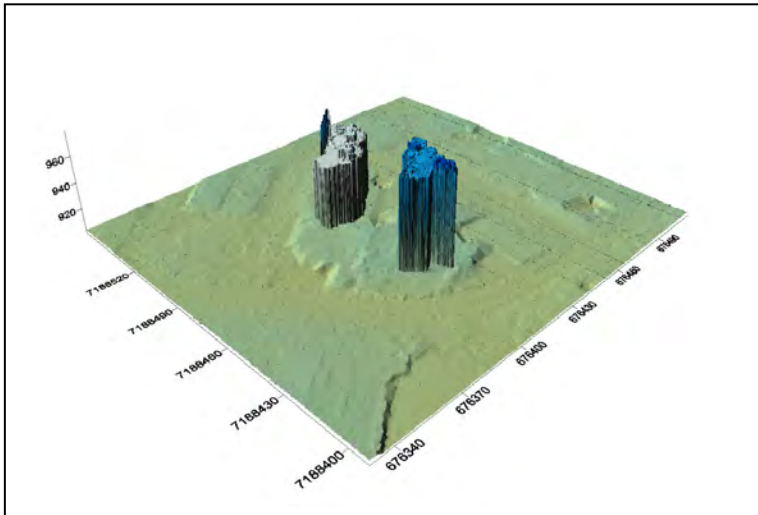


FIGURA 165 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ARQUIT
FONTE: O Autor (2010)

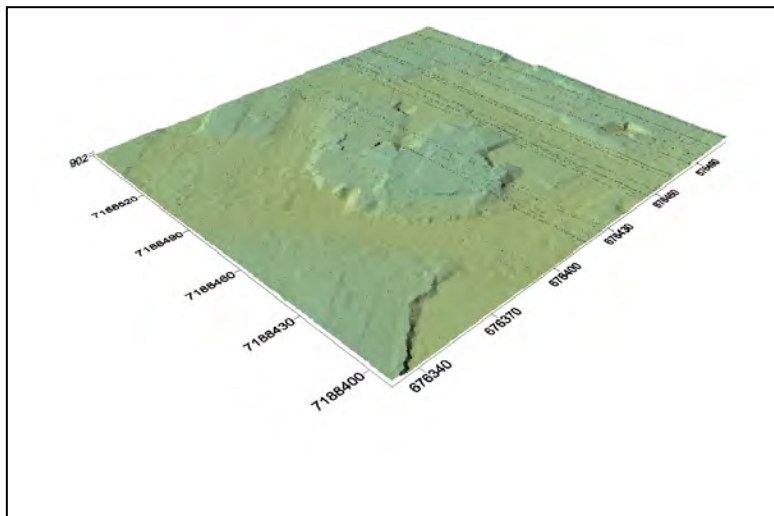


FIGURA 166 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA ARQUIT
FONTE: O Autor (2010)

A comparação das Figuras 161 e 165 permite identificar que as bordas das edificações estão retificadas, não apresentando mais o aspecto irregular que caracteriza as bordas provenientes de um levantamento LIDAR. Já a comparação das Figuras 162 e 166 permite verificar que a base das edificações não apresenta mais o aspecto irregular presente no modelo antes da 2ª Compatibilização. Para finalizar a reconstrução falta apenas a retificação da cobertura, que é apresentada na Figura 167 no MDS, e na Figura 168 no MDSn.

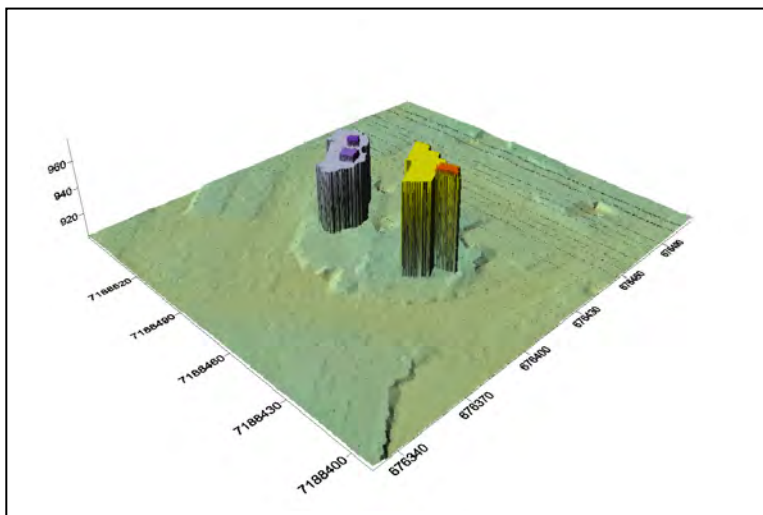


FIGURA 167 – MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DAS COBERTURAS DA ÁREA ARQUIT
 FONTE: O Autor (2010)

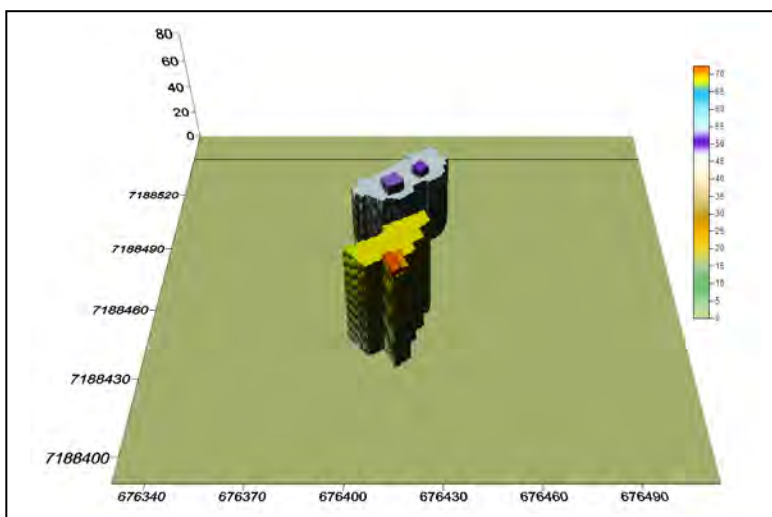


FIGURA 168 – MALHA REGULAR MDS_n DA ÁREA ARQUIT
 FONTE: O Autor (2010)

A análise da edificação A permite verificar que existem duas pequenas construções em sua cobertura, com, aproximadamente, a mesma altura. Essas duas construções foram tratadas pela metodologia como se fossem pequenas edificações isoladas, sendo reconstruídas com correção. Na edificação B observa-se a presença de uma pequena construção, que foi representada por dois planos com alturas diferentes. Provavelmente, essas construções, nas duas edificações, representam as caixas d'água e dos elevadores, comuns em edifícios residenciais e comerciais.

A avaliação da exatidão da reconstrução das edificações foi realizada com emprego dos PAQG, mostrados nas Figuras 100 a 102. Dos dezesseis pontos previstos no Quadro 09, apenas treze pontos foram utilizados nessa análise, devido ao fato que os pontos 84 (edificação A), e 94 e 95 (edificação B) não foram identificados nas edificações reconstruídas. As Tabelas 23 e 24 apresentam as diferenças e exatidões obtidas, e a Figura 169 a distribuição dos erros.

TABELA 23 – EXATIDÃO POSICIONAL DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT

Ponto	Coordenadas de Campo			Coordenadas do Modelo			Diferença		
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
81	676398,10	7188488,41	955,89	676400,21	7188487,66	957,72	-2,10	0,75	-1,83
82	676425,41	7188457,19	979,72	676426,55	7188460,21	979,99	-1,14	-3,02	-0,27
83	676424,16	7188453,65	979,70	676424,34	7188453,12	979,99	-0,18	0,53	-0,29
85	676421,12	7188448,60	979,72	676421,70	7188447,22	979,99	-0,59	1,38	-0,27
86	676418,52	7188440,87	982,51	676419,80	7188439,16	982,79	-1,28	1,71	-0,28
87	676432,98	7188509,13	958,19	676432,50	7188509,72	957,72	0,48	-0,59	0,47
88	676429,33	7188497,80	958,87	676431,46	7188498,64	957,72	-2,13	-0,84	1,15
89	676424,85	7188494,31	958,86	676426,87	7188494,67	957,72	-2,02	-0,36	1,14
90	676418,59	7188492,02	958,35	676420,51	7188492,13	957,72	-1,93	-0,11	0,63
91	676416,19	7188491,03	962,55	676417,83	7188490,02	962,79	-1,64	1,01	-0,24
92	676412,13	7188487,84	962,54	676412,51	7188487,13	962,79	-0,38	0,71	-0,25
93	676415,13	7188485,62	958,37	676416,26	7188485,41	957,72	-1,13	0,21	0,65
96	676408,54	7188484,84	955,26	676410,28	7188484,57	957,72	-1,74	0,27	-2,46
Média							-1,21	0,13	-0,14
Desvio-Padrão							0,83	1,20	1,05

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 24 – EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT

Ponto	Discrepâncias		
	Altimétrica (Δh)	Planimétrica ($\Delta E \Delta N$)	Planialtimétrica ($\Delta E \Delta N \Delta h$)
81	1,83	2,23	2,89
82	0,27	3,22	3,24
83	0,29	0,56	0,63
85	0,27	1,50	1,52
86	0,28	2,14	2,16
87	0,47	0,76	0,90
88	1,15	2,29	2,56
89	1,14	2,05	2,35
90	0,63	1,93	2,03
91	0,24	1,92	1,94
92	0,25	0,81	0,85
93	0,65	1,15	1,32
96	2,46	1,76	3,03
Média	0,76	1,72	1,95
Desvio-Padrão	0,70	0,75	0,86

Fonte: O Autor (2010)

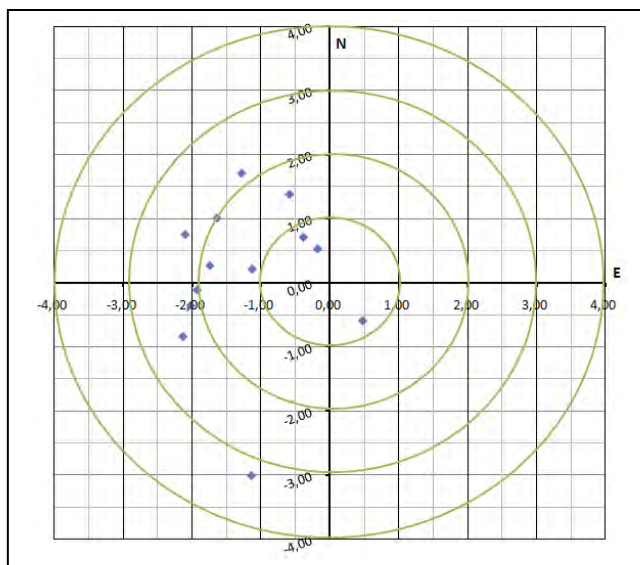


FIGURA 169 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA ARQUIT
 FONTE: O Autor (2010)

A Discrepância Planimétrica média apresentou resultados de 1,72 m, com desvio-padrão de 0,75 m, ou seja, aproximadamente, 8 *groundels* e 3,5 *groundels*, respectivamente. Esses erros são maiores se comparados com as Discrepâncias Planimétricas obtidas até agora nos demais experimentos. Sua causa foi a retificação das bordas curvas com o emprego de retas. Cinco pontos (81, 82, 86, 88 e 89) apresentaram erros superiores a 2,00 m (10 *groundels*), sendo que no ponto 82 ele foi superior a 3,00 m. Esses pontos se localizam em regiões nas quais houve a linearização de borda, ou também, em quinas que não foram bem definidas pelas bordas não retificadas oriundas do levantamento LIDAR.

Outra causa desses erros pode estar relacionada com a densidade dos pontos do levantamento LIDAR nessa área, de 2,81 pontos/m² (Quadro 02), que pode não ter sido suficiente para levantar todos os pormenores arquitetônicos das duas edificações.

As diferenças planimétricas nos eixos coordenados “E” e “N” apresentaram diferenças médias de -1,21 m e 0,13 m, respectivamente, que juntamente com a análise da Figura 169, possibilita verificar que existe uma tendenciosidade dos erros na direção geral NO. Ao analisar a direção geral de voo do levantamento LIDAR, empregando a Figura 38, constata-se que ela é de NE-SO, ou SO-NE. Essa constatação, diferentemente dos experimentos anteriores, não possibilita correlacionar a direção geral da tendência dos erros com a de voo. Nesse caso específico, a tendência do erro se correlaciona com a direção geral dos feixes LASER do levantamento LIDAR, que é NO-SE, ou SE-NO. Esse resultado pode ter

sido influenciado pelas bordas curvas da edificação, que ao serem retificadas, acabaram por influenciar a tendência dos erros.

A Discrepância Altimétrica média obtido foi de 0,76 m, com desvio-padrão de 0,70 m. Esse resultado, diferentemente da Discrepância Planimétrica, é coerente com os resultados dos experimentos anteriores. A análise dos sinais das diferenças altimétricas permite verificar que os quatro pontos (82, 83, 85 e 86) da edificação B apresentam altitude no modelo superior à existente na edificação real. No caso da edificação A essa tendenciosidade não se mostra presente, com cinco pontos apresentando altitude maior na edificação real do que no modelo reconstruído, e quatro ponto no caso contrário. A Discrepância Planialtimétrica média forneceu resultados de 1,95 m, ou, aproximadamente, nove *groundels*, com desvio-padrão de 0,86 m, ou, aproximadamente, quatro *groundels*.

4.3.4.2 Geração das Ortoimagens Verdadeiras

As ortoimagens verdadeiras geradas na área ARQUIT são provenientes de extratos das fotografias 41, 42 e 43 do Bloco Bacacheri, conforme apresentado no Quadro 08. As Figuras 170 a 171 apresentam esses extratos.

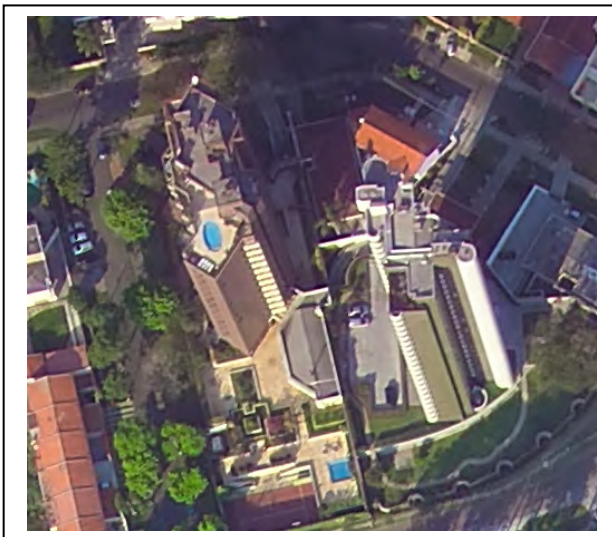


FIGURA 170 – EXTRATO DA FOTOGRAFIA 41 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA ARQUIT)
FONTE: O Autor (2010)

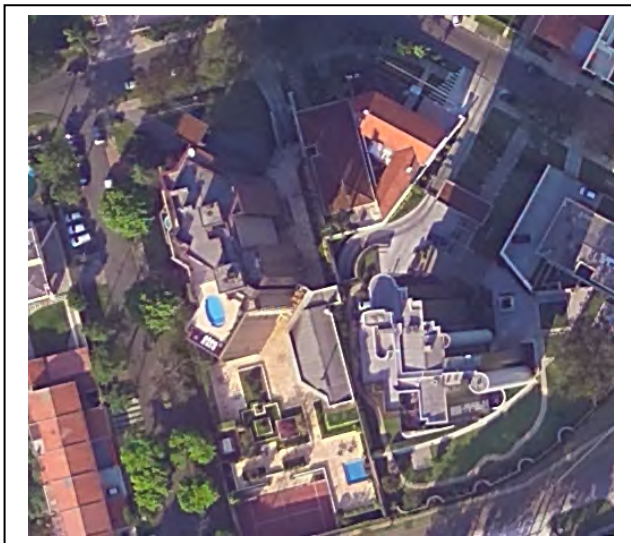


FIGURA 171 – EXTRATO DA FOTOGRAFIA 42 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA ARQUIT)
FONTE: O Autor (2010)



FIGURA 172 – EXTRATO DA FOTOGRAFIA 43 DO BLOCO BACACHERI (ÁREA ARQUIT)
FONTE: O Autor (2010)

As três fotografias que recobrem a área ARQUIT mostram as edificações de três pontos de vista diferentes, o que faz com suas inclinações se apresentem, também, de formas diferenciada. Comparando essas inclinações é possível verificar que as faces das Figuras 170 e 171 são opostas, e que a Figura 172 apresenta a mesma posição relativa das faces da Figura 171, mas com uma inclinação maior. Esse é o motivo da utilização das três fotografias nesse experimento.

Da mesma forma que nos experimentos anteriores foram geradas três ortomagens (convencional, verdadeira sem detecção de oclusões e verdadeira com

detecção de oclusões) para cada uma das três fotografias, com resolução de 0,2218 m. As Figuras 173 a 181 as apresentam,

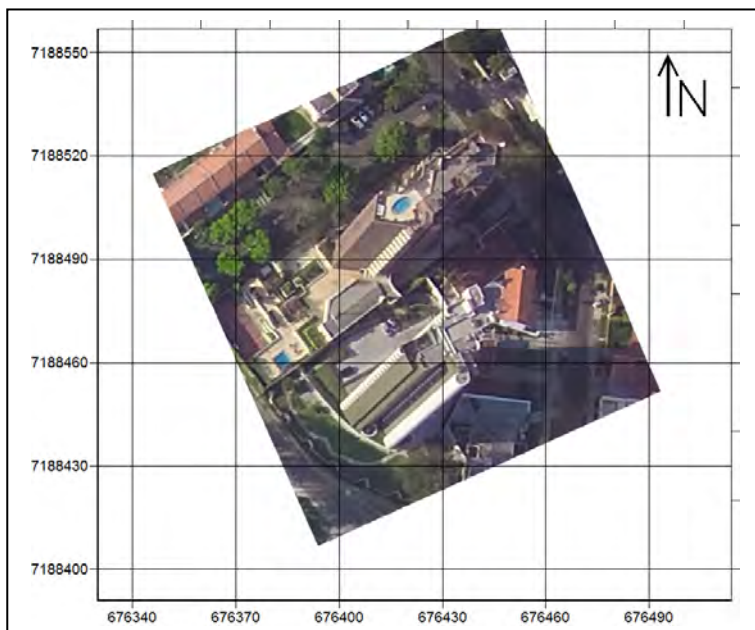


FIGURA 173 – ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 41 DA ÁREA ARQUIT
FONTE: O Autor (2010)

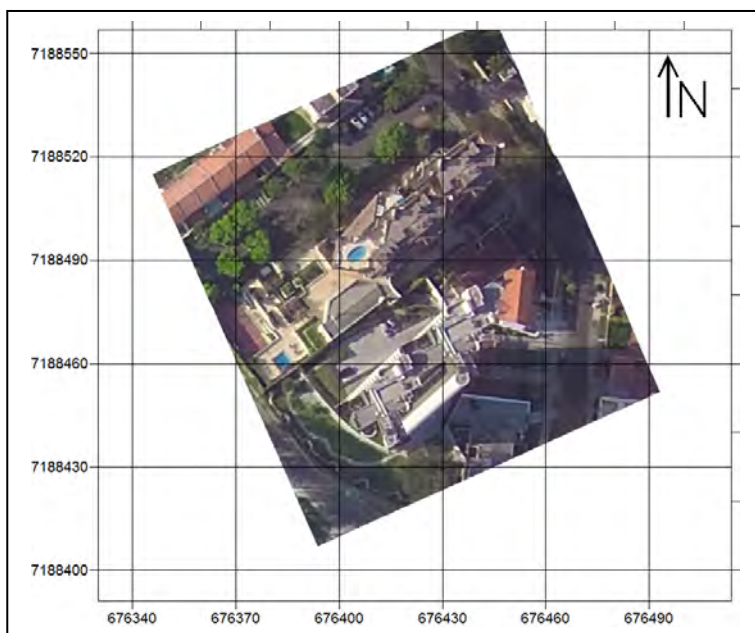


FIGURA 174 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 41
DA ÁREA ARQUIT SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES
FONTE: O Autor (2010)

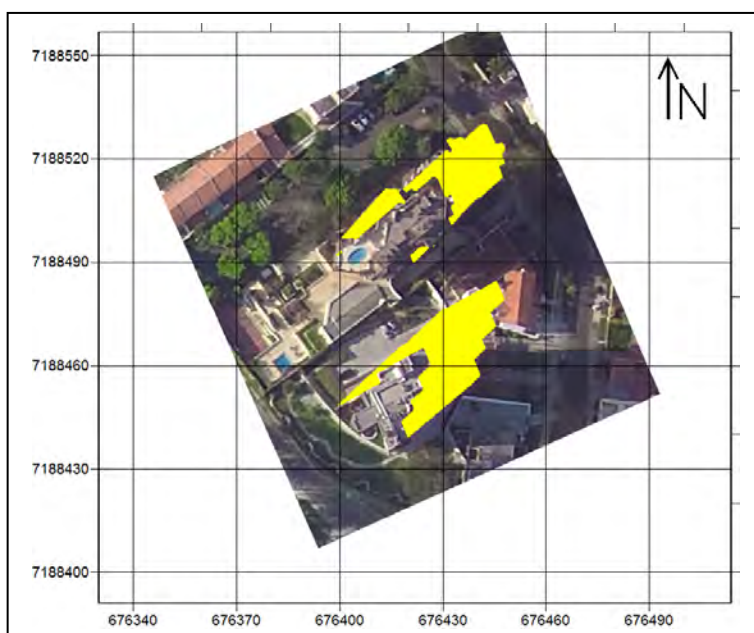


FIGURA 175 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 41 DA ÁREA ARQUIT COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)

FONTE: O Autor (2010)

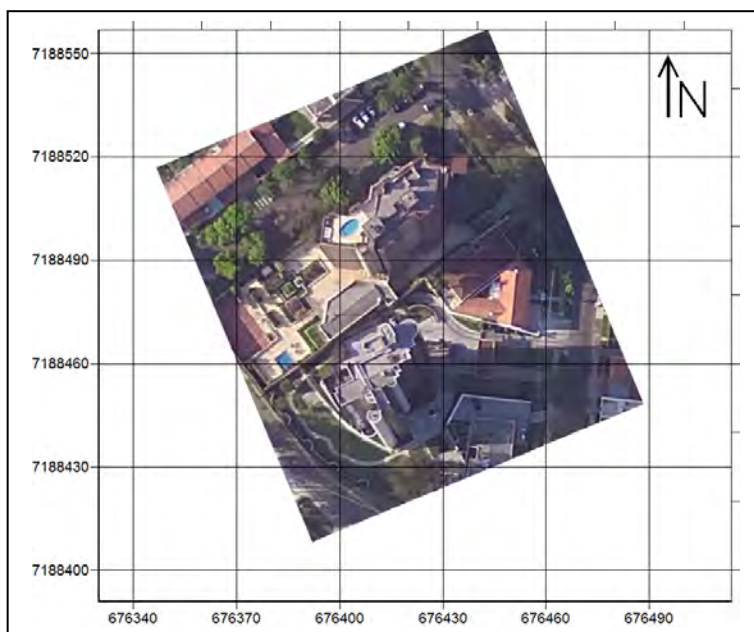


FIGURA 176 – ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA ARQUIT

FONTE: O Autor (2010)

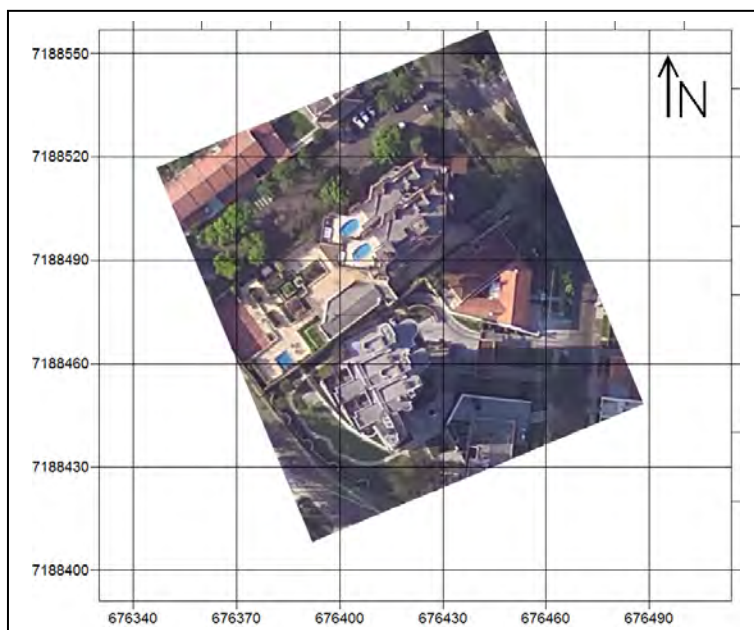


FIGURA 177 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA ARQUIT SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES
FONTE: O Autor (2010)

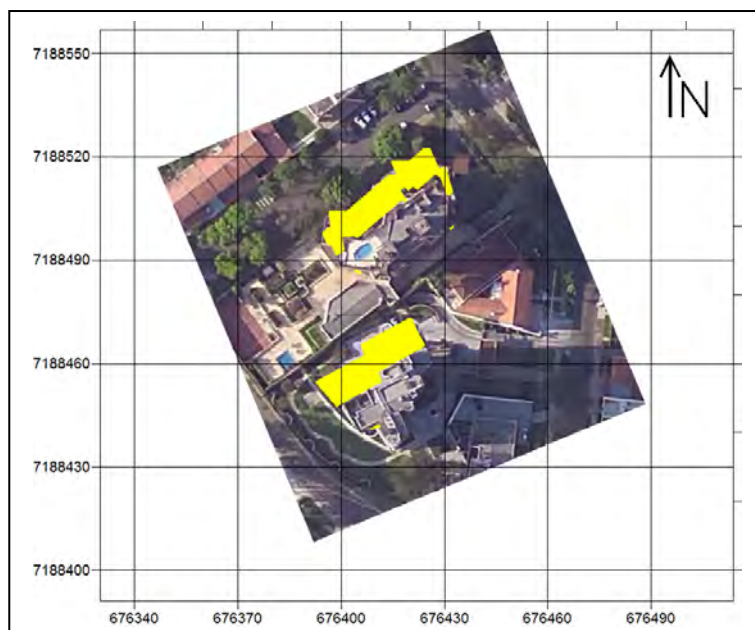


FIGURA 178 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA ARQUIT COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)
FONTE: O Autor (2010)

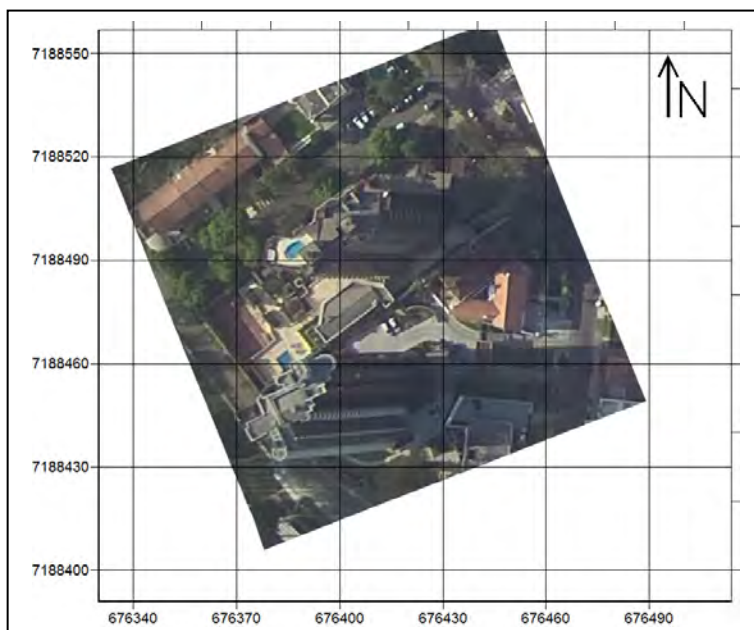


FIGURA 179 – ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA ARQUIT
FONTE: O Autor (2010)

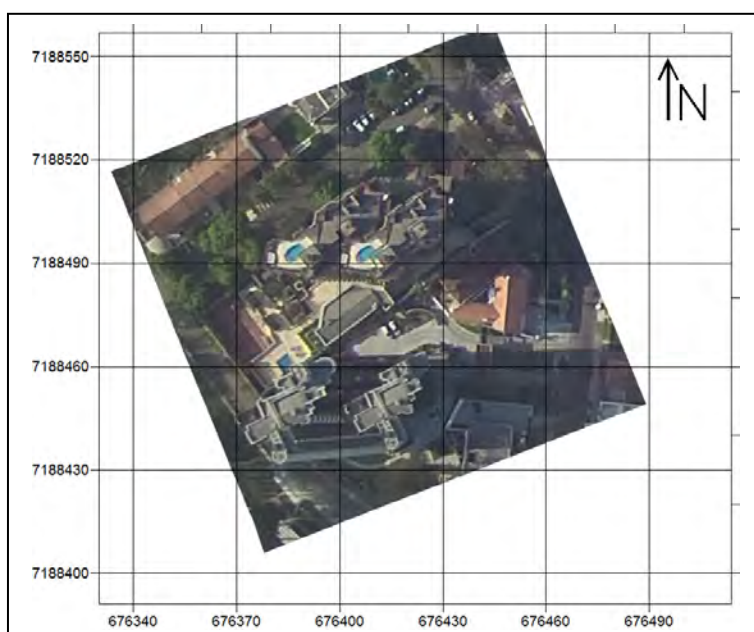


FIGURA 180 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43
DA ÁREA ARQUIT SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES
FONTE: O Autor (2010)

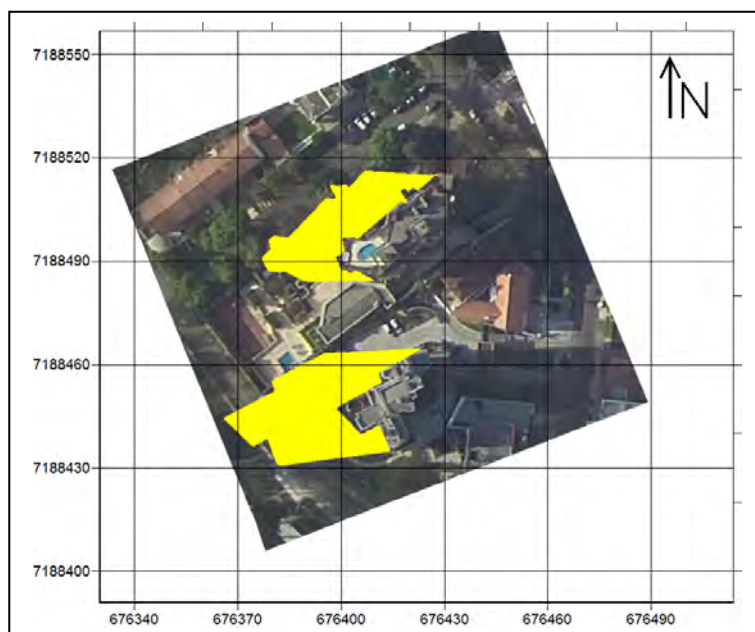


FIGURA 181 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA ARQUIT COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)

FONTE: O Autor (2010)

A análise das ortofotomontagens convencionais dos três extratos de fotografias permite identificar que as inclinações das edificações ocorreram nas direções NE (Figura 173), NO (Figura 176) e L (Figura 179). Ao comparar essas direções com as direções dos duplos mapeamentos nas Figuras 174, 177 e 180, respectivamente, verifica-se que as elas são exatamente as mesmas. Constata-se, também, que os duplos mapeamentos são as projeções inclinadas, presentes em uma ortofotomontagem convencional que continuam presentes em uma ortofotomontagem verdadeira.

No caso de edificações de grande porte, como as duas dessa área de estudo, observa-se que entre a cobertura da edificação e o duplo mapeamento existe um espaço, que é preenchido pela lateral da edificação (Figuras 174 e 180). Esse é o comportamento da Porção M tipo Quina em edificações de grande porte. A união da representação da cobertura, da lateral e do duplo mapeamento, em uma edificação de grande porte, provoca dificuldades na interpretação dessa edificação, exigindo maior atenção do interpretador humano.

Ao se aplicar o Método de Detecção de Oclusões *H-Buffer* nas ortofotomontagens verdadeiras (Figuras 175, 178 e 181) constata-se que todas essas regiões, que correspondem às áreas oclusas (em amarelo), foram corretamente identificadas, restando apenas a cobertura das edificações na ortofotomontagem.

Uma análise de desempenho que pode ser realizada se refere à comparação da identificação entre os Métodos *Z-Buffer* e *H-Buffer*. A Figura 182 apresenta as áreas oclusas da Figura 181 identificadas pelo método *Z-Buffer*.

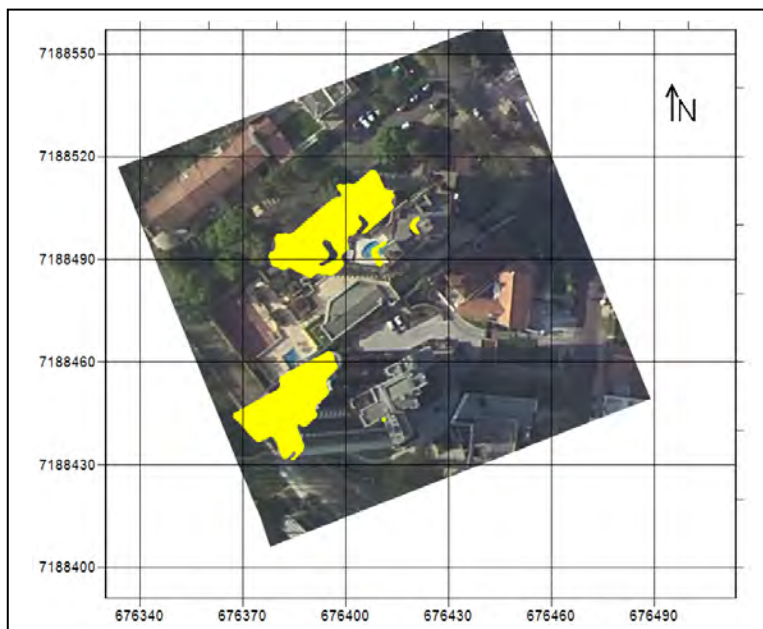


FIGURA 182 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA ARQUIT COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO) PELO MÉTODO Z-BUFFER

FONTE: O Autor (2010)

A análise da Figura 182 permite constatar que o Método *Z-Buffer* somente identificou o duplo mapeamento, representado pela cobertura da edificação. A presença de componentes das partes laterais não foi identificada em nenhuma das duas edificações. Além disso, verifica-se, a existência incorreta de uma porção visível na oclusão da edificação A, cuja causa é a componente vertical de uma das pequenas construções presentes em sua cobertura. Comparando esse resultado com o obtido pelo Método *H-Buffer* na Figura 181, é possível verificar a eficiência do método proposto.

A avaliação da qualidade geométrica das ortoimagens verdadeiras foi realizada com emprego dos dezesseis PAQG (Quadro 09 e Figuras 100 a 102) disponíveis, que foram medidos nas ortoimagens verdadeiras, com auxílio do programa Erdas ViewFinder, e, posteriormente, tiveram suas coordenadas comparadas com as medidas no terreno. As Tabelas 25 a 27 mostram as estatísticas obtidas, e a Figura 183 a distribuição espacial das diferenças planimétricas.

TABELA 25 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 41 DA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E\Delta N$ (m)
81	676398,10	7188488,41	676398,62	7188487,41	-0,52	1,00	1,13
82	676425,41	7188457,19	676424,82	7188457,07	0,59	0,12	0,61
83	676424,16	7188453,65	676424,38	7188452,82	-0,22	0,83	0,86
84	676421,58	7188450,00	676422,11	7188450,52	-0,53	-0,52	0,74
85	676421,12	7188448,60	676421,56	7188448,30	-0,44	0,30	0,53
86	676418,52	7188440,87	676419,45	7188440,98	-0,94	-0,11	0,94
87	676432,98	7188509,13	676433,2	7188508,81	-0,22	0,32	0,39
88	676429,33	7188497,80	676430,48	7188497,80	-1,15	0,00	1,15
89	676424,85	7188494,31	676425,93	7188493,99	-1,08	0,32	1,13
90	676418,59	7188492,02	676419,94	7188491,56	-1,35	0,46	1,43
91	676416,19	7188491,03	676417,73	7188491,78	-1,54	-0,75	1,71
92	676412,13	7188487,84	676413,26	7188488,15	-1,13	-0,31	1,18
93	676415,13	7188485,62	676416,97	7188486,01	-1,84	-0,39	1,88
94	676412,39	7188485,99	676413,53	7188485,59	-1,14	0,40	1,21
95	676410,31	7188486,25	676410,95	7188485,65	-0,64	0,60	0,88
96	676408,54	7188484,84	676409,20	7188484,68	-0,66	0,16	0,68
Média					-0,80	0,15	1,03
Desvio-Padrão					0,60	0,48	0,41

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 26 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E\Delta N$ (m)
81	676398,10	7188488,41	676399,17	7188489,33	-1,07	-0,92	1,41
82	676425,41	7188457,19	676424,76	7188458,00	0,65	-0,81	1,04
83	676424,16	7188453,65	676424,25	7188453,70	-0,09	-0,05	0,10
84	676421,58	7188450,00	676422,42	7188450,71	-0,84	-0,71	1,10
85	676421,12	7188448,60	676421,39	7188448,94	-0,27	-0,34	0,43
86	676418,52	7188440,87	676419,13	7188441,14	-0,61	-0,27	0,67
87	676432,98	7188509,13	676432,87	7188509,37	0,11	-0,24	0,27
88	676429,33	7188497,80	676430,52	7188497,61	-1,19	0,19	1,21
89	676424,85	7188494,31	676426,10	7188494,50	-1,25	-0,19	1,26
90	676418,59	7188492,02	676419,85	7188492,26	-1,26	-0,24	1,29
91	676416,19	7188491,03	676417,45	7188491,26	-1,26	-0,23	1,28
92	676412,13	7188487,84	676413,30	7188488,28	-1,17	-0,44	1,25

TABELA 26 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E\Delta N$ (m)
93	676415,13	7188485,62	676416,36	7188485,10	-1,23	0,52	1,33
94	676412,39	7188485,99	676413,52	7188486,71	-1,13	-0,72	1,35
95	676410,31	7188486,25	676411,43	7188486,39	-1,12	-0,14	1,12
96	676408,54	7188484,84	676408,79	7188485,75	-0,25	-0,91	0,95
Média					-0,75	-0,34	1,00
Desvio-Padrão					0,60	0,40	0,41

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 27 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 43 DA ÁREA DE ESTUDO ARQUIT

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E\Delta N$ (m)
81	676398,10	7188488,41	676399,21	7188489,25	-1,11	-0,84	1,39
82	676425,41	7188457,19	676425,33	7188458,34	0,08	-1,15	1,15
83	676424,16	7188453,65	676424,53	7188453,66	-0,37	-0,01	0,37
84	676421,58	7188450,00	676422,24	7188450,57	-0,66	-0,57	0,87
85	676421,12	7188448,60	676421,17	7188448,84	-0,05	-0,24	0,24
86	676418,52	7188440,87	676419,17	7188441,10	-0,65	-0,23	0,69
87	676432,98	7188509,13	676432,95	7188509,37	0,03	-0,24	0,25
88	676429,33	7188497,80	676430,03	7188498,16	-0,70	-0,36	0,79
89	676424,85	7188494,31	676425,89	7188494,60	-1,04	-0,29	1,08
90	676418,59	7188492,02	676419,46	7188491,17	-0,87	0,85	1,22
91	676416,19	7188491,03	676417,57	7188491,32	-1,38	-0,29	1,41
92	676412,13	7188487,84	676413,74	7188488,48	-1,61	-0,64	1,74
93	676415,13	7188485,62	676415,77	7188485,20	-0,64	0,42	0,77
94	676412,39	7188485,99	676412,72	7188485,82	-0,33	0,17	0,37
95	676410,31	7188486,25	676411,04	7188486,02	-0,73	0,23	0,76
96	676408,54	7188484,84	676408,27	7188485,54	0,27	-0,70	0,75
Média					-0,61	-0,24	0,87
Desvio-Padrão					0,53	0,50	0,44

Fonte: O Autor (2010)

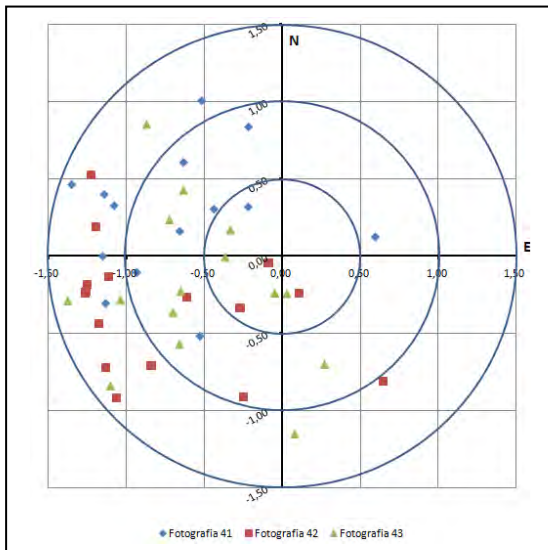


FIGURA 183 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS DA ÁREA ARQUIT

FONTE: O Autor (2010)

As Discrepâncias Planimétricas médias apresentam resultados de 1,03 m (± 5 *pixels*), com desvio-padrão de 0,41 m (± 2 *pixels*), na ortomagem verdadeira da fotografia 41; 1,00 m (± 5 *pixels*), com desvio-padrão de 0,41 m (± 2 *pixels*), na ortomagem verdadeira da fotografia 42, e 0,87 m (± 4 *pixels*), com desvio-padrão de 0,44 m (± 2 *pixels*) na ortomagem verdadeira da fotografia 43.

A análise das distribuições das diferenças presentes na Figura 183, e dos sinais das diferenças médias presentes nas Tabelas 25 a 27, indicam a existência de tendenciosidade dos erros nas direções NO, para os erros na ortomagem verdadeira da fotografia 41, e SO para os das fotografias 42 e 43. Determinando as posições dos CP das fotografias em relação à área de estudo ARQUIT, com auxílio das Figuras 184 a 186, obtêm-se as direções NE para a fotografia 41 (Figura 184), NO para a fotografia 42 (Figura 185) e W para a fotografia 43 (Figura 186).

Essas direções não são coincidentes, indicando a não correlação da posição do CP e da direção dos erros. Essa não coincidência é contrária à correlação demonstrada nos Experimentos 01 a 03, e sua causa provável decorre da influência da edificação reconstruída na ortomagem gerada.

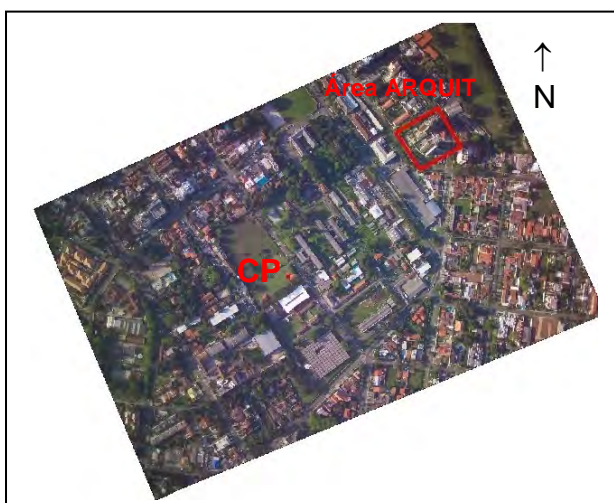


FIGURA 184 – POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 41 EM RELAÇÃO À ÁREA ARQUIT
FONTE: O Autor (2010)

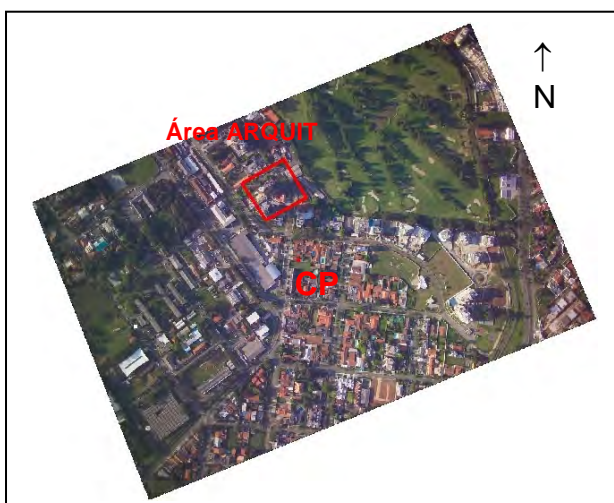


FIGURA 185 – POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 42 EM RELAÇÃO À ÁREA ARQUIT
FONTE: O Autor (2010)

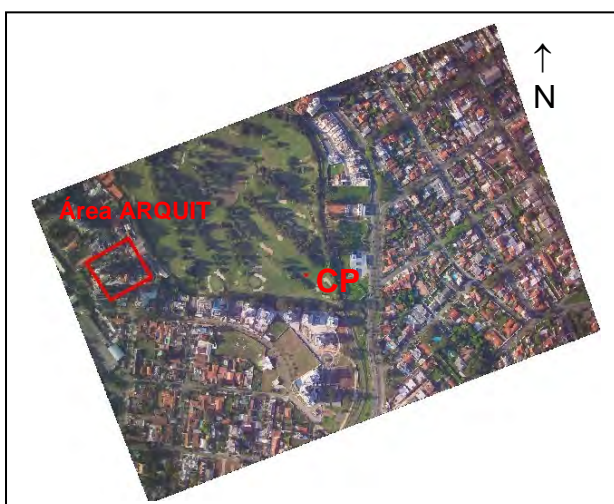


FIGURA 186 – POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 43 EM RELAÇÃO À ÁREA ARQUIT
FONTE: O Autor (2010)

A Figura 187 apresenta, para os treze PAQG que foram medidos na edificação reconstruída e na ortoimagem verdadeira, o comportamento dos erros planimétricos e planialtimétricos da edificação reconstruída e dos erros planimétricos da ortoimagem verdadeira.

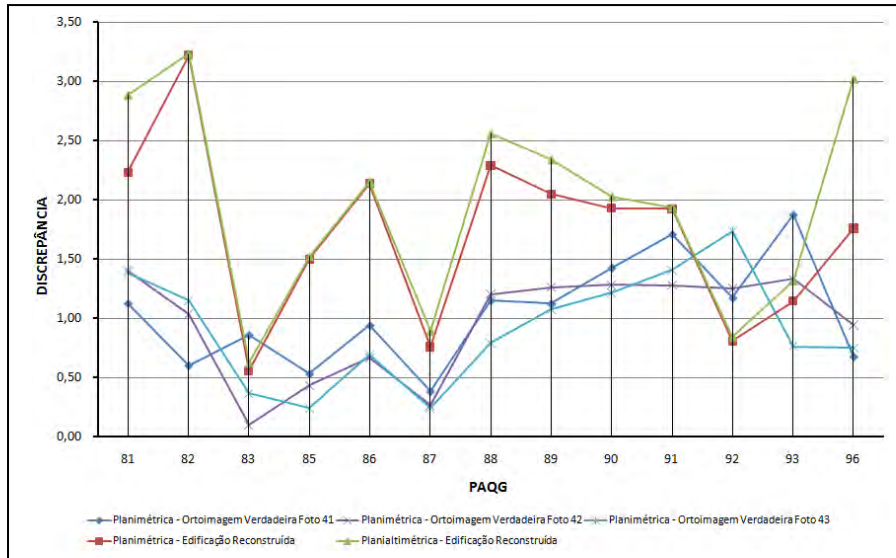


FIGURA 187 – COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DAS EDIFICAÇÕES RECONSTRUÍDAS E DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS DA ÁREA ARQUIT

FONTE: O Autor (2010)

A análise da Figura 187 possibilita verificar que os erros planimétricos dos PAQG apresentam comportamento semelhante nas três ortomagens verdadeiras, com exatidões próximas na maioria dos pontos. Pode-se verificar que 10 pontos (81, 82, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91 e 96) apresentam erro planimétrico nas ortomagens verdadeiras inferior aos erros planialtimétrico, e planimétrico, da edificação reconstruída. Somente no ponto 92 é que os erros presentes nas três ortomagens foram superiores aos das edificações reconstruídas. Esse fato confirma que os erros presentes na ortoimagem verdadeira são, normalmente, inferiores aos erros presentes nas edificações reconstruídas, e a causa provável disso é a compensação dos erros provenientes da orientação interior, e exterior, das fotografias aéreas e da própria ortorretificação da imagem.

Houve baixa correlação nos PAQG que apresentam maiores erros planimétricos, e planialtimétricos, na edificação reconstruída com os que apresentaram maiores erros na ortoimagem verdadeira. Pelo contrário, no gráfico da Figura 187 é possível observar que os pontos com maior erro planialtimétrico (e

planimétrico) na edificação reconstruída (pontos 81, 82, 88 e 96) apresentaram erros próximos as Discrepâncias Planimétricas de cada ortoimagem.

4.3.5 Experimento 05 – Área QUADRA

A área QUADRA pertence ao Bloco Bacacheri e é formada por uma quadra típica do bairro Bacacheri, da cidade de Curitiba. Nele estão presentes diversas edificações, de pequeno porte, como casas e garagens cobertas, de médio porte, como casas de dois andares, ou conjuntos de casas combinadas, e de grande porte, representadas por dois edifícios. Por ser uma área, eminentemente, residencial existe grande presença de árvores de pequeno e médio porte, muitas das quais integradas com as diversas construções existentes. A área QUADRA é a maior área de estudo e foi introduzida como o teste final da metodologia proposta, capaz de sintetizar o terreno e as edificações existentes nas demais áreas de estudo.

Os objetivos desse experimento se relacionam com as análises da capacidade dos algoritmos de reconstrução das edificações em modelar construções com essas características, da capacidade da metodologia em eliminar polígonos cujas bordas não apresentam forma definida, da influência na exatidão geométrica das ortomagens verdadeiras do emprego de um modelo de reconstrução de edificações com variadas formas e tamanhos, da capacidade do algoritmo de detecção de oclusões *H-Buffer* em identificar as oclusões das edificações presentes na área e de relacionar as tendências dos erros de reconstrução das edificações com a direção geral do voo do levantamento LIDAR, e de geração de ortomagens verdadeiras com a posição do CP da fotografia. Para atingir esses objetivos foram utilizados extratos de duas fotografias aéreas do Bloco Bacacheri que recobrem a área de estudo.

4.3.5.1 Reconstrução das Edificações

Para reconstruir as edificações foram disponibilizados pelo LACTEC dois conjuntos de pontos, um representando o MDS, e o outro o MDT, da área QUADRA. As malhas regulares originais, com resoluções de 0,2218 m, desses modelos são apresentadas nas Figuras 188 e 189.

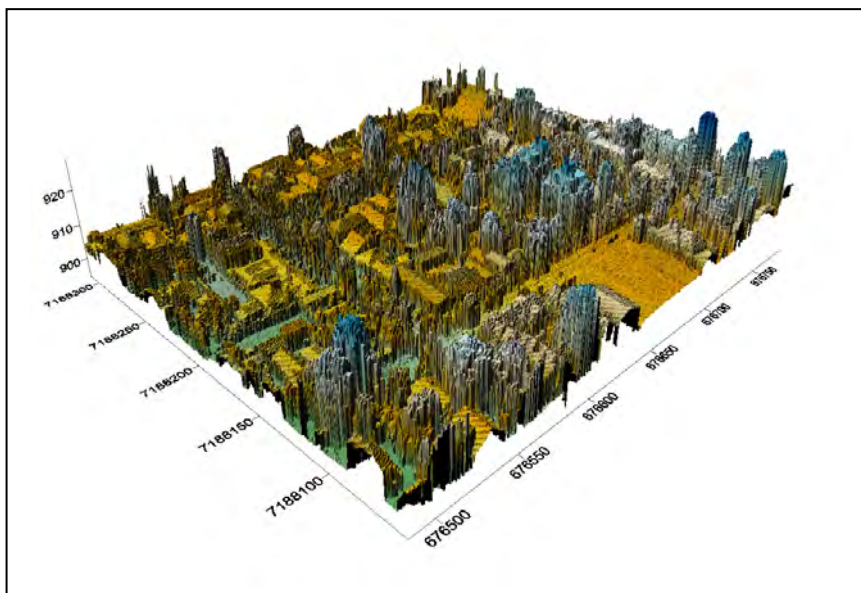


FIGURA 188 – MALHA REGULAR MDS ORIGINAL DA ÁREA QUADRA
 FONTE: O Autor (2010)

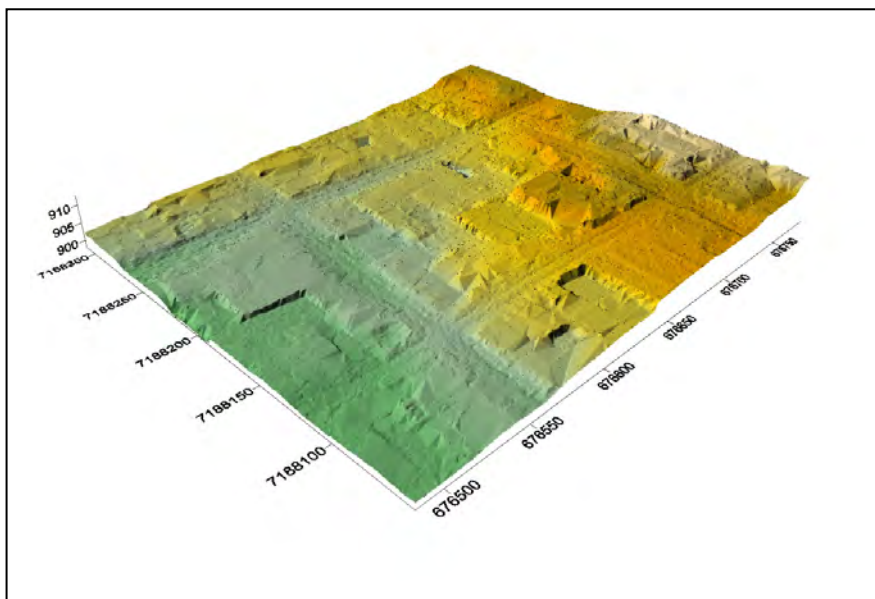


FIGURA 189 – MALHA REGULAR MDT ORIGINAL DA ÁREA QUADRA
 FONTE: O Autor (2010)

A análise da Figura 188 permite observar a existência de edificações variadas na área QUADRA, com diversas entidades com coberturas irregulares. Pode-se identificar na quadra central a presença, provavelmente, de vegetações isoladas em seus contornos, e de elementos com formato de “cone” em seu centro. A análise da Figura 189 possibilita verificar que o terreno é plano, com pouca variação de altitude e uma pequena irregularidade na parte SE da quadra.

A 1ª Compatibilização entre o MDS e o MDT inicia o processo de atribuição de coordenadas altimétricas iguais aos elementos comuns, tais como, terreno exposto, arruamentos, vegetação e áreas fora da quadra central. As Figuras 190 e 191 apresentam esses modelos após a 1ª Compatibilização.

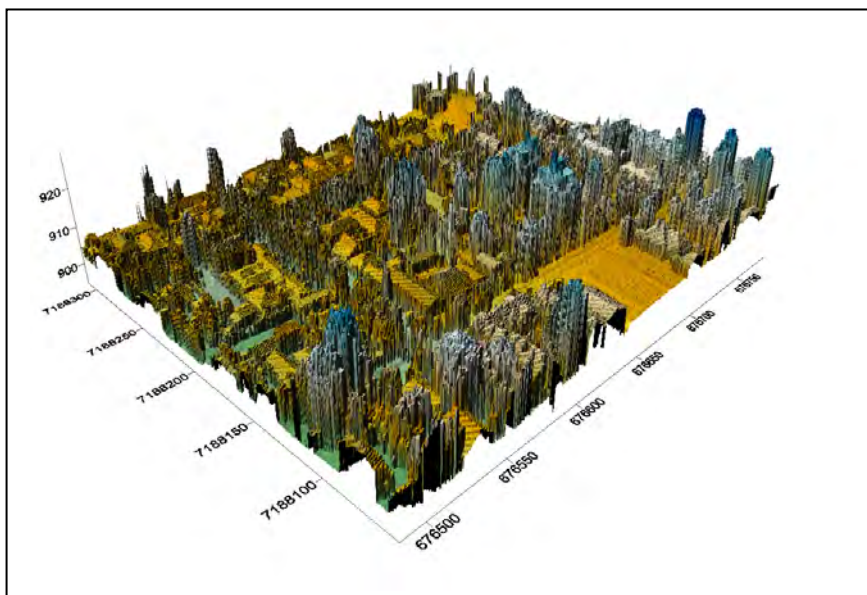


FIGURA 190 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA QUADRA
FONTE: O Autor (2010)

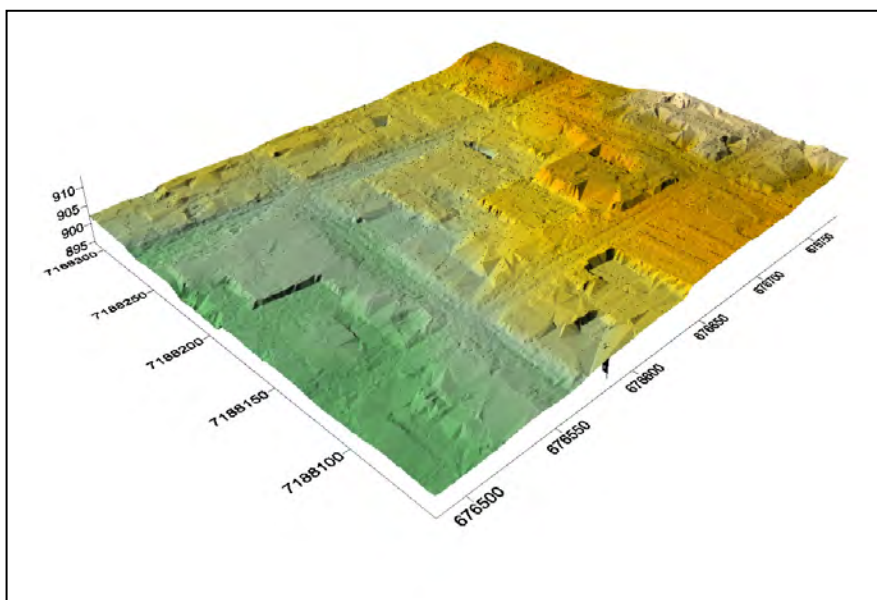


FIGURA 191 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 1ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA QUADRA
FONTE: O Autor (2010)

A análise da Figura 190 permite constatar, visualmente, que a vegetação eliminada não foi relevante para o total da vegetação existente. A etapa seguinte é a determinação, e a retificação, das bordas das edificações presentes na área de

estudo, conforme apresentado nas Figuras 192 e 193, que contém as bordas retificadas (em azul) e as não retificadas (em vermelho), e na Figura 194 que contém uma visualização das bordas retificadas sobre o extrato da imagem hipsométrica do levantamento LIDAR correspondente a área.

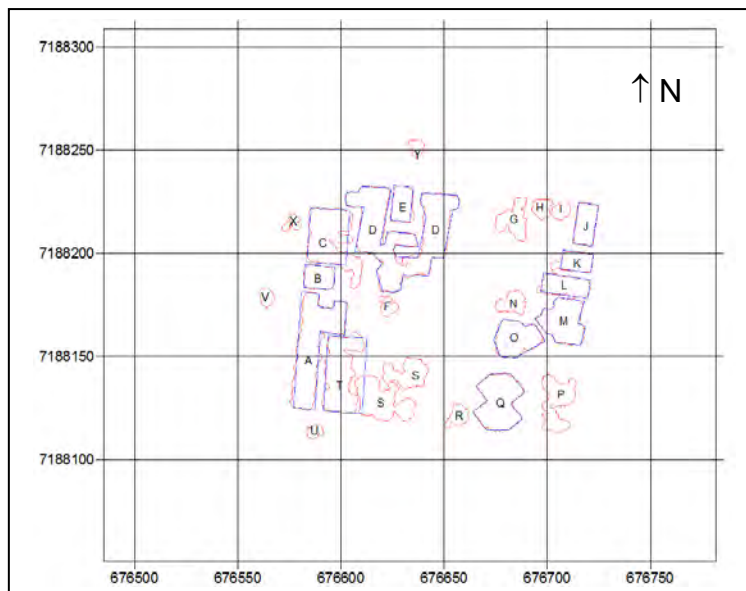


FIGURA 192 – EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO), E DEPOIS (AZUL), DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA
 FONTE: O Autor (2010)

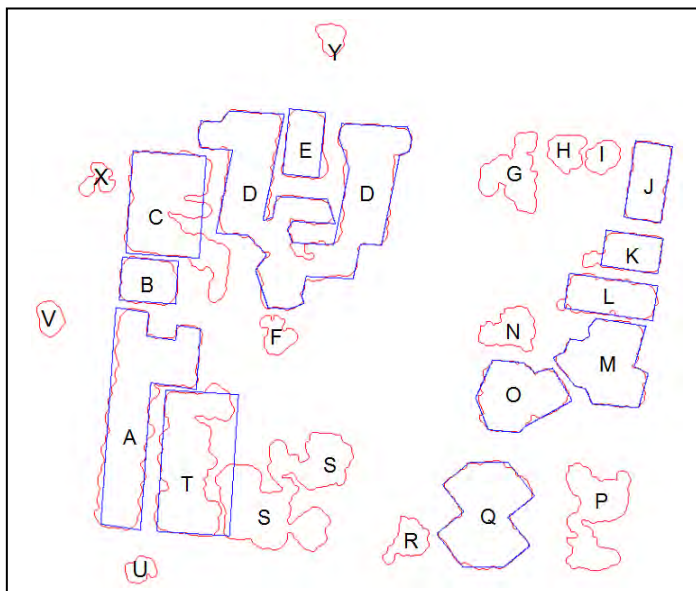


FIGURA 193 – AMPLIAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES ANTES (VERMELHO), E DEPOIS (AZUL), DA RETIFICAÇÃO DA BASE PLANIMÉTRICA
 FONTE: O Autor (2010)

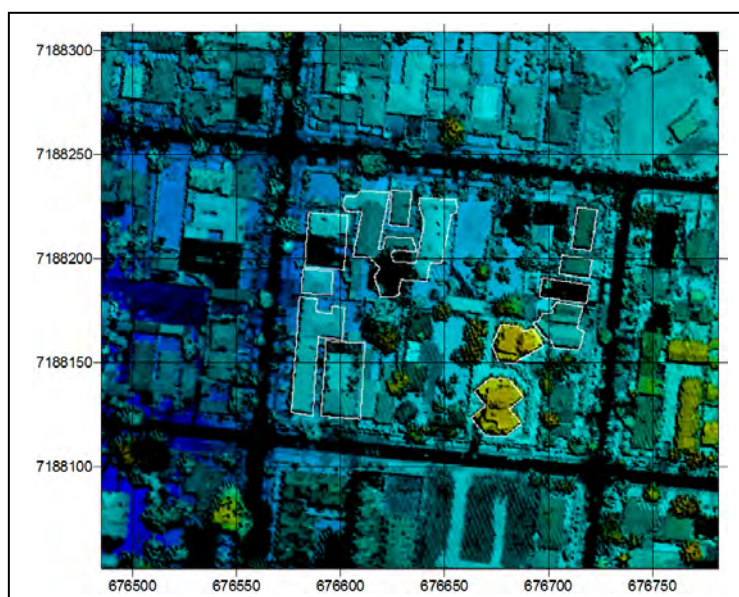


FIGURA 194 – BORDAS RETIFICADAS (EM BRANCO) DAS EDIFICAÇÕES SOBRE A IMAGEM HIPSOMÉTRICA
 FONTE: O Autor (2010)

Da análise das Figuras 192 e 193 pode-se verificar que a metodologia identificou vinte e quatro polígonos (nomeados de “A” a “Y”), dos quais doze (polígonos F, G, H, I, N, P, R, S, U, V, X e Y) foram eliminados do processo de reconstrução (50% do total), por serem julgados como amorfos pelo Filtro de Eliminação pelo Número de Vértices (item 3.3.5.2.4). Nos polígonos restantes, considerados como edificações, as bordas foram retificadas.

É possível observar, comparando os polígonos nas Figuras 193 e 194, que o polígono C apresentou forma irregular (em vermelho), devido a união de uma construção com vegetação adjacente, que acabou sendo retificada como um quadrilátero. Este fato, também, ocorreu no polígono D, resultante da união de três edificações isoladas unidas por uma vegetação elevada (“cone” na parte central da Figura 190). A forma do polígono final foi considerada como válida pelo Filtro Elimina Vértices, apesar de não ser uma forma usual de construção. O polígono retificado T acabou incorporando parte do polígono S, que por sua vez foi considerado amorfo pelo Filtro de Eliminação pelo Número de Vértices.

As edificações K e L foram retificadas corretamente, apesar da irregularidade da borda em todos os segmentos. As edificações A, E, J e M, que representam construções de pequeno porte apresentaram bordas não retificadas de retificação simples, o mesmo que nos polígonos O e Q, que representam edificações de grande porte.

Com as novas bordas definidas foi realizada a 2ª Compatibilização entre o MDS e o MDT, como apresentadas nas Figuras 195 e 196.

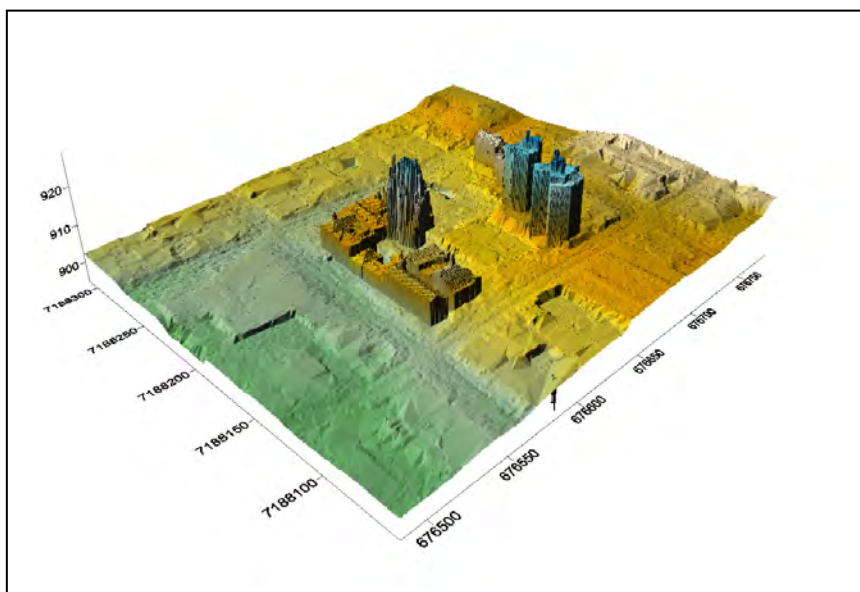


FIGURA 195 – MALHA REGULAR MDS APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA QUADRA
FONTE: O Autor (2010)

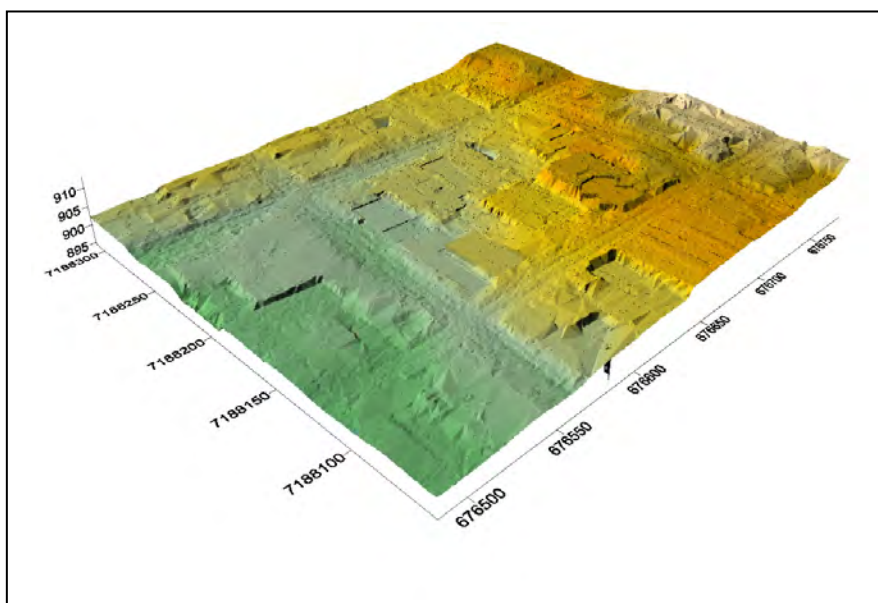


FIGURA 196 – MALHA REGULAR MDT APÓS A 2ª HARMONIZAÇÃO DA ÁREA QUADRA
FONTE: O Autor (2010)

Observando a Figura 195 pode-se identificar as edificações que tiveram suas bordas retificadas. Percebe-se, também, que em sua maioria elas representam construções de pequeno porte (residências particulares). Existe ainda a presença de três grandes entidades proeminentes, das quais duas representam os polígonos “O” e “Q”, e uma a vegetação de grande porte presente no polígono “D”.

Na Figura 196 verifica-se que as bases de todas as edificações são representadas por planos, conforme prevê a metodologia. A seguir, as coberturas das edificações foram retificadas, com o MDS ficando da forma da Figura 197, e o MDSn da Figura 198.

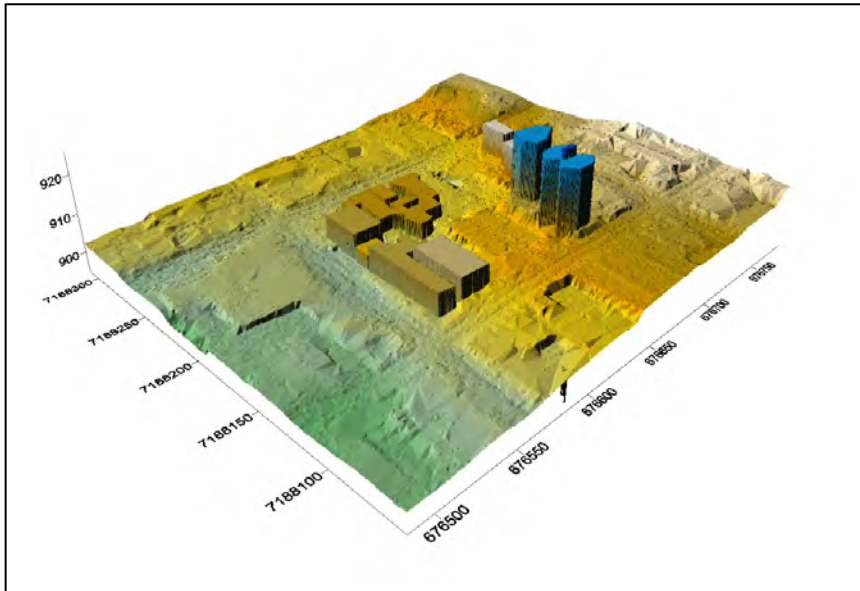


FIGURA 197 – MALHA REGULAR MDS APÓS RETIFICAÇÃO DAS COBERTURAS DA ÁREA QUADRA
 FONTE: O Autor (2010)

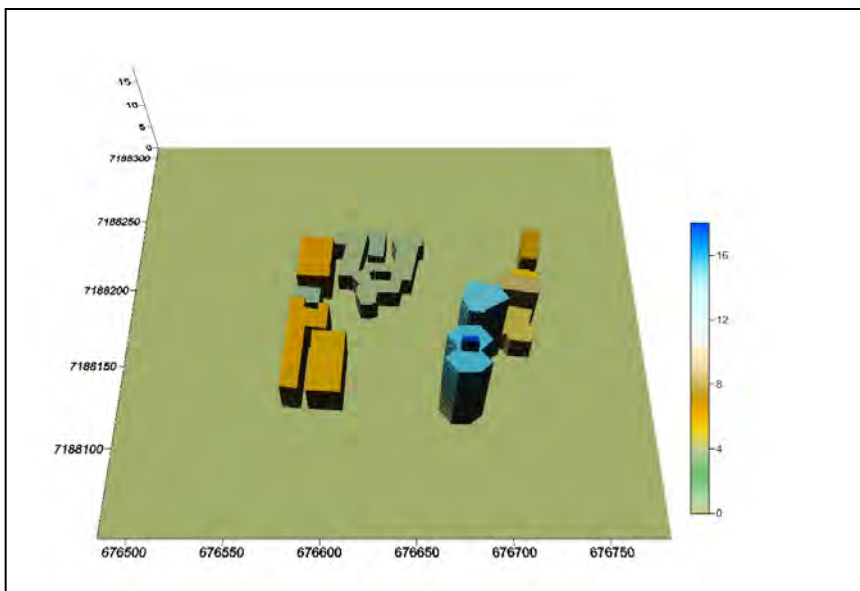


FIGURA 198 – MALHA REGULAR MDSn DA ÁREA QUADRA
 FONTE: O Autor (2010)

As coberturas de todas as edificações foram representadas por planos, determinados com o emprego da Média Móvel Restrita. A única edificação que apresentou construção em sua cobertura foi a “Q”, sendo provavelmente a caixa

d'água e/ou do elevador. A vegetação presente na edificação "D" teve sua altura reduzida, devido ao fato de que as altitudes de todos os *groundels* pertencentes a essa edificação entraram nos cálculos, o que acabou por minimizar o efeito da altura da própria vegetação na altura da edificação reconstruída.

Para avaliação da exatidão geométrica das edificações foram utilizados dezesseis dos trinta e seis PAQG previstos na Tabela 07 e na Figuras 103 e 104. Os vinte pontos restantes não foram utilizados por não terem sido identificados nas edificações reconstruídas, ou por se localizarem em polígonos que foram julgados amorfos no decorrer do processo. As Tabelas 28 e 29, e a Figura 199, apresentam essa exatidão.

TABELA 28 – EXATIDÃO POSICIONAL DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Ponto	Coordenadas de Campo			Coordenadas do Modelo			Diferença		
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	h (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	Δh (m)
102	676714,90	7188167,51	929,90	676714,42	7188166,52	928,52	0,48	0,99	1,38
103	676716,11	7188156,06	927,65	676715,50	7188155,86	928,52	0,61	0,20	-0,87
104	676686,32	7188167,82	938,32	676685,89	7188167,46	940,52	0,43	0,35	-2,20
105	676692,26	7188167,16	938,32	676693,21	7188166,11	940,52	-0,95	1,06	-2,20
106	676698,32	7188159,68	938,33	676698,35	7188157,71	940,52	-0,03	1,97	-2,19
107	676682,38	7188141,64	938,32	676681,74	7188141,71	940,42	0,64	-0,07	-2,10
112	676688,73	7188133,83	938,33	676688,59	7188133,07	940,42	0,14	0,76	-2,09
113	676687,41	7188120,98	938,32	676687,49	7188120,27	940,42	-0,08	0,71	-2,10
114	676679,50	7188114,42	938,33	676680,60	7188114,67	940,42	-1,10	-0,25	-2,09
115	676669,54	7188115,47	938,31	676670,10	7188114,80	940,42	-0,56	0,67	-2,11
117	676664,64	7188136,36	938,31	676664,82	7188135,96	940,42	-0,19	0,40	-2,11
120	676585,03	7188125,12	925,13	676586,77	7188124,26	925,12	-1,74	0,85	0,01
125	676593,36	7188160,51	927,15	676593,26	7188160,43	926,22	0,11	0,08	0,93
126	676609,93	7188158,82	927,14	676612,05	7188159,26	926,22	-2,12	-0,43	0,92
127	676580,96	7188181,64	922,26	676580,38	7188181,75	925,12	0,58	-0,11	-2,86
131	676584,92	7188222,82	925,40	676584,78	7188222,23	925,02	0,14	0,59	0,38
Média							-0,23	0,49	-1,21
Desvio-Padrão							0,85	0,60	1,42

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 29 – EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Ponto	Discrepâncias		
	Altimétrica (Δh)	Planimétrica ($\Delta E \Delta N$)	Planialtimétrica ($\Delta E \Delta N \Delta h$)
102	1,38	1,10	1,76
103	0,87	0,64	1,08
104	2,2	0,55	2,27
105	2,2	1,42	2,62
106	2,19	1,97	2,95
107	2,1	0,64	2,20
112	2,09	0,77	2,23
113	2,1	0,71	2,22
114	2,09	1,13	2,38
115	2,11	0,87	2,29
117	2,11	0,44	2,16
120	0,01	1,94	1,94

TABELA 29 – EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DAS EDIFICAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Ponto	Discrepâncias		
	Altimétrica (Δh)	Planimétrica ($\Delta E \Delta N$)	Planialtimétrica ($\Delta E \Delta N \Delta h$)
125	0,93	0,13	0,94
126	0,92	2,16	2,35
127	2,86	0,59	2,92
131	0,38	0,60	0,71
Média	1,66	0,98	2,06
Desvio-Padrão	0,80	0,58	0,65

Fonte: O Autor (2010)

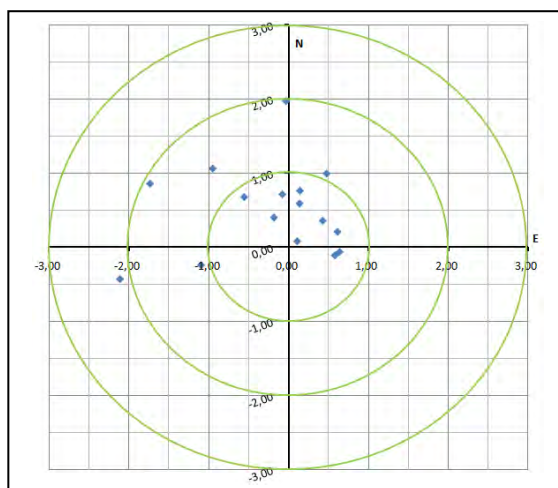


FIGURA 199 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DA ÁREA QUADRA
 FONTE: O Autor (2010)

A Discrepância Planimétrica média obtida foi de 0,98 m, com desvio-padrão de 0,58 m, ou seja, aproximadamente, cinco e três *groundels*, respectivamente (*groundel* com resolução de 0,2218 m). As diferenças nos eixos apresentaram média de -0,23 m, no eixo E, e de 0,49 m no eixo N. Analisando a Figura 199 verifica-se a existência de uma leve tendência na direção geral NE, que pode ser explicada por ser a direção geral do voo do levantamento LIDAR, obtido a partir da análise da direção dos feixes LASER presentes na Figura 39. Esse resultado corrobora os resultados obtidos nos Experimentos 1, 2 e 3, e indica ser possível relacionar a tendência dos erros de reconstrução das edificações com a direção geral de voo do levantamento LIDAR.

Os PAQG que apresentaram maior erro planimétrico foram os pontos 106 (1,97 m), 120 (1,94 m), 114 (1,13 m) e 102 (1,10 m), localizados nas edificações “A”, “Q”, “O” e “M”, respectivamente. Essas edificações foram aquelas cujas bordas retificadas mais se assemelharam, visualmente, as bordas não retificadas, indicando que a densidade média da distribuição de pontos LIDAR de 1,97 pontos/m² (Quadro

04) pode não ser suficiente para servir de base para uma reconstrução acurada de edificações.

A Discrepância Altimétrica média apresentou resultado de 1,66 m, com 0,80 m de desvio-padrão. Cinco pontos apresentaram altitude nas edificações reconstruídas inferiores a do terreno (pontos 102, 120, 125, 126 e 127). Os demais onze pontos, pelo contrário, apresentaram altitude superior no modelo do que no terreno, pertencendo às edificações. A causa desses erros se refere aos tipos de coberturas existentes no terreno, que apresentam como forma mais comum, não o plano simples da metodologia, mas sim, planos conjugados formados por duas ou mais “águas”. Esses resultados possibilitam constatar que a adoção do plano como forma genérica de representação de edificações de pequeno porte não é a mais exata.

A Discrepância Planialtimétrica média forneceu resultados de 2,06 m, ou, aproximadamente, dez *groundels*, com desvio-padrão de 0,65 m, ou, aproximadamente, três *groundels*. Esse erro representa o vetor tridimensional dos erros, sendo importante para avaliar qual a importância da exatidão das edificações reconstruídas (no espaço tridimensional) na geração das ortoimagens verdadeiras (espaço bidimensional).

4.3.5.2 Geração das Ortoimagens Verdadeiras

Na área QUADRA foram gerados dois conjuntos de ortoimagens provenientes de extratos das fotografias 38 e 42 do Bloco Bacacheri, conforme apresentado no Quadro 08, sendo que cada conjunto contém uma ortoimagem convencional, uma ortoimagem verdadeira sem a detecção de bordas e uma ortoimagem verdadeira com a detecção de bordas. As Figuras 200 a 205 as apresentam.

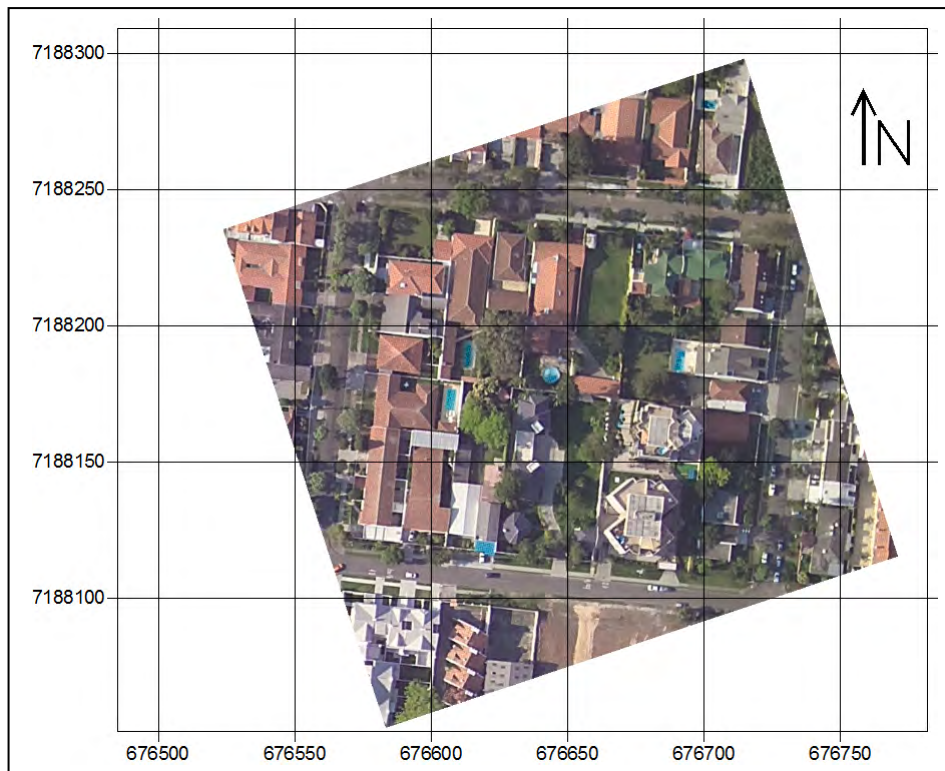


FIGURA 200 – ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA QUADRA
FONTE: O Autor (2010)

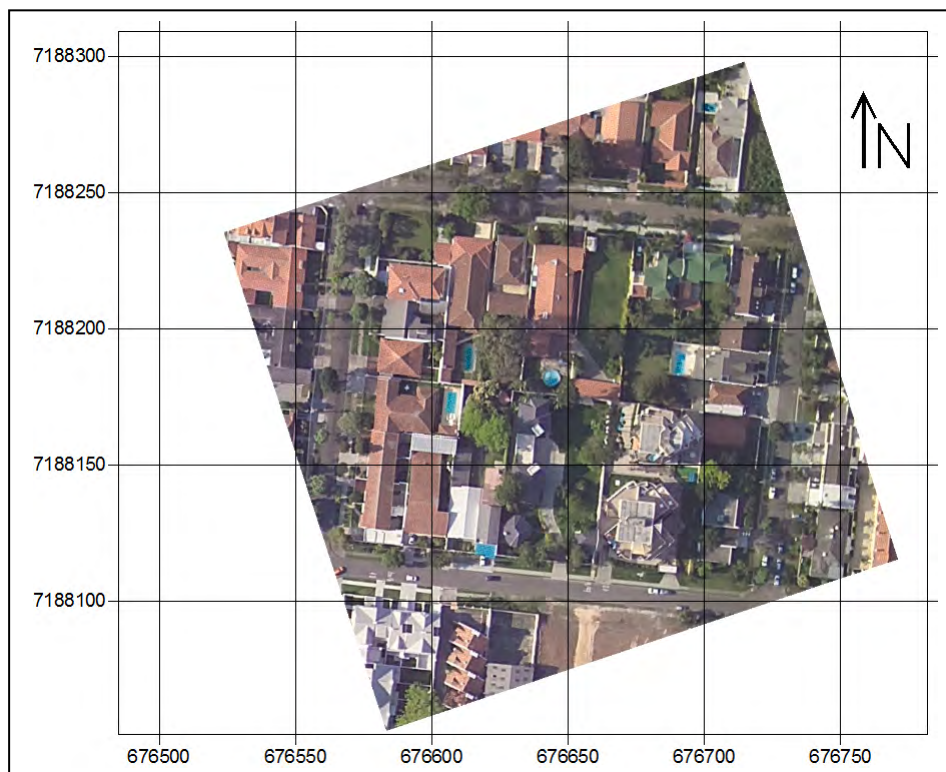


FIGURA 201 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA
QUADRA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES
FONTE: O Autor (2010)

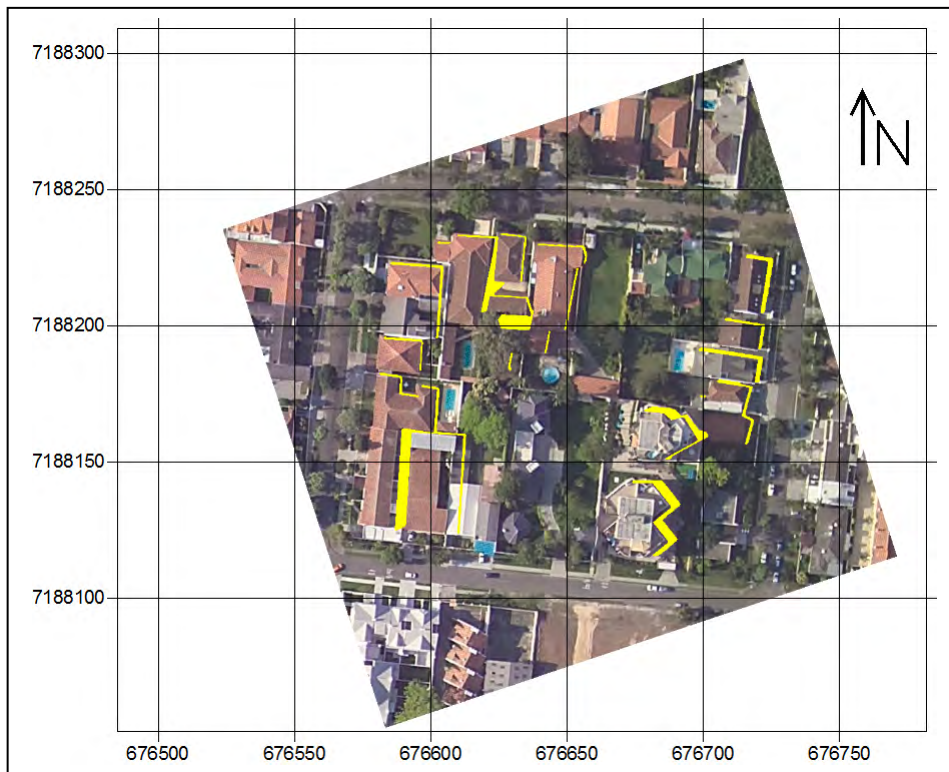


FIGURA 202 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA QUADRA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES (EM AMARELO)

FONTE: O Autor (2010)

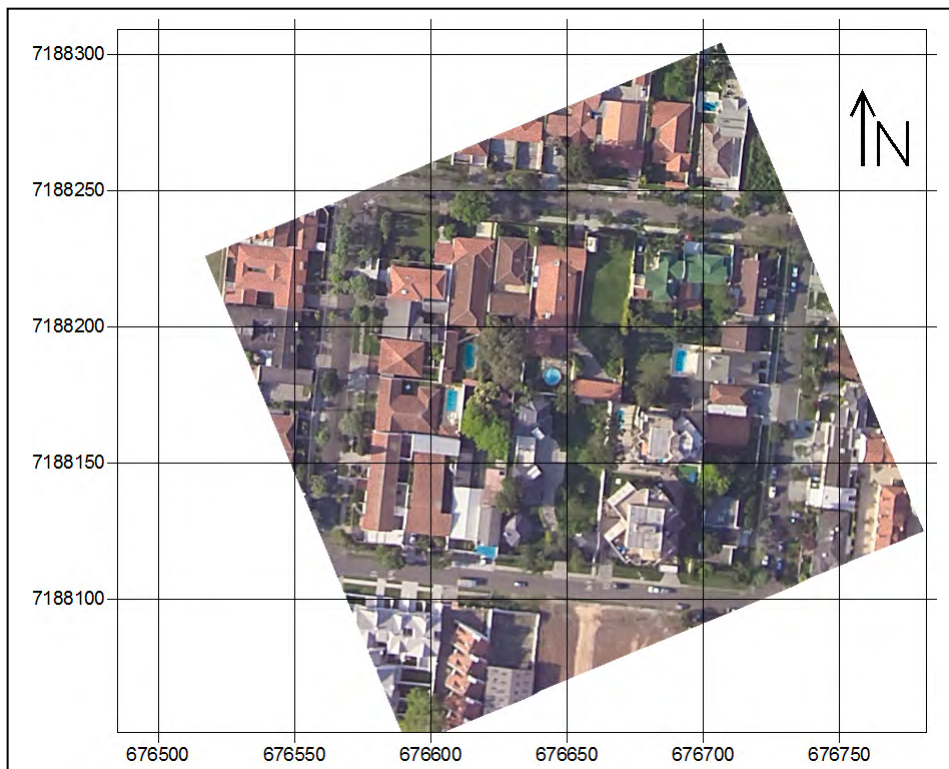


FIGURA 203 – ORTOIMAGEM CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA QUADRA

FONTE: O Autor (2010)

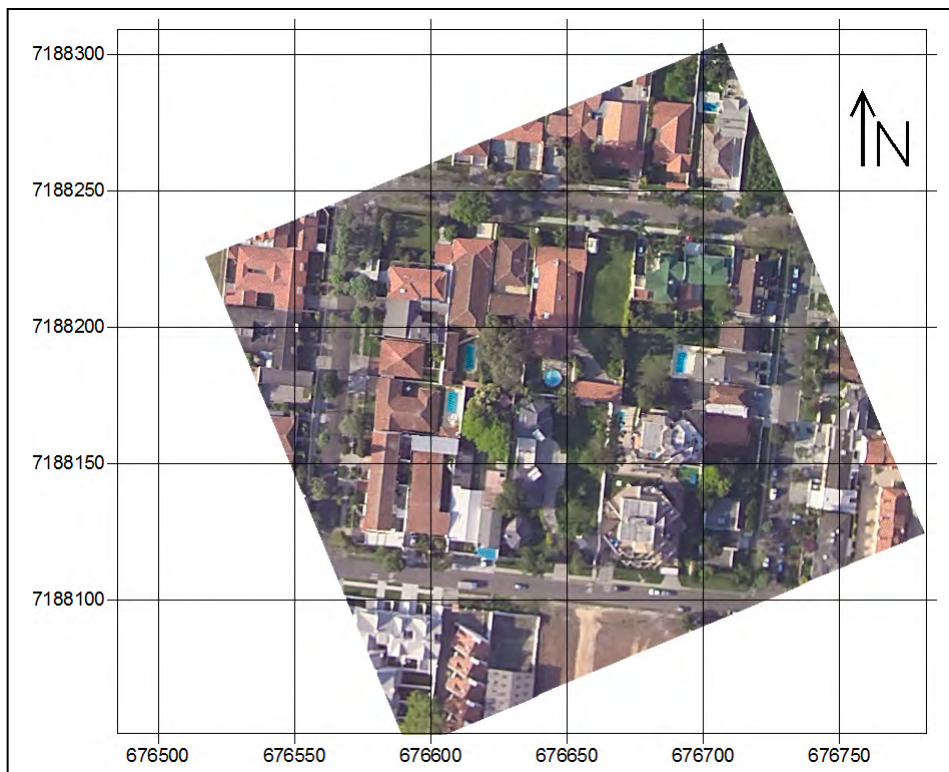


FIGURA 204 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA
QUADRA SEM DETECÇÃO DE OCLUSÕES

FONTE: O Autor (2010)

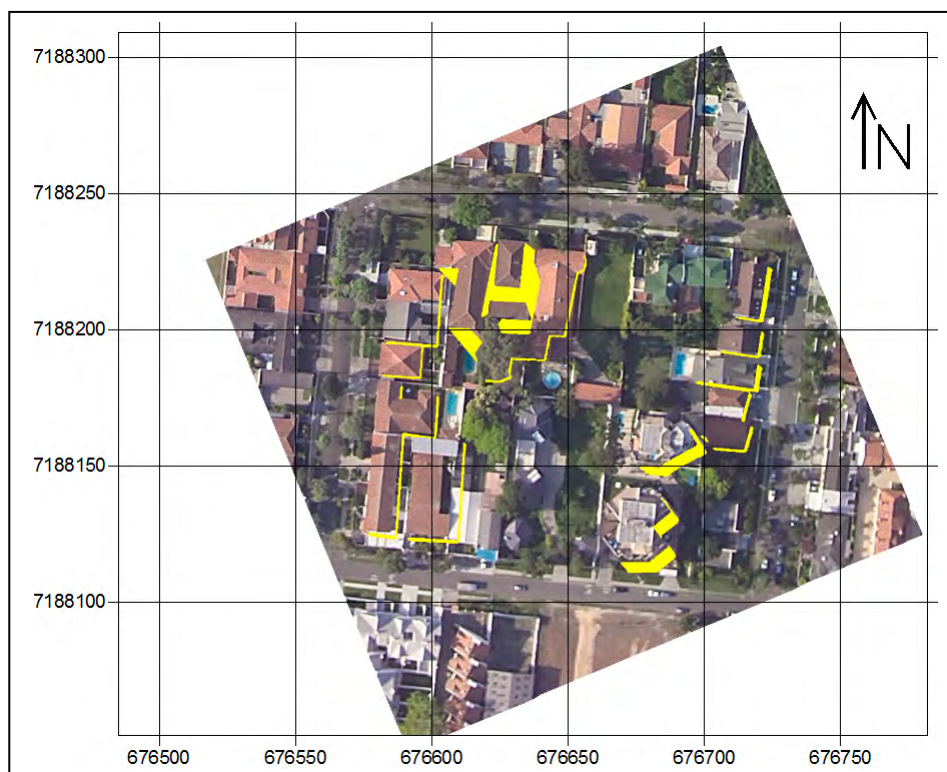


FIGURA 205 – ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA
QUADRA COM DETECÇÃO DE OCLUSÕES

FONTE: O Autor (2010)

A análise das Figuras 200 e 203 (ortoimagens convencionais) permite verificar visualmente, que as edificações de pequeno porte apresentam pouca inclinação lateral, diferentemente das duas edificações de maior porte (“O” e “Q”), cujas laterais são visíveis.

Nas Figuras 201 e 203 pode-se visualizar como o duplo mapeamento se manifesta em pequenas construções. Por exemplo, visualizando a edificação “L” na Figura 201 é possível constatar que ele (duplo mapeamento) pode ser confundido com uma extensão da representação da própria construção. A visualização de sua área oclusa na Figura 202 permite definir corretamente quais são os limites dessa construção.

Outra informação importante se refere à reconstrução de edificações de forma diferente da real existente no terreno. Utilizando, como exemplo, a edificação “S” na Figura 204 é possível verificar que sua borda superior apresenta um leve degrau, que coincide com o limite da edificação reconstruída “T”. Essa descontinuidade é decorrente do desnível entre essas edificações existente no MDS, que quando projetado na fotografia aérea, no momento de sua ortoretificação, acaba buscando a informação métrica em local incorreto, de forma semelhante ao apresentado na Figura 08. Essa é uma das causas da eliminação dos polígonos julgados amorfos por um filtro, qual seja de evitar que edificações, cujos modelos reconstruídos fujam da realidade de forma excessiva, sejam representadas nas ortoimagens verdadeiras por bordas descontínuas e irregulares.

Nas Figuras 202 e 205 visualiza-se o efeito da identificação das áreas oclusas pelo Método *H-Buffer*. A reconstrução de edificações de forma incorreta fez com que áreas oclusas fossem identificadas, também, incorretamente, o que provocará inconsistências na ortoimagem verdadeira no momento da substituição dos *pixels* oclusos.

Para avaliar a geometria das ortoimagens verdadeiras foram utilizados os trinta e seis PAQG, previstos no Quadro 09, cujas estatísticas estão presentes nas Tabelas 30 e 31, e na Figura 206.

TABELA 30 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E\Delta N$ (m)
97	676724,55	7188224,15	676724,21	7188223,29	0,34	0,86	0,92
98	676722,11	7188204,04	676721,49	7188204,06	0,62	-0,02	0,62
99	676716,95	7188204,60	676716,87	7188205,15	0,08	-0,55	0,56
100	676708,21	7188190,14	676707,64	7188188,86	0,57	1,28	1,40
101	676712,20	7188174,50	676712,61	7188174,43	-0,41	0,07	0,42
102	676714,90	7188167,51	676714,54	7188167,45	0,36	0,06	0,36
103	676716,11	7188156,06	676715,52	7188155,95	0,59	0,11	0,60
104	676686,32	7188167,82	676685,34	7188167,15	0,98	0,67	1,18
105	676692,26	7188167,16	676692,08	7188166,03	0,18	1,13	1,15
106	676698,32	7188159,68	676697,50	7188159,08	0,82	0,60	1,02
107	676682,38	7188141,64	676681,83	7188141,30	0,55	0,34	0,65
108	676682,98	7188135,46	676682,35	7188135,25	0,63	0,21	0,66
109	676670,63	7188136,77	676670,24	7188136,27	0,39	0,50	0,63
110	676672,24	7188130,36	676672,42	7188129,90	-0,18	0,46	0,49
111	676689,74	7188154,76	676689,74	7188154,71	0,00	0,05	0,05
112	676688,73	7188133,83	676687,87	7188133,63	0,86	0,20	0,88
113	676687,41	7188120,98	676686,61	7188120,73	0,80	0,25	0,84
114	676679,50	7188114,42	676678,71	7188114,46	0,79	-0,04	0,79
115	676669,54	7188115,47	676669,21	7188115,69	0,33	-0,22	0,40
116	676681,32	7188119,89	676681,03	7188120,15	0,29	-0,27	0,39
117	676664,64	7188136,36	676664,75	7188136,18	-0,11	0,18	0,21
118	676624,13	7188119,53	676623,90	7188119,95	0,23	-0,42	0,48
119	676592,25	7188135,89	676591,78	7188135,73	0,47	0,16	0,49
120	676585,03	7188125,12	676584,88	7188125,32	0,15	-0,20	0,25
121	676579,84	7188125,63	676579,51	7188125,90	0,33	-0,27	0,43
122	676578,23	7188162,04	676578,10	7188161,82	0,13	0,22	0,26
123	676583,43	7188161,50	676583,10	7188161,11	0,33	0,39	0,51
124	676592,81	7188154,93	676593,12	7188155,20	-0,31	-0,27	0,41
125	676593,36	7188160,51	676593,58	7188160,07	-0,22	0,44	0,49
126	676609,93	7188158,82	676609,56	7188158,69	0,37	0,13	0,39
127	676580,96	7188181,64	676580,63	7188181,36	0,33	0,28	0,43
128	676585,10	7188181,23	676584,50	7188180,89	0,60	0,34	0,69
129	676588,85	7188188,81	676588,56	7188189,06	0,29	-0,25	0,38
130	676583,61	7188210,87	676584,11	7188210,48	-0,50	0,39	0,64
131	676584,92	7188222,82	676584,96	7188222,23	-0,04	0,59	0,59
132	676655,79	7188224,86	676656,01	7188224,74	-0,22	0,12	0,25
Média					0,29	0,21	0,58
Desvio-Padrão					0,37	0,40	0,29

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 31 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E\Delta N$ (m)
97	676724,55	7188224,15	676724,26	7188223,26	0,29	0,89	0,93
98	676722,11	7188204,04	676721,66	7188203,86	0,45	0,17	0,48
99	676716,95	7188204,60	676716,67	7188205,06	0,28	-0,46	0,54
100	676708,21	7188190,14	676707,65	7188189,00	0,56	1,14	1,27
101	676712,20	7188174,50	676712,38	7188174,69	-0,18	-0,19	0,26
102	676714,90	7188167,51	676714,84	7188167,63	0,06	-0,12	0,13
103	676716,11	7188156,06	676715,77	7188156,32	0,34	-0,26	0,43
104	676686,32	7188167,82	676685,52	7188167,25	0,80	0,57	0,98
105	676692,26	7188167,16	676693,01	7188165,86	-0,75	1,30	1,50

TABELA 31 – EXATIDÃO DA ORTOIMAGEM VERDADEIRA DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Ponto	Coordenadas de Campo		Coordenadas da Ortoimagem Verdadeira		Diferença		Discrepância Planimétrica
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta E \Delta N$ (m)
106	676698,32	7188159,68	676697,47	7188159,17	0,85	0,51	0,99
107	676682,38	7188141,64	676681,77	7188141,39	0,61	0,25	0,66
108	676682,98	7188135,46	676682,50	7188135,72	0,48	-0,26	0,55
109	676670,63	7188136,77	676670,14	7188136,56	0,49	0,21	0,53
110	676672,24	7188130,36	676672,06	7188129,90	0,18	0,46	0,50
111	676689,74	7188154,76	676689,52	7188154,62	0,22	0,14	0,27
112	676688,73	7188133,83	676688,00	7188133,52	0,73	0,31	0,79
113	676687,41	7188120,98	676686,69	7188120,74	0,72	0,24	0,76
114	676679,50	7188114,42	676678,82	7188114,47	0,68	-0,05	0,68
115	676669,54	7188115,47	676669,14	7188115,86	0,40	-0,39	0,56
116	676681,32	7188119,89	676681,27	7188120,32	0,05	-0,44	0,44
117	676664,64	7188136,36	676664,70	7188136,19	-0,06	0,17	0,18
118	676624,13	7188119,53	676624,22	7188120,22	-0,09	-0,69	0,70
119	676592,25	7188135,89	676592,29	7188135,69	-0,04	0,20	0,20
120	676585,03	7188125,12	676584,83	7188125,58	0,20	-0,46	0,50
121	676579,84	7188125,63	676579,46	7188125,92	0,38	-0,29	0,48
122	676578,23	7188162,04	676578,55	7188162,08	-0,32	-0,04	0,32
123	676583,43	7188161,50	676582,93	7188161,37	0,50	0,13	0,52
124	676592,81	7188154,93	676593,16	7188154,83	-0,35	0,10	0,36
125	676593,36	7188160,51	676593,46	7188160,13	-0,10	0,38	0,39
126	676609,93	7188158,82	676609,68	7188158,85	0,25	-0,03	0,25
127	676580,96	7188181,64	676580,46	7188181,18	0,50	0,46	0,68
128	676585,10	7188181,23	676584,45	7188181,06	0,65	0,17	0,67
129	676588,85	7188188,81	676588,73	7188189,17	0,12	-0,36	0,38
130	676583,61	7188210,87	676583,92	7188210,45	-0,31	0,42	0,52
131	676584,92	7188222,82	676584,93	7188222,15	-0,01	0,67	0,67
132	676655,79	7188224,86	676655,95	7188224,96	-0,16	-0,10	0,19
Média					0,23	0,13	0,56
Desvio-Padrão					0,37	0,44	0,30

Fonte: O Autor (2010)

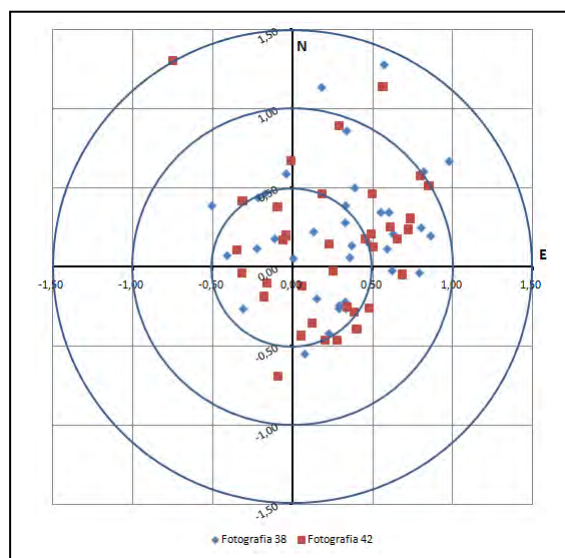


FIGURA 206 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS DAS ORTOFOTOGRAFIAS VERDADEIRAS DA ÁREA QUADRA

FONTE: O Autor (2010)

As Discrepâncias Planimétricas das duas ortoimagens verdadeiras foram de 0,58 m (± 3 pixels), com desvio-padrão de 0,29 m (± 1 pixel), na da fotografia 38, e de 0,56 m (± 3 pixels), com desvio-padrão de 0,30 m (± 1 pixel), na da fotografia 42. Esses valores são próximos, e indicam que as exatidões das duas ortoimagens verdadeiras podem ser consideradas como satisfatórias.

A análise das distribuições das diferenças presentes na Figura 205, e dos sinais das diferenças médias presentes nas Tabelas 30 e 31, indicam a existência de tendenciosidade dos erros nas direções NE, para ambas as ortoimagens. Visualizando as posições dos CP das fotografias em relação à área de estudo QUADRA, com auxílio das Figuras 207 e 208, obtêm-se as direções NE para a fotografia 38 (Figura 207) e SE para a fotografia 42 (Figura 208).

Para a ortoimagem verdadeira da fotografia 38 as direções, da posição do CP e da tendência dos erros, são coincidentes, mas para no caso da fotografia 42 a coincidência não acontece. Esse resultado é dúbio, e não fornece condições nem de embasar os resultados dos Experimentos 01, 02 e 03 de coincidência, nem do Experimento 04 de não coincidência.



FIGURA 207 – POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 38 EM RELAÇÃO À ÁREA QUADRA
FONTE: O Autor (2010)



FIGURA 208 – POSIÇÃO DO CP DA FOTOGRAFIA 42 EM RELAÇÃO À ÁREA QUADRA
 FONTE: O Autor (2010)

Os PAQG com maior erro planimétrico foram os pontos 100 (1,40 m), 104 (1,18 m), 105 (1,15 m) e 102 (1,02 m) na ortoimagem da fotografia 38, e os pontos 105 (1,50 m), 100 (1,27 m), 106 (0,99 m) e 104 (0,98 m) na ortoimagem da fotografia 42. Os pontos 100 e 102 pertencem a pequenas edificações e os demais (104, 105 e 106) a grandes edificações.

Classificando os PAQG de acordo com a dimensão das edificações, tem-se que quatorze pontos pertence as grandes (104 a 117), e vinte e dois as pequenas (97 a 103 e 118 a 132). Somente um ponto (118) pertence a uma edificação que não foi reconstruída (“S”). Recalculando a Discrepância Planimétrica de acordo com o tamanho das edificações, têm-se os resultados apresentados na Tabela 32.

TABELA 32 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA POR TIPO DE EDIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Tipo Edificação	Discrepâncias			
	Ortoimagem Verdadeira Fotografia 38		Ortoimagem Verdadeira Fotografia 42	
	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão
Grande	0,67 m	0,33 m	0,67 m	0,26 m
Pequena	0,53 m	0,25 m	0,49 m	0,32 m

Fonte: O Autor (2010)

A análise da Tabela 32 permite verificar que as edificações mais altas afetam com maior intensidade a exatidão da ortoimagem verdadeira do que as edificações mais baixas.

Com a finalidade de comparar a exatidão das pequenas edificações nas ortoimagens verdadeiras e convencionais, os vinte e dois pontos localizados sobre

elas foram medidos nas ortoimagens convencionais, que complementados com as medições realizadas nas ortoimagens verdadeiras, forneceram as diferenças para as coordenadas de campo, ficando da forma apresentada nas Tabelas 33 e 34.

TABELA 33 – COMPARAÇÃO DA EXATIDÃO DOS PONTOS DAS PEQUENAS EDIFICAÇÕES NAS ORTOIMAGENS VERDADEIRA E CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 38 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Ponto	Diferenças das Coordenadas de Campo e da Ortoimagem Verdadeira		Resultante	Diferenças das Coordenadas de Campo e da Ortoimagem Convencional		Resultante
	ΔE (m)	ΔN (m)		ΔE (m)	ΔN (m)	
97	0,34	0,86	0,92	-0,86	-1,31	1,56
98	0,62	-0,02	0,62	-0,59	-0,63	0,86
99	0,08	-0,55	0,56	-1,57	-1,34	2,06
100	0,57	1,28	1,40	-1,69	-1,14	2,04
101	-0,41	0,07	0,42	-1,38	-0,53	1,48
102	0,36	0,06	0,36	-0,73	-0,61	0,96
103	0,59	0,11	0,60	-0,11	-0,28	0,30
118	0,23	-0,42	0,48	-0,32	-0,91	0,96
119	0,47	0,16	0,49	-0,20	-0,27	0,33
120	0,15	-0,20	0,25	-0,14	-0,56	0,58
121	0,33	-0,27	0,43	-0,34	-0,32	0,46
122	0,13	0,22	0,26	-0,23	-0,39	0,45
123	0,33	0,39	0,51	-0,52	-0,54	0,75
124	-0,31	-0,27	0,41	-1,09	1,05	1,52
125	-0,22	0,44	0,49	-0,01	-0,79	0,79
126	0,37	0,13	0,39	-0,55	-0,67	0,87
127	0,33	0,28	0,43	-0,03	0,11	0,11
128	0,60	0,34	0,69	0,06	-0,14	0,16
129	0,29	-0,25	0,38	-0,12	-0,83	0,84
130	-0,50	0,39	0,64	-0,27	-0,57	0,63
131	-0,04	0,59	0,59	-0,29	-0,72	0,78
132	-0,22	0,12	0,25	-0,89	-0,06	0,89
Média	0,20	0,16	0,53	-0,52	-0,54	0,88
Desvio-Padrão	0,33	0,41	0,25	0,52	0,50	0,55

Fonte: O Autor (2010)

TABELA 34 – COMPARAÇÃO DA EXATIDÃO DOS PONTOS DAS PEQUENAS EDIFICAÇÕES NAS ORTOIMAGENS VERDADEIRA E CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Ponto	Diferenças das Coordenadas de Campo e da Ortoimagem Verdadeira		Resultante	Diferenças das Coordenadas de Campo e da Ortoimagem Convencional		Resultante
	ΔE (m)	ΔN (m)		ΔE (m)	ΔN (m)	
97	0,29	0,89	0,93	-1,23	0,71	1,42
98	0,45	0,17	0,48	-1,10	0,22	1,12
99	0,28	-0,46	0,54	-2,13	1,08	2,39
100	0,56	1,14	1,27	-2,19	1,52	2,67
101	-0,18	-0,19	0,26	-1,85	1,08	2,14
102	0,06	-0,12	0,13	-1,37	1,02	1,71
103	0,34	-0,26	0,43	-0,99	0,41	1,07
118	-0,09	-0,69	0,70	-1,02	0,79	1,29
119	-0,04	0,20	0,20	-1,07	1,95	2,23
120	0,20	-0,46	0,50	-1,11	0,22	1,13
121	0,38	-0,29	0,48	-1,15	0,73	1,36
122	-0,32	-0,04	0,32	-0,91	1,48	1,74
123	0,50	0,13	0,52	-1,03	1,65	1,95

TABELA 34 – COMPARAÇÃO DA EXATIDÃO DOS PONTOS DAS PEQUENAS EDIFICAÇÕES NAS ORTOIMAGENS VERDADEIRA E CONVENCIONAL DA FOTOGRAFIA 42 DA ÁREA DE ESTUDO QUADRA

Ponto	Diferenças das Coordenadas de Campo e da Ortoimagem Verdadeira		Resultante	Diferenças das Coordenadas de Campo e da Ortoimagem Convencional		Resultante
	ΔE (m)	ΔN (m)		ΔE (m)	ΔN (m)	
124	-0,35	0,10	0,36	-0,17	-0,69	0,71
125	-0,10	0,38	0,39	-1,03	0,90	1,37
126	0,25	-0,03	0,25	-1,40	1,32	1,92
127	0,50	0,46	0,68	-0,87	0,68	1,10
128	0,65	0,17	0,67	-0,68	0,87	1,10
129	0,12	-0,36	0,38	-1,00	1,09	1,48
130	-0,31	0,42	0,52	-1,58	0,77	1,75
131	-0,01	0,67	0,67	-1,22	1,11	1,65
132	-0,16	-0,10	0,19	-1,67	1,06	1,97
Média	0,16	0,06	0,49	-1,19	0,89	1,60
Desvio-Padrão	0,31	0,44	0,26	0,47	0,55	0,50

Fonte: O Autor (2010)

A análise das diferenças presentes nas Tabelas 33 e 34 permite verificar que as ortoimagens verdadeiras apresentaram Resultantes, aproximadamente, uma vez e meia, na ortoimagem verdadeira da fotografia 38, e três vezes inferior, na ortoimagem verdadeira da fotografia 42, do que as respectivas ortoimagens convencionais. Esse dado indica que, mesmo nas pequenas edificações, existe ganho de exatidão quando do uso das ortoimagens verdadeiras em detrimento das convencionais.

A Figura 209 apresenta, para os dezesseis PAQG que foram medidos na edificação reconstruída e na ortoimagem verdadeira, o comportamento dos erros planimétricos e planialtimétricos da edificação reconstruída, e dos erros planimétricos da ortoimagem verdadeira.

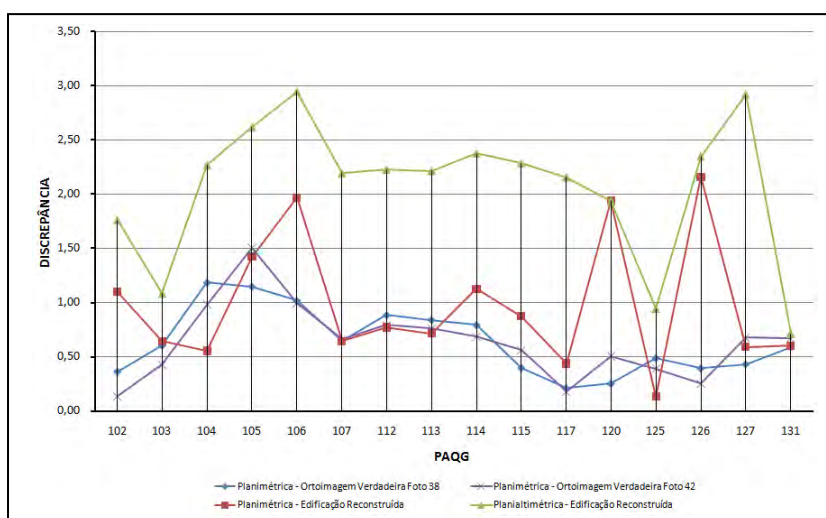


FIGURA 209 – COMPARAÇÃO ENTRE AS EXATIDÕES DAS EDIFICAÇÕES RECONSTRUÍDAS E DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS DA ÁREA QUADRA

FONTE: O Autor (2010)

A análise da Figura 209 permite verificar que os erros planialtimétricos dos dezesseis PAQG medidos nas edificações reconstruídas são superiores aos erros planimétricos das duas ortoimagens verdadeiras, e que os erros planimétricos das edificações reconstruídas são superiores, aos erros planimétricos presentes nas duas ortoimagens em apenas sete pontos. Esse dado confirma os resultados obtidos nos demais experimentos, de que os erros planialtimétricos das edificações podem ser utilizados como indicadores de erros planimétricos máximos das ortoimagens verdadeiras.

4.3.6 Exatidão Global da Reconstrução das Edificações

Para melhor expressar o comportamento da metodologia na reconstrução das diversas edificações é importante que se realize uma análise dos resultados sob a forma global. Cada experimento utilizou áreas de estudo (ESCOLA, DUPLA, VILA, ARQUIT e QUADRA) com características próprias, com edificações que possuem propriedades comuns a maioria das edificações presentes nos centros urbanos brasileiros, tais como, formas definidas por retas e curvas, coberturas formadas por um ou vários planos, com ou sem construções, edificações com altura baixa, média ou alta, e aglutinação, ou não, com vegetação. A união dos resultados obtidos em todas essas edificações possibilita que uma visão geral do método de reconstrução proposto seja obtida, facilitando a compreensão de suas facilidades e dificuldades.

Como existem dois levantamentos diferentes, com resoluções diferentes, optou-se por normalizar os erros dos PAQG, apresentados nas Tabelas 08, 09, 12, 13, 19, 20, 23, 24, 28 e 29. As medições dos pontos dos dois conjuntos tiveram suas unidades de medida convertidas de metro para *groundel*, sendo as do Bloco Centro Politécnico divididas por 0,2050 m, e as do Bloco Bacacheri por 0,2218 m. A Tabela 35 apresenta as diferenças normalizadas de todos os PAQG e suas estatísticas globais de reconstrução, e a Figura 210 apresenta a distribuição espacial das exatidões planimétricas normalizadas (em *groundels*).

TABELA 35 – EXATIDÃO GLOBAL DAS EDIFICAÇÕES RECONSTRUÍDAS

Ponto	Diferenças (<i>groundels</i>)			Discrepâncias		
	ΔE	ΔN	Δh	Planimétrica ($\Delta E \Delta N$)	Altimétrica (Δh)	Planialtimétrica ($\Delta E \Delta N \Delta h$)
1	-4,35	-0,82	3,49	4,42	3,49	5,64
4	0,24	-0,82	3,61	0,86	3,61	3,71
5	-4,37	5,85	7,37	7,31	7,37	10,38
6	1,76	1,42	2,17	2,26	2,17	3,14
7	-0,23	4,12	2,24	4,12	2,24	4,69
8	-3,19	3,22	0,39	4,53	0,39	4,55
9	-4,41	2,00	0,20	4,84	0,2	4,85
10	-4,43	1,76	0,75	4,77	0,75	4,83
11	-4,86	-0,27	3,68	4,87	3,68	6,10
12	-2,74	-2,08	0,86	3,43	0,86	3,54
14	-2,70	1,45	0,71	3,07	0,71	3,15
15	-3,60	0,73	0,80	3,67	0,8	3,75
16	-0,87	1,34	3,49	1,60	3,49	3,84
17	-5,86	-0,45	2,21	5,88	2,21	6,28
18	-3,83	5,02	2,29	6,32	2,29	6,72
19	-1,85	1,71	4,16	2,52	4,16	4,86
20	-4,71	2,00	0,54	5,12	0,54	5,15
21	-1,86	-1,15	-1,41	2,18	1,41	2,75
22	-3,36	2,57	-1,45	4,23	1,45	4,80
25	0,97	0,89	-1,59	1,32	1,59	2,13
26	-2,62	-1,19	-1,26	2,88	1,26	3,36
29	-2,35	-0,50	-1,21	2,40	1,21	2,87
40	1,30	-1,69	1,44	2,13	1,44	2,72
41	0,05	2,44	1,57	2,44	1,57	3,07
44	1,23	2,38	1,77	2,68	1,77	3,39
45	-3,12	-2,25	-5,93	3,84	5,93	7,24
46	-1,30	-1,36	0,50	1,88	0,5	2,09
47	-7,45	-0,01	0,61	7,45	0,61	8,08
48	-0,84	-2,20	5,55	2,36	5,55	6,11
49	-0,69	-3,84	5,54	3,91	5,54	6,97
50	1,24	-0,46	5,55	1,32	5,55	5,73
51	-0,84	-4,19	5,78	4,27	5,78	7,40
52	1,02	-1,04	5,82	1,46	5,82	6,03
53	-1,19	-3,72	-10,14	3,90	10,14	10,99
54	1,23	1,20	5,57	1,71	5,57	5,87
55	-5,74	3,07	0,63	6,51	0,63	7,08
56	0,75	1,76	0,49	1,91	0,49	2,12
57	-1,21	0,87	-5,83	1,49	5,83	6,05
58	-5,01	-1,34	1,04	5,18	1,04	5,70
59	1,24	0,33	-9,84	1,29	9,84	9,94
60	1,03	1,77	-9,83	2,05	9,83	10,08
61	-1,31	-2,18	-9,84	2,54	9,84	10,22
62	1,09	0,52	5,98	1,21	5,98	6,12
63	-0,91	-2,49	5,94	2,65	5,94	6,59
64	0,49	-0,11	-9,28	0,50	9,28	9,30
65	-0,08	1,58	-9,40	1,58	9,4	9,56
66	-0,73	1,00	-8,55	1,23	8,55	8,65
67	0,13	1,83	-8,71	1,84	8,71	8,94
68	-1,35	-0,14	-7,27	1,36	7,27	7,42
69	-2,56	-1,02	-7,27	2,75	7,27	7,86
70	-1,94	-1,21	-7,92	2,29	7,92	8,30
71	-1,22	-3,05	-7,91	3,28	7,91	8,67
72	-0,17	-0,09	-4,10	0,19	4,1	4,11
73	-1,94	-0,69	-4,03	2,06	4,03	4,61
74	-1,02	-0,65	2,48	1,21	2,48	2,80
75	-4,39	-0,65	2,75	4,43	2,75	5,53
76	-1,04	-0,92	-4,00	1,39	4	4,27
77	0,74	1,46	-4,20	1,64	4,2	4,55
78	-1,13	-1,34	-4,20	1,75	4,2	4,61

TABELA 35 – EXATIDÃO GLOBAL DAS EDIFICAÇÕES RECONSTRUÍDAS

Ponto	Diferenças (groundels)			Discrepâncias		
	ΔE	ΔN	Δh	Planimétrica ($\Delta E \Delta N$)	Altimétrica (Δh)	Planialtimétrica ($\Delta E \Delta N \Delta h$)
79	-2,75	-1,60	-3,80	3,18	3,8	5,13
80	-1,84	-1,43	2,67	2,33	2,67	3,67
81	-9,48	3,40	-8,93	10,07	8,93	14,09
82	-5,14	-13,60	-1,33	14,54	1,33	15,78
83	-0,80	2,39	-1,40	2,52	1,4	3,06
85	-2,64	6,23	-1,31	6,76	1,31	7,43
86	-5,78	7,72	-1,36	9,65	1,36	10,52
87	2,16	-2,68	2,31	3,44	2,31	4,38
88	-9,62	-3,80	5,59	10,34	5,59	12,51
89	-9,11	-1,60	5,55	9,25	5,55	11,45
90	-8,69	-0,51	3,07	8,71	3,07	9,91
91	-7,39	4,55	-1,17	8,68	1,17	9,46
92	-1,74	3,21	-1,21	3,65	1,21	4,13
93	-5,09	0,96	3,18	5,18	3,18	6,44
96	-7,85	1,21	-11,99	7,95	11,99	14,76
102	2,15	4,47	6,71	4,96	6,71	8,59
103	2,76	0,92	-4,25	2,91	4,25	5,29
104	1,92	1,60	-10,74	2,50	10,74	11,08
105	-4,30	4,77	-10,71	6,42	10,71	12,77
106	-0,14	8,88	-10,70	8,88	10,7	14,38
107	2,88	-0,30	-10,25	2,90	10,25	10,71
112	0,63	3,41	-10,19	3,47	10,19	10,86
113	-0,36	3,20	-10,23	3,22	10,23	10,81
114	-4,95	-1,11	-10,21	5,08	10,21	11,59
115	-2,52	3,03	-10,31	3,94	10,31	11,15
117	-0,84	1,79	-10,30	1,97	10,3	10,52
120	-7,84	3,85	0,04	8,74	0,04	9,45
125	0,48	0,35	4,56	0,59	4,56	4,60
126	-9,54	-1,95	4,50	9,74	4,5	11,46
127	2,61	-0,51	-13,95	2,66	13,95	14,25
131	0,62	2,64	1,85	2,71	1,85	3,47
Média	-2,08	0,55	-1,68	3,90	4,75	7,04
Desvio-Padrão	3,07	2,93	5,68	2,72	3,54	3,38

Fonte: O Autor (2010)

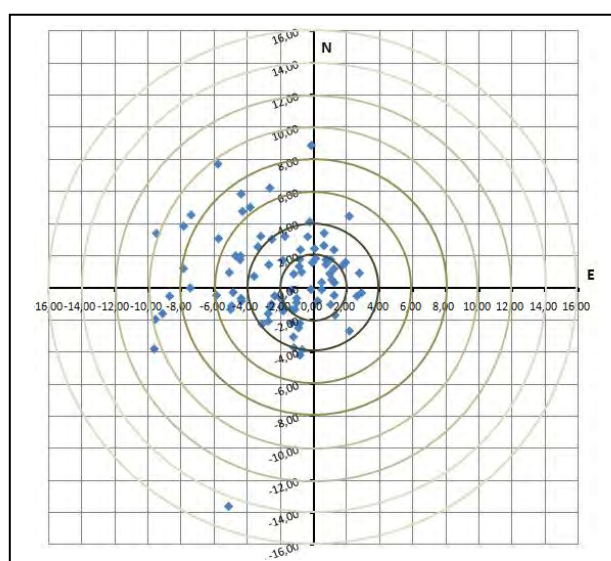


FIGURA 210 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS NORMALIZADOS

FONTE: O Autor (2010)

A Discrepância Planimétrica média obtida foi de 3,90 *groundels*, com desvio-padrão de 2,72 *groundels*, a Discrepância Altimétrica média foi de 4,75 *groundels*, com desvio-padrão de 3,54 *groundels*, e a Discrepância Planialtimétrica média foi de 7,04 *groundels*, com desvio-padrão de 3,38 *groundels*. Deslocando-se a origem para a posição $\Delta E = -2,08$ *groundels* e $\Delta N = 0,55$ *groundels*, ter-se-ia uma probabilidade de 68% dos erros planimétricos serem inferiores a 2,72 *groundels* (raio).

A análise do gráfico da Figura 210, e das diferenças médias nos eixos E e N na Tabela 35, permite identificar a presença de uma leve tendenciosidade dos erros planimétricos na direção NO. No entanto, como os dados LIDAR utilizados nos cinco experimentos são oriundos de dois levantamentos diferentes, não foi possível correlacionar a tendência dos erros com a direção geral de voo.

4.3.7 Exatidão Global da Geração de Ortoimagens Verdadeiras

A análise global das ortoimagens verdadeiras geradas tem por objetivo agrupar os resultados obtidos em edificações isoladas, procurando identificar a eficiência da metodologia proposta. Como citado anteriormente, cada área de pesquisa foi selecionada por possuir uma, ou mais, edificações com características particulares, que contribuiriam para a análise da solução proposta. Edificações com coberturas planas retas, planas inclinadas ou multiplanares, com bordas retas ou curvas, integradas à vegetação adjacente ou isoladas, com pouca, média ou elevada altura, distantes ou próximas do centro perspectivo das fotografias, etc. A integração desses elementos possibilitará a extrapolação das análises locais para o conjunto de dados presente no terreno.

Os PAQG foram medidos em diversas ortoimagens verdadeiras, sendo que em dois experimentos (01 e 03) em uma ortoimagem, em três (02, 04 e 05) em mais de uma ortoimagem. Sendo assim, o conjunto disponível para a análise global dos resultados ficou sendo formado por duzentos e vinte e quatro pontos, com vinte na área ESCOLA (Experimento 01), quarenta e oito na DUPLA (vinte e quatro em duas ortoimagens verdadeiras – Experimento 02), trinta e seis na VILA (Experimento 03), quarenta e oito na ARQUIT (dezesseis em três ortoimagens verdadeiras – Experimento 04) e setenta e dois na QUADRA (trinta e seis em duas ortoimagens verdadeiras – Experimento 05).

Da mesma forma que na análise das reconstruções houve a necessidade de se normalizar os resultados, visto que as resoluções geométricas das ortoimagens do Experimento 01 são diferentes da dos demais experimentos. Utilizando o elemento de resolução no terreno das ortoimagens (*pixels*), que é de 0,205 m no caso da área ESCOLA e de 0,2218 m nas demais áreas. A Tabela 36 apresenta os erros normalizados em *pixels*, e a Figura 215 a distribuição espacial das diferenças do conjunto global de Pontos de Avaliação da Qualidade Geométrica.

TABELA 36 – EXATIDÃO PLANIMÉTRICA GLOBAL DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS (PIXELS)

Área	Ortoimagem	Ponto	ΔE	ΔN	Discrepância Planimétrica
ESCOLA	23	1	-2,63	4,43	5,15
		2	-2,83	3,60	4,58
		3	-2,86	1,65	3,30
		4	1,26	-0,04	1,27
		5	-3,41	1,17	3,60
		6	-3,17	0,15	3,17
		7	-2,58	1,80	3,14
		8	-2,19	0,57	2,26
		9	-3,19	1,21	3,42
		10	-3,11	2,83	4,21
		11	-1,00	3,73	3,86
		12	-0,34	2,46	2,48
		13	-0,22	2,67	2,68
		14	-1,18	1,94	2,27
		15	-1,45	2,48	2,87
		16	-3,12	1,63	3,52
		17	0,82	0,28	0,87
		18	0,27	-1,21	1,24
		19	-2,09	4,20	4,69
		20	-2,76	-0,86	2,89
DUPLA	42	21	-0,11	1,90	1,90
		22	-0,09	0,74	0,75
		23	-1,77	0,51	1,84
		24	0,21	4,37	4,38
		25	-1,90	0,12	1,90
		26	-1,39	1,35	1,94
		27	0,35	1,92	1,95
		28	-2,18	1,45	2,62
		29	-0,18	-0,07	0,20
		30	0,92	4,43	4,52
		31	-0,29	-0,92	0,96
		32	-6,34	1,66	6,55
		33	-0,15	-1,87	1,88
		34	-2,83	0,89	2,97
		35	-0,30	2,84	2,86
		36	0,30	0,11	0,32
		37	0,74	-0,30	0,79
		38	1,59	-2,12	2,65
		39	0,67	-1,44	1,59
		40	-1,03	-0,30	1,07
		41	0,96	-0,68	1,18
		42	-2,53	1,02	2,72
		43	-0,23	-2,39	2,40
		44	1,60	-0,64	1,72
DUPLA	43	21	-2,00	2,57	3,26
		22	-1,80	-1,74	2,50

TABELA 36 – EXATIDÃO PLANIMÉTRICA GLOBAL DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS (PIXELS)

Área	Ortoimagem	Ponto	ΔE	ΔN	Discrepância Planimétrica		
DUPLA	43	23	-2,53	0,06	2,54		
		24	-0,16	0,54	0,56		
		25	-5,37	-1,42	5,55		
		26	-3,47	0,54	3,51		
		27	-0,74	-0,38	0,83		
		28	-0,51	-1,62	1,70		
		29	-0,95	-1,92	2,14		
		30	-3,37	-1,21	3,58		
		31	0,11	-2,31	2,32		
		32	-4,04	-1,05	4,17		
		33	-1,90	-2,32	3,00		
		34	-3,10	-0,01	3,10		
		35	-2,92	0,95	3,07		
		36	-0,92	0,07	0,92		
		37	-1,74	-0,16	1,75		
		38	-2,61	-2,57	3,66		
		39	-1,63	-2,02	2,60		
		40	-2,34	-1,47	2,76		
		41	-1,92	-0,68	2,04		
		42	-2,39	0,03	2,39		
		VILA	30	43	-1,36	5,46	5,63
				44	-0,48	-0,96	1,07
45	-3,06			-0,40	3,08		
46	-2,07			-0,69	2,19		
47	-6,77			3,26	7,51		
48	-0,19			0,25	0,32		
49	-0,78			0,37	0,87		
50	-0,25			0,16	0,30		
51	-0,20			-1,37	1,38		
52	0,37			0,44	0,58		
53	-0,70			-0,94	1,18		
54	0,02			1,55	1,55		
55	-6,72			3,63	7,64		
56	-2,18			1,19	2,48		
57	-2,36			1,98	3,08		
58	-4,59			1,03	4,70		
59	-0,15			1,01	1,02		
60	-1,12			-0,79	1,37		
61	-1,75			-0,49	1,82		
62	0,08			0,88	0,88		
63	-1,14			-0,73	1,35		
64	-0,80			0,30	0,86		
65	-2,57			1,16	2,82		
66	-1,74			0,96	1,99		
67	-0,73			3,46	3,54		
68	-2,22			1,18	2,51		
69	-4,11			1,21	4,29		
70	-1,81			1,10	2,12		
71	-2,27			0,27	2,28		
72	-1,06			1,36	1,72		
73	-3,10			0,79	3,20		
74	-2,86			0,10	2,86		
75	-5,55			-0,13	5,55		
76	-2,12			0,78	2,26		
77	-0,03			2,41	2,41		
78	-2,04			0,12	2,05		
79	-2,21			1,49	2,66		
80	-2,05			0,18	2,06		
ARQUIT	41	81	-2,34	4,52	5,09		
		82	2,67	0,55	2,73		
		83	-0,99	3,76	3,89		

TABELA 36 – EXATIDÃO PLANIMÉTRICA GLOBAL DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS (PIXELS)

Área	Ortoimagem	Ponto	ΔE	ΔN	Discrepância Planimétrica
ARQUIT	41	84	-2,40	-2,34	3,35
		85	-1,99	1,36	2,41
		86	-4,22	-0,49	4,25
		87	-1,00	1,43	1,74
		88	-5,20	-0,01	5,20
		89	-4,87	1,46	5,09
		90	-6,10	2,08	6,44
		91	-6,94	-3,38	7,72
		92	-5,12	-1,39	5,30
		93	-8,28	-1,74	8,46
		94	-5,16	1,79	5,46
		95	-2,86	2,72	3,95
		96	-2,98	0,71	3,06
ARQUIT	42	81	-4,80	-4,15	6,35
		82	2,92	-3,65	4,68
		83	-0,40	-0,22	0,46
		84	-3,79	-3,21	4,97
		85	-1,22	-1,53	1,96
		86	-2,76	-1,21	3,02
		87	0,49	-1,10	1,20
		88	-5,38	0,84	5,44
		89	-5,64	-0,84	5,70
		90	-5,70	-1,08	5,80
		91	-5,68	-1,04	5,77
		92	-5,30	-1,97	5,65
		93	-5,53	2,37	6,02
94	-5,12	-3,26	6,07		
95	-5,03	-0,61	5,07		
96	-1,13	-4,11	4,26		
ARQUIT	43	81	-4,98	-3,79	6,26
		82	0,35	-5,18	5,20
		83	-1,66	-0,04	1,66
		84	-2,98	-2,58	3,94
		85	-0,23	-1,08	1,10
		86	-2,94	-1,03	3,12
		87	0,13	-1,10	1,11
		88	-3,17	-1,64	3,57
		89	-4,69	-1,29	4,86
		90	-3,94	3,83	5,50
		91	-6,22	-1,31	6,35
		92	-7,28	-2,88	7,83
		93	-2,87	1,92	3,45
94	-1,51	0,75	1,69		
95	-3,27	1,06	3,44		
96	1,22	-3,16	3,39		
QUADRA	38	97	1,52	3,87	4,16
		98	2,80	-0,11	2,80
		99	0,34	-2,49	2,51
		100	2,58	5,76	6,31
		101	-1,85	0,32	1,87
		102	1,61	0,26	1,63
		103	2,67	0,50	2,71
		104	4,41	3,01	5,34
		105	0,82	5,11	5,18
		106	3,70	2,71	4,58
		107	2,48	1,55	2,93
		108	2,83	0,93	2,98
		109	1,75	2,25	2,85
110	-0,79	2,07	2,22		
111	0,02	0,23	0,24		
112	3,89	0,88	3,99		

TABELA 36 – EXATIDÃO PLANIMÉTRICA GLOBAL DAS ORTOIMAGENS VERDADEIRAS (PIXELS)

Área	Ortoimagem	Ponto	ΔE	ΔN	Discrepância Planimétrica
QUADRA	38	113	3,62	1,11	3,79
		114	3,57	-0,18	3,58
		115	1,48	-1,00	1,79
		116	1,30	-1,19	1,77
		117	-0,50	0,80	0,94
		118	1,02	-1,90	2,16
		119	2,11	0,71	2,22
		120	0,68	-0,91	1,14
		121	1,50	-1,20	1,92
		122	0,59	1,00	1,16
		123	1,49	1,74	2,30
		124	-1,39	-1,20	1,84
		125	-0,97	1,97	2,20
		126	1,67	0,60	1,77
		127	1,48	1,26	1,94
		128	2,71	1,55	3,13
		129	1,31	-1,11	1,72
130	-2,27	1,74	2,86		
131	-0,18	2,65	2,66		
132	-1,00	0,52	1,13		
QUADRA	42	97	1,30	4,01	4,21
		98	2,03	0,79	2,18
		99	1,24	-2,08	2,43
		100	2,53	5,13	5,72
		101	-0,81	-0,85	1,18
		102	0,26	-0,55	0,61
		103	1,54	-1,16	1,93
		104	3,60	2,58	4,43
		105	-3,38	5,88	6,78
		106	3,83	2,31	4,47
		107	2,75	1,15	2,98
		108	2,15	-1,19	2,46
		109	2,20	0,94	2,39
		110	0,83	2,07	2,24
		111	1,01	0,64	1,20
		112	3,30	1,38	3,58
		113	3,26	1,06	3,43
		114	3,08	-0,22	3,08
		115	1,80	-1,77	2,52
		116	0,22	-1,96	1,97
		117	-0,28	0,75	0,80
		118	-0,42	-3,12	3,15
		119	-0,19	0,89	0,91
120	0,90	-2,08	2,27		
121	1,73	-1,29	2,15		
122	-1,44	-0,18	1,45		
123	2,26	0,57	2,33		
124	-1,57	0,47	1,64		
125	-0,43	1,70	1,75		
126	1,12	-0,12	1,13		
127	2,25	2,07	3,05		
128	2,94	0,78	3,04		
129	0,54	-1,61	1,69		
130	-1,42	1,88	2,35		
131	-0,05	3,01	3,01		
132	-0,73	-0,47	0,87		
		Média	-1,07	0,39	2,95
		Desvio-Padrão	2,53	1,97	1,69

Fonte: O Autor (2010)

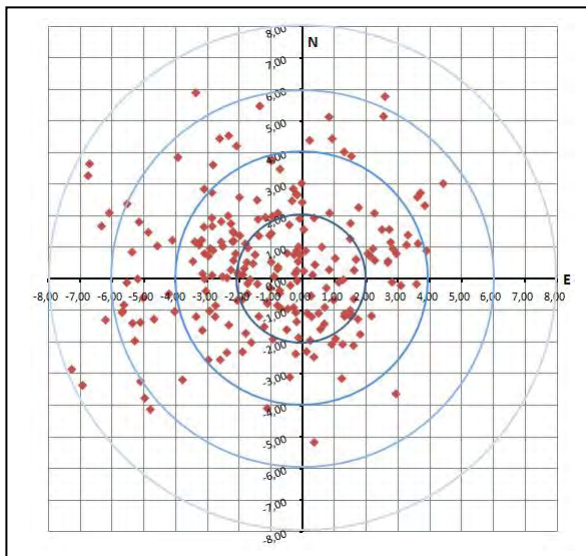


FIGURA 211 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ERROS PLANIMÉTRICOS NORMALIZADOS
 FONTE: O Autor (2010)

A análise do gráfico da Figura 211, e da Tabela 36, permite identificar uma leve tendenciosidade dos erros na direção geral NO. No entanto, como os erros são oriundos de diversas ortoimagens verdadeiras, não é possível se associar a direção geral dos erros com a da posição do CP das várias fotografias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver metodologia de retificação de edificações, a partir de modelos digitais de superfície oriundos de levantamentos LIDAR, visando a geração de ortoimagens verdadeiras. Como mecanismo de inserção da presente pesquisa, em relação ao atual estágio de desenvolvimento tecnológico do assunto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica abrangente e profunda, que incluiu as principais revistas científicas nacionais e internacionais, o que permitiu direcionar os trabalhos para o estado da arte da geração de ortoimagens verdadeiras.

Da análise do estado da arte foi possível verificar que as pesquisas científicas começaram utilizando modelos diferentes para representar o terreno e as edificações. Posteriormente, esses modelos foram agrupados em um único, que continha as informações do terreno e dos objetos situados acima dele. A principal técnica de agregação de informações ao MDT foi a restituição manual das edificações, com emprego de sistemas fotogramétricos digitais.

O surgimento de sistemas LIDAR, na década de 1990, abriu novas possibilidades para a geração das ortoimagens verdadeiras, mas sua incapacidade de definir as bordas das edificações fez com que pesquisadores procurassem essa informação em outras fontes, como mapas cadastrais, modelos estereoscópicos oriundos de fotografias aéreas, etc., mesclando a informação de fontes diferentes no modelo representativo final. As últimas pesquisas procuraram utilizar informações planimétricas de mapas cadastrais com informações altimétricas de levantamentos LIDAR.

Para detectar as oclusões diversas técnicas foram desenvolvidas, incorporando a probabilidade, a trigonometria, a visão computacional, ou adaptadas da Computação Gráfica, inclusive por pesquisadores brasileiros.

Para atingir o objetivo da Tese foram criadas diversas ferramentas de detecção de vértices, retificação de bordas e coberturas das edificações, detecção de oclusões e geração de ortoimagens verdadeiras, com base em algoritmos existentes e em algoritmos próprios desenvolvidos especificamente para a metodologia proposta.

Na geração do MDT e do MDS foram realizadas duas compatibilizações entre esses modelos de forma a uniformizar a informação de pontos do terreno, que pertençam aos dois modelos de forma simultânea. Essas compatibilizações foram realizadas em etapas, sendo executadas diversas ações em cada uma delas, de forma a garantir que o modelo representativo fosse fidedigno à informação espacial nele presente.

A reconstrução das edificações foi realizada em duas etapas separadas, considerando a informação planimétrica no primeiro momento, e a altimétrica no segundo.

A retificação planimétrica utiliza como base uma imagem binária denominada de imagem de desnível, obtida a partir da subtração do MDT do MDS. Essa imagem é utilizada como elo de ligação entre as edificações reconstruídas e os modelos utilizados (MDS e MDT) na geração de ortoimagens verdadeiras e convencionais.

Os vértices das edificações foram detectados a partir de uma técnica desenvolvida com emprego das bordas das edificações detectadas em um processo de duas fases. Inicialmente são detectadas bordas provisórias das edificações, com emprego de diversos filtros (altimétrico, perímetro e área mínima, *pixels* isolados, moda e toque nas bordas) e do operador Sobel. Posteriormente, bordas definitivas são detectadas, com novas aplicações de filtros (perímetro e área mínima, de *pixels* isolados, moda e toque nas bordas) e do operador Sobel.

As novas bordas retificadas da edificação são provenientes da aplicação iterativa da Média Móvel Restritiva a pontos da borda julgados como delimitadores potenciais dos lados dos polígonos das edificações. Os vértices determinados e as novas edificações retificadas formadas são analisadas pela aplicação de um filtro específico, procurando-se identificar as edificações amorfas, não retificadas de modo satisfatório.

As coberturas das edificações foram retificadas com a aplicação da Média Móvel Restritiva sobre planos de altitude constante, paralelos ao plano XY. Essa retificação pode ser uni ou multiplanar, e se adéqua mais a representação de edificações de grande porte, como edifícios, do que de pequeno porte como casas.

Para detectar as oclusões foi desenvolvida uma técnica baseada no algoritmo *Z-Buffer*, que utiliza imagens binárias com “n” dimensões. Essa técnica, denominada *H-Buffer*, procurou eliminar as limitações originais do método, criando condições para seu emprego mais eficaz na geração de ortoimagens verdadeiras. Por fim, as

ortoimagens verdadeiras são geradas pelo emprego do método inverso, e as oclusões são aplicadas a elas, eliminando a presença dos duplos mapeamentos e oclusões existentes.

Para testar a metodologia proposta foram realizados cinco experimentos, que utilizaram cinco áreas de estudo diferentes, cada uma contendo edificações, ou conjuntos de edificações, com propriedades singulares, em parte ou no todo. Como mecanismo de avaliação dos resultados foi utilizado um conjunto de pontos, denominado de Pontos de Avaliação da Qualidade Geométrica, distribuídos sobre as diversas edificações presentes nas áreas de estudo.

Para esse conjunto de pontos foram obtidos três conjuntos de coordenadas, sendo o primeiro proveniente da medição *in loco* no terreno, o segundo da medição de alguns desses pontos no MDS final, posterior à segunda compatibilização, e o último da medição sobre as ortoimagens verdadeiras geradas.

Esses conjuntos de coordenadas foram comparados, e as exatidões das edificações reconstruídas, e das ortoimagens verdadeiras, geradas com emprego da metodologia, determinadas. Foi verificado que a metodologia proposta apresentou resultados satisfatórios, com exatidão da reconstrução das edificações em planimetria de 3,90 *groundels*, com desvio-padrão de 2,72 *groundels*, e em planialtimetria de 7,04 *groundels*, com desvio-padrão de 3,38 *groundels*. A exatidão final das ortoimagens verdadeiras geradas foi de 2,95 *pixels*, com desvio-padrão de 1,69 *pixels*.

Dos experimentos foi possível verificar que:

- A metodologia de reconstrução de edificações pode ser empregada em construções com formas variadas, com bordas lineares e não-lineares, coberturas planas (inclinadas ou não), multiplanas e com componentes superiores a elas, alturas baixa, média e alta, e com vegetação aglutinada;
- Os erros planimétricos presentes nas edificações reconstruídas se correlacionam com a direção geral do voo LIDAR;
- A distribuição dos pontos LIDAR sobre uma edificação influencia a exatidão de sua reconstrução (pela metodologia proposta);
- O EMQ Planialtimétrico das edificações reconstruídas pode ser utilizado como um estimador do EMQ Planimétrico das ortoimagens verdadeiras geradas;

- A área das edificações reconstruídas pela metodologia proposta tende a ser maior do que a área das edificações reais existentes no terreno;
- A metodologia proposta mantém a forma original das bordas das edificações provenientes de levantamento LIDAR;
- No geral, a representação das coberturas das edificações por planos paralelos ao plano XY possibilita que ortoimagens verdadeiras sejam geradas com exatidão, mas que essa opção introduz erros altimétricos indesejáveis nessas edificações;
- A realização de análises das formas das edificações, com base em direções externas, possibilita que edificações semelhantes sejam reconstruídas com base em informações mais fidedignas, mesmo que a distribuição dos pontos LIDAR sobre essas edificações não seja homogênea;
- O uso de segmentos de retas lineares nas bordas retificadas de edificações originalmente com bordas não lineares apresentou resultados satisfatórios, mas dependente da distribuição de pontos LIDAR sobre essas edificações;
- A injunção de que os ângulos internos de polígonos quadriláteros sejam obrigados a serem ângulos retos melhora a exatidão das edificações de quatro lados reconstruídas;
- O uso de coberturas das edificações obtidas a partir da retificação de planos, com emprego da média móvel restritiva:
 - Elimina a presença de platibandas nessas coberturas retificadas;
 - Faz com que a influência da vegetação aglutinada a essas edificações, e não eliminada, seja minimizada no modelo reconstruído;
- O emprego do método de detecção de oclusões *H-Buffer* possibilita que a Porção M, inclusive a proveniente das quinas, seja identificada como área oclusa;
- Deve-se reconstruir todas as edificações presentes em um espaço geográfico no qual serão geradas ortoimagens verdadeiras, inclusive as de pequeno porte;

- A tendenciosidade dos erros planimétricos presentes em uma ortoimagem verdadeira é influenciado pela posição do centro perspectivo da fotografia aérea;
- A exatidão das ortofotogramas verdadeiras é superior a das ortofotogramas convencionais, quando o ambiente representado é o urbano; e
- O erro planimétrico das ortofotogramas verdadeiras tende a ser menor do que o planialtimétrico das edificações reconstruídas.

Como é possível verificar, a precisão final das ortofotogramas foi superior a dos modelos das edificações reconstruídas, visto que o tamanho dos *groundels*, do MDS e do MDT, e dos *pixels*, das ortofotogramas, era igual. Essa melhora nos resultados indica que houve compensação dos erros, com influência dos parâmetros de orientação exterior das fotografias aéreas, da geração de ortofotogramas verdadeiras e da qualidade da medição realizada pelo observador que efetuou as medições dos PAQG nos modelos e nas ortofotogramas verdadeiras.

Como contribuições científicas da presente Tese pode-se citar o seguinte:

- Desenvolvimento de uma técnica de detecção de bordas das edificações em duas etapas, que permite minimizar a influência de objetos exteriores a edificação na detecção de sua borda;
- Proposição da técnica Média Móvel Restrita, que possibilita separar os pontos mais significativos em um conjunto de pontos qualquer, com base em processo iterativo que analisa suas propriedades específicas, que pode ser aplicado em conjuntos bidimensionais, ou tridimensionais, de coordenadas;
- Proposição de um método iterativo de detecção de vértices de edificações, baseado na análise de ângulos e distâncias, que possibilita a agregação de injunções externas; e
- Desenvolvimento de um método de detecção de oclusões (*H-Buffer*), baseado em algoritmo existente (*Z-Buffer*), que minimiza as limitações do método original, ampliando-o para a aplicação na geração de ortofotogramas verdadeiras.

As principais limitações do método se relacionam com a, possível, necessidade de interferência humana, principalmente, na definição dos parâmetros relacionados à reconstrução da base planimétrica e ao uso de planos paralelos ao plano XY na definição das coberturas das edificações. O uso desses planos pode ser apontado como a principal causa da elevada deterioração da exatidão dos Pontos de Avaliação da Qualidade Geométrica, quando se compara a precisão planimétrica das edificações reconstruídas com as planialtimétricas.

Foi verificado, também, que o erro das bordas das edificações tem influência nas ortoimagens verdadeiras geradas, no qual se agregam informações do terreno à cobertura das edificações, indicando a existência, mesmo que em pequenas proporções, do duplo mapeamento nas imagens retificadas.

Pode-se citar como recomendações para pesquisas futuras, a partir da presente pesquisa, os seguintes tópicos:

- Implementação de algoritmos para substituição dos *pixels* das ortoimagens verdadeiras pertencentes as áreas oclusas;
- Implementação de algoritmos de compatibilização da radiometria das ortoimagens verdadeiras após a substituição dos *pixels* oclusos;
- Realização da retificação da cobertura das edificações utilizando o conceito da Média Móvel Restritiva para coberturas inclinadas, desenvolvendo algoritmos para representá-los por meio de fórmulas matemáticas lineares e não lineares, como por exemplo, quadráticas, curvas, etc.;
- Realização de estudos para automação da retificação das bordas presentes na base planimétrica de um modelo terrestre, contribuindo para a automação do processo de retificação das edificações;
- Realização de estudos visando a avaliação automática das edificações reconstruídas, com base na análise radiométrica das ortoimagens verdadeiras geradas;
- Realização de estudos visando a retificação de bordas das edificações com emprego da Média Móvel Restritiva sobre formulações matemáticas curvas, como segmentos de circunferências, elipses, hipérbolas, etc., de forma a representá-los com mais fidedignidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, FRIEDRICH. Techniques and Strategies for DEM Generation. **Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry**. Bethesda: ASPRS. 1996. pp 135-141.

_____. Airborne Laser Scanning – Present Status And Future Expectations. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 54, pp. 64-67. 1999.

ALBERTZ, J.; WOLF, B., Generating True Orthoimages WITHOUT A 3D Surface Model. **The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.35 (3). pp. 693-698. 2004.

AMHAR, FAHMI; ECKER, ROBERT. An Integrated Solution for the Problems of 3D Man-made Objects in Digital Orthophotos. **The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 31 (B4).1996.

AMHAR, F.; JANSA, JOSEF; RIES, CHRISTINE. The Generation of True Orthophotos using a 3D Building Model in Conjunction with a Conventional DTM. **The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32 (4). 1998.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). **Manual of Photogrammetry**. 4th Ed. Falls Church: ASPRS. 1980. 1056 p.

ANDRADE, J. BITTENCOURT DE. **Fotogrametria**.Curitiba: SBEE. 1998. 258 p.

ARAKI, HIDEO. **Fusão de Informações Espectrais, Altimétricas e de Dados Auxiliares na Classificação de Imagens de Alta Resolução Espacial**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná Curitiba. 2005.

ARNAULT, ADRIANA ANDRADE. **Metodologia para Conversão da Representação 2D para 3D do Relevo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica) – Departamento de Engenharia Cartográfica. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2001.

AXELSSON, PETER. Processing of Lasee Scanner Data – Algorithms and Applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 54, pp. 138-147. 1999.

BALTSAVIAS, E. P. Digital ortho-images – a powerful tool for the extration of spatial – and geo-information. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 51, pp. 63-67. 1996.

_____. Airborne LASER Scanning: Existing Systems and Firms and Other Resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 54, pp. 164 - 198. 1999a.

_____. Airborne LASER Scanning: Basic Relations and Formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 54, pp. 199 - 214. 1999b.

BANG, K. I.; HABIB, AYMAN F.; SHIN, S. W.; KIM, K. O. Comparative Analysis of Alternative Methodologies for True Ortho-photo Generation from High Resolution Satelliite Imagery. In: ASPRS ANNUAL 2007, 2007, Tampa. **Proceedings**. Disponível em: http://www.ssmatics.com/TrueOrtho-photoGeneration_ASPRS_07ve.pdf. Acesso em Ago 2007.

BAZARETTI, LUIGI; BROVELLI, MARIA; SCAIONI, MARCO. Problems Related to the Generations of Tru-Orthophotos with LIDAR DDSMs. **The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. V. 36. Part 3 / W52. pp. 20-25. 2007.

BIASION, ANDREA; DEQUAL, SERGIO; LINGUA, ANDREA. A New Procedure for the Automatic Production of True Orthophotos. **The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.35 (B4). pp. 533-538. 2003.

BLACHUT, TEODOR J.; BURKHARDT, RUDOLF. **Historical Development of Photogrammetric Methods and Instruments**. Fall Church: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 1989. 157p.

BOTELHO, MOSAR FARIA. **Modelagem Tridimensional de Edificações Usando Dados do Sistema LASER Scanner e Imagem Orbital de Alta Resolução Espacial**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná Curitiba. 2007.

BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a Laser: Comparação com Métodos Fotogramétricos. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, Presidente Prudente. **Anais**. UNESP. 2002.

BRAUN, JOSEF. Aspects on True-Orthophoto Production. In: PHOTOGRAMMETRIC WEEK'03. 2003. Stuttgart: Herbert Wichmann Verlag. **Anais**. Disponível: www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo03/braun.pdf. Acesso em Ago 2007.

BRITO, JORGE LUÍS NUNES E., **Precision os Digital Orthoimages: Assessment and Application to the Oclusion Detection Problem**. PhD Thesis. The Ohio State University. Columbus. EUA. 1997.

CHEN, LIANG-CHIEN; TEO, TEE-ANN; WEN, JEN-YU; RAU, JIANN-YEOU. Occlusion-Compensated True Orthorectification For High-Resolution Satellite Images. **The Photogrammetric Record**. v. 22 (117). pp 2-113. 2007.

CÔRTEZ, JOÃO BATISTA RAMOS. **Integração de Imagens Digitais com Dados Lidar, Empregando Pontos de Apoio Pré-Sinalizados e Fototriangulação**. Relatório de Seminário II (Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná (não-publicado). Curitiba. 2007.

DAL POZ, ALUIR P.; SANTOS, DANIEL R. Automação do Processo de Orientação Absoluta Metodologia Híbrida. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA E XVII SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FOTOGRAMETRIA. Recife: CBC. **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia**. 1999. 1 CD-ROM.

DALMOLIN, Q., DOS SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanning: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. 3ª ed. Curitiba: UFPR, 2004. 111 p.

FELGUEIRAS, CARLOS ALBERTO. **Modelagem Numérica do Terreno**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2001. Disponível em: http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GAA01048/aulas_files/cap7-mnt.pdf. Acesso em: Out 2007.

FERGUSON, R. STUART. **Practical Algorithms for 3D Computer Graphics**. Natick: A. K. Peters. 2001. 539 p.

FOLEY, JAMES D.; VAN DAM, ANDRIES; STEVEN K., FEINER; HUGHES, JOHN F. **Computer Graphics: Principles and practice**. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley. 2001. 1175 p.

GONG, P.; BIGING, GREG S.; STANDIFORD, R. Use of Digital Surface Model for Hardwood Rangeland Monitoring. **Journal of Range Management**. v. 53. pp 622-626. 2000.

GONZALEZ, RAFAEL C.; WOODS, RICHARD E.; **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda. 2000. 509 p.

GOOGLE. **Google Earth**. Curitiba, 22 Mai 2009. 1 Imagem de Satélite. Servidor: kh.google.com. Acesso em: Jul 2009.

GÜNAY, ARIF; AREFI, HOSSEIN; HAHN, MICHAEL. True Orthophoto Production Using LIDAR Data. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v.36 Part 4/W52. pp. 2007. Disponível em: http://www.geovisualisierung.net/isprs2007/docs/02_G%FCnay.pdf. Acesso em: Mar 2009.

HABIB, AYMAN F.; KIM, EUI-MYOUNG; KIM, CHANG-JAE. New Methodologies for True Orthophoto Generation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 73(1). pp 025–036. 2007.

KRAUS, KARL. **Photogrammetry: Fundamentals and Standard Processes**. v. 1. 4th ed. Bonn: Ferd Dummler Verlag. 1992. 397 pp.

KUZMIN, P.; KORYTNIK, SERGEY A.; LONG, ORRIN. Polygon-Based True Orthophoto Generation. **XXth ISPRS Congress Proceedings**, 12-23 Julho. Istambul (Turquia). pp 529–531. 2004.

LEMMENS, M.; DEJKERS, H.; LOOMAN, P. Building detection by fusing airborne laser-altimeter DEMs and 2D digital maps. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32/3-4W2, p. 29–42, 1997.

LI, Y.; GONG P.; SASAGAWA T. Integrated Shadow Removal Based on Photogrammetry and Image Analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26 (18). pp 3911-3929. 2005.

LILLESAND, THOMAS M.; KIEFER, RALPH W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 4th ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc. 2000. 724 p.

MACHADO, ÁLVARO MURIEL LIMA. **Extração Automática de Contornos de Edificações Utilizando Imagem Gerada por Câmara Digital de Pequeno Formato e Dados LIDAR**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná Curitiba. 2006.

MACHADO, ÁLVARO; MITISHITA, EDSON A.; DELARA, ROOSEVELT, Algoritmo para Detecção Automática de Oclusões na Geração de True Ortofoto. **Série em Ciências Geodésicas**. v.5. pp 219-228. 2005.

MAUNE, DAVID F.. DEM Extration, Editing, Matching and Quality Control Techniques. **Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry**. Bethesda: ASPRS. 1996. pp 131-134.

MENDONÇA JÚNIOR, MARCIS G. **Estratégias para Geração semi-automática de Modelos Digitais do Terreno Visando seu Emprego no Mapeamento Sistemático**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica) – Departamento de Engenharia Cartográfica. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2002.

MIKHAIL, EDWARD M.; BETHEL, JAMES S.; McGLONE, J. CHRIS. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc. 2001. 479 p.

MITISHITA, EDSON APARECIDO. **Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para Fins de Mapeamento na Área Florestal**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1997.

NIELSEN , MORTEN ØDEGAARD. **True Orthophoto Generation**. Dissertação. Universidade Técnica da Dinamarca. 2004. Disponível em: http://www.iter.dk/projects/docs/imm-thesis-2004-50_web.pdf. Acesso em Ago 2006.

RAU, JIANN-YEOU; CHEN, NAI-YU; CHEN, LIANG-CHIEN. Hidden Compensation and Shadow Enhancement for True Orthophoto Generation. In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING 2000. **Proceedings**. 2000. Disponível em: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts4/digi0003.asp> . Acesso em Ago 2006.

_____. True Orthophoto Generation of Built-Up areas Using Multi-View Images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 68 (6). pp 581-588. 2002.

ROTTENSTEINER, F.; BRIESE, C. A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. **IAPRSIS - International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information science**, Graz, Áustria, v. 34/3A, p. 295 – 301, 2002.

SANHUEZA, JOHN ALEJANDRO FIERRO. **Extração Semi-Automática de Feições Planas e Cálculo de Entidades Pontuais a Partir dos Dados Lidar para o Apoio Fotogramétrico**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná Curitiba. 2007.

SANTOS JÚNIOR, ROOSEVELT DELARA. **Extração Automática de Pontos de Apoio para Integração de Imagens Aéreas Digitais e Dados de Perfilamento LASER Aerotransportado**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2007.

SCHICKLER, WOLFGANG; THORPE, ANTHONY. Operational Procedure for Automatic True Orthophoto Generation. **International Archives of Photogrammetric and Remote Sensing**. V. 32 (4). Pp: 527-532, 1998.

SHENG, Y., Minimising Algorithm-Induced Artefacts in True Ortho-Image Generation: A Direct Method Implemented in The Vector Domain. **The Photogrammetric Record**. v. 22 (118). pp 116–198. 2007

SHENG, Y.; GONG, P.; BIGING, G. S. True Orthoimage Production for Forested Areas from Large-scale Aerial Photographs. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 69(3). pp 259–266. 2003.

TERRASCAN. **Terra Solid Limited**. Disponível em: <<http://www.terrasolid.fi>>. Acesso em: Out 2007.

TOMMASELLI, ANTONIO MARIA GARCIA. Extração de Linhas Retas em Imagens Digitais. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA E XVII SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FOTOGRAMETRIA. Recife: CBC. **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia**. 1999. 1 CD-ROM.

VOLOTÃO, CARLOS FREDERICO DE SÁ. **Geração de Ortoimagens para Aplicações Urbanas: Desenvolvimento das Equações e Protótipo Experimental**. Dissertação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2001.

VOSELMAN, G. Building reconstruction using planar faces in very high density height data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Munique, Alemanha, v. 32/3- 2W5, p. 87–92, 1999.

WEHR, ALOYSIUS; LOHR, UWE . Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 54, pp. 68-82. 1999.

WOLF, PAUL R. **Elements of Photogrammetry**. International Student Edition. Japão: Mcraw-Hill Kogakusha, Ltd. 1974. 562 p.