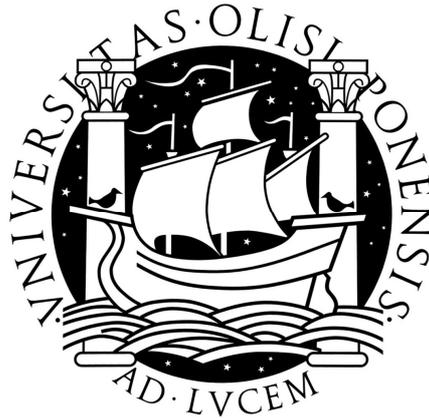


UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA,
GEOFÍSICA E ENERGIA



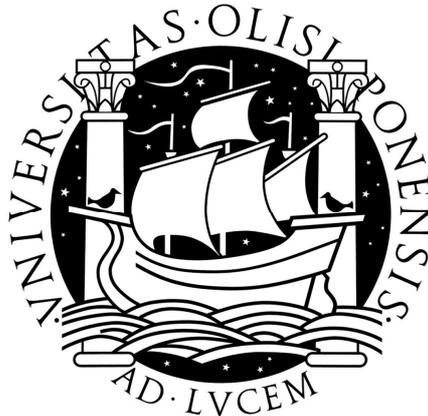
DETECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DE
MOVIMENTOS EM ARRIBAS COSTEIRAS E
GESTÃO DO INVENTÁRIO NUM SISTEMA DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Rita Martins Henriques Matildes

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOGRÁFICA

2009

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA,
GEOFÍSICA E ENERGIA



DETECÇÃO FOTOGRAMÉTRICA DE
MOVIMENTOS EM ARRIBAS COSTEIRAS E
GESTÃO DO INVENTÁRIO NUM SISTEMA DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Rita Martins Henriques Matildes

Dissertação orientada pela Professora Doutora Paula
Redweik

Co-Orientador: Professor Doutor Fernando Marques

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOGRÁFICA

2009

Índice

Índice	i
Lista de Tabelas	iii
Lista de Figuras	iv
Lista de Acrónimos	viii
Resumo	1
Abstract	2
Agradecimentos	3
Agradecimentos institucionais	4
Introdução	5
Objectivos	8
Estrutura	8
I. Estado da arte	10
II. Fundamentos teóricos	13
Objecto de estudo - Movimentos de vertente	13
Tipologia e processos de movimentos	14
Cartografia de movimentos e mapas-inventário	17
Métodos e técnicas	20
Processamento fotogramétrico	20
III. Enquadramento da região de estudo: Algarve – Burgau a Ancão	40
Enquadramento Geográfico	40
Geomorfologia e Geologia	41
Áreas de estudo - Ponta da Piedade e Praia da Falésia	43
Ponta da Piedade	44
Praia da Falésia	46
IV. Detecção Fotogramétrica de Movimentos em Arribas Costeiras	48
Fase de preparação de material de trabalho	48
Inventário de movimentos 1947 - 1991 [MARQUES, 1997]	50
Seleção da série temporal fotográfica e informação associada	51
Processamento fotogramétrico da série temporal	55
Voo INAG-2002	57

Voo IGP-2007	64
Voo SPLAL.....	70
Voo IGP-1991	82
Voo IGP-1995	84
Considerações finais acerca do processamento fotogramétrico.....	86
Estereorrestituição dos elementos da arriba.....	86
Detecção directa de movimentos a partir dos elementos estereorrestituídos.....	90
Detecção de movimentos a partir de Modelos Digitais de Elevação Diferenciais.....	91
Geração de Modelos Digitais de Elevação	91
Modelos Digitais de Elevação Diferenciais.....	105
Cálculo de volumes	113
Outros produtos gerados	115
Ortofotos.....	115
V. SIG – ARRIBA: Integração e gestão do inventário de movimentos em arribas.....	117
Estrutura do SIG-ARRIBA.....	118
Descrição e aquisição/produção de informação.....	119
VI. Conclusões e trabalho futuro.....	130
Referências de Livros e Teses.....	136
ANEXOS	
ANEXO A - Certificados de calibração das câmaras usadas nos voos processados.	
ANEXO B – Listagem dos pontos fotogramétricos e mapa de localização.....	
ANEXO C – Listagem das fotos aéreas processadas e respectivos parâmetros de orientação externa calculados pelas ATs.	
ANEXO D – Mapas executados.....	

Lista de Tabelas

Tabela 1- Classificação abreviada de movimentos de massa em vertentes (adaptado de TURNER AND JAYAPRAKASH ET AL. [1996]).	15
Tabela 2 - Precisão e dimensões aproximadas em função da escala (adaptado de BERBERAN [2003]).	32
Tabela 3 - Características dos voos seleccionados para processamento fotogramétrico (adaptado de MATILDES et al. [2008] e REDWEIK et al. [2008]).	52
Tabela 4 - Características gerais dos voos não seleccionados para processamento fotogramétrico [REDWEIK et al., 2008].	52
Tabela 5 – Exactidão obtida para o ajustamento Bugau-Lagos - INAG2002.	59
Tabela 6 – Desvios nos pontos fotogramétricos Burgau-Lagos – INAG2002.	59
Tabela 7 - Exactidão obtida para o ajustamento Alvor-Albufeira - INAG2002.	60
Tabela 8 - Desvios nos pontos fotogramétricos Alvor-Albufeira – INAG2002.	61
Tabela 9 - Exactidão obtida para o ajustamento Albufeira-Ancão - INAG2002.	62
Tabela 10 - Desvios nos pontos fotogramétricos Albufeira-Ancão – INAG2002.	62
Tabela 11 - Exactidão obtida para o ajustamento Burgau-Lagos - IGP2007.	66
Tabela 12 - Desvios nos pontos fotogramétricos Burgau-Lagos – IGP2007.	67
Tabela 13 - Exactidão obtida para o ajustamento Alvor-Olhos de Água - IGP2007.	68
Tabela 14 - Desvios nos pontos fotogramétricos Alvor-Olhos de Água – IGP2007.	68
Tabela 15 - Exactidão obtida para o ajustamento Olhos de Água-Ancão - IGP2007.	69
Tabela 16 - Desvios nos pontos fotogramétricos Olhos de Água-Ancão – IGP2007.	69
Tabela 17: Coordenadas foto para as 4 marcas fiduciais das imagens SPLAL.	73
Tabela 18 - Exactidão obtida para o ajustamento Burgau-Lagos - SPLAL.	74
Tabela 19 - Desvios nos pontos fotogramétricos Burgau-Lagos - SPLAL.	75
Tabela 20 - Resultados obtidos para os modelos, bem como na orientação individual de imagens, do bloco Albufeira – Praia da Falésia, e número de pontos fotogramétricos e de ligação utilizados para o efeito.	79
Tabela 21 - Exactidão obtida para o ajustamento Olhos de Água-Ancão - SPLAL.	79
Tabela 22 - Desvios nos pontos fotogramétricos Olhos de Água-Ancão - SPLAL.	80
Tabela 23 - Exactidão obtida para o ajustamento Albufeira-Ancão – IGP1991.	83
Tabela 24 - Desvios nos pontos fotogramétricos Albufeira-Ancão – IGP1991.	83
Tabela 25 - Exactidão obtida para o ajustamento Albufeira-Rocha Baixinha – IGP1995.	84
Tabela 26 - Desvios nos pontos fotogramétricos Albufeira-Rocha Baixinha – IGP1995.	85
Tabela 27 - Precisão, em metros, da estereorrestituição calculada pelas expressões e/ou indicações dos autores referenciados.	88
Tabela 28 – Parâmetros estatísticos do MDE de 2002 da Ponta da Piedade.	94
Tabela 29 – Parâmetros estatísticos do MDE de 2007 da Ponta da Piedade.	95
Tabela 30 - Parâmetros estatísticos do MDE SPLAL da Ponta da Piedade.	97
Tabela 31 - Parâmetros estatísticos do MDE de 2002 da Praia da Falésia.	99
Tabela 32 - Parâmetros estatísticos do MDE de 2007 da Praia da Falésia.	100
Tabela 33 - Parâmetros estatísticos do MDE SPLAL da Praia da Falésia.	102
Tabela 34 - Parâmetros estatísticos do MDE de 1991 da Praia da Falésia.	103

Tabela 35 - Parâmetros estatísticos do MDE de 1995 da Praia da Falésia.....	103
Tabela 36 – Registo de movimentos nos diferentes MDEDs gerados.	111
Tabela 37 – Valores registados de largura máxima e somatório das áreas de terreno perdido em movimentos, para cada unidade, e determinação dos valores de densidade de movimentos....	123
Tabela 38 - Valores registados de comprimento de arriba e somatório do comprimento de arriba afectado por movimentos, para cada unidade, e determinação dos valores de densidade de movimentos.....	124

Lista de Figuras

Figura 1: Em cima: Arribas da Praia da Falésia (Albufeira – Quarteira); em baixo, à esquerda: Arriba da Praia do Camilo (Lagos); em baixo, à direita: Praia de Porto de Mós – Praia do Canavial (Lagos).	6
Figura 2: Queda de blocos na Praia Maria Luísa (Olhos de Água), a 21 de Agosto de 2009 (<i>fonte das imagens</i> : SAPO Local, Diário Digital).	7
Figura 3: Sinalética de aviso relativamente a perigo causado por arribas instáveis.....	7
Figura 4: Tipologia de movimentos de vertente segundo a classificação de VARNES [1978].....	15
Figura 5: Marcas fiduciais em fotografias aéreas recentes, à esquerda, e mais antigas, à direita.	22
Figura 6: Posição da imagem rodada relativamente ao sistema de referência objecto (adaptado de MIKHAIL [2001]).	26
Figura 7: Condição de colinearidade entre câmara, imagem e terreno [WOLF, 2001].	26
Figura 8: Formatos Grid e TIN de MDEs (adaptado de <i>ArcGIS Desktop Help</i> – ESRI).	34
Figura 9: Auxílio das linhas de quebra na geração de uma arriba por um MDE (adaptado de MIKHAIL [2001]).	36
Figura 10: Comparação da geometria perspectiva e a ortográfica (adaptado de MIKHAIL [2001]).	38
Figura 11: Enquadramento da região de estudo (<i>fonte</i> : http://www.imagens-terra.com/europa/portugal.jpg , <i>Google Earth</i> e <i>Folhas da Carta Militar de Portugal – IgeoE</i>).	40
Figura 12: Enquadramento geológico da região de estudo (<i>fonte</i> : <i>Carta Geológica de Portugal, 1: 100000</i>).	42
Figura 13: Mapa de sismicidade histórica e actual (1755 – 1996) à escala 1: 1 000 000 (<i>fonte</i> : <i>Atlas do Ambiente</i>).	43
Figura 14: Região de estudo da Ponta da Piedade.....	44
Figura 15: Em cima: vista geral da Praia do Canavial às arribas da Ponta da Piedade. Em baixo, à esquerda: Leixões de grandes dimensões e arcos, junto à Ponta da Piedade; Em baixo, à direita: Algar parcialmente destruído, na Praia de Dona Ana (sector Ponta da Piedade – Lagos).	45
Figura 16: Região de estudo da Praia da Falésia.....	47
Figura 17: Arribas altas, de declive acentuado, da Praia da Falésia.....	47
Figura 18: Conjunto de ortofotos de 2005 (IGP).	49
Figura 19: Fotografias oblíquas.....	49

Figura 20: Exemplo do inventário original, em suporte papel [MARQUES, 1997].	50
Figura 21: Exemplo da base de dados construída a partir do inventário de Marques [1997].	51
Figura 22: Extracto do enquadramento do voo INAG-2002 e SPLAL (esquerda) e IGP-1991 (à direita).	53
Figura 23: Extracto do enquadramento das fotografias do voo IGP-2007.	53
Figura 24: Projecção dos pontos fotogramétricos em SIG.	54
Figura 25: Exemplo de informação associada a cada ponto fotogramétrico disponibilizado: <i>croquis</i> e fotografia.	55
Figura 26: Marcação de um ponto fotogramétrico na cópia em papel de uma fotografia aérea do voo INAG-2002.	55
Figura 27: Fluxograma representativo das tarefas a executar no âmbito do processamento fotogramétrico.	56
Figura 28: Identificação das marcas fiduciais (Wild RC20).	58
Figura 29: Configuração do bloco Burgau - Lagos para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.105m e 0.242m, respectivamente).	59
Figura 30: Foto número 332 da fiada 194 (INAG-2002).	60
Figura 31: Configuração do bloco 1 Alvor-Albufeira para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação.	61
Figura 32: Configuração do bloco 2 Alvor-Albufeira para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação.	61
Figura 33: Configuração do bloco 3 Alvor-Albufeira para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação.	62
Figura 34: Configuração do bloco Albufeira - Ancão para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.102m e 0.418m, respectivamente).	63
Figura 35: Distribuição de pontos incluídos na aerotriangulação, numa imagem da cobertura IGP-2007.	66
Figura 36: Configuração do bloco Burgau - Lagos para a cobertura IGP-2007, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.327m e 0.841m, respectivamente).	67
Figura 37: Configuração do bloco Alvor - Olhos de Água para a cobertura IGP-2007, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.283m e 0.730m, respectivamente).	68
Figura 38: Configuração do bloco Olhos de Água - Ancão para a cobertura IGP-2007, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.270m e 0.623m, respectivamente).	69
Figura 39: Pormenor do cartograma da cobertura para a região do Algarve demonstrando que o Barlavento deverá ter sido coberto em 1952 e o Sotavento em 1951 (adaptado de [REDWEIK et al., 2009]).	71
Figura 40: Marca fiducial na margem de uma fotografia SPLAL, onde se salienta o pequeno ponto branco que constitui a marca.	72
Figura 41: Redefinição do elemento a usar como marca fiducial, por ausência sistemática de uma das marcas fiduciais originais nas imagens.	72
Figura 42: Definição da identificação e medição das marcas fiduciais.	73
Figura 43: Configuração do bloco Burgau - Lagos para a cobertura SPLAL, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.823m e 1.426m, respectivamente).	75
Figura 44: Comparação da visualização, com <i>zoom</i> de 200%, de um mesmo pormenor nas imagens SPLAL em prova de contacto fotográfica (processo fotográfico clássico, à esquerda) e impressas em papel fotográfico (com impressora de jacto de tinta, à direita).	76
Figura 45: Configuração dos sub-blocos Alvor – Carvoeiro (em cima) e Carvoeiro – Albufeira (em baixo), com projecção das várias fiadas e pontos pseudo-fotogramétricos.	77

Figura 46: Configuração do sub-bloco de 2 fiadas, com projecção dos pontos fotogramétricos (a verde) e alguns dos pontos de ligação medidos entre as fiadas.....	78
Figura 47: Configuração do bloco Praia da Falésia (Oeste) - Ancão para a cobertura SPLAL, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.823m e 1.426m, respectivamente).	80
Figura 48: Configuração do bloco Albufeira- Ancão para a cobertura 1991, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.681m e 1.455m, respectivamente).	83
Figura 49: Excerto do mapa índice da cobertura fotográfica de 1995, para a região de Albufeira-Rocha Baixinha (IGP).	84
Figura 50: Configuração do bloco Albufeira – Rocha Baixinha para a cobertura SPLAL, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.320m e 0.524m, respectivamente).	85
Figura 51: Restituição linear contínua da crista e base das arribas nas coberturas fotográficas SPLAL, INAG-2002 e IGP-2007 (pormenor da Praia da Falésia).....	86
Figura 52: Restituição da crista e base das arribas, e de pormenores da morfologia da região nas coberturas fotográficas SPLAL, INAG-2002 e IGP-2007 (pormenor da Ponta da Piedade).....	87
Figura 53: Delimitação e medição dos movimentos em AutoCAD.	90
Figura 54: Modelos digitais de elevação para a Ponta da Piedade, sobrepostos por ortofotos do IGP, de 2005 (por ordem, 2002, 2007 e SPLAL).....	93
Figura 55: Distribuição das diferenças entre o TIN de referência e o MDE 2002 gerado por correlação automática de imagem, ao longo de uma faixa de 150 m, na Ponta da Piedade (1m x 1m).	95
Figura 56: Distribuição das diferenças entre o TIN de referência e o MDE 2007 gerado por correlação automática de imagem, ao longo de uma faixa de 150 m, na Ponta da Piedade (1m x 1m).	96
Figura 57: Ponta da Piedade: correlação errada em zonas do interior do modelo e atribuição de valores de altimetria errada (altitude máxima de 95m incorrecta).	97
Figura 58: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE SPLAL gerado, ao longo de uma faixa de 150 m, na Ponta da Piedade (1m x 1m).	98
Figura 59: Modelos Digitais de Elevação da Praia da Falésia – em cima, à esquerda: 2002; em cima, à direita: 2007; seguidos do MDE 1991 e 1995.	99
Figura 60: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE 2002 gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).....	100
Figura 61: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE 2007 gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).....	101
Figura 62: Praia da Falésia: correlação errada no modelo e atribuição de valores de altimetria muito heterogéneos no terreno.	101
Figura 63: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE SPLAL gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).....	102
Figura 64: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE 1991 gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).....	103
Figura 65: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE 1995 gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).....	104
Figura 66: Exemplo de comportamento típico de ocorrência de movimentos, com perda de área no topo (crista) e acumulação de material deslocado na base (fonte: MARQUES [1997]).....	106
Figura 67: Em cima – MDE diferencial com o pormenor de um exemplo de uma zona de perda de material e respectiva acumulação de material, referente a um movimento na Praia do Canavial (em baixo).	106
Figura 68: MDED da Ponta da Piedade, gerado para o intervalo de tempo SPLAL a 2002.....	108
Figura 69: MDED da Ponta da Piedade, gerado para o intervalo temporal de 2002 a 2007.....	109

Figura 70: MDED da Praia da Falésia, gerado para o intervalo temporal de 2002 a 2007.	109
Figura 71: MDED da Praia da Falésia, gerado para o intervalo temporal de 1995 a 2002.	110
Figura 72: MDED da Praia da Falésia, gerado para o intervalo temporal de 1991 a 1995.	111
Figura 73: Volumes (m ³) envolvidos em movimentos ocorridos entre 1951 e 2002, na Ponta da Piedade.	114
Figura 74: Ortofoto da Ponta da Piedade, obtida a partir do MDE gerado automaticamente para a cobertura INAG 2002.	116
Figura 75: Ortofoto da Praia da Falésia, obtida a partir do MDE gerado automaticamente para a cobertura IGP 1991.	116
Figura 76: Extracto exemplificativo da tabela de atributos dos movimentos detectados ao longo do litoral de arriba algarvio, de 1951 (SPLAL) a 2007.	120
Figura 77: Tabela de atributos associada a cada movimento, e a fotografia aérea oblíqua do movimento.	121
Figura 78: Extracto da cartografia subdividida em níveis de acordo com as características dos elementos (em transparência, a ortofoto IGP de 2005).	121
Figura 79: Pormenor das linhas de crista e base obtidas por estereorrestituição. Exemplo da Praia de Porto de Mós e do Canavial (Lagos).	122
Figura 80: Pormenor do Mapa de Densidades na região da Ponta da Piedade.	123
Figura 81: Modelo digital de terreno de 2002, na zona da Praia da Falésia.	125
Figura 82: Modelo digital diferencial entre 1951 e 2002 para a Ponta da Piedade, em escala cromostereográfica.	126
Figura 83: Pormenor do levantamento de pormenor realizado, constante no SIG em formato <i>raster</i>	126
Figura 84: Distribuição das fotografias aéreas oblíquas ao longo do litoral algarvio entre Burgau e Ancão.	127
Figura 85: Distribuição das estações meteorológicas do Algarve (fonte dos dados: SNIRH). ..	128
Figura 86: Mapa pluviométrico gerado com dados de pluviosidade média anual entre 1952 a 1996 (fonte dos dados: SNIRH).	128

Lista de Acrónimos

- ASP – American Society of Photogrammetry
- BLUH - Bundle block adjustment University of Hannover
- CCDR – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional
- DGSFA – Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas
- DGSU – Direcção Geral dos Serviços de Urbanização
- DRAOT – Direcção Regional do Ambiente e Ordenamento do Território
- FAP – Força Aérea Portuguesa
- GPS – Global Positioning System
- GSD – Ground sample distance
- IGEOE – Instituto Geográfico do Exército
- IGP – Instituto Geográfico Português
- IMU – Inertial Movement Unit
- INAG – Instituto da Água
- INSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
- ISO – Integrated Sensor Orientation
- LIDAR – Light Detection And Ranging
- MDE – Modelo Digital de Elevação
- MDED – Modelo Digital de Elevação Diferencial
- MDS – Modelo Digital de Superfície
- MDT – Modelo Digital de Terreno
- RAF – Royal Air Force (GB)
- RTCAP – Regulamento Técnico das Coberturas Aerofotográficas para Fins Civis
- SIG – Sistema de Informação Geográfica
- SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
- SPLAL – Sociedade Portuguesa de Levantamentos Aéreos Ltd.

TIN – Triangulated irregular network

USAF – United States Air Force (EUA)

USGS – United States Geological Survey

Resumo

A principal causa do recuo sofrido pelas arribas rochosas no litoral é a ocorrência de movimentos de massa de diferentes tipos e dimensões, fenómenos que provocam risco natural considerável. Ao longo do litoral Algarvio, fortemente utilizado e densamente ocupado por estruturas antrópicas, a ocorrência frequente de movimentos dita a necessidade de condução de estudos de carácter científico que permitam conhecer de forma conveniente o comportamento destes fenómenos e, então, mitigar os riscos que lhes estão associados.

Para se poder compreender convenientemente o comportamento do litoral no que concerne a ocorrência de movimentos em arribas costeiras, é necessário construir inventários sistemáticos de movimentos, executados através de estudos multi-temporais de fotografias aéreas. Este carácter multi-temporal da análise requer o maior intervalo temporal possível, o que implica a utilização de fotografias aéreas muito antigas, por vezes em condições que dificultam o seu processamento.

O objectivo principal do projecto “Avaliação Quantitativa da Intensidade da Erosão das Arribas do Litoral do Algarve Central”, proposto pela CCDR Algarve, era comparar e actualizar um inventário realizado por Marques [1997] para o intervalo 1947 – 1991, baseado em métodos simplificados [Marques, 2006]. Neste contexto, realizou-se um novo estudo multi-temporal de movimentos em arribas rochosas, para o sector Burgau – Ancão, recorrendo à aplicação de procedimentos fotogramétricos digitais rigorosos às fotografias aéreas do intervalo 1947 a 2007. No desenvolvimento deste trabalho, foram testadas duas metodologias de detecção e caracterização dos movimentos: baseadas em comparação directa dos elementos crista e base de arribas, obtidos por estereorrestituição, e baseadas em modelos digitais de elevação (MDE) gerados automaticamente e diferenças entre esses modelos digitais de elevação, de forma a quantificar as alterações sofridas pelas arribas ao longo do tempo.

Dada a elevada importância de um estudo deste tipo, bem como a quantidade de informação necessária à sua persecução e a quantidade de informação subsequente produzida, torna-se fundamental que os resultados se apresentem numa estrutura completa e organizada, e que estejam acessíveis de forma eficiente. Para tal, foi criado um Sistema de Informação Geográfica, denominado SIG-ARRIBA, com o intuito de disponibilizar uma ferramenta de grande utilidade para a gestão da orla costeira. O inventário de movimentos compilado foi integrado no SIG-ARRIBA, e este foi populado com um vasto conjunto de dados adicionais relevantes (produzidos ao longo do trabalho e adquiridos directamente), proporcionando uma gestão mais eficiente do fenómeno de movimentos em arribas costeiras.

Palavras-chave: Fotogrametria, SIG-ARRIBA, Movimentos de massa, Inventário, Modelo digital de elevação.

Abstract

The main cause of sea cliff retreat is the occurrence of mass movements of variable dimensions and types, which are a considerable source of natural risk. Throughout the Algarve coast, heavily used and strongly occupied by buildings and structures, the frequent occurrence of mass movements dictates the need to execute scientifically based studies which allow a deeper knowledge on the behavior of such a phenomenon and, then, reduce the associated risks.

In order to truly comprehend the coastal behavior in what concerns the mass movements phenomena in sea cliffs, it is necessary to perform systematic inventories based on multi-temporal studies of aerial photographs. This multi-temporal component requires the widest possible time interval which means using old aerial photos, which are very difficult to process.

The main goal of the project “Avaliação Quantitativa da Intensidade da Erosão das Arribas do Litoral do Algarve Central”, proposed to Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa by CCDR Algarve, was comparing and updating an inventory compiled by MARQUES [1997] for the time interval of 1947 to 1991, based on simplified methods. A new multi-temporal study on the sea cliff retreat problem was performed for the coastal segment between Burgau and Ancão, based on the application of digital photogrammetric processing to aerial photographs dating from 1947 to 2007. In the course of this work, methodologies of mass movement detection and characterization were tested: based on direct comparison of the stereo plotted elements cliff top and cliff base, and based on the automatic generation of digital elevation models and digital differential elevation models, in order to quantify the changes suffered by the coastal cliffs.

Given the high importance of such a study, as well as the amount of data needed to proceed with the work and the amount of produced information, it is fundamental that all the data is presented in a complete and organized structure which enables easy visualization, query, processing and updating. Therefore, a GIS named SIG-ARRIBA was designed with the goal of offering a tool of great utility to the management of coastal areas. The inventory performed was integrated in SIG-ARRIBA and the latter was populated with a large set of additional relevant data (produced throughout the work and directly acquired), where an efficient management of the phenomena may be pursued.

Keywords: Photogrammetry, SIG-ARRIBA, Mass Movements, Inventory, Digital Elevation Model.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às pessoas que, sem as quais, este trabalho teria sido uma tarefa quase impossível de completar.

Em primeiro lugar, à Professora Doutora Paula Redweik pelas longas horas que dedicou quase em regime tutorial a trabalhar em equipa comigo, pelas orientações e ensinamentos, e pela constante boa disposição!

Ao Professor Doutor Fernando Marques, pela oportunidade que me proporcionou ao seleccionar-me para colaborar num projecto científico por si coordenado, permitindo-me desenvolver este estudo que apresento, e pelos úteis conselhos e sugestões que foi dando ao longo do tempo.

Aos Professores do grupo de Engenharia Geográfica do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, pela sempre constante motivação desde o primeiro dia, e, tenho que dizê-lo, amizade.

Aos Professores Doutores Isabel Moitinho de Almeida e Rui Taborda, do Departamento de Geologia, pela compreensão para comigo ao longo da fase de finalização desta dissertação.

À Leonor Santos, colega e amiga, que trabalhou comigo no projecto. Penso que verá os devidos créditos da sua actividade espelhados neste trabalho.

Aos meus ilustríssimos amigos Diogo Carreira, Sandra Moreira, Alexandra Oliveira e João Leitão pelas preciosas revisões, fins de tarde e *thumbs-up!* E ainda a Tânia Ferreira e Ana Maria Silva pelas sugestões e apoio.

Ao Tó pela compreensão, apoio e sorriso constantes.

Ao meu irmão Diogo, que tem sempre uma palavra amiga a dar, e aos meus avós. As suas preocupações e curiosidade também alimentam a vontade de fazer mais e melhor.

E sempre, aos meus Pais. Por tudo, todos os dias.

Agradecimentos institucionais

É devido o agradecimento à Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve, pelo financiamento do projecto *Avaliação Quantitativa da Intensidade da Erosão das Arribas do Litoral do Algarve Central* no qual se insere a presente dissertação.

É devido também um agradecimento ao Dr. Fernando Magalhães, do INAG, pela disponibilização de material fundamental para a realização deste projecto.

Um agradecimento ao Dr. Sebastião Teixeira, pela cedência de fotografias oblíquas, tão importantes neste trabalho.

É ainda prestado o devido agradecimento ao Instituto Geográfico Português pela cedência de parte das fotografias aéreas trabalhadas, ao abrigo do programa FIGIEE.

Introdução

O litoral continental e insular português alberga cerca de 75% da população total, numa faixa de diferentes dinâmicas, comportamentos, ambientes, etc., que se estende, segundo o Instituto Nacional da Água, ao longo de uma extensão de 1187 km.

O litoral, que apresenta zonas de praias de areia intercaladas com zonas de arribas rochosas, é ocupado por actividades económicas de grande importância como por exemplo a indústria, a pesca e o turismo. Estima-se que cerca de 30% desta faixa esteja ocupada com construções, repartidas entre habitação, estabelecimentos de actividades económicas e áreas portuárias.

O INAG realça a importância da erosão costeira como um risco natural a que o litoral português está sujeito, focando a perda sedimentar sofrida por muitos sectores de litoral arenoso que em alguns locais pode atingir valores de recuo de linha de costa de 20 m/ano. No entanto, e embora o interesse por parte das instituições gestoras do litoral tenha vindo a aumentar nos últimos anos, a erosão sofrida pelos segmentos de litoral rochoso representa um risco ao qual não é ainda atribuída a importância devida.

Obviamente, fenómenos de recuo da linha de costa têm lugar desde sempre. No entanto, a previsão do *Intergovernmental Panel on Climate Change* em 2007 prevê para a Europa um cenário de aumento da erosão costeira devido a episódios de meteorologia severa, efeito que será exacerbado pelas pressões cada vez maiores sobre as áreas costeiras (muito alta confiança na probabilidade de ocorrência) [IPCC2007].

No caso particular do Algarve, nos últimos 30 anos o aumento da ocupação da costa pelo turismo proporcionou vários acidentes relacionados com movimentos em arribas, vitimando, por vezes mortalmente, pessoas e danificando edifícios de habitação, infra-estruturas de apoio à praia, etc. [TEIXEIRA, 2006].

Dada a relevância do problema da erosão no litoral algarvio (Figura 1), que apresenta repercussões directas em populações e bens, a Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve teve a necessidade de aumentar o conhecimento sobre as arribas rochosas, particularmente sobre o comportamento destas em resposta à

erosão, de forma a tornar mais eficaz a monitorização que já executa e a otimizar as soluções de engenharia que aplica localmente.



Figura 1: Em cima: Arribas da Praia da Falésia (Albufeira – Quarteira); em baixo, à esquerda: Arriba da Praia do Camilo (Lagos); em baixo, à direita: Praia de Porto de Mós – Praia do Canavial (Lagos).

É de notar que, ainda no ano de 2008, foi publicado pelo Ministério da Administração Interna e do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, o Despacho nº. 27660/2008, onde se sublinha a necessidade do “reconhecimento das situações de perigo e a avaliação das suas potenciais consequências” como uma “etapa fundamental para o planeamento e gestão do território”. O mesmo documento corrobora as considerações que são tecidas ao longo desta dissertação relativamente à importância de uma cartografia temática rigorosa que, reunida num SIG, se apresenta como um “instrumento fundamental para o planeamento de acções de prevenção, para a identificação e delimitação das zonas potencialmente afectadas e para a consequente afectação e optimização de recursos”.

Já no decurso da fase final de escrita desta dissertação, ocorreu uma queda de blocos na Praia Maria Luísa, a Oeste de Albufeira, vitimando mortalmente 5 pessoas.

Segundo o jornal Expresso, edição online de dia 21 de Agosto de 2009, “um pedregulho de grande dimensão caiu na praia (...)” atingindo uma área de 100 m² (Figura 2). Acrescenta ainda a notícia que “apesar da maré vazia, as pessoas que estavam na praia

encontravam-se na sua maioria junto à arriba”, ignorando os sinais de aviso de risco presentes nas arribas desta região.



Figura 2: Queda de blocos na Praia Maria Luísa (Olhos de Água), a 21 de Agosto de 2009 (fonte das imagens: SAPO Local, Diário Digital).

É de extrema relevância dar continuidade a estudos deste âmbito e nesta região, de forma a garantir um fluxo de informação assertiva e constante direccionada a turistas e utilizadores destas praias, baseada nas observações científicas que se têm vindo a desenvolver, relativamente aos riscos existentes. Os sinais de aviso existem, e embora o seu estado seja, por vezes, de alguma degradação (Figura 3), não são, aparentemente, alvo de atenção e preocupação por parte do público alvo.



Figura 3: Sinalética de aviso relativamente a perigo causado por arribas instáveis.

A combinação destes factores é um claro indicador de quão importante é a realização de estudos que incidem sobre a faixa costeira, nomeadamente os sectores de arriba rochosa, usualmente menos sensíveis que os litorais arenosos mas nem por isso menos preocupantes, com base em métodos fotogramétricos rigorosos.

Objectivos

O trabalho apresentado nesta dissertação surge no contexto do projecto “Avaliação quantitativa da erosão das arribas do litoral do Algarve Central”, atribuído à Faculdade de Ciências pela CCDR Algarve e financiado pela mesma instituição, e no qual a autora colaborou como Bolseira de Investigação de Novembro de 2006 a Outubro de 2008. O sector costeiro objecto de estudo estende-se por cerca de 72 km, entre Burgau e Ancão e é de jurisdição da referida Instituição.

Com este trabalho, a autora pretende também sublinhar a importância de realizar inventários multi-temporais completos de movimentos, e fortalecer os processos fundamentais de verificação baseados em ferramentas complexas e rigorosas de quantificação desses mesmos eventos, através das técnicas fotogramétricas; pretende ainda dar a conhecer a enorme utilidade de um Sistema de Informação Geográfica como ferramenta de disponibilização da informação, capaz de reunir dados fundamentais num suporte digital bem organizado, compreensível e flexível, e que sirva de base para futuros estudos e execução de cartografia de risco de movimentos, servindo assim como um indispensável auxílio aos processos de tomada de decisão.

Para cumprir os objectivos propostos neste trabalho, utilizaram-se técnicas fotogramétricas na verificação multi-temporal da informação constante no inventário de movimentos realizado por MARQUES [1997] e na actualização da informação acerca da ocorrência de movimentos em arribas até à mais recente data possível. Um projecto desta dimensão implica diversas etapas, cada uma com uma complexidade muito específica, e tempos de execução muitas vezes longos.

No âmbito da Década Internacional de Redução de Riscos Naturais (1991 - 2000) foi proposto um questionário [BRABB, 1993] a investigadores e especialistas de todo o mundo acerca da existência de mapas-inventário de movimentos. No que respeita à situação na Europa, as respostas obtidas revelaram que, à excepção da Áustria e Hungria, a grande maioria dos países europeus tinham apenas até 25% da sua área total coberta por cartografia referente a movimentos [CHÁCON et al., 2006]. A autora gostaria de influenciar a evolução deste panorama ou, pelo menos, chamar a atenção para a importância de tornar comum a execução de inventários sistemáticos de movimentos ao longo do litoral de arriba português, melhorando a informação já existente sobre esta matéria (ver por exemplo MARQUES [1998]).

Estrutura

Esta dissertação encontra-se organizada de forma a descrever todas as fases de um projecto deste tipo, os fundamentos teóricos de que depende, os procedimentos práticos executados, a gestão da informação produzida e, finalmente, fundamentar os resultados através de dois casos de estudo. A estrutura e conteúdos da introdução teórica foram pensados de forma a constituírem uma primeira abordagem ao estudo e divulgação da

fotografia aérea e da fotogrametria, principalmente entre os alunos de Geologia e geólogos profissionais menos conhecedores das vantagens de aplicações como as que se apresentam neste trabalho.

Em maior detalhe, a dissertação encontra-se organizada nos seguintes capítulos:

No Capítulo I, será apresentado um resumo dos trabalhos que têm sido desenvolvidos no âmbito da monitorização das arribas do litoral, enumerando e explorando brevemente publicações relevantes, não só referentes ao objecto de estudo mas também aos procedimentos e metodologias práticas de obtenção de dados de base.

O Capítulo II consiste no desenvolvimento teórico que, por uma questão de organização e porque se trata de informação de apoio ao desenvolvimento do trabalho, apresentará de forma compilada todos os conceitos fundamentais de forma a permitir a compreensão de todas as fases práticas do trabalho. Primeiramente, serão apresentados os fundamentos teóricos acerca dos tipos e processos de movimentos de massa de vertentes e da elaboração de cartografia pertinente no estudo desse fenómeno. É, depois, desenvolvida a teoria que apoia a escolha, aquisição e preparação da informação de base, o pré-processamento e processamento de dados, a produção de informação e a exploração da informação produzida.

No Capítulo III é fornecida uma descrição geográfica, geológica e geomorfológica da região em estudo, bem como a descrição mais pormenorizada de cada zona de estudo específico seleccionada para apresentar neste trabalho, a Ponta da Piedade e a Praia da Falésia.

No Capítulo IV, é apresentado todo o desenvolvimento prático que foi realizado, apresentando os resultados obtidos para todo o sector trabalhado e, em maior detalhe, para os casos de estudo Ponta da Piedade e Praia da Falésia. Neste capítulo, encontra-se a descrição da aplicação de todas as metodologias testadas.

Para o Capítulo V reserva-se a descrição do SIG Arriba, desenhado e implantado para gerir o inventário de movimentos e apoiar a tomada de decisão por parte da instituição reguladora daquele sector litoral.

Esta dissertação termina com o Capítulo VI, onde são apresentadas as Conclusões e são indicados alguns caminhos a prosseguir em trabalho futuro.

I. Estado da arte

À escala do planeta, as arribas rochosas compreendem 75% de toda a faixa costeira [LIM et al., 2005], mas o conhecimento acerca dos fenómenos de recuo destes litorais, os seus processos e mecanismos, e a respectiva distribuição espacial é ainda limitado, especialmente devido à dificuldade de obtenção de dados quantitativos acerca das alterações morfológicas sofridas nestes locais. Alguns exemplos de trabalhos mais recentes realizados no sentido de melhor conhecer o recuo sofrido por arribas rochosas podem encontrar-se em LIM et al. [2005], COSTA et al. [2004], ZVIELY et al. [2004], HAPKE et al. [2004], entre outros.

O caso de Portugal não é diferente do panorama internacional. Nos últimos anos têm sido realizados alguns estudos com o objectivo de determinar quantitativamente o recuo sofrido por determinados sectores litorais de arriba, principalmente no litoral algarvio e, em particular no sector compreendido entre Albufeira e o sítio de Ancão, um segmento cuja intensidade erosiva levanta preocupações. Dos estudos referentes a este troço litoral são exemplo DIAS [1992], MARQUES [1997], CATALÃO et al. [2002], OLIVEIRA [2003], OLIVEIRA et al. [2008] e MATILDES et al. [2008].

No que respeita às técnicas e métodos aplicados ao conhecimento da evolução da costa, existem vários trabalhos publicados, onde se apresentam aplicações do processamento fotogramétrico tradicional em fotografias aéreas ou combinado com dados de *laser scanning* na determinação da evolução de arribas [LIM et al., 2005], de imagens de satélite na determinação da evolução da posição da linha de costa [SESLI et al., 2008], de processamento fotogramétrico com produção de MDEs multi-temporais na monitorização de alterações na costa [MILLS, 2005], correlação de superfícies entre MDEs produzidos por fotogrametria [MILLER et al., 2008] e MDEs produzidos com base em dados de *laser scanning* no conhecimento da dinâmica dos movimentos de massa na costa [LIM et al., 2005].

A grande maioria dos trabalhos realizados para a costa portuguesa baseia-se na utilização de técnicas fotogramétricas. Os procedimentos fotogramétricos digitais, nomeadamente o processo de estereorrestituição aplicado na quantificação do recuo das

arribas, mostram-se muito úteis na quantificação robusta de parâmetros de erosão costeira [CATALÃO et al., 2002] e na determinação quantitativa precisa de distâncias de recuo de arribas [ZVIELY et al., 2004], especialmente devido à complexa natureza do terreno das regiões costeiras, que tem de ser representado com grande resolução [MILLS et al., 2005].

É importante salientar os trabalhos desenvolvidos com base em métodos simplificados para a detecção de movimentos em arribas [MARQUES, 1997], que permitiram cobrir grandes extensões do litoral português, nomeadamente os sectores Nazaré – Cascais [MARQUES, 1997a, 1998], Tróia a Sines e a totalidade da costa do Algarve [MARQUES, 1997], retribuindo resultados que apoiaram, entre outros trabalhos, os Planos de Ordenamento da Orla Costeira das regiões referidas.

Foram já publicados diversos trabalhos focando a importância da utilização, em primeira instância, de fotografias aéreas como fonte de dados ideal para a cartografia de uso da costa e monitorização das alterações por ela sofrida em áreas extensas [SESLI et al., 2008; DIAS, 1988], e, conseqüentemente, das técnicas e produtos fotogramétricos no estudo da morfologia da superfície terrestre na perspectiva da geologia de engenharia [WEST et al., 1986], da geomorfologia [CHANDLER et al. 1998; BAILY et al., 2003], e monitorização de elementos estruturais naturais [KERLE et al., 2002; BALDI et al., 2007].

A importância de um inventário de movimentos rigoroso, que constitua a base fundamental para a geração de cartografia de risco de movimentos, é salientada em diversos trabalhos. Embora referente a movimentos em terra, GUZZETTI [2005] apresenta as técnicas, métodos e ferramentas aplicados a movimentos de massa, fazendo recomendações sobre “boas práticas” no tratamento do problema e, principalmente, sobre o que deverá ser considerado na detecção e na cartografia de base de movimentos de massa. Dadas as especificidades e complexidades do tema, deve ser dada especial atenção a inventários onde sejam registados diferentes tipos de movimentos passíveis de serem compilados num mapa, bem como informação associada [CHACÓN et al., 2006].

Muitos dos trabalhos publicados referentes a inventários de movimentos estão ligados a SIGs [DUMAN et al., 2004; GALLI et al., 2007; DEVOLI et al. 2007] ou se apoiam nesses sistemas para executar mapas de risco e/ou outra cartografia de interesse na análise dos movimentos [CARRARA et al., 1999; LAZZARI et al., 1999; COLOMBO et al., 2005; CHACÓN et al., 2006; GUPTA et al., 2008]. Particularmente no que respeita a aplicação de técnicas fotogramétricas e interpretação de fotografia aérea na monitorização de movimentos de vertente, algumas considerações interessantes são tecidas acerca da utilização de fotografias aéreas na cartografia de movimentos, salientando as capacidades do seu processamento através de técnicas fotogramétricas, não só na detecção de alterações da superfície terrestre e na detecção de movimentos de massa [YALCIN, 2006], como para a produção de MDEs [WALSTRA AND CHANDLER et al., 2007]. Também o potencial das fotografias oblíquas é salientado, na investigação e caracterização de regiões afectadas por movimentos [MATTHEWS et al., 1986], chamando a atenção, porém, para a necessidade de cuidado na interpretação destes

materiais e a dependência da experiência do intérprete [FOOKES et al., 1991; HART et al., 2009]. WALSTRA AND DIXON et al. [2007] salientam o potencial que um arquivo fotográfico oferece no estudo da evolução de movimentos de vertente, uma vez que a cobertura temporal sequencial captura todas as alterações morfológicas à superfície da Terra.

O grande desenvolvimento das técnicas de análise e processamento de imagens de satélite têm permitido a utilização de imagens IKONOS, QuickBird ou SPOT na detecção e estudo de movimentos, de que são exemplo os trabalhos apresentados por NICHOL et al. [2005], DANNEELS et al. [2007] e FERNÁNDEZ et al. [2008].

No entanto, a utilização de técnicas mais avançadas como o *laser scanning* ou fontes de informação como as imagens aéreas digitais ou as imagens de satélite não permitem, pelo seu advento recente, um estudo alargado no tempo pelo que a sua aplicação apenas permite determinar dados para épocas mais actuais. Quando se pretende conhecer a evolução do fenómeno de forma mais consistente e que permita a determinação mais apoiada de estatísticas e parâmetros ambientais, é importante utilizar a janela temporal o mais abrangente possível. A utilização de fotografias aéreas antigas é por isso fundamental na medida em que, muitas vezes, são a única fonte de informação mais antiga acerca do terreno [HAPKE et al., 2005]. No caso de Portugal, esta janela temporal pode mesmo ser alargada até aos anos 30 do século XX, em algumas regiões.

II. Fundamentos teóricos

Objecto de estudo - Movimentos de vertente

Ao longo da História, os movimentos de vertente têm constituído a causa de muitas catástrofes, sendo, por vezes e em algumas regiões do globo, responsáveis por um número elevado de vítimas mortais e consideráveis danos materiais. São por isso fenómenos de grande importância social e económica.

SCHUSTER et al. [1996] indica que, para os movimentos em terra, são vários os factores que têm contribuído para o aumento do número de movimentos verificado por todo o globo. Como factores que promovem a ocorrência de movimentos em arribas rochosas litorais, surge o aumento de urbanização e desenvolvimento em áreas propensas a movimentos, e o aumento da precipitação regional causada pela alteração dos padrões climáticos. Neste caso, os movimentos que ocorrem nas arribas podem promover danos materiais e humanos graves na base da arriba (local de utilização preferencial por parte dos utilizadores da praia), por acumulação do material movimentado da face e da crista da arriba, e, no topo da arriba, a perda de material traduz-se em perda de propriedade e, por vezes, de bens materiais, podendo ainda originar danos em infra-estruturas no subsolo, como sejam esgotos ou colectores de água.

Vários exemplos de danos materiais e humanos causados pela ocorrência de movimentos em arribas no litoral encontram-se documentados como a destruição total de um restaurante situado na base de arriba numa praia perto de Lagos, em Junho de 1997, sem registo de vítimas, na sequência de um grande movimento envolvendo um volume de terras de $3 \times 10^4 \text{ m}^3$, a morte de um pescador por ocorrência de uma queda de blocos em Março de 1998, ou a destruição parcial de quatro habitações por colapso da arriba [TEIXEIRA, 2006].

Para a compreensão deste fenómeno, é importante, então, aprofundar o conhecimento acerca dos tipos de movimentos que se podem verificar em vertentes, e que processos e mecanismos os controlam.

Ao longo deste trabalho, e na maior parte da literatura original de língua portuguesa, é utilizado o termo “movimento” ou “movimento de massa” para referir o que, na literatura anglo-saxónica, é normalmente denominado “*landslide*”. Movimento ou movimento de massa pode ser definido como o movimento de uma massa de rocha, detritos ou terra ao longo de um declive, por influência da gravidade [GUZZETTI et al., 2005]. No entanto, o termo inglês *landslide* abrange um significado muito maior do que o sugerido pelos seus componentes (*land+slide*) uma vez que os movimentos não estão limitados a terra (*land*) e, da mesma forma, ocorrem outros movimentos que não são, tal como a tradução directa o indica, deslizamentos (*slides*) [CRUDEN et al., 1991]. De facto, a utilização do termo *landslide* está ainda associada a algumas dificuldades devido à complexidade e natureza variável do fenómeno [CHACÓN et al., 2006].

Tipologia e processos de movimentos

No contexto geomorfológico, qualquer movimento de vertente pode ser descrito e classificado usando dois substantivos: o primeiro descreve o tipo de movimento e o segundo descreve o material envolvido. Os materiais envolvidos em movimentos de massa de vertentes podem ser “rocha”, “detritos” e “terras”, podendo os movimentos ser do tipo queda, tombamento, deslizamento, expansões e fluxos [TURNER AND JAYAPRAKASH et al., 1996].

Apresenta-se na Tabela 1 uma classificação de movimentos de massa e a relação entre o material envolvido e a tipologia de cada movimento.

É importante salientar que um movimento de massa de vertente é sempre mais complexo do que a sua designação poderá sugerir. De facto, para além desta dupla caracterização, a designação do movimento pode ser completada, à medida que surgem mais dados acerca de determinado movimento, como por exemplo, um indicador temporal e a localização espacial. A título de exemplo, o termo “queda de blocos” implica que o material movimentado seria, no início do movimento, uma massa rochosa, ainda que o material resultante depois seja constituído por detritos rochosos. Se o movimento é complexo e o tipo de movimento se altera com a sua progressão, o material deverá ser descrito no início de cada movimento sucessivo.

Chama-se ainda a atenção para a muito ilustrativa compilação de esquemas dos vários tipos de movimentos de vertente (Figura 4), classificados de acordo com VARNES [1978].

Tabela 1- Classificação abreviada de movimentos de massa em vertentes (adaptado de TURNER AND JAYAPRAKASH ET AL. [1996]).

Tipo de Movimento	Tipo de Material		
	Maciço rochoso	Solos coesos	Solos finos
Queda	Queda de blocos	Queda de detritos	Queda de terras
Tombamento	Tombamento de blocos	Tombamento de detritos	Tombamento de terras
Deslizamento	Deslizamento de blocos	Deslizamento de detritos	Deslizamento de terras
Expansões	Expansões de blocos	Expansões de detritos	Expansões de terras
Fluxo	Fluxo de blocos	Fluxo de detritos	Fluxo de terras

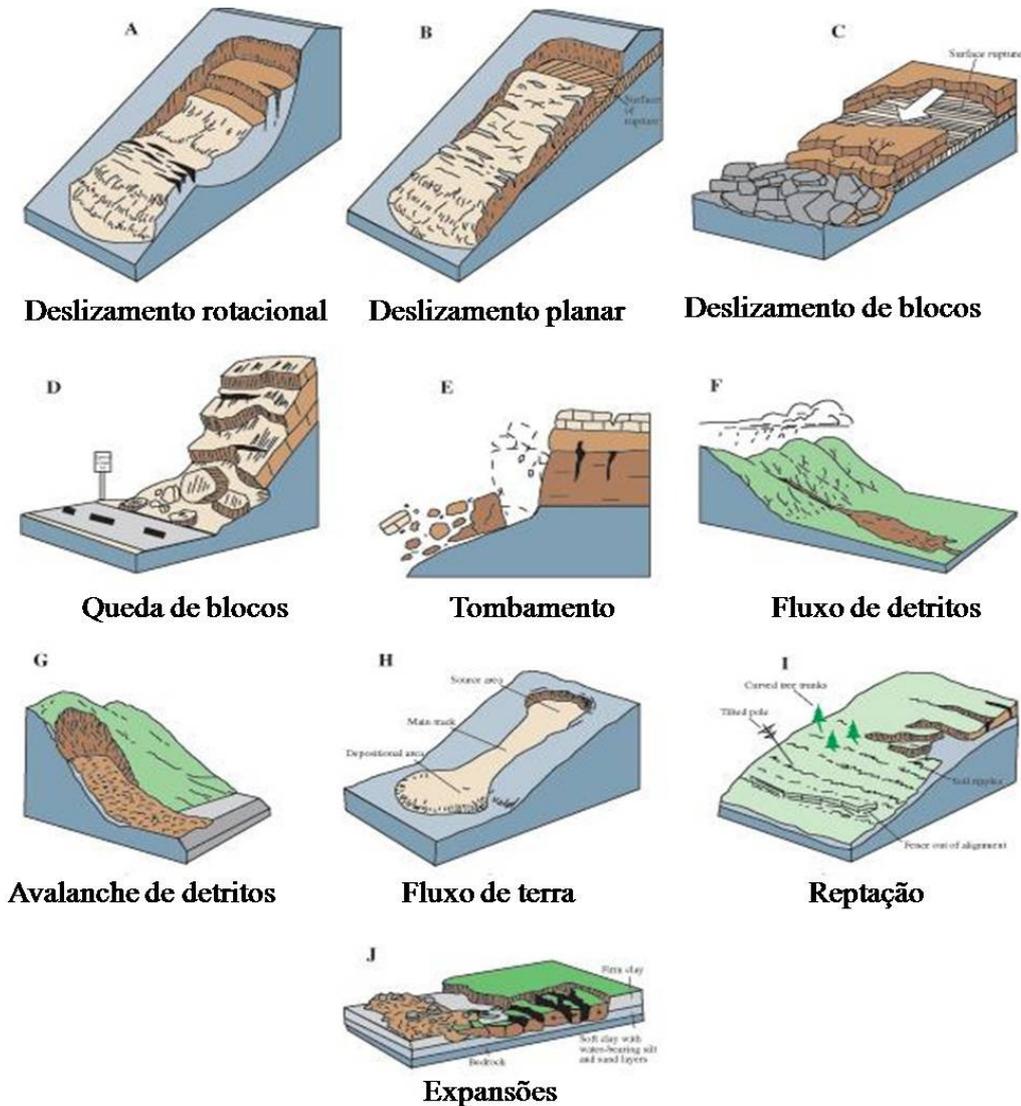


Figura 4: Tipologia de movimentos de vertente segundo a classificação de VARNES [1978].

Na elaboração de um inventário de movimentos, é fundamental a correcta classificação dos movimentos a constar do registo, o que requer algum conhecimento acerca das características próprias de cada tipo de movimento, principalmente no que respeita a sua cinemática e morfologia.

Embora de forma breve, é pertinente descrever cada um dos tipos de movimentos que se pode encontrar, baseado em TURNER AND JAYAPRAKASH et al. [1996],:

- **Quedas** – ocorre o destacamento de solo ou rocha ao longo de uma superfície inclinada, num movimento rápido a extremamente rápido. Muitas vezes estão associados à remoção de material coesivo da base de vertentes ou a rochas na base de arribas que sofrem ataque de ondas ou acção erosiva de linhas de água;
- **Tombamento** – dá-se a rotação, para fora da vertente, de uma massa de solo ou rocha em torno de um ponto ou eixo abaixo do centro de gravidade da massa movimentada, originado normalmente pela gravidade exercida pelo material acima da massa. São movimentos extremamente lentos a extremamente rápidos, muitas vezes acelerando ao longo do deslocamento.
- **Deslizamento** – o movimento dá-se ao longo do declive (vertente) de uma massa rochosa ou solo ocorrendo predominantemente em superfícies de ruptura. O primeiro sinal de movimento é o aparecimento de fendas na superfície topográfica original ao longo das quais a escarpa principal do deslizamento se formará. A massa movimentada poderá deslocar-se para além da base da superfície de ruptura cobrindo a superfície inclinada original.
É importante fazer a distinção entre deslizamentos rotacionais e planares/translacionais, pois as diferenças são significativas para a análise de estabilidade e respostas de controlo. Os deslizamentos rotacionais movem-se ao longo de uma superfície de ruptura curva ou côncava. No caso de os deslizamentos planares, o material é movimentado ao longo de uma superfície de ruptura plana, mais superficialmente que os rotacionais. Enquanto a rotação de um deslizamento rotacional tende a restaurar o equilíbrio na massa movimentada, a translação pode ainda estar activa se a superfície de separação for suficientemente inclinada.
- **Fluxo** - movimento contínuo no espaço em que as superfícies de deslizamento são de curta duração, pouco espaçadas e usualmente não ficam preservadas. A distribuição e velocidades da massa deslocada assemelham-se a um líquido viscoso. Os deslizamentos de detritos podem tornar-se fluxos de detritos extremamente rápidos ou avalanches de detritos à medida que o material em movimento perde coesão, ganha água ou encontra declives mais acentuados.
- **Expansões** – movimentos súbitos em camadas siltosas ou arenosas com grande conteúdo em água, às quais se sobrepõem camadas argilosas homogéneas ou que

tenham sido sobrecarregadas. Podem resultar da liquefacção, fluxo e extrusão de material mais brando. São movimentos complexos mas bastante comuns.

Normalmente, para a ocorrência de movimentos de massa verifica-se uma ou várias causas, de natureza diversa (geológica, humana, morfológica, etc.) mas, no que concerne o mecanismo desencadeante, ele é geralmente apenas um. Por definição, o mecanismo desencadeante consiste num estímulo externo como precipitação intensa, gelo/degelo rápido, sismos, erupções vulcânicas, ondas de tempestades, ou erosão fluvial rápida, que causa uma resposta quase imediata na forma de um movimento de massa na vertente [TURNER AND JAYAPRAKASH et al., 1996]. A variedade de causas que se podem verificar simultaneamente, a combinação das causas e alterações dos materiais podem levar à incapacidade de identificar directamente um determinado mecanismo como factor desencadeante.

No caso das arribas litorais, os mecanismos desencadeantes podem ser a precipitação intensa, a alteração do nível da água do mar (que pode significar a acção directa da ondulação marítima na base das arribas onde, anteriormente, haveria protecção), e sismos (à região do Algarve são atribuídas intensidades sísmicas máximas de 8 e 9, numa escala de 4 a 10, referentes a dados registados entre 1901 e 1992 [Atlas do Ambiente]).

Cartografia de movimentos e mapas-inventário

É importante referir que a grande maioria da literatura publicada sobre cartografia de movimentos, como a apresentada nesta secção, se refere quase em exclusivo a movimentos de vertentes em terra, e não em morfologias de arribas costeiras em particular. No entanto, muitas das considerações tecidas são válidas para esta última situação, pelo que se torna relevante transmiti-las.

GUZZETTI et al. [2005] refere que o valor de um mapa depende directamente do seu conteúdo informativo, que, por sua vez, depende do tipo de dados, da sua qualidade, e de que forma essa informação é nova e essencial.

Sendo os movimentos de vertente um fenómeno complexo, que depende de inúmeros factores, é importante a compilação de toda a informação que, ao longo do tempo, se vai reunindo e determinando. Existem diferentes tipos de mapas que interessam ao estudo dos movimentos de vertente e que vão sendo gerados desde as fases preliminares até à determinação da perigosidade e riscos. Segundo CHACÓN et al. [2006], estes podem ser divididos em 4 classes: mapas-inventário, mapas de susceptibilidade, mapas de perigosidade e mapas de risco.

De uma forma breve, de acordo com CHACÓN et al. [2006], um mapa de susceptibilidade a movimentos consiste na classificação de declives numa região relativamente à sua estabilidade, em categorias de estável a instável, sem qualquer implicação temporal; um mapa de perigosidade representa a probabilidade de ocorrência de movimentos dentro de um determinado período de tempo numa região onde potencialmente poderá ter lugar o fenómeno; um mapa de risco combina a probabilidade de ocorrência com a análise de possíveis consequências, mostrando o custo anual esperado por danos causados por movimentos.

Os mapas-inventário de movimentos podem ser construídos com base em diferentes tipos de informação, isto é, um mapa-inventário de movimentos pode ser:

- do tipo histórico, baseado no registo de movimentos detectados numa determinada data (efectuando o levantamento de todos os movimentos - através de reconhecimento de campo, voo fotográfico, etc.);
- ligado a um único evento desencadeante de grande magnitude (como por exemplo, Sismo de Northridge, fusão de neves na Umbria, passagem do furacão Mitch na Guatemala);
- multi-temporal.

Neste trabalho, compilou-se um mapa-inventário multi-temporal de movimentos de vertente, que, segundo GUZZETTI et al. [2005], é a forma mais avançada de inventário de movimentos. Num mapa-inventário básico são representadas as localizações e fronteiras dos movimentos registados [CHACÓN et al., 2006]. Num mapa multi-temporal, existem ainda informações pertinentes acerca de cada movimento individual e a sua recente evolução no espaço e no tempo. São mapas raros e de execução muito demorada [GUZZETTI et al., 2006] mas essenciais previamente a qualquer análise de ocorrência de movimentos e da sua relação com condições ambientais [DUMAN et al., 2004], constituindo o primeiro passo em qualquer programa de mitigação [CHACÓN et al., 2006]. São indubitavelmente uma ferramenta fundamental no ordenamento do território e no apoio à decisão, permitindo compreender a evolução da paisagem e a susceptibilidade e perigosidade associadas ao fenómeno, apoiar de forma mais eficiente a definição de políticas de protecção civil [GUZZETTI et al., 2006] e o desenvolvimento de sistemas de aviso e de gestão de emergências [DEVOLI et al., 2007].

A compilação de um mapa-inventário de movimentos passa pela reunião de informação de diferentes naturezas e fontes [GUZZETTI, 2005], tais como:

- interpretação sistemática de fotografias aéreas, independentemente da escala, data e formato;
- informação de movimentos na superfície topográfica recolhida através de medições *in situ*, levantamentos topográficos, tecnologias de detecção remota, etc.;
- dados de reconhecimento de campo, preferencialmente após um evento despoletador de movimentos (aplicável especialmente no caso de movimentos em terra);

- informação histórica acerca de movimentos, obtida por pesquisa em arquivos e registos bibliográficos.

A qualidade e a completude de um mapa deste tipo afectam directamente a qualidade das estimativas, pelo que é importante avaliar a qualidade dos mapas-inventário [GUZZETTI et al., 2006]. Segundo GUZZETTI et al. [2006], não foram ainda definidos critérios absolutos para a avaliação de qualidade. No entanto, é fundamental compreender as dificuldades inerentes à compilação de um inventário de movimentos, não só na detecção de ocorrências mas também na caracterização individual das mesmas:

- indefinição na determinação da data de ocorrência;
- quão “frescos” se apresentam os movimentos;
- repetição da morfologia de movimento na região;
- tipo, qualidade e escala das fotografias aéreas e cartografia de base, bem como a escala do mapa final;
- experiência do intérprete em análise de fotografia aérea [GUZZETTI, 2006];
- quantidade e diversidade de recursos materiais disponíveis, *software* utilizado;
- complexidade morfológica e geológica da região, tipos de uso de solo e alterações nessa estrutura;
- particularmente em inventários multi-temporais, dificuldade no registo de movimentos reactivados na mesma localização espacial em tempos distintos [DEVOLI et al., 2007].

Outro tipo de mapa bastante interessante, e que foi também realizado neste trabalho, é o mapa de densidade de movimentos, que tem como objectivo a quantificação da abundância de movimentos através da sua distribuição espacial [GUZZETTI, 2005], ou mapa de incidência espacial de movimentos, um dos mais emergentes tipos de informação projectada em SIG [CHÁCON et al., 2006].

GUZZETTI [2005] define a densidade de movimentos (D) como a proporção $\frac{A_L}{A_M}$, onde A_L representa a área de terreno envolvida em movimentos, e A_M , representa a área da unidade cartográfica usada para calcular a densidade. A densidade de movimentos é um valor que se situa entre 0 e 1, onde o 0 representa uma unidade sem movimentos [GUZZETTI, 2005]. A unidade cartográfica usada pode ser definida através de regiões ou zonamentos geológicos ou geomorfológicos, bem como através de zonamentos baseados em identificação de factores (susceptibilidade a instabilidade, declives, etc.) e atribuição de “pesos” [CHÁCON ET AL., 2006].

Ao contrário dos mapas-inventário, que informam acerca da localização de movimentos e suas características, os mapas de densidade de movimentos não deixam áreas por

classificar [GUZZETTI, 2005]. Segundo o mesmo autor, os mapas de densidade permitem ter uma visão geral da distribuição da ocorrência de movimentos em regiões extensas, oferecem uma primeira aproximação à abundância e/ou actividade de movimentos, sendo muito úteis na monitorização frequente destas regiões.

A perda de resolução causada pela ausência da localização específica dos movimentos ocorridos é compensada pela maior facilidade de interpretação do conteúdo do mapa e pela menor incidência de erros cartográficos. Este mapa é assim muito adequado à interpretação por parte de decisores e utilizadores não especialistas uma vez que rapidamente se conclui que onde a densidade é baixa, os movimentos são pouco frequentes [GUZZETTI, 2005].

Ainda de acordo com GUZZETTI [2005], a utilização conjunta de mapas de densidade e mapas-inventário de movimentos, feita de forma muito eficiente num SIG, potencia a relevância da informação para outros fins como o ordenamento territorial e a tomada de decisão em várias temáticas.

Métodos e técnicas

Processamento fotogramétrico

A actividade básica de um intérprete de fotografia aérea é a identificação de objectos, características, fenómenos e processos, numa tarefa principalmente qualitativa, mas também é possível extrair medições de uma fotografia aérea, obtendo-se informação quantitativa. As técnicas que um intérprete utiliza na extracção de informação quantitativa são menos rigorosas que as usadas por fotogrametristas, que aplicam modelos rigorosos e instrumentos mais sofisticados nas suas medições [ESTES, 1996].

Muitos autores definem fotogrametria como a ciência e a arte de obter medições rigorosas a partir de fotografias [TATE, 1998], através de processos de registo, medição e interpretação de imagem e padrões [WOLF, 2000]. BERBERAN [2003] define a fotogrametria como a arte, ciência e tecnologia usadas para coligir informação fiável, quer métrica quer semântica, acerca de objectos, por meio da interpretação de imagens obtidas através de registos de radiação visível.

A importância da utilização da fotogrametria quando se pretende retirar informação numérica rigorosa acerca de determinado fenómeno e integrá-la com informação de outros tipos e outras fontes de forma válida, é facilmente demonstrada pelas características da informação produzida através desta técnica: qualidade métrica conhecida e controlada, referenciada, classificada, adquirível directamente para suporte

electrónico e visando o povoamento de sistemas de informação geográfica [BERBERAN, 2003].

É fundamental acrescentar que dadas as características ópticas inerentes a uma fotografia aérea vertical e as anomalias próprias dos componentes da câmara que a obtém, uma fotografia não é um mapa e não pode ser usada como tal [ESTES, 1996]. A fotografia é uma projecção central, ao contrário do mapa, que é um produto de uma projecção ortográfica [ESTES, 1996].

É importante salientar que os processos descritos ao longo deste trabalho dizem respeito ao processamento fotogramétrico digital, isto é, utilizando fotografias aéreas digitalizadas ou imagens aéreas digitais num software específico. O processamento das fotografias analógicas poderia também ser executado de forma analógica ou analítica, mas esses métodos encontram-se já em desuso. Apesar de com o desenvolvimento da fotogrametria digital, mudar o formato das fotografias, aumentar a produtividade e diminuir o tempo de execução da maioria das operações, a formulação matemática que rege a fotogrametria é válida para as três técnicas e, de uma forma implícita, a recuperação das orientações está sempre presente [BERBERAN, 2003].

Fotografias aéreas

Uma das principais aplicações da fotogrametria é o processamento de fotografias aéreas com o fim de extrair informações planimétricas e altimétricas acerca da superfície topográfica. Ultimamente também as imagens aéreas digitais e as imagens de satélite têm constituído material para a fotogrametria moderna [TATE, 1998].

As fotografias aéreas analógicas são obtidas através de câmaras métricas aéreas analógicas, que produzem fotografias em suporte de filme [REDWEIK, 2007], que possuem lentes de elevada qualidade geométrica. As câmaras métricas aéreas obtêm sucessões de fotografias muito rapidamente, segundo especificações exactas [WOLF, 2000], e são instaladas na fuselagem inferior da aeronave que as transporta. Associadas às câmaras estão, obviamente, lentes de grande qualidade, cujas distorções são conhecidas com enorme rigor, através de testes e calibrações efectuadas pelos fabricantes, normalmente instituições e empresas com largos anos de experiência. Para cartografia, as lentes mais utilizadas actualmente têm uma distância focal de 152 – 153 mm e cobrem um formato de imagem de 23 cm por 23 cm, sendo esta a combinação mais favorável à estabilidade geométrica e às escalas fotográficas mais usuais. Algumas câmaras mais antigas, apresentavam distâncias focais maiores e formatos mais reduzidos de fotografia. Um constituinte fundamental do conjunto de instrumentos necessários à cobertura aerofotogramétrica analógica é a moldura contra a qual é planificado o filme durante a exposição através de um sistema de vácuo, e que contém as marcas fiduciais que irão ficar registadas em cada fotografia (Figura 5).

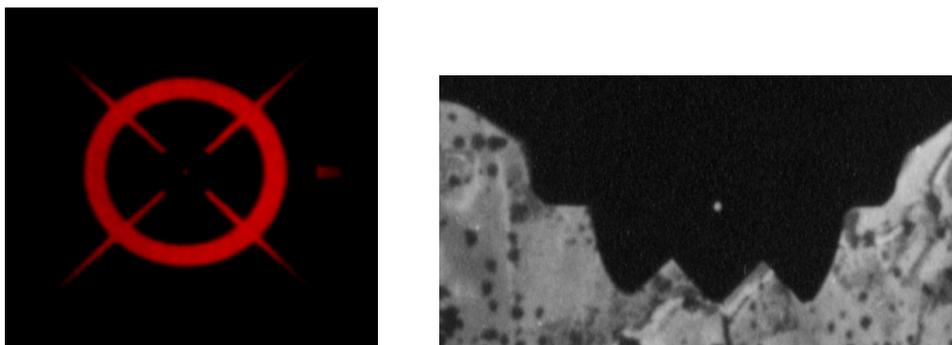


Figura 5: Marcas fiduciais em fotografias aéreas recentes, à esquerda, e mais antigas, à direita.

Após o seu fabrico e antes da utilização, as câmaras aéreas são cuidadosamente calibradas para determinar com grande precisão os fundamentais parâmetros de orientação interna das fotografias captadas pela câmara [WOLF, 2000]. Para além de se conhecer a distorção causada pelo sistema de lentes, denominada distorção radial, e a distorção causada pela descentragem das diversas lentes, distorção tangencial, a calibração fornece a constante da câmara, c (ou distância focal) e as coordenadas fotográficas do ponto principal, x_0 e y_0 [REDWEIK, 2007]. Também são conhecidas nesta operação as coordenadas das marcas fiduciais, x e y , que definem a referência posicional bidimensional para o ponto principal, bem como para todos os pontos imagem na área da fotografia [WOLF, 2000].

No caso das imagens originalmente digitais, a situação é bastante diferente. Uma imagem digital consiste numa matriz de números inteiros quantificando níveis de cinzento, ou graus de luminosidade, que, na quantidade de milhões, quase apresentam a continuidade de uma imagem tradicional [WOLF, 2000]. A principal característica destas imagens é a sua resolução geométrica ou espacial que se pode definir como a dimensão física de cada pixel no objecto ou *ground sample distance* (GSD) (para a mesma área de imagem, maior resolução geométrica significa maior número de pixels). Actualmente, embora não se encontrem já em produção, as câmaras analógicas continuam em utilização, coexistindo com as mais recentes câmaras digitais, não as substituindo [LEBERLE et al., 2002]. Estas são instrumentos de maior custo mas têm associadas três importantes vantagens: a grande constância na orientação interna [REDWEIK, 2007], proporcionada por uma distância focal virtual, fornecida pelo fabricante e obtida aquando da calibração, a inexistência de marcas fiduciais, e a dispensa da digitalização das imagens, operação necessária para possibilitar o processamento fotogramétrico digital de fotografias analógicas.

Tanto as fotografias analógicas como as imagens digitais para fotogrametria aérea com fins cartográficos devem ser obtidas de acordo com especificações de qualidade muito concretas. De acordo com o Artigo 14º do Regulamento Técnico das Coberturas Aerofotográficas para Fins Civis (RTCAP), publicado pelo Instituto Geográfico Português, os desvios do eixo óptico da câmara em relação à vertical não podem exceder 4 graus e as inclinações relativas entre duas exposições consecutivas não podem exceder 6 graus. Só em casos excepcionais a fotografia será verdadeiramente vertical,

devido a pequenas variações da atitude da aeronave que transporta a câmara; no entanto, dentro dos limites indicados, estas variações são bem resolvidas pelas equações e ajustamento fotogramétricos, pelo que se pode considerar que se está em presença de fotografias verticais.

Existem duas importantes características das fotografias aéreas a salientar: a inconstância da escala ao longo de cada fotografia e o deslocamento devido ao relevo. Não se pode falar, numa fotografia, de uma “escala da fotografia”, mas apenas de uma escala média, uma vez que cada ponto da fotografia estará a diferentes distâncias verticais do centro de projecção [BERBERAN, 2003]. Em terreno mais acidentado, esta situação agrava-se, podendo mesmo dar-se a oclusão de elementos da superfície topográfica por outros.

O deslocamento devido ao relevo, que consiste no desfasamento ou desvio da posição fotográfica de uma imagem causada pelo relevo do objecto, isto é, acima ou abaixo da superfície de referência vertical [WOLF, 2000], é de extrema importância pois é a sua existência que impede a obtenção de informação métrica directamente sobre a fotografia.

Orientações fotogramétricas

A geometria projectiva que é a base da fotogrametria é a mesma, quer se trate de fotografias analógicas ou digitais [MIKHAIL, 2001]. Assim, as considerações que nas próximas páginas se fazem acerca do processamento fotogramétrico são válidas para fotografias aéreas analógicas e imagens aéreas digitais (exclui-se, como introduzido anteriormente, o caso da orientação interna), pelo que, excepto quando assinalado em contrário, o termo imagem referir-se-á a ambos os materiais.

No momento de obtenção da imagem, existe uma relação espacial única entre a imagem formada dentro da câmara e o objecto fotografado [REDWEIK, 2007], relação que é própria de cada imagem e fica definida com um conjunto de parâmetros. Estes parâmetros são obtidos através das operações de orientação interna e orientação externa, que consistem na recuperação da posição do plano imagem dentro da câmara e da definição do feixe perspectivo, e da recuperação da posição da câmara e orientação do eixo fotográfico no espaço objecto. Uma vez conhecidos os parâmetros já atrás referidos é então possível a obtenção da informação geométrica rigorosa das imagens.

Existem, claramente, dois sistemas de referência presentes nestas operações: o sistema de referência fotográfico e o sistema de referência objecto ou terreno. No que concerne estes dois sistemas, a fase de orientação interna consiste em relacionar o referencial fotográfico com um terceiro sistema, o sistema de referência instrumental, com o qual se fazem as observações [BERBERAN, 2003], neste caso as medições de coordenadas na imagem. A relação entre estes dois sistemas é obtida, para cada imagem individualmente, através da medição das coordenadas das marcas fiduciais, cujos

valores apresentam coordenadas (*linha,coluna*), com unidades pixel (sistema de referência instrumental). Relembrando que no certificado de calibração estão registadas as coordenadas dessas mesmas marcas fiduciais no sistema de referência fotográfico, com base nesse conjunto de pontos comuns conhecidos em dois sistemas de referência, estabelece-se a relação de transformação entre os dois sistemas, ficando assim definida a posição original da imagem na câmara aérea. Matematicamente, o estabelecimento dessa relação consiste na determinação dos parâmetros de uma transformação plana afim que, com recurso a 4 marcas fiduciais, será a de 6 parâmetros. Para um ponto genérico *a*, de coordenadas (x_a, y_a) e (X_a, Y_a), em dois sistemas de referência:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & e \\ d & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \end{bmatrix}$$

onde *a*, *b*, *c*, *d*, *e* e *f* são os parâmetros de transformação, que correspondem a duas escalas, uma ao longo de cada eixo, e o enviesamento que possa existir entre os eixos dos dois sistemas, uma rotação e duas translações.

Falta ainda conhecer a relação entre o sistema de referência fotográfico e o sistema de referência objecto, que será recuperada por meio da operação de orientação externa. Após esta operação, serão conhecidos seis parâmetros fundamentais, únicos para cada imagem: os três ângulos Ω , Φ , κ , que definem a atitude da aeronave, e por conseguinte, da câmara, no momento de obtenção da imagem, e as três coordenadas X_0 , Y_0 , Z_0 do centro de projecção de cada imagem relativos a um sistema de coordenadas objecto.

Actualmente, já é possível conhecer a orientação externa de cada imagem de modo directo. Se acoplado à aeronave que executa o voo fotográfico estiver um sistema GPS/IMU, são automaticamente registados dados pelo receptor GPS que, após processamento, permitem conhecer as coordenadas do centro de projecção no instante de obtenção de cada imagem, definidas a partir da posição X , Y , Z da aeronave na sua trajectória no mesmo instante. Dos dados registado pela unidade de medição inercial que controla o movimento associado é igualmente possível determinar a atitude do avião, também no mesmo instante.

No entanto, e dado que a utilização deste sistema é ainda recente, para o processamento de imagens menos recentes ou que não tenham sido obtidas num voo com GPS/IMU é importante conhecer o método indirecto de obtenção destes parâmetros, que consiste na recuperação da orientação externa de forma analítica [REDWEIK, 2007]. Para relacionar os dois sistemas em causa, são necessários pontos de controlo que estabeleçam a ligação entre a imagem e a superfície do terreno, os pontos fotogramétricos. Estes pontos podem ser elementos naturais do terreno, indubitavelmente identificáveis, ou locais assinalados artificialmente antes do voo fotográfico (para que constem nas fotografias

aéreas obtidas). Normalmente, são elementos conspícuos do terreno, bem identificados e visíveis nas fotografias aéreas onde estão representados, e dos quais se conhecem as coordenadas no sistema de referência objecto, usualmente por coordenação topográfica no campo.

No caso mais simples, em que se pretende processar um par ou um conjunto pequeno de imagens, a operação de orientação externa pode ser facilmente realizada imagem a imagem, desde que, para cada imagem ou par de imagens, esteja disponível o mínimo de três pontos fotogramétricos. Estes deverão ter uma distribuição não colinear na imagem. Convém sublinhar que a unidade de trabalho nesta operação, independente do número de imagens ou dos modelos que possam ser formados entre elas, é uma só imagem [BERBERAN, 2003].

No caso de uma faixa ou um bloco de imagens, a orientação externa será mais facilmente determinada através da operação de triangulação aérea ou aerotriangulação, que se desenvolve de seguida. Após o processamento completo, todos os pontos de cada imagem processada ficam completamente posicionados no espaço objecto [REDWEIK, 2007].

A precisão destas operações vai depender do número de imagens em que o mesmo ponto é medido, da precisão dos dados de base, da distribuição dos pontos fotogramétricos no bloco de imagens e da quantidade de pontos fotogramétricos utilizados [REDWEIK, 2007]. A aplicação da operação de aerotriangulação é bastante precisa e poderá, eventualmente, retribuir melhores resultados do que a primeira aproximação, especialmente em blocos ou faixas cuja geometria seja um pouco menos favorável. Na prática, esta assumpção pode não corresponder directamente à realidade, uma vez que se a geometria se afastar bastante de uma figura geométrica mais ou menos regular (quadrilátero, por exemplo), a aerotriangulação dificilmente resolverá o ajustamento das imagens com a precisão desejada.

A Figura 6 mostra a relação entre a imagem e o objecto no momento de obtenção da imagem. Facilmente se verifica que a imagem não só tem uma origem distinta do sistema de referência terreno X, Y, Z como os três eixos que formam o seu sistema de referência x, y, z estão rodados relativamente ao primeiro. Assim, tem que existir uma fase de cálculo intermédia na ligação entre os dois sistemas, que consiste na utilização de um sistema de coordenadas auxiliar x', y', z' , que é paralelo ao sistema de referência objecto mas tem a mesma origem que o sistema fotográfico (Figura 6).

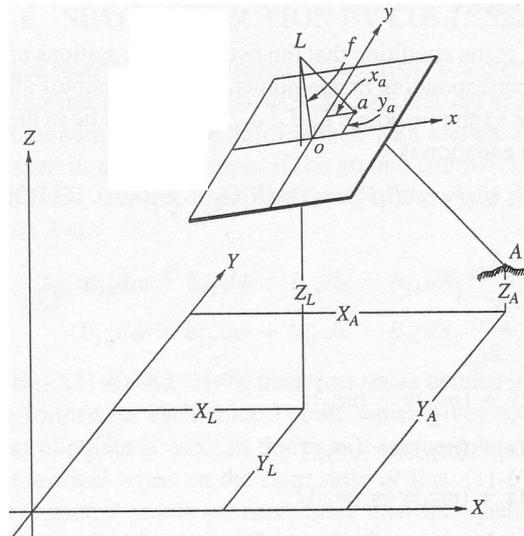


Figura 6: Posição da imagem rodada relativamente ao sistema de referência objecto (adaptado de MIKHAIL [2001]).

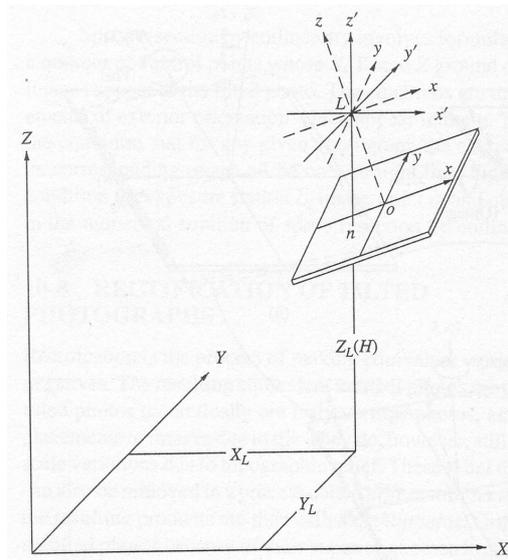


Figura 7: Condição de colinearidade entre câmara, imagem e terreno [WOLF, 2001].

Como se verifica na Figura 7, assumindo a condição teórica de que a luz reflectida pelo ponto A no terreno, propagando-se em linha recta, irá passar pelo centro da lente L e dar origem à imagem a do referido ponto na imagem [BERBERAN, 2003], esta colinearidade é expressa por

$$x = x_0 - c \frac{x' - x'_0}{z' - z'_0}$$

$$y = y_0 - c \frac{y' - y'_0}{z' - z'_0}$$

Falta então relacionar o sistema auxiliar x' , y' , z' com o sistema terreno. É necessário aplicar rotações no sistema auxiliar. Os três ângulos, já indicados como Ω , Φ , κ , definem univocamente as relações angulares entre os eixos de um e outro sistema. Para que os dois sistemas fiquem paralelos são aplicadas três rotações sequenciais: de ângulo Ω no eixo dos XX , de ângulo Φ no eixo dos YY e de ângulo κ em torno do eixo dos ZZ . É importante sublinhar que cada uma destas três rotações afecta os três eixos da imagem, e é definida matematicamente pela matriz de rotação R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Assim, o sistema de referência auxiliar x' pode ser escrito em função de X , através de R , ou seja, $R^T \cdot X = x'$. Pode-se então estabelecer a relação entre as coordenadas fotográficas e as coordenadas terreno através das equações da colinearidade:

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Ainda se pode exprimir as mesmas equações, mas em ordem às coordenadas objecto, considerando intrinsecamente nos cálculos a escala existente entre o sistema de coordenadas fotográfico e o sistema auxiliar:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) - r_{13}.c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}.c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) - r_{23}.c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}.c}$$

A condição de colinearidade poderá não ser rigorosamente coincidente com a realidade, devido a desvios dos raios luminosos e outras simplificações, mas nos modelos matemáticos utilizados no processamento podem ser introduzidos parâmetros adicionais que melhor modelam os erros associados [BERBERAN, 2003] à realidade fotográfica.

REDWEIK [2007] apresenta um conjunto de considerações importantes acerca das implicações das equações da colinearidade:

- a cada ponto terreno corresponde um e um só ponto imagem;
- a cada ponto imagem correspondem infinitos pontos terreno (todos aqueles que se situam sobre o raio luminoso que atravessa o centro de projecção e o ponto imagem), pelo que para determinar as três coordenadas terreno de um ponto será necessário medi-lo em mais do que uma imagem, isto é, será necessário incluir no processamento duas ou mais imagens em que esse ponto seja visível.

As operações descritas, para um par de imagens e, principalmente, para a aerotriangulação, desenvolvem-se num conjunto de procedimentos que, para um operador não experiente, poderão ser complexos e de difícil execução. Chama-se também a atenção para a importância do controlo de qualidade ao longo de todo o processo; é fundamental conhecer os resíduos das medições efectuadas, conhecer, no fim do processo, a precisão estimada pelos métodos matemáticos utilizados nos cálculos, e, também de extrema importância, saber interpretar a precisão dos resultados de cada fase face às circunstâncias dos dados de entrada e ajuizar do seu valor.

Aerotriangulação

A aerotriangulação, ou triangulação aérea, é uma operação que permite orientar a cobertura fotográfica de uma zona de terreno, de modo a formar um modelo completo composto por vários modelos parciais, com um mínimo de pontos fotogramétricos [REDWEIK, 2007]. Os resultados desta operação, calculados através de ajustamento matemático, são os seis parâmetros de orientação externa para cada imagem que compõe o bloco ou a faixa e as coordenadas no sistema de referência terreno de todos os pontos medidos, o que pode ser bastante útil em aplicações subsequentes, como, por exemplo, constituírem pontos de apoio à restituição.

Os dados necessários à aerotriangulação não diferem dos dados referidos como necessários à operação de orientação externa isolada: definição da orientação interna de cada imagem, pontos fotogramétricos e pontos de apoio dos quais se conhecem apenas as coordenadas no sistema de referência fotográfico. A grande vantagem do cálculo de uma aerotriangulação reside precisamente na menor quantidade de pontos fotogramétricos necessários à determinação das orientações externas de cada imagem: apenas alguns modelos do bloco terão associados pontos fotogramétricos, sendo os restantes orientados à custa das orientações dos primeiros, por transporte analítico de coordenadas [REDWEIK, 2007].

Existem dois modelos funcionais de execução de uma aerotriangulação, que se distinguem pelos métodos fotogramétricos usados na determinação dos resultados: por ajustamento em bloco de modelos independentes e por ajustamento de um bloco de fotografias [BERBERAN, 2003], também conhecido por ajustamento por feixes perspectivos.

De uma forma breve, o ajustamento por modelos independentes assenta na medição de coordenadas modelo dos pontos fotogramétricos, pontos de apoio e centros de projecção [REDWEIK, 2007], uma vez que a unidade de trabalho é o modelo estereoscópico e não uma imagem individual [BERBERAN, 2003]. Uma vez que se trata de um método menos preciso que o ajustamento de um bloco de fotografias [BERBERAN, 2003] e não foi utilizado neste trabalho, remete-se o seu desenvolvimento para [BERBERAN, 2003], [REDWEIK, 2007], [MIKHAIL, 2001], [WOLF, 2000].

Neste trabalho foi usado o ajustamento por feixes perspectivivos [REDWEIK, 2007] (ou *bundle block adjustment*), que reúne num só processo de ajustamento os feixes projectivos que ligam cada ponto objecto aos correspondentes pontos nas várias imagens [LINDER, 2006]. Considerando que a imagem provém de um conjunto de raios luminosos (um feixe) que convergem para o centro de perspectiva, com posição e orientação desconhecidas no espaço, é possível, com o apoio dos pontos fotogramétricos, determinar a posição e orientação através deste método, que, segundo MIKHAIL [2001], constitui o ajustamento mais preciso e flexível.

O ajustamento por feixes perspectivivos assenta nas equações da colinearidade, cujas incógnitas são os 6 parâmetros de orientação externa das imagens, 3 parâmetros de orientação interna e as três coordenadas objecto do ponto [MIKHAIL, 2001]. As observações são as coordenadas imagem das medições.

Não sendo um modelo linear, a estimação dos parâmetros é muito complexa [REDWEIK, 2007] e é executada pelo método dos mínimos quadrados. O método requer que se conheçam os valores aproximados dos parâmetros para que se possa iniciar o cálculo, e, antes, é necessário linearizar as equações da colinearidade. Uma vez linearizadas, obter-se-ão duas equações de observação (x e y) para cada ponto medido, em cada imagem. As equações linearizadas das equações de colinearidade, formuladas para a totalidade dos pontos medidos, constituem um sistema de equações lineares cujas incógnitas serão as correcções aos valores aproximados dos parâmetros. Estas equações linearizadas têm enorme interesse na medida em que, sendo formuladas para um ponto genérico, podem servir uma série de aplicações, como seja a determinação da orientação externa de uma imagem com recurso a um mínimo de 3 pontos fotogramétricos, da orientação interna de uma imagem, com um mínimo de 5 pontos fotogramétricos, das orientações externas de um par de imagens e das coordenadas objecto de um ponto novo [REDWEIK, 2007].

Neste trabalho, foi utilizado o programa de aerotriangulação BLUH, da Universidade de Hannover, um software optimizado para ajustamento de raios projectivos em fotografias aéreas [LINDER, 2006].

Uma vez finalizado o ajustamento, é necessário validar os resultados através de avaliação da qualidade dos mesmos.

A primeira fase após a obtenção dos resultados do ajustamento consiste na execução da avaliação qualitativa, em que se analisa graficamente os resultados para a identificação

de tendências gerais e erros grosseiros; posteriormente, são aplicadas técnicas estatísticas na determinação quantitativa da qualidade do ajustamento [MIKHAIL, 2001].

A representação gráfica dos resíduos é bastante útil na medida em que, num ajustamento correcto, os erros devem estar distribuídos aleatoriamente e serem de tamanhos comparáveis. Exagerando as dimensões destes, pode identificar-se a presença de efeitos sistemáticos, representados por resíduos que apontam na mesma direcção, e de erros grosseiros, representados por resíduos cujo tamanho não é comparável aos restantes [MIKHAIL, 2001].

Para avaliar quantitativamente os resultados de um ajustamento, são usados métodos estatísticos. Aspectos como a precisão e a exactidão devem ser avaliados, cada um com a técnica estatística apropriada, de forma a garantir que a solução é válida [MIKHAIL, 2001]. É importante que a redundância seja elevada, para que a análise dos erros seja fiável [REDWEIK, 2007]. Os indicadores de qualidade estatísticos podem dividir-se em indicadores finos e grosseiros, cuja principal diferença é a possibilidade de conhecer onde e porquê existem maus resultados [REDWEIK, 2007].

A exactidão de um ajustamento pode ser avaliada através de *check points* que são pontos fotogramétricos que não foram usados como tal no ajustamento. O erro médio quadrático das diferenças entre as coordenadas calculadas e os valores conhecidos representa uma medida da exactidão da solução [MIKHAIL, 2001]. Existe ainda um parâmetro, σ_0 (*sigma naught*), que reflecte a precisão geral do ajustamento [REDWEIK, 2007]. A variância de um parâmetro, σ_p^2 , pode ser referida como quão bem determinado está o seu valor: um parâmetro com variância baixa tem o seu valor conhecido dentro de limites estreitos, enquanto uma variância elevada indica que o parâmetro não estará bem determinado na solução [MIKHAIL, 2001].

Embora requerendo mais cálculos, por serem indicadores finos, parâmetros como o desvio-padrão, fiabilidade interna e externa, elipses de erro e o formato efectivo da imagem [REDWEIK, 2007] também são bastante úteis na interpretação do ajustamento.

Modelo estereoscópico e estereorrestituição

É importante salientar que a obtenção de um modelo estereoscópico não está dependente do conhecimento dos parâmetros atrás descritos. Como é comum, através de um estereoscópio de espelhos é possível criar o modelo tridimensional de duas imagens orientando apenas relativamente as duas imagens entre si. Tal como referido, esta orientação expedita que o intérprete faz no estereoscópio consiste na orientação relativa de um modelo, isto é, reproduzir as posições das duas imagens, relativamente uma à outra, aquando da obtenção. Nesta situação, o modelo tem uma escala arbitrária e uma orientação no espaço não definida [REDWEIK, 2007].

No entanto, tal só será possível se as duas imagens tiverem sido obtidas em condições geométricas semelhantes à visão humana. À semelhança da visão humana, que é binocular, a fotogrametria tem de recorrer a imagens tiradas com sobreposição e de

pontos de vista diferentes, para conseguir a construção de um modelo tridimensional do objecto em estudo [BERBERAN, 2003]. Observando a fotografia esquerda com o olho esquerdo e a fotografia direita com o olho direito, é obtida uma visualização tridimensional do terreno [LILLESAND, 1994], desde que estejam cumpridas as condições de estereoscopia.

Na maior parte das aplicações fotogramétricas, o objectivo último é a extracção de informação tridimensional das imagens, através da vectorização de objectos georreferenciados, classificados e julgados pertinentes para determinada aplicação [BERBERAN, 2003], sendo essa operação designada por estereorrestituição.

A operação de estereorrestituição para cartografia, embora consista na materialização de elementos da superfície topográfica em linhas, pontos ou polígonos, é complexa na medida em que exige alguma experiência por parte do operador, especialmente no que concerne o registo da altimetria. Esta operação está fortemente condicionada pela experiência do operador relativamente à acuidade de visão estereoscópica, rigor de execução e, obviamente, pela experiência de foto-interpretação, pois é o operador quem decide em última instância o que restituir [MATOS, 2001].

A estimação da precisão posicional da informação geográfica vectorizada a partir de modelos estereoscópicos depende de muitos factores que se relacionam de uma forma muito complexa e até hoje nunca satisfatoriamente modelada [BERBERAN, 2003].

REDWEIK [2007] apresenta linhas orientadoras para a estimativa das precisões para restituição tridimensional em planimetria e altimetria. Relativamente a elementos naturais pontuais, isto é, não assinalados artificialmente, os valores de precisão empíricos serão:

$$\sigma_{XY} = \sqrt{\sigma^2_{XY}(sin) + \sigma^2_{XY}(indef)}$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma^2_Z(sin) + \sigma^2_Z(indef)}$$

onde *sin* se refere a pontos sinalizados e cujos valores de $\sigma_{XY} = \pm 6\mu\text{m}$ e $\sigma_Z = \pm 0.06\%_0 H$ (onde H representa a altura de voo) e *indef* significa a indefinição intrínseca na medição de objectos naturais como, a título de exemplo, esquinas de casa, muros ou vedações em que $\sigma_{XY} = 7$ a 12 cm e $\sigma_Z = 8$ a 15 cm. Para o caso da estereorrestituição linear, o erro médio de uma linha de limite de objectos terá um valor de $\pm 45\mu\text{m}$, podendo ser melhorada através de restituição com *zoom* na imagem.

A estereorrestituição da componente altimétrica de elementos lineares é $\sigma_H = 0.25\%_0 H$.

BERBERAN [2003] também apresenta uma tabela de precisões e dimensões envolvidas tendo em conta algumas especificações de voo (distância focal de 153 mm, base aérea de 23 cm e sobreposição longitudinal de 60%), da qual se apresentam os dados relativos às características próximas dos voos usados neste trabalho (Tabela 2).

Tabela 2 - Precisão e dimensões aproximadas em função da escala (adaptado de BERBERAN [2003]).

Escala foto (módulo)	Resolução (DPI ou PPP)	Dimensão pixel (μm)	Pixel terreno (m)	Precisão planimétrica (70% pixel) (m)	Passo vertical (m)	Precisão altimétrica (m)
5000	1200	21	0.11	0.07	0.18	0.09
8000	1200	21	0.17	0.12	0.28	0.14
15000	1200	21	0.32	0.22	0.53	0.26
30000	1200	21	0.64	0.44	1.06	0.53

Finalmente, também MATOS [2001] apresenta expressões para a estimação da exactidão posicional da estereorrestituição fotogramétrica digital:

$$\sigma_{XY} = N \times P \times 0.7 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_Z = N \times P \times \left(\frac{F}{B}\right) \times 0.5 \times 10^{-6}$$

onde N representa o módulo da escala média da imagem, P, a dimensão do pixel, em μm , F, a distância focal da câmara, em mm e B, a base fotográfica (distância que separa os centros de projecção de duas imagens consecutivas), em mm .

Os elementos estereorrestituídos com fins cartográficos e outros constituem informação geográfica, usualmente codificada, que pode integrar um SIG e, no caso de serem o resultado da vectorização de elementos morfológicos, podem também constituir informação de apoio à geração de modelos digitais de elevação. Segundo WOLF [2000], a maior vantagem na aquisição de informação topográfica em formato digital reside na compatibilidade directa entre esta informação e as bases de dados geográficas, muitas vezes sem necessidade de operações complementares de transformação de formatos. Outras vantagens saltam à vista no que respeita à informação adquirida desta forma: pode ser separada por temas, por relevância, constitui facilmente um dado de *input* para análises subsequentes, pode ser facilmente editada, copiada e impressa a partir de um ecrã, pode ser transmitida electronicamente, entre outras [WOLF, 2000].

Modelos digitais de elevação

Segundo CHAPLOT et al. [2005], o desenvolvimento de representações numéricas do terreno através de MDEs de elevada resolução é um dos desafios mais importantes nos estudos ambientais. São ferramentas indispensáveis a muitas análises como extracção de elementos topográficos, análises à hidrografia, análise de estabilidade de vertentes, etc. [TAKAGI, 1998].

Um modelo digital de elevação consiste na representação discreta da superfície topográfica [WOLF, 2000]. No contexto dos sistemas de informação geográfica, MATOS

[2001] define um modelo digital de terreno como qualquer conjunto de dados em suporte numérico que, para uma determinada zona, permite associar a qualquer ponto definido sobre o plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude.

É importante distinguir os vários tipos de modelos digitais da superfície terrestre que podem aparecer descritos na literatura e que, muitas vezes, estão afectados de “abusos de linguagem” na sua utilização. O termo mais comumente utilizado, o Modelo Digital de Terreno (MDT), consiste na representação do terreno “verdadeiro”, isto é, a superfície topográfica natural de uma região, sem considerar construções, árvores, etc. É ainda conhecido o Modelo Digital de Superfície (MDS) que, ao contrário do MDT, contabiliza todos os objectos implantados na superfície topográfica natural. Ambos podem ser denominados Modelos Digitais de Elevação (MDE) [REDWEIK, 2007]. Por representarem realidades distintas, os dois modelos digitais têm diferentes aplicações: na modelação da morfologia natural da região, interessará gerar ou utilizar um MDT, mas na geração de um modelo de cidade, por exemplo, obter-se-ão melhores resultados com um MDS [REDWEIK, 2007].

Para além das formas mais simples de representação do terreno, como sejam as curvas de nível ou os perfis, os formatos de MDE mais comuns são o *grid* e o *TIN*. Para a geração de ambos os modelos, é necessário ter-se adquirido um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais, a amostra primária, que pode ter distribuição regular ou irregular [REDWEIK, 2007], e de onde, posteriormente, resultará o modelo, isto é, um conjunto secundário de dados criado por um método de interpolação que propague a altitude conhecida num dado conjunto de pontos para quaisquer outros pontos da região a integrar no modelo [MATOS, 2001]. É importante a escolha do método de interpolação a aplicar a um conjunto de dados espaciais, devendo essa escolha ter em consideração os tipos de morfologia da superfície a modelar, a densidade dos dados originais, as técnicas de interpolação disponíveis aplicáveis aos dados [CHAPLOT et al., 2005], e o objectivo do modelo.

O *grid* consiste numa representação do terreno com a elevação dada a pontos distanciados de intervalos regulares [WOLF, 2000]. Quanto mais pequeno for o intervalo mais correctos serão os valores de elevação [MIKHAIL, 2001]. O *TIN*, ou *Triangulate Irregular Network*, é gerado a partir de linhas construídas entre pontos de distribuição irregular, formando um sistema de triângulos que cobrem a superfície. Cada triângulo é assumido plano, com um declive uniforme no espaço tridimensional [MIKHAIL, 2001] (Figura 8).

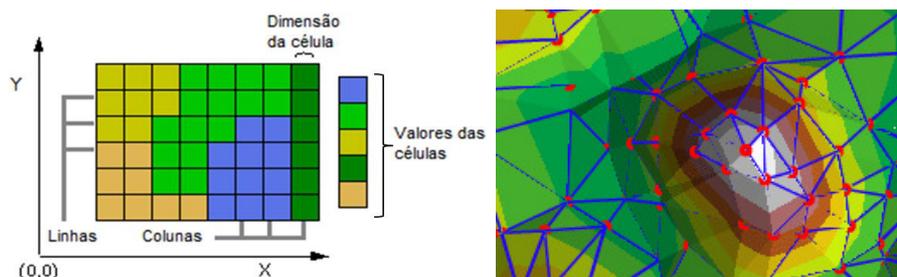


Figura 8: Formatos Grid e TIN de MDEs (adaptado de *ArcGIS Desktop Help* – ESRI).

A amostra primária pode ser obtida manual ou automaticamente, e existem vários métodos de obtenção de dados que podem ser aplicados, dependendo da aplicação final [BRIESE et al., 2002]. A aquisição manual de pontos cotados ou curvas de nível é uma tarefa morosa e dispendiosa, especialmente para regiões extensas [MIKHAIL, 2001]. Os processos associados implicam um operador experiente em estereorrestituição, uma vez que é fundamental a qualidade das medições de elevação para a precisão do modelo digital final. Cumpridos os requisitos de qualidade, e conhecida a precisão esperada, o produto final é de confiança.

Actualmente, existem outros métodos de obtenção de amostra primária como o LiDAR ou InSAR [Redweik, 2007]. Ambos os métodos produzem amostras muito densas, com elevada precisão altimétrica, mas cujas operações de processamento são ainda bastante complexas e dispendiosas.

Os métodos de obtenção automática assentam na correlação automática de imagem, através dos mesmos princípios de processamento fotogramétrico [SHEARS et al., 1995], utilizando a tecnologia de visão computacional e algoritmos de processamento digital de imagem para determinar a elevação da superfície através da correlação entre áreas de um mesmo modelo estereoscópico, tornando o processo bastante mais rápido e económico: a densidade de dados usados para representar a morfologia da superfície aumenta de um valor superior a 100 comparativamente a métodos de medição manuais [CHANDLER et al., 2001]. Por se basearem no conteúdo das imagens, geram MDS; falham eventualmente em cenários mais complicados como áreas urbanas, florestas e em áreas sem características, sendo quase sempre necessária alguma edição manual [MIKHAIL, 2001]. A presença de erros sistemáticos afecta a precisão relativa e diminui a qualidade do MDE, podendo ocorrer picos ou buracos devido a ruído nos dados ou má correlação [MIKHAIL, 2001]. No entanto, segundo CHANDLER et al. [2001], “a fotogrametria continua a representar o método mais versátil e eficiente para derivar MDEs densos de forma a representar as características geométricas da superfície de um terreno”.

Neste trabalho, foi utilizado o método automático de correlação de imagem, próprio do *software* de fotogrametria aplicado no processamento das imagens, LISA, denominado *area-based matching*, onde os valores de cinzento dentro de uma janela são correlacionados com os valores de cinzento de uma janela na outra imagem do par

[MIKHAIL, 2001]. O método é válido para imagens contínuas que apresentem textura [BERBERAN, 2003], como é o caso das imagens aéreas. A definição oficial do algoritmo em causa compara a vizinhança de um ponto, definida por uma janela de dimensão i, j pixels na imagem da esquerda (matriz de referência) com a vizinhança da posição aproximada do mesmo ponto na imagem direita (matriz de busca), fazendo mover a janela da matriz de busca ao longo das linhas e das colunas, e calculando sucessivamente um coeficiente de correlação, cujo conjunto de valores vai permitir definir a posição correcta do ponto procurado [LINDER, 2006]. No entanto, segundo o mesmo autor e criador da aplicação, pequenas modificações no algoritmo anulam a existência de uma matriz de busca *per se*: estando a trabalhar no domínio espacial do objecto (ou terreno), o algoritmo percorre as imagens ao longo do espaço, desde a posição original x, y, z até aos centros de projecção, o que significa que a intersecção entre os raios projectivos e o plano imagem ocorre ao longo da linha epipolar e são exactamente as vizinhanças dessas intersecções que constituem as matrizes de busca. MIKHAIL [2001] descreve pormenorizadamente o processo de correlação, denominada correlação normalizada, que toma em consideração diferenças na luminosidade e variância entre as imagens:

$$N = \frac{[E(m_1 m_2) - E(m_1)E(m_2)]}{[\sigma(m_1)\sigma(m_2)]}$$

onde E é o valor esperado dos valores dos pixels, na prática traduzido em valor médio, em ambas das janelas (m_1 e m_2) e σ o desvio padrão calculado em cada janela.

Esta aproximação é bastante útil na medida em que, sem ela, regiões da imagem com valores médios de pixels mais elevados tenderão a ter valores de correlação mais elevados que em regiões de correlação possivelmente correcta com valores de cinzento mais normais [MIKHAIL, 2001].

Na prática, a situação assume contornos mais complexos. Uma vez que, como as superfícies são vistas de diferentes pontos de vista nas duas imagens, as suas dimensões aparentes vão diferir entre as duas imagens [MIKHAIL, 2001]. Diferenças em escala vão causar problemas na correlação uma vez que se tentarão correlacionar diferentes sinais [MIKHAIL, 2001], bem como diferenças no contraste e luminosidade, estruturas repetitivas ao longo de áreas extensas (como campos cultivados) ou terreno muito montanhoso (causando diminuição do factor de correlação) [LINDER, 2006].

Para tornar o cálculo mais eficiente e otimizar o consumo de memória computacional, o processo utiliza na correlação a piramidização das imagens, isto é, percorre séries de versões de reduzida resolução, geradas por suavização e reamostragem da imagem original [MIKHAIL, 2001].

Retira-se directamente do próprio conceito de MDE que se trata de um modelo de uma superfície real, obtido através da aplicação de uma função matemática sobre um conjunto de pontos. No fundo, é uma superfície que se tenta adaptar o melhor possível à superfície terrestre. Assim, e particularmente se a superfície que se pretende modelar apresentar mudanças súbitas de elevação no terreno, morfologias mais complexas poderão não ser convenientemente retratadas. É fundamental nestas situações incluir na amostra primária *breaklines*, ou linhas de quebra, que constituem elementos resistentes aos algoritmos de interpolação. Estas linhas de quebra devem ser resultado da estereorrestituição de descontinuidades topográficas importantes do terreno como cristas de arriba, linhas de água, etc. A recorrência à visualização estéreo torna-se aqui essencial uma vez que é absolutamente necessário distinguir “quebras” topográficas [HAPKE et al., 2005]. MIKHAIL [2001] apresenta um exemplo utilizando o objecto de estudo deste trabalho, as arribas (Figura 9). Uma linha de quebra que represente a descontinuidade do declive entre um e outro lado de uma arriba obriga o interpolador a não ligar pontos da amostra primária que se localizem nos dois lados da arriba. Sem o auxílio destes elementos, a interpolação entre pontos de um e outro lado da arriba será incorrecta, uma vez que os declives não são contínuos [MIKHAIL, 2001].

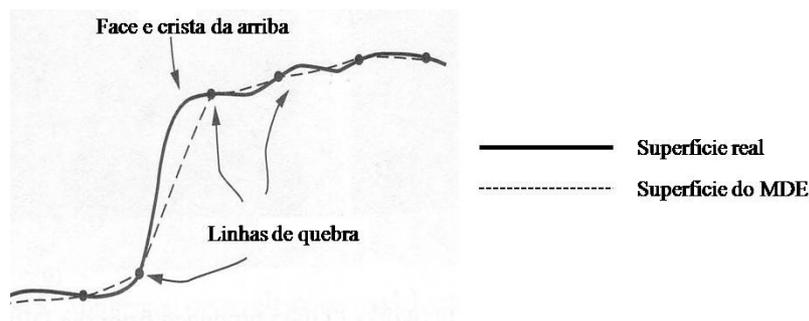


Figura 9: Auxílio das linhas de quebra na geração de uma arriba por um MDE (adaptado de MIKHAIL [2001]).

BAILLARD et al. [2003] conclui ser possível calcular um MDS fiável usando um par estereoscópico se for adicionada informação tridimensional vectorial apropriada, onde a existência de linhas de quebra assume particular significância [CHANDLER et al., 2001].

Segundo HAPKE et al. [2005], a precisão vertical de um MDE pode ser descrita em função da escala da fotografia e, conseqüentemente, da altura de voo e da distância focal. Para além dos efeitos sistemáticos já referidos anteriormente, este mesmo autor salienta a importância de erros não sistemáticos na precisão do MDE, como relevo extremo, distribuição linear de pontos de controlo, distorção do filme original, falta de dados de calibração da câmara e elevada distorção radial nas imagens, que podem ser tratados através da aplicação de um factor ambiental (EF), de valor entre 1 e 5, onde 5 representa a situação em que todos os factores acima descritos estão presentes [HAPKE et al., 2005].

REDWEIK [2007] apresenta a precisão que se pode esperar de um modelo digital do terreno. Para a componente altimétrica e assumindo que a cota é obtida através de um modelo estereoscópico, a precisão é dada por

$$\sigma_z = \frac{h}{b} \cdot spx$$

onde h representa a altura (de voo), b , a base (distância entre os centros das duas imagens que compõem o modelo), e spx , o erro na medição da paralaxe horizontal e que se pode aproximar ao valor do pixel no terreno.

De uma forma mais geral, a precisão pode ser calculada através da fórmula

$$\sigma_z = a + b \cdot \text{tg}\alpha$$

onde α representa o declive do terreno, e a e b parâmetros característicos do método utilizado na obtenção do modelo [REDWEIK, 2007]

É necessário aplicar, uma vez determinado o MDE, estatísticas que informem acerca da validade dos resultados, através da recolha de uma amostra de pontos de teste que nunca deverá ser inferior a 28 pontos (20 pontos interiores e 8 nas margens) [USGS, 2007]. Nesta fase, “erro” significa a diferença entre o valor de z do ponto medido e a superfície verdadeira do terreno [BRIESE et al., 2002]. CHAPLOT et al. [2005] indica como parâmetros de avaliação a aplicar para determinação da precisão de um MDE o erro médio, erro médio absoluto e o erro médio quadrático. MATOS [2001] defende, entre outros métodos, a análise da qualidade por confrontação directa de altitudes através da determinação do erro médio na altitude, média do valor absoluto dos erros, desvio-padrão, erro máximo e erro mínimo.

Existem ainda outros parâmetros avançados de verificação da qualidade de um MDE, como a aproximação estocástica empírica, baseada na densidade de pontos, na curvatura local [KRAUS et al., 2004], na rugosidade (existência de artefactos na interpolação) e declive [CHAPLOT et al., 2005]. Mais do que o método de interpolação, é a densidade de pontos da amostra primária que condiciona a qualidade final do MDE [KRAUS et al., 2004; CHAPLOT et al., 2005].

Uma das principais aplicações de um modelo digital de terreno é a geração de ortofotos ou ortoimagens, como se vê de seguida.

Ortofotografia

É nesta altura claro que a fotografia é uma projecção central, de forma que, em comparação com a cartografia, apresenta deformações projectivas e perspectivas [BERBERAN, 2003].

Uma ortofoto, pelo contrário, tem as mesmas propriedades que um mapa, mostrando todos os objectos na sua posição ortográfica correcta. Uma ortoimagem é particularmente relevante uma vez que combina as capacidades interpretativas da

imagem original com a relevância posicional de um mapa [CHANDLER et al., 2001]. Tal como um mapa, pode-se obter medições de áreas, ângulos, distâncias, etc., sem necessidade de correcções adicionais. Tem a vantagem de, ao contrário do mapa cujo conteúdo consiste em símbolos e linhas, conter todos os elementos existentes na superfície topográfica real, uma vez que se trata da informação contida na imagem original.

Este produto resulta da rectificação geométrica da fotografia tendo em conta o modelo digital de terreno e as características geométricas da câmara fotográfica [MATOS, 2001], isto é, são removidos os efeitos do relevo inerentes à projecção central por reprojecção, agora ortogonal, permitindo em toda a imagem uma escala homogénea (Figura 10).

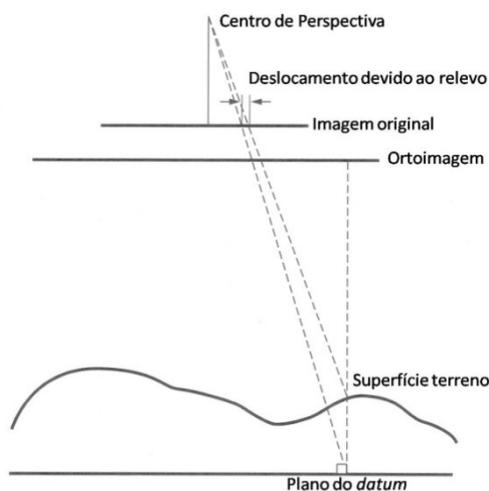


Figura 10: Comparação da geometria perspectiva e a ortográfica (adaptado de MIKHAIL [2001]).

Ao longo do tempo tem-se assistido a uma grande evolução nos métodos de rectificação: gráfica, analítica, por projecção subjectiva, óptico-mecânica, diferencial e digital [REDWEIK, 2007]. O desenvolvimento dos métodos referidos pode ser encontrado em REDWEIK [2007].

No contexto deste trabalho, torna-se apenas relevante desenvolver o método digital. De uma forma rápida e bastante precisa, a transformação da imagem original numa ortoimagem baseia-se na aplicação sucessiva das equações da colinearidade aos pixels da imagem original, utilizando também algoritmos de interpolação e algoritmos de processamento digital de imagem [REDWEIK, 2007].

Pode recorrer-se a dois métodos de rectificação digital para a criação de uma ortoimagem: o método directo, através do qual é calculada a posição de determinado pixel na imagem original e, depois, na imagem rectificada, com auxílio do MDE, e, só então, é atribuído o valor de cinzento do pixel original; e o método indirecto, através do qual, para cada posição de pixel na imagem rectificada é calculada, também com apoio do MDE, a posição na imagem original e, então, o correspondente valor de cinzento é atribuído ao pixel respectivo na imagem rectificada [REDWEIK, 2007]. A diferença entre

os dois métodos reside no facto de, no método directo, e no caso de o efeito do relevo e os efeitos perspectivados serem significativos, haverá lacunas entre os pontos projectados na ortoimagem pelo que os pixels sem informação serão gerados por interpolação [MIKHAIL, 2001], situação que não se verifica no método indirecto.

Uma ortofoto contém apenas informação posicional planimétrica, não havendo lugar a dados referentes à altimetria. Para tal, será necessário editar a ortoimagem e adicionar curvas de nível ou pontos cotados que informem acerca das variações do relevo ao longo da imagem. Pode ainda codificar-se radiometricamente a imagem, com base no MDE, numa escala cromostereográfica que, com óculos apropriados, dará a sensação de elevação; no entanto, a recodificação da imagem eliminará a radiometria original, pelo que se perde a representação colorida natural de uma fotografia.

Podem ser derivados ortofotomapas que consistem simplesmente numa ortoimagem à qual foram adicionados quadrícula, grelha, curvas de nível, legenda, toponímia, etc. [BERBERAN, 2003], assemelhando-se à cartografia tradicional e podendo ser utilizada como tal.

As ortofotos são comumente usadas em ligação com SIGs, servindo como referência planimétrica para análise espacial e para gerar níveis de informação para integração em bases de dados [WOLF, 2000]. TATE [1998] aponta os benefícios da utilização de ortofotos em SIGs como mapas base para planeamento regional, para revisão de mapas topográficos, para criação de mapas de solo, para estudos de drenagem; podem ser mais económicas que os mapas convencionais, para além de conterem mais elementos da superfície terrestre. São mais facilmente disponibilizáveis digitalmente via Internet.

III. Enquadramento da região de estudo: Algarve – Burgau a Ancão

Enquadramento Geográfico

O Algarve situa-se na extremidade Sul de Portugal Continental. Possui uma costa extensa, que se estende por mais de 200 km, banhada a Sul e a Oeste pelo Oceano Atlântico.

A região estudada compreende o sector costeiro entre a vila de Burgau, no Barlavento, e o sítio de Ancão, já no Sotavento, abrangendo os municípios de Vila do Bispo, Lagos, Portimão, Lagoa, Albufeira, Loulé e uma pequena parte do município de Faro. Esta extensão corresponde, na Carta Militar de Portugal 1: 25000, a 6 folhas (Folhas 602, 603, 604, 605, 606 e 610) cujo enquadramento se apresenta na Figura 11.



Figura 11: Enquadramento da região de estudo (fonte: <http://www.imagens-terra.com/europa/portugal.jpg>, Google Earth e Folhas da Carta Militar de Portugal – IgeoE).

Geomorfologia e Geologia

O litoral do Algarve é caracterizado por uma grande riqueza de aspectos geológicos e morfológicos [ANDRADE, 1990], sendo que a sua geologia se encontra bem estudada e documentada em diversos trabalhos já publicados [MARQUES, 1997]. DIAS [1998] constata mesmo que a notável variabilidade em termos geológicos, geomorfológicos e de características de agitação marítima tornam a região algarvia uma região privilegiada para estudos de geologia litoral.

Segundo ANDRADE [1990], a região Oeste do litoral algarvio é dominado morfológicamente por arribas altas, que afloram para poente de Porto de Mós. Para Este, até à Praia de Olhos de Água, a plataforma litoral desenvolve-se numa cota média de 45 m, inclinada suavemente para Sudeste. Neste segmento, as rochas encontram-se fortemente carsificadas tendo a acção marinha gerado erosão, de forma irregular, sobre o maciço. A acção da rebentação, associada a variações litológicas e estruturais do maciço rochoso, promoveu ainda a maior carsificação, criando leixões e definindo um traçado complexo e rendilhado. Neste caso, a existência de um grande número de leixões está associada à protecção contra a agitação marítima predominante, de que é exemplo a zona da Ponta da Piedade (Lagos) [DIAS, 1988].

Da Praia de Olhos de Água à Praia do Ancão, a arriba é composta de materiais mais brandos, onde a taxa de recuo de arribas assume os valores mais elevados no litoral algarvio. O seu desenvolvimento é plano e quase linear, mantendo-se ao longo da sua extensão um perfil bastante inclinado. Esta faixa apresenta praias de areia contínuas que oferecem protecção às arribas, embora em situação de temporal a eficiência dessa protecção diminua significativamente [ANDRADE, 1990]. É um sector muito actuado por processos de erosão continental que provocam intenso ravinamento [DIAS, 1988].

É importante referir a existência de longos areais ao longo deste sector (como Meia Praia, Alvor, Armação de Pêra e Albufeira), uma vez que alguns constituem importantes barreiras de protecção das arribas contra a acção marinha. Um caso de protecção efectiva é a barreira arenosa localizada a Este da Ponta de João Arens, onde as arribas existentes estão inactivas [DIAS, 1988].

No que respeita à geologia, e de acordo com MARQUES [1997], em toda a região litoral Sul do Algarve, ocorrem terrenos da Orla Meso-Cenozóica meridional, incluindo formações do Triássico, Jurássico, Cretácico, Miocénico e Plio-Plistocénico (Figura 12), que vão sendo mais recentes à medida que se caminha para oriente [MANUPPELLA et al., 1987].

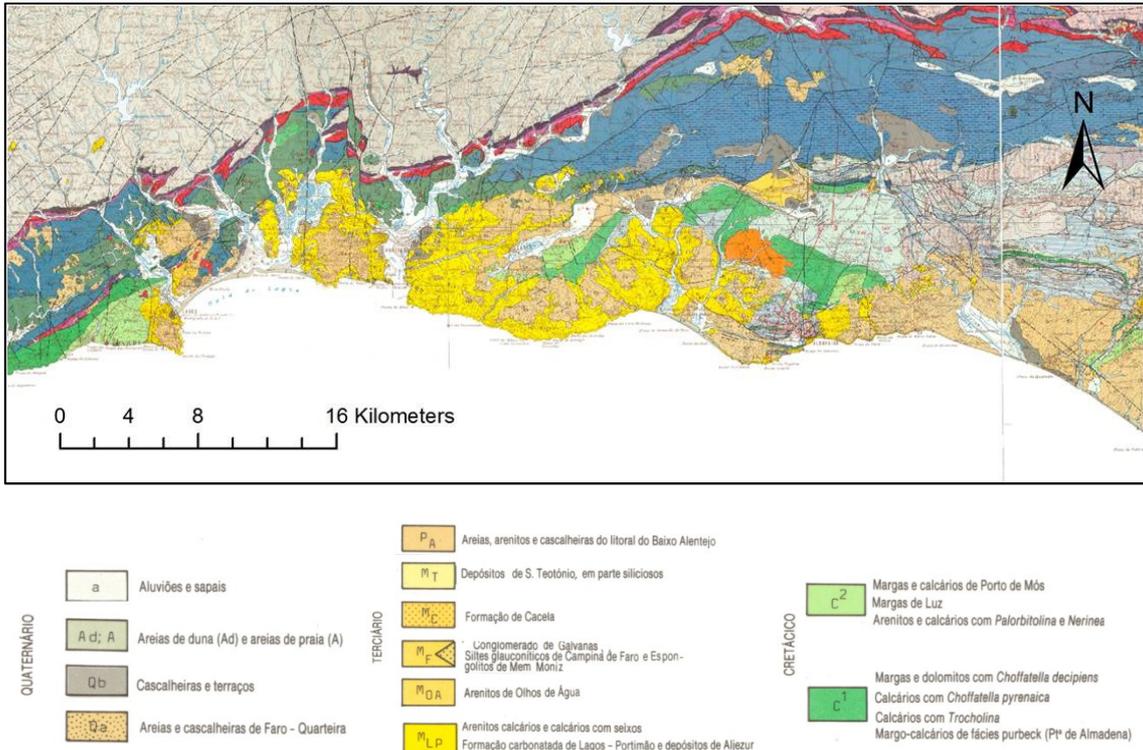


Figura 12: Enquadramento geológico da região de estudo (fonte: *Carta Geológica de Portugal, 1: 100000*).

De Burgau até Porto de Mós, o litoral é constituído por rochas carbonatadas margosas, de idade cretácica, sofrendo irregularidades pontuais causadas pela presença de rochas eruptivas, como é o caso da Ponta das Ferrarias. No sector Praia de Porto de Mós – Praia de Olhos de Água, encontram-se rochas carbonatadas de idade miocénica. Estas, carsificadas, encontram-se preenchidas por depósitos detríticos plioquaternários [ANDRADE, 1990]. Para Este dos Olhos de Água, e até ao Ancão, o sistema de arribas encontra-se talhado em materiais pobremente consolidados de idade miocénica e plioquaternária [ANDRADE, 1990].

Quanto à sismicidade e tectónica, a região do Algarve inclui-se, de acordo com o Atlas do Ambiente, numa região sísmica de grau X (Figura 13).

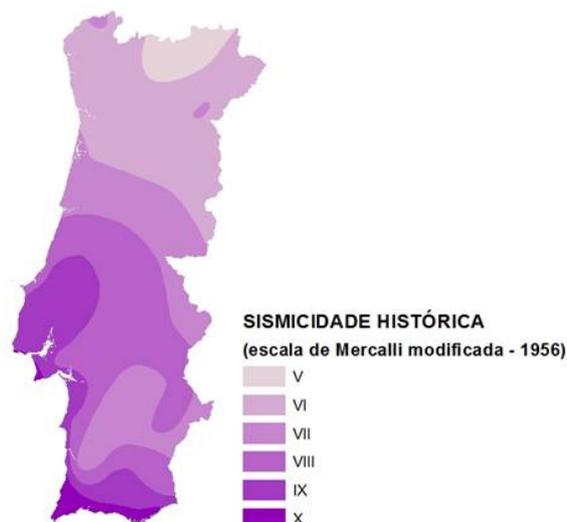


Figura 13: Mapa de sismicidade histórica e actual (1755 – 1996) à escala 1: 1 000 000 (fonte: *Atlas do Ambiente*).

O Algarve encontra-se numa região de moderada a elevada perigosidade sísmica dada a proximidade da fronteira das placas Ibérica (Euro-Asiática) e Africana. Segundo MARQUES [1997], a proximidade à zona de fronteira entre placas Açores-Gibraltar faz desta uma região activa em sismos: estão documentados inúmeros epicentros de sismos a Sul e Sudeste de Faro, e a Sudoeste do Cabo de S. Vicente, bem como epicentros no interior do Algarve.

Em praticamente todos os estudos acerca da sismicidade no país, a conclusão é de que a perigosidade no Algarve toma os valores máximos na faixa litoral, decrescendo para Norte, embora toda a região apresente intensidade sísmica forte [CCDRA, 2007].

É relevante, nesta altura, introduzir as áreas de estudo específicas deste trabalho, ainda que apenas no Capítulo IV sejam referidos os resultados obtidos para as mesmas.

Áreas de estudo - Ponta da Piedade e Praia da Falésia

Dada a extensão de litoral em estudo, e dado o nível de complexidade das tarefas práticas que se pretendiam apresentar neste trabalho, houve necessidade de restringir duas regiões de estudo para a aplicação de metodologias mais específicas, como a geração de MDEs, MDEDs, etc.

Assim, foram definidas duas zonas, distintas do ponto de vista geológico, morfológico e, conseqüentemente, no que respeita o tipo e características do recuo causado por movimentos, e que colocam diferentes problemas à aplicação dos métodos: a Ponta da Piedade (Lagos) e a Praia da Falésia (Olhos de Água).

De seguida são dadas a conhecer as características gerais das zonas de estudo e dados relativos ao recuo sofrido nessas regiões.

Ponta da Piedade

O primeiro segmento de costa que se apresenta como caso de estudo, e que compõe parte do sector seleccionado como primeiro bloco de testes do projecto, prolonga-se desde a Praia de Porto de Mós, a Este da Ponta da Piedade, até Lagos, numa extensão de costa de cerca de 4 km (Figura 14).



Figura 14: Região de estudo da Ponta da Piedade.

A morfologia das arribas desta região encontra-se descrita de forma muito desenvolvida em MARQUES [1997]. O mesmo autor caracteriza esta região como constituída por rochas carbonatadas miocénicas com carsificação antiga, originando uma grande densidade de pequenos algares de contorno circular e profundidades que podem ultrapassar o Zero Hidrográfico, formas que constituem regiões de fraqueza importantes. Os algares encontram-se preenchidos por materiais vermelhos arenosos, plio-pleistocénicos, cuja erosão originou uma linha de costa “rendilhada” e muito

irregular, caracterizada pela existência de inúmeras reentrâncias, pontais e leixões. A protecção de sopé das arribas deste sector é bastante reduzida, indicando uma estabilidade igualmente reduzida.

Particularmente, da Praia do Canavial à Ponta da Piedade, existem inúmeros algares, que sofreram remoção do material de preenchimento através de galerias bastante desenvolvidas. O autor refere a existência de apenas 2 praias neste segmento, e os leixões são em número muito reduzido (Figura 15). Ocorrem, submersos, alinhamentos rochosos contínuos, correspondentes a níveis resistentes das rochas carbonatadas. Da Ponta da Piedade a Lagos, são mais frequentes pequenas praias, em número de 15, ocupando a reentrância de arribas, bem como leixões constituídos por materiais geológicos mais resistentes, de maior dimensão, muitos dos quais destacados das arribas litorais (Figura 15). Os algares, em menor número, encontram-se bastante erodidos, especialmente nas paredes do lado do mar.



Figura 15: Em cima: vista geral da Praia do Canavial às arribas da Ponta da Piedade. Em baixo, à esquerda: Leixões de grandes dimensões e arcos, junto à Ponta da Piedade; Em baixo, à direita: Algar parcialmente destruído, na Praia de Dona Ana (sector Ponta da Piedade – Lagos).

MARQUES [1997] apresenta uma detalhada descrição da evolução das arribas no sector Praia do Canavial a Praia da Falésia, onde se inclui o segmento estudado da Ponta da Piedade (Praia do Canavial – Lagos). Segundo o autor, neste local, o estudo dos

movimentos e recuo em arribas entre 1947 e 1991 retribuiu valores de taxa média de recuo nos materiais plioquaternários de 0.114 m/ano e, nas rochas miocénicas, de 0.002 m/ano, resultando numa taxa média de recuo global de 0.003 m/ano. Estes valores são, predominantemente, da responsabilidade de movimentos que ocorrem nas reentrâncias do contorno das arribas em locais com praias bastante encaixadas, com concentração da areia junto à base das arribas, no caso dos materiais arenosos. A presença de blocos na base é bastante reduzida dada a sua fraca resistência à erosão marinha. Para as rochas miocénicas, o autor refere que, embora se verifique um maior número de movimentos em arribas com morfologias salientes e leixões, é nos movimentos em arribas mais protegidas, nas reentrâncias, que se verifica a maior área horizontal perdida. Neste sector predominam os movimentos do tipo rotacional nas areias plio-pleistocénicas e tombamentos e quedas de blocos nas rochas miocénicas.

Praia da Falésia

O segmento costeiro da Praia da Falésia (Figura 16), estende-se ao longo de cerca de 4 km. À semelhança de todo o sector Olhos de Água - Ancão, encontra-se significativamente ocupado por actividade turística, tendo sido, por isso, alvo de mais frequentes estudos, especialmente na região para leste da Praia da Falésia.

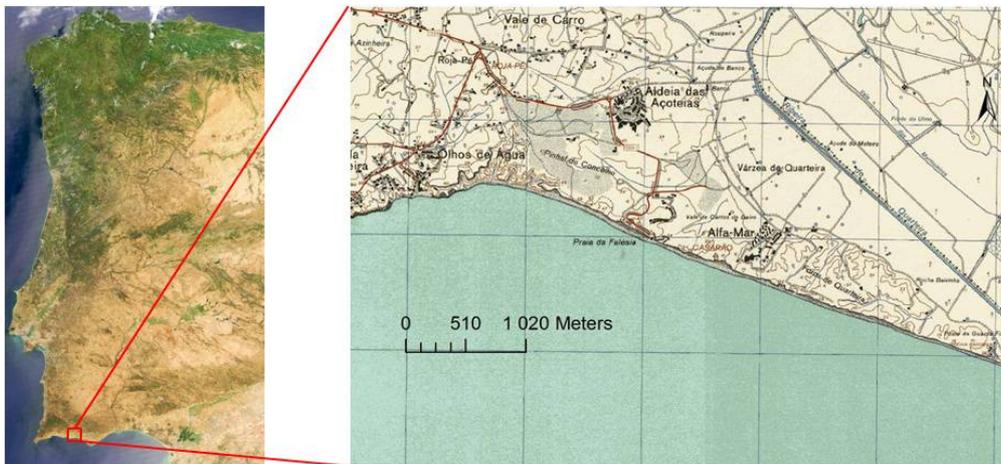




Figura 16: Região de estudo da Praia da Falésia.

De acordo com MARQUES [1997], ao longo desta praia, os taludes de arriba apresentam-se rectilíneos, com declives de 40 a 45° nas areias miocénicas e quase verticais nas areias plio-pleistocénicas, formando uma face côncava; as arribas ocorrem a cerca de 40 m de altura no extremo Oeste da praia mas decrescem progressivamente até cerca de 15 m, no extremo Este (Figura 17). Possuem protecção de sopé importante garantida por areal contínuo, excepto na região central, onde a base das arribas sofre acção marinha.

Os movimentos que aqui têm lugar são esporádicos e bem localizados [MARQUES, 1997]. Segundo o mesmo autor, em diferentes intervalos de tempo, os recuos locais variam significativamente, existindo mesmo recuo nulo, consequência do carácter pontual dos movimentos nesta região. O ciclo de acontecimentos, após a ocorrência de um movimento, passa pela estabilização da crista e remoção dos depósitos na base.

As taxas de recuo nesta região não são particularmente variáveis, constatando-se alguma estabilidade até 1992. Mais uma vez, MARQUES [1997] atribui a este sector taxas de recuo médio global entre 0.16 e 0.28 m/ano, causadas principalmente por erosão marinha e, com origem na erosão sub-aérea, os valores diminuem para 0.2 a 0.09 m/ano.



Figura 17: Arribas altas, de declive acentuado, da Praia da Falésia.

IV. Detecção Fotogramétrica de Movimentos em Arribas Costeiras

Ao longo deste trabalho foram executadas diversas tarefas, com o objectivo de encontrar uma metodologia de trabalho para a detecção de movimentos de terra em arribas rochosas no litoral, inventariação e caracterização dessas ocorrências, integração dos resultados com outra informação espacial relevante e gestão desse conjunto de informações em SIG.

Fase de preparação de material de trabalho

Aquando do início do projecto, fez-se um levantamento das necessidades de material e instrumentos de trabalho, fundamentais para o bom desenvolvimento das tarefas propostas: disponibilidade e aquisição de fotografias aéreas, selecção de *software* a utilizar nas várias fases do projecto, organização e passagem do inventário já existente a formato digital, aquisição de cartografia de base, aquisição de informação de apoio ao processamento fotogramétrico, etc.

Foi definida, também nesta altura, a referência espacial a usar no trabalho. A informação espacial associada foi executada e disponibilizada no referencial geográfico Hayford-Gauss *Datum 73*, pelo que, por uma questão de coerência e de forma a evitar transformações entre referenciais, se manteve para todo o trabalho.

Apresenta-se de seguida uma breve menção ao material utilizado no processamento fotogramétrico, no refinamento da datação dos movimentos detectados, a cartografia de base, a informação espacial que foi associada, etc., bem como o *software* e *hardware* utilizados no decurso do trabalho:

Fotografias aéreas processadas fotogrametricamente: voos SPLAL-1951/1952, IGP-1991, IGP-1995, INAG-2002, IGP-2007, cujas descrições detalhadas podem ser encontradas no Capítulo IV (e listagem no Anexo C).

Fotografias intermédias: voos RAF-1947, USAF-1958, DGSFA-1952, DGSU-1974, FAP-1980, FAP-1983, cujas listagens mais detalhadas podem ser encontradas no Anexo C.

Cartografia de base: cartografia vectorial 1: 2000 do INAG de 2002, Folhas 602, 603, 604, 605, 606 e 610 da Carta Militar 1: 25000 do IGeoE, cartografia geológica 1: 50000 da Carta Geológica de Portugal, cartografia geológica de pormenor (1:5000 e 1:2000) executada por MARQUES [1997];

Outra informação fotográfica: Ortofotos de 2005 (IGP) (Figura 18) e fotografias oblíquas de 2001 e 2006 (Figura 19);



Figura 18: Conjunto de ortofotos de 2005 (IGP).



Figura 19: Fotografias oblíquas.

Outra informação processada: inventário de movimentos [MARQUES, 1997], dados de precipitação das estações meteorológicas da região do Algarve (SNIRH - Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos).

Software utilizado: ArcGIS 9.2 (ESRI), LISA Basis e Photo, BLUH, PCI Geomatica 10, AutoCAD 2006, Photoshop Elements 3.

Hardware utilizado: Workstation Dell, 2 Gb memória RAM, placa gráfica Stereo Ready 3D com 512 Mb RAM dedicada, 2 discos rígidos internos 250 Gb, 2 discos rígidos externos 500 Gb, óculos NuVision Shutter glasses e emissor.

Inventário de movimentos 1947 - 1991 [MARQUES, 1997]

É possível encontrar em MARQUES [1997] um extenso inventário de movimentos em arribas, ao longo de todo o litoral rochoso do Algarve, compreendendo os sectores Oeste e Sul. Este inventário, foi realizado com recurso a métodos simplificados que se baseiam em interpretação e comparação sistemáticas, e medições realizadas em provas de contacto de fotografias aéreas, usando apenas um estereoscópio de espelhos com oculares de ampliação de 8x e instrumentos de medição adequados [MARQUES, 2006]. No total, foram registados 237 movimentos. A informação alfanumérica encontra-se compilada em folhas de cálculo, e a informação relativa à localização de cada movimento encontra-se registada em papel, sobre a cartografia 1: 25000 do IGeoE impressa em formato A4 (Figura 20).

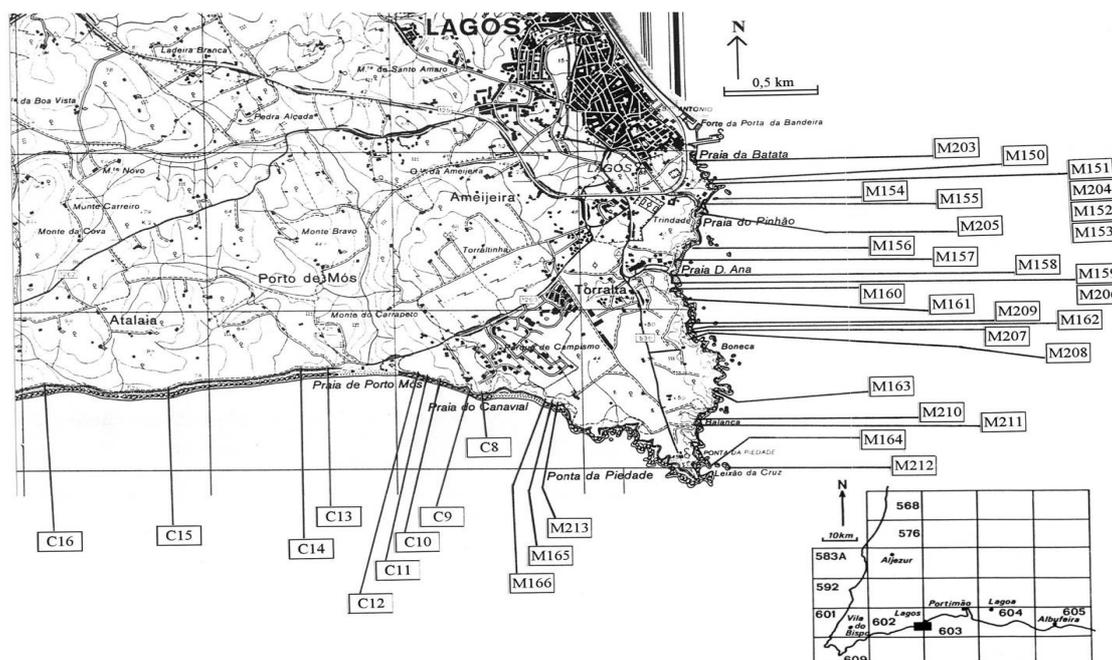


Figura 20: Exemplo do inventário original, em suporte papel [MARQUES, 1997].

Para tornar a informação espacial flexível e trabalhável, foi necessário transferir toda a informação acerca dos movimentos para formato digital através de um software SIG: com o auxílio da informação planimétrica (curvas de nível) constante na cartografia 1: 2000 do INAG, foi interpretada a morfologia dos segmentos rochosos e, através da implantação aproximada dos movimentos na cartografia 1: 25000, foi localizado cada movimento e associados os respectivos atributos (Figura 21).

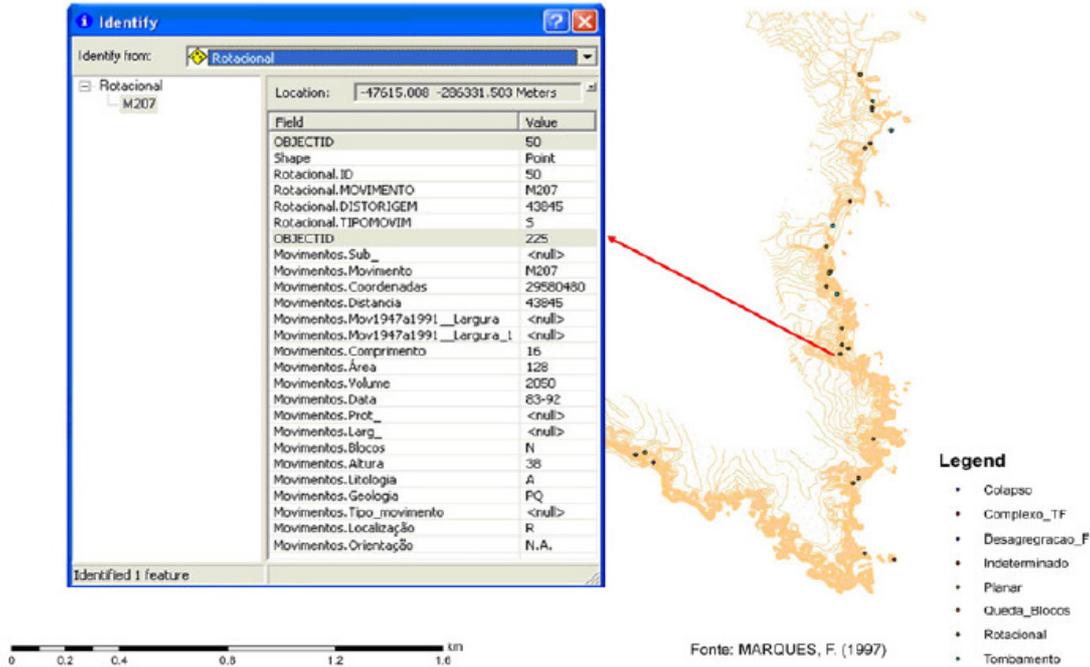


Figura 21: Exemplo da base de dados construída a partir do inventário de Marques [1997].

Esta operação permitiu um acesso mais fácil e maior flexibilização no uso do inventário, e foi de grande utilidade na fase de validação de resultados.

Seleção da série temporal fotográfica e informação associada

Foi feito um levantamento prévio das coberturas fotográficas aéreas existentes para o litoral algarvio e as respectivas características em termos de escala, suporte original, localização do filme/ficheiros originais, abrangência geográfica, número de fotografias necessárias para cobrir a região de interesse, instituição proprietária, etc. Em posse desta informação, e uma vez que já estava disponível um conjunto significativo de fotografias aéreas analógicas, em suporte papel, referentes a coberturas aéreas até 1995, passou-se a definir que coberturas aéreas seria necessário adquirir e quais as que seriam alvo de processamento fotogramétrico, de forma a garantir atempadamente digitalizações e certificados de calibração.

A escolha dos voos a processar fotogrametricamente (Tabela 3) baseou-se nos seguintes critérios: melhor escala, melhor qualidade radiométrica, maior janela temporal, possibilidade de actualização do inventário e existência de pontos fotogramétricos.

Tabela 3 - Características dos voos seleccionados para processamento fotogramétrico (adaptado de MATILDES et al. [2008] e REDWEIK et al. [2008]).

Nome – Data	Escala/GSD (m)	Número Fiadas	Número Imagens	Distância focal (mm)	Câmara
SPLAL 1951/1952	1:18000/ 0.38	8	74	204.40	RMK S1818
IGP 1991	1: 30000/ 0.67	2	9	151.64	Wild RC10
IGP 1995	1:15000/ 0.34	3	8	152.73	Wild RC10
INAG 2002	1:8000/ 0.18	7	169	153.07	Wild RC20
IGP 2007	1:44000/ 0.50	9	59	120.00	DMC

Foi necessário adquirir a cobertura aérea realizada em 2002, propriedade do INAG. O respectivo rolo original foi inspeccionado de forma a escolher as fotografias necessárias à cobertura da região de interesse que, posteriormente, foram digitalizadas num scanner fotogramétrico Vexcel Ultrascan 5000. Adquiriu-se também, para a mesma região, a cobertura fotográfica digital de 2007, realizada pelo IGP.

Os restantes voos, cujas características se encontram definidas na Tabela 4, actuaram, como referido, como apoio na refinação das datas de ocorrência dos movimentos através de observação estereoscópica com oculares 8x.

Tabela 4 - Características gerais dos voos não seleccionados para processamento fotogramétrico [REDWEIK et al., 2008].

Nome	Data	Escala	Formato (cmxcm)	Distância Focal (mm)	Câmara
RAF	1947	1: 30000	23x23	152.4	Fairchild K17
USAF	1958	1: 30000	23x23	152.04	N/A
DGSFA	1972	1: 15000	23x23	152.05	Wild RC8
DGSU	1974	1: 15000	23x23	153.36	N/A
FAP	1980	1: 15000	23x23	153.36	N/A
FAP	1983	1: 30000	23x23	151.64	Wild RC10

À excepção do voo IGP-2007, para os voos seleccionados para processamento fotogramétrico, realizou-se um enquadramento combinado por centros e mancha sobre as 6 folhas da Carta Militar 1:25000 do IGeoE que abrangem a faixa litoral de interesse (Figura 22), e posteriormente, em SIG. O enquadramento do voo IGP-2007 foi realizado directamente em SIG (Figura 23).

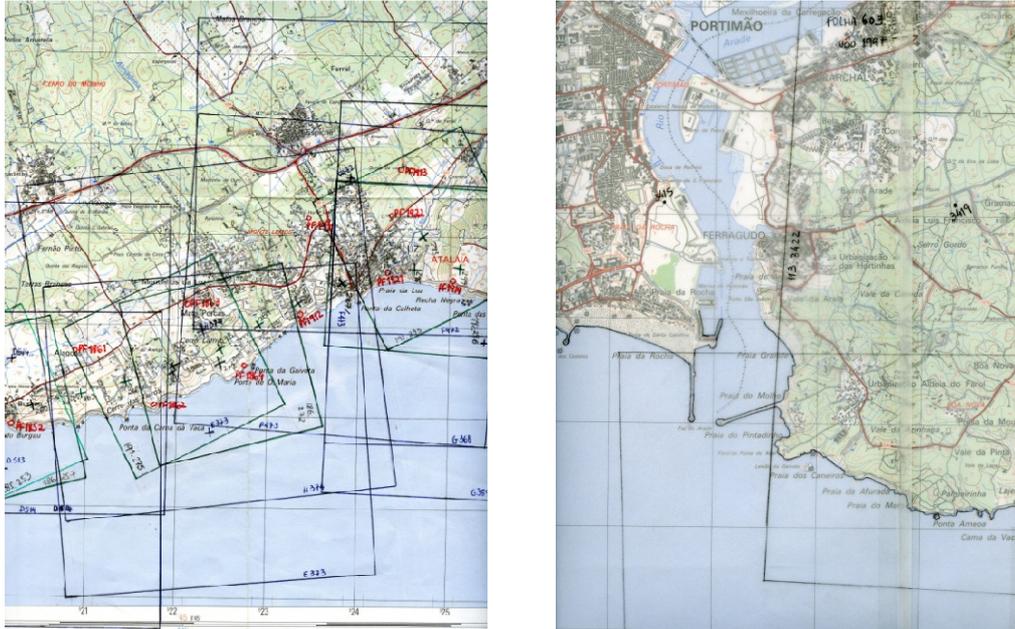


Figura 22: Extracto do enquadramento do voo INAG-2002 e SPLAL (esquerda) e IGP-1991 (à direita).

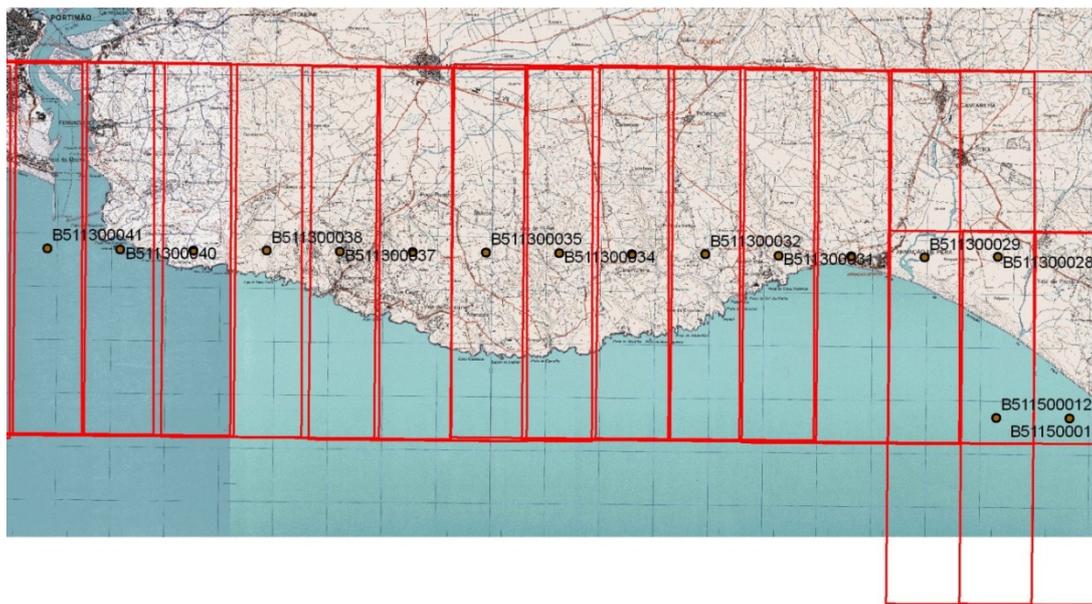


Figura 23: Extracto do enquadramento das fotografias do voo IGP-2007.

Foi disponibilizada pelo INAG a listagem de pontos de controlo (Anexo B), coordenados pela empresa ARTOP Lda. e utilizados na execução de cartografia para o INAG, bem como os respectivos *croquis* de localização e a cartografia 1:2000 em formato digital (CAD). Foram também disponibilizados os relatórios resultantes das aerotriangulações realizadas pela mesma entidade e respectivos esquemas de *output*, mas apresentavam algumas incongruências a nível da codificação de pontos e fotografias, sendo possível a introdução de erros resultantes de má identificação. Existiam ainda marcados nas fotografias pontos do tipo PUG, que consistem em marcações artificiais nos diapositivos (ou negativos) das fotografias a serem restituídas,

especialmente importantes em regiões onde não se observem pontos bem identificáveis que possam servir de ligação ou passagem entre modelos [REDWEIK, 2007], sendo bem identificáveis no modelo estereoscópico. Tais pontos estavam apenas marcados numa fotografia de cada par e, no cumprimento da sua função, em zonas sem contraste, pelo que a identificação do mesmo ponto na fotografia seguinte se verificou impossível. Concluiu-se, portanto, não ser possível utilizar este conjunto de informações.

Foi necessário organizar a informação dos pontos fotogramétricos, referenciados ao sistema Hayford-Gauss *Datum 73*, de forma a ser facilmente acedida: utilizando um software de SIG, projectou-se os 122 pontos de controlo sobre as ortofotos do IGP, bem como nas cartas 1: 25000 onde se efectuou o enquadramento por centros das fotografias (Figura 22).

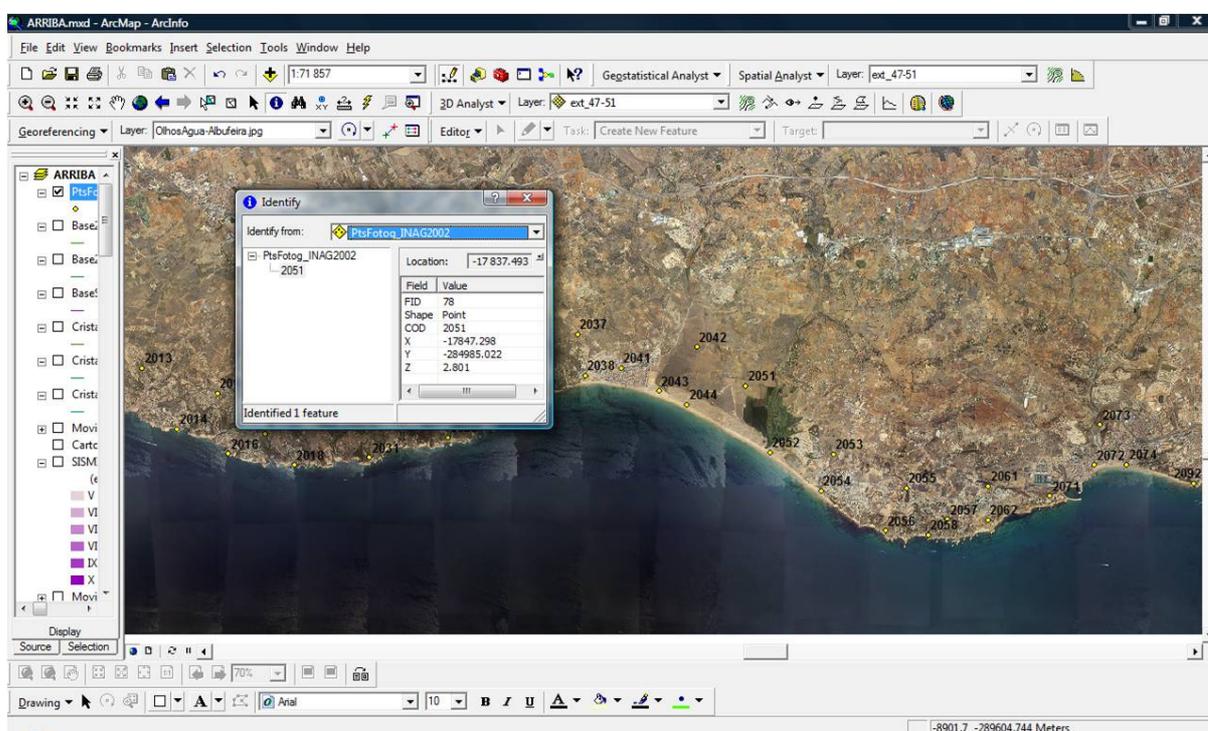


Figura 24: Projecção dos pontos fotogramétricos em SIG.

Com base na localização dos pontos fotogramétricos e com o apoio dos *croquis* de localização dos referidos pontos (Figura 25), foi possível identificar sem ambiguidade os elementos definidos como pontos fotogramétricos e assinalar, em cada fotografia onde eram visíveis, a sua localização, onde foram identificados pelo seu número (Figura 26).

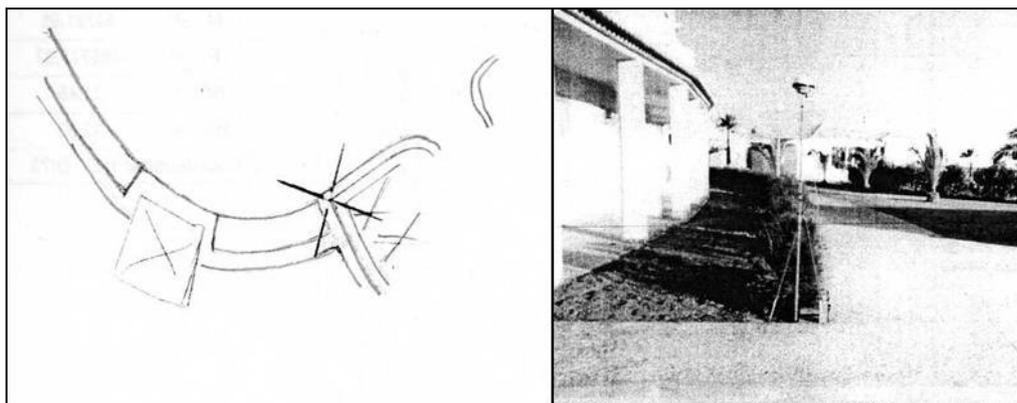


Figura 25: Exemplo de informação associada a cada ponto fotogramétrico disponibilizado: *croquis* e fotografia.

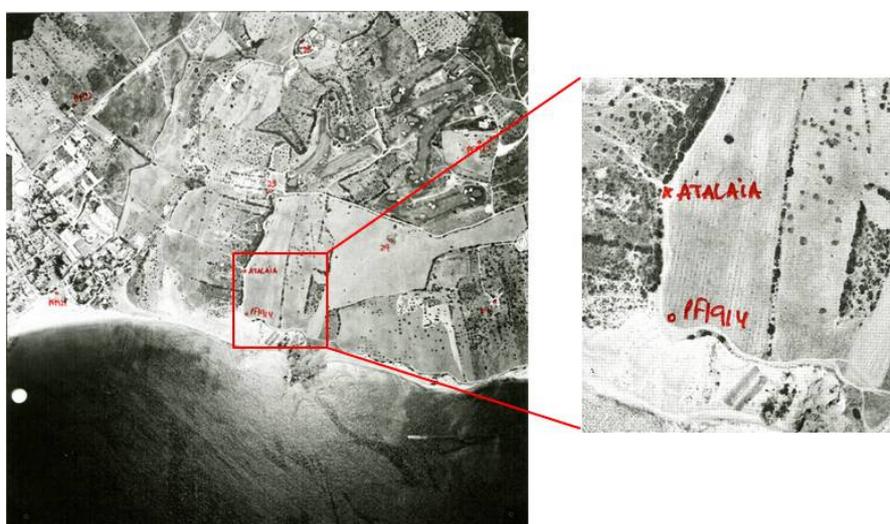


Figura 26: Marcação de um ponto fotogramétrico na cópia em papel de uma fotografia aérea do voo INAG-2002.

Processamento fotogramétrico da série temporal

Para o processamento fotogramétrico foi definido um fluxo de trabalho [adaptado de REDWEIK et al., 2008], representativo dos passos sequenciais a executar (Figura 27).

Chama-se a atenção para o facto de os voos IGP-1991 e IGP-1995 não constarem no fluxograma de trabalho. Por uma questão de calendário, não foi possível completar o processamento das fotografias aéreas correspondentes a todo o segmento de interesse; foi definida uma região de interesse mais imediato (maior taxa de recuo de arribas, maior atenção dedicada por parte da CCDR Algarve), geograficamente limitada, apresentada neste trabalho como região de estudo (Capítulo IV), onde foi aplicado o processamento fotogramétrico.

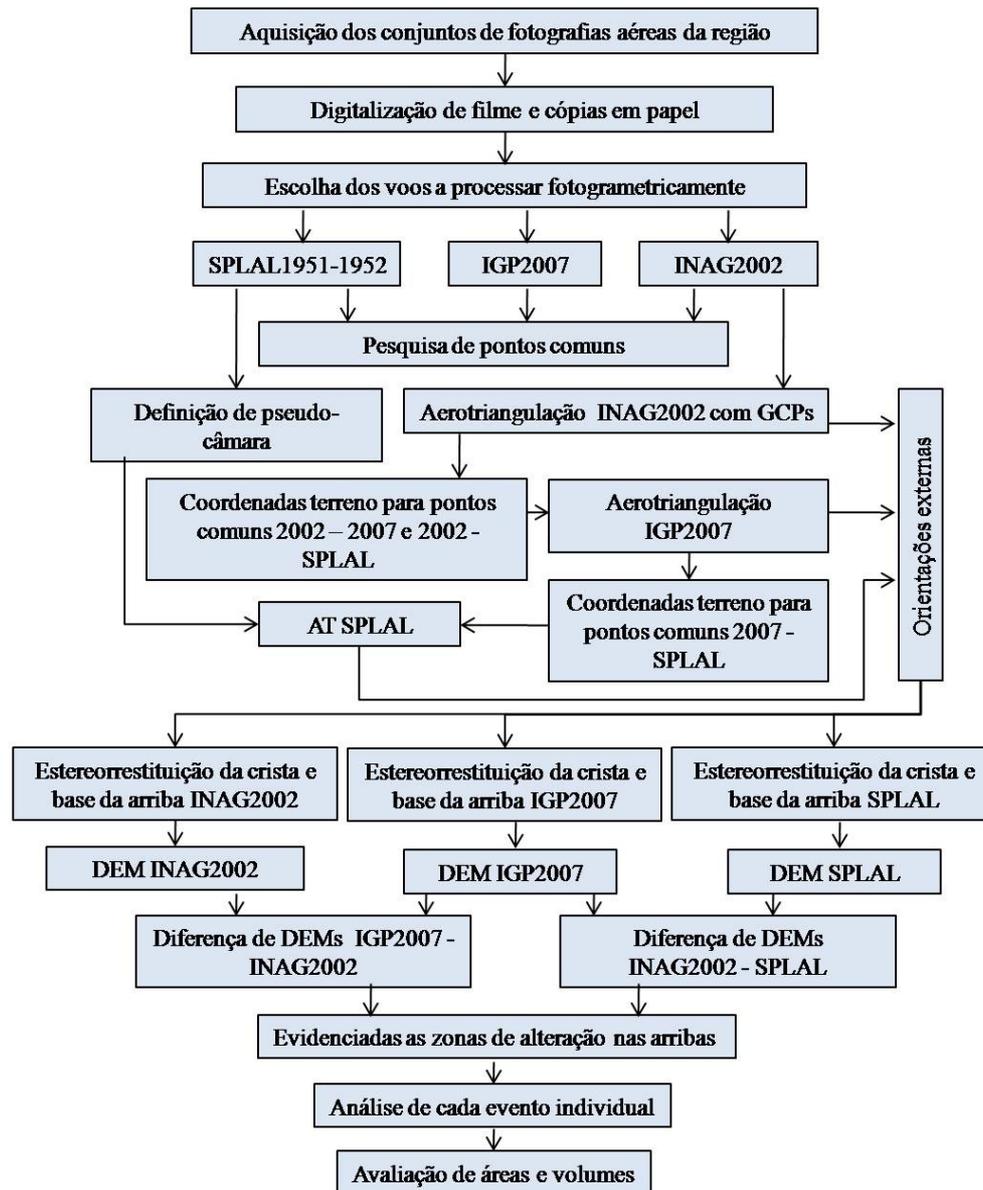


Figura 27: Fluxograma representativo das tarefas a executar no âmbito do processamento fotogramétrico.

Nesta secção será feito o desenvolvimento do processamento fotogramétrico aplicado a cada voo fotográfico. No Anexo A, estão compilados os certificados de calibração utilizados e, no Anexo C, os parâmetros de orientação externa para cada imagem processada.

A ordem pela qual se apresentam metodologias e resultados relativos a cada cobertura aérea não corresponde necessariamente à sequência pela qual, na prática, o processamento foi executado. Na realidade, foi primeiro definida uma região de teste, correspondente ao bloco Burgau - Lagos, caracterizado em seguida, onde foi efectuado o processamento das coberturas aéreas INAG-2002 e, posteriormente, SPLAL.

A cobertura IGP-2007 foi disponibilizada mais tarde, pelo que, para esta região apenas, o seu processamento não foi executado contemporaneamente aos anteriores. Aliás, para

os restantes blocos mostrou-se ser essencial a utilização conjunta das três coberturas nalguns processos.

O processamento fotogramétrico teve de ser executado em 3 blocos isoladamente, para as diversas coberturas fotográficas, devido a interrupções nos sectores de arriba e a marcadas variações de orientação da linha de costa, e consequentemente da orientação das fiadas. O primeiro bloco, denominado Burgau - Lagos, compreende a região entre Burgau e Lagos, onde se inicia uma interrupção importante na morfologia da costa causada pelo areal extenso sem arriba da região do Alvor. O segundo bloco, estende-se desde o início de um novo troço de arriba a leste da Praia do Alvor até a Olhos de Água (Albufeira), tendo sido denominado de Alvor - Olhos de Água. Este sector, embora bastante irregular em termos de orientação da costa apresenta uma tendência geral Oeste-Este, pelo que se considerou válido o processamento conjunto das fiadas. A marcada alteração para uma orientação Noroeste-Sudeste do litoral entre Olhos de Água e Ancão, que se apresenta quase rectilíneo, definiu o último bloco a processar, Olhos de Água - Ancão. No caso da cobertura INAG-2002, o último bloco foi definido entre Albufeira e Ancão.

O número e localização dos pontos fotogramétricos adquiridos para esta cobertura são condicionados pela geometria da fiada e dos modelos estereoscópicos, factores decisivos na definição da densidade e zonas de estabelecimento dos mesmos. Como referido, estes pontos fotogramétricos não são identificáveis nas fotografias do voo SPLAL uma vez que consistem fundamentalmente em objectos urbanos que, em 1951-1952, eram inexistentes [REDWEIK et al., 2008]. O rápido desenvolvimento sofrido pelo litoral algarvio levou a alterações, muitas vezes profundas, na paisagem, e que originaram, não só a situação descrita para a cobertura mais antiga, mas também a impossibilidade de identificação de alguns dos mesmos pontos fotogramétricos de 2002 nas fotografias de 2007. Há a salientar, no entanto, que a menor resolução das fotografias da cobertura IGP-2007 dificulta significativamente a identificação de objectos de menor dimensão como seja arbustos jovens ou cantos de pequenos muros, por exemplo, que na cobertura INAG-2002 constituem pontos fotogramétricos.

Voo INAG-2002

O voo foi realizado entre os anos de 2001 e 2002, com o objectivo específico de se obter um levantamento aerofotogramétrico do litoral de todo o país. Por esse motivo, a orientação das fiadas fotográficas foi planeada para acompanhar a orientação de sectores litorais pré-determinados, isto é, a orientação das fiadas é a mesma que o troço litoral a ser sobrevoado nesse instante.

Trata-se do voo mais importante de todo o trabalho, uma vez que serviu de referência espacial aos restantes voos processados.

É também a cobertura fotográfica que apresenta a melhor escala, 1: 8000, óptima qualidade radiométrica RGB, informação de pontos de controlo disponível e realizada para a própria cobertura fotográfica e certificado de calibração da câmara associado.

As fotografias aéreas, originalmente obtidas com uma câmara métrica Wild RC20, foram digitalizadas num *scanner* fotogramétrico de alta qualidade, com resolução de 22.5 µm, possibilitando um pixel correspondente de 0.18m no terreno. É importante salientar que cada imagem ocupa cerca de 302 Mb de disco, o que torna o seu processamento bastante pesado.

Uma vez que iria servir de base à aquisição de pontos de controlo para os restantes voos, todas as fotografias desta cobertura foram sistematicamente comparadas com as fotografias dos voos SPLAL, IGP-1991, IGP-1995 e, posteriormente, IGP-2007, com o objectivo de detectar pontos comuns entre a cobertura de referência e as restantes que pudessem, posteriormente, servir de pontos de controlo no processamento destes.

Para os 3 blocos definidos, para além dos 112 pontos fotogramétricos de base, disponíveis para o voo INAG-2002, foram ainda registados 367 pontos comuns com o voo SPLAL e 267 comuns com o voo IGP-2007.

As marcas fiduciais apresentam-se bem visíveis e identificadas (Figura 28) e as respectivas coordenadas estão disponíveis no certificado de calibração da câmara.

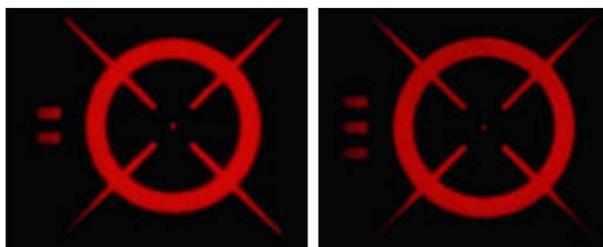


Figura 28: Identificação das marcas fiduciais (Wild RC20).

Foi então possível realizar as orientações internas de todas as imagens e ainda associar as distorções associadas à mesma.

Ao bloco Burgau - Lagos, composto por 7 fiadas, estão associados 30 pontos fotogramétricos. Para o bloco Alvor - Albufeira, foram utilizados 55 pontos fotogramétricos distribuídos ao longo de 12 fiadas. Finalmente, no bloco Albufeira - Ancão, foram medidos 21 pontos fotogramétricos em 4 fiadas. Em todos os casos, as fiadas sobrepõem-se em 2 modelos nas extremidades e as fotografias apresentam sobreposição longitudinal de 60%. Foram ainda medidos pontos de ligação entre fotografias da mesma fiada e entre os modelos sobrepostos nas extremidades das fiadas, de modo a apoiar o melhor possível a ligação entre fotografias e fiadas consecutivas.

Sendo necessário conhecer as coordenadas terreno dos pontos a servir como pontos fotogramétricos no processamento das restantes coberturas, foram também medidos

esses mesmos pontos no processamento deste voo, para que a informação necessária fosse retribuída pela aerotriangulação.

Em posse dos ficheiros com as coordenadas foto de todos os pontos medidos e detectados automaticamente, e com as orientações internas de todas as fotos, é possível realizar a triangulação aérea.

Burgau - Lagos:

A melhor solução obtida através do ajustamento retribuiu uma precisão geral σ_0 de 18 μm (0.14 m no terreno). Esta solução foi atingida utilizando 25 pontos de controlo horizontais e verticais, cuja exactidão final para as 3 componentes posicionais é a apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Exactidão obtida para o ajustamento Bugau-Lagos - INAG2002.

RMSE (m)	X	Y	Z
	0.109	0.117	0.258

Outra informação importante é o desvio posicional nos pontos fotogramétricos relativamente às coordenadas iniciais, dado pelo erro médio quadrático das diferenças (Tabela 6).

Tabela 6 – Desvios nos pontos fotogramétricos Burgau-Lagos – INAG2002.

RMSE (m) PFs	X	Y	Z
	0.105	0.113	0.242

Através da Figura 29 pode-se fazer uma primeira análise gráfica e observar a configuração do bloco, bem como os pontos de ligação, pontos fotogramétricos e vectores representando os desvios nestes últimos.

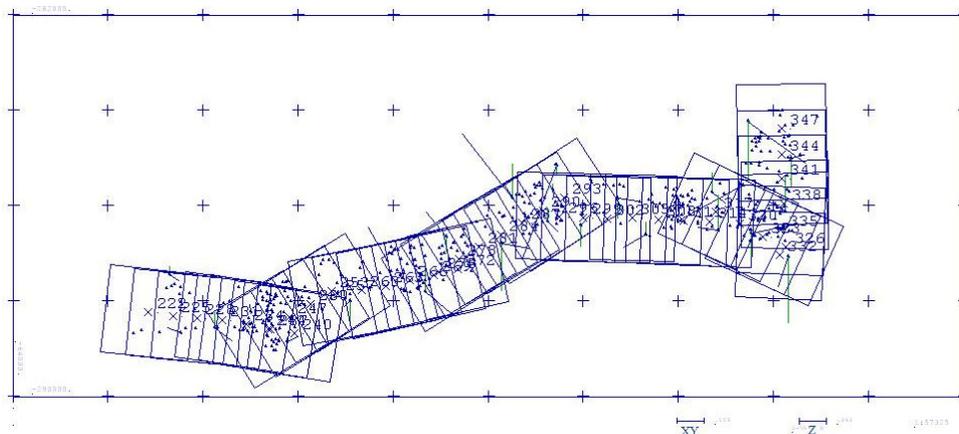


Figura 29: Configuração do bloco Burgau - Lagos para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.105m e 0.242m, respectivamente).

Discussão: Os resultados são considerados muito satisfatórios no que se refere aos valores de precisão e exactidão. Não se observam erros grosseiros ou sistemáticos: os desvios estão distribuídos em todas as direcções e homogeneamente ao longo do bloco. Verifica-se, no entanto, maiores resíduos na fiada da extremidade Este, o que é explicável pelo menor apoio de pontos de controlo na região, pela acentuada variação na orientação da fiada e pela extensa área coberta por água nas fotografias desta fiada, como se pode observar na imagem abaixo (Figura 30).

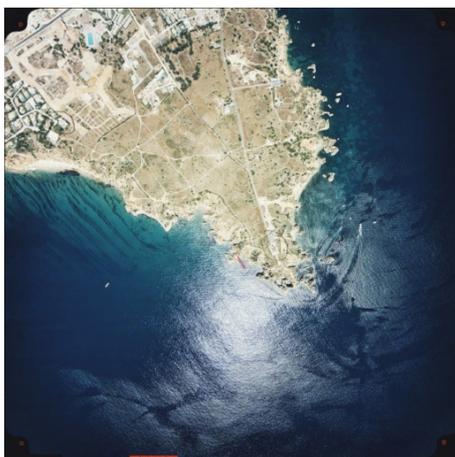


Figura 30: Foto número 332 da fiada 194 (INAG-2002).

Alvor - Albufeira:

Numa primeira aproximação, e uma vez que havia suficiente sobreposição entre fiadas, considerou-se válida a triangulação conjunta das 12 fiadas do bloco. No entanto, e após diversas tentativas, verificou-se ser necessária a partição do bloco em sub-blocos mais homogéneos no que se refere à orientação das fiadas e com ligação significativa entre fiadas consecutivas. Assim, foram criados 3 sub-blocos de 6, 2 e 4 fiadas: Alvor - Albufeira1, Alvor - Albufeira2 e Alvor - Albufeira3, respectivamente.

As melhores soluções resultaram de ajustamentos calculados com 2523, 531 e 1344 observações para os 3 sub-blocos, respectivamente, num total de 4390 observações, entre pontos fotogramétricos, de ligação e automáticos, e que permitiram as seguintes estatísticas (Tabela 7):

Tabela 7 - Exactidão obtida para o ajustamento Alvor-Albufeira - INAG2002.

	RMSE (m)			σ_0 (μm) (terreno)
	X	Y	Z	
Alvor-Albufeira1	0.192	0.144	0.637	19.76 (0.158m)
Alvor-Albufeira2	0.127	0.204	0.963	21.37 (0.171m)
Alvor- Albufeira3	0.100	0.106	0.470	25.69 (0.205m)

Os valores do erro médio quadrático das diferenças nos pontos fotogramétricos, para todo o bloco processado, apresentam os seguintes valores (Tabela 8):

Tabela 8 - Desvios nos pontos fotogramétricos Alvor-Albufeira – INAG2002.

	RMSE (m) PFs		
	X	Y	Z
Alvor-Albufeira	0.107	0.172	0.728

As configurações dos blocos apresentam-se de seguida nas Figura 31, Figura 32 e Figura 33.

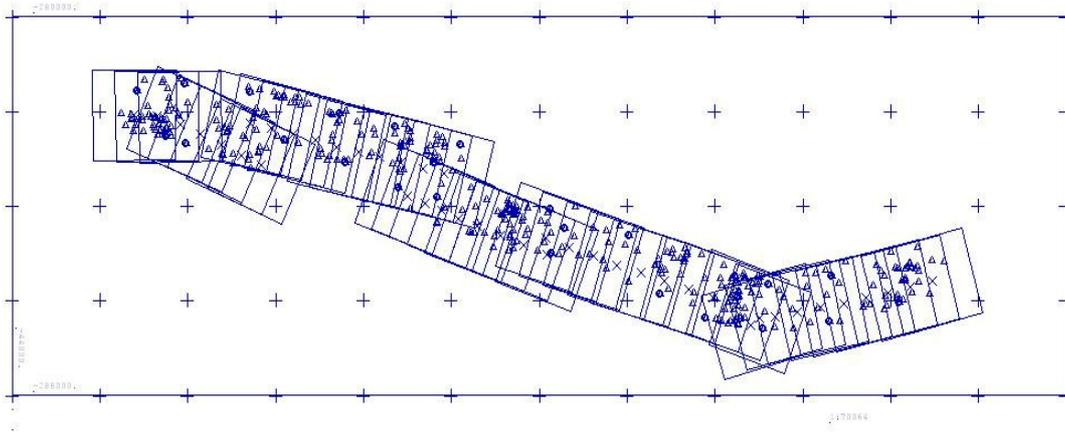


Figura 31: Configuração do bloco 1 Alvor-Albufeira para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação.

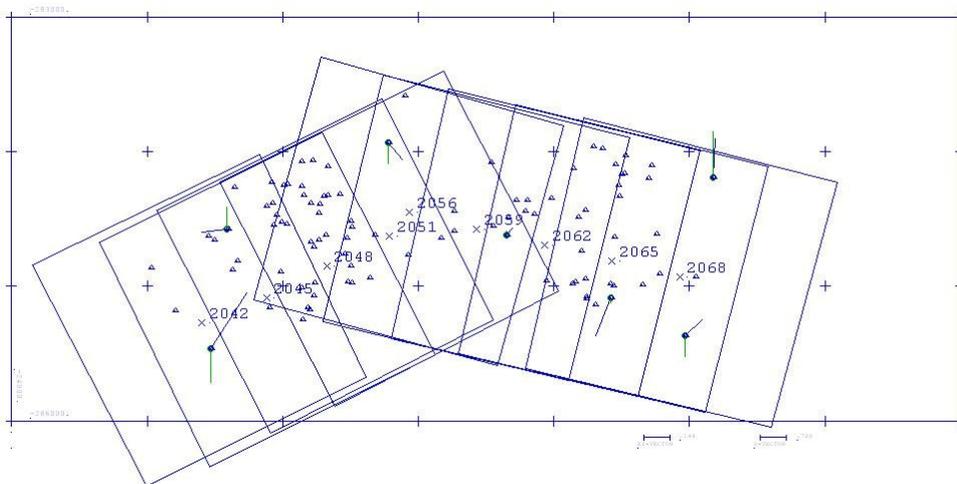


Figura 32: Configuração do bloco 2 Alvor-Albufeira para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação.

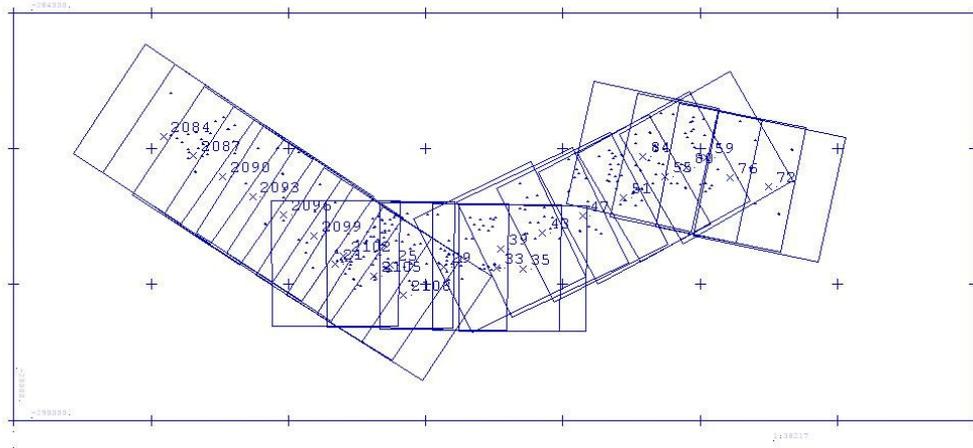


Figura 33: Configuração do bloco 3 Alvor-Albufeira para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação.

Discussão: A triangulação de cada sub-bloco verificou-se ser bastante trabalhosa, requerendo várias iterações com diferentes configurações, não só a nível do cálculo do ajustamento mas também a nível de medições consecutivas e adição de pontos de ligação, e aferição de medição de pontos fotogramétricos, até atingir um resultado que se pudesse considerar aceitável para os objectivos do trabalho. Verifica-se, no geral, uma razoável ligação entre as fiadas de cada bloco, bem como a ausência de erros sistemáticos, e a distribuição aleatória dos erros, espacial e direccionalmente.

Albufeira - Ancão:

A solução aceite para o ajustamento deste último bloco apoia-se em 5139 observações, e apresenta uma precisão de 33 μm (0.264 m) e valores de exactidão para as 3 componentes posicionais que se encontram na Tabela 9.

Tabela 9 - Exactidão obtida para o ajustamento Albufeira-Ancão - INAG2002.

RMSE (m)	X	Y	Z
	0.107	0.090	0.448

Também nos pontos fotogramétricos os valores de erro médio quadrático obtidos foram os constantes na Tabela 10.

Tabela 10 - Desvios nos pontos fotogramétricos Albufeira-Ancão – INAG2002.

RMSE (m) PFs	X	Y	Z
	0.102	0.086	0.418

A configuração do bloco pode ser observada na Figura 34, onde estão projectados os pontos fotogramétricos e os respectivos os vectores de desvio nas componentes planimétrica e vertical.

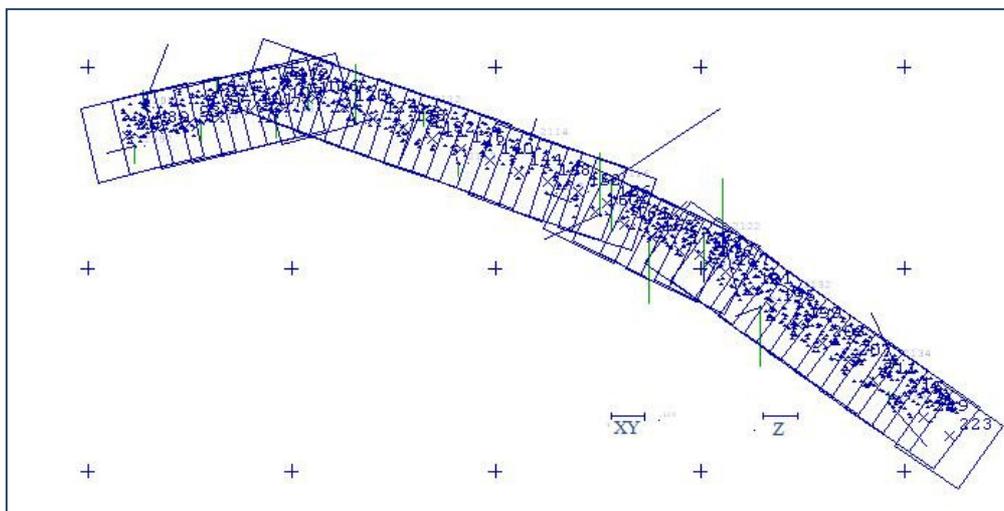


Figura 34: Configuração do bloco Albufeira - Ancão para a cobertura INAG-2002, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.102m e 0.418m, respectivamente).

Discussão: Os resultados do ajustamento obtido para este sector foram igualmente satisfatórios. Da análise gráfica da configuração do bloco, não se verificam erros sistemáticos ou grosseiros, estando os desvios bem distribuídos ao longo do bloco e em todas as direcções. Os maiores desvios encontram-se em zonas nas menos apoiadas de extremidades de fiadas, como seria de esperar.

É importante salientar que, por se tratar de uma cobertura fotográfica de um elemento específico como seja o litoral, todas as fotografias apresentam uma área mínima de 25 a 50% coberta por mar, área onde obviamente não foram coordenados pontos fotogramétricos e onde não é de todo possível registar pontos. Tais circunstâncias dificultam, em muitos casos, a obtenção de precisões que, num caso normal de uma cobertura tradicional, de geometria regular, para fins cartográficos, seriam mais facilmente atingidas.

Uma das dificuldades sentidas, principalmente no sector Alvor - Olhos de Água, relaciona-se com a necessidade de medir manualmente uma quantidade muito significativa de pontos de ligação entre fotografias e fiadas. Embora se tenha aplicado aos 3 blocos uma operação de correlação de imagem para a determinação automática de pontos comuns entre fotografias, a quantidade de pontos detectados com um coeficiente de correlação de aproximadamente 90% foi menor do que seria esperado para imagens com elevada homogeneidade e qualidade radiométricas, obrigando à medição sistemática de pontos homólogos em fotografias consecutivas.

Acrescenta-se que a detecção automática dos pontos foi alvo de uma verificação cuidada, onde foram eliminados todos os pontos que apresentavam cota negativa, uma vez que tal valor, a ocorrer em terra, está errado, e, no mar, não é informação relevante e pode contaminar pontos na vizinhança.

Voo IGP-2007

Esta cobertura fotográfica foi realizada pelo IGP, no ano de 2007, com uma câmara métrica digital DMC da Z/I Imaging, gerando imagens RGB de escala 1: 44000. A dimensão de 12 μ m do pixel, permite, à escala referida, uma resolução no terreno de cerca de 0.50m.

À semelhança da cobertura INAG-2002, e embora esta cobertura não tenha sido planeada para os mesmos objectivos, também as imagens de IGP-2007 utilizadas apresentam, com poucas excepções, cerca de 50 a 75% da sua área coberta por água, dificultando o processamento. No entanto, a geometria geral criada pelo conjunto das fiadas não se mostra tão problemática quanto a cobertura anterior, bem evidenciada pelo enquadramento da cobertura IGP-2007.

Tal como consta no certificado de calibração (Anexo A), as imagens obtidas, RGB, têm uma dimensão de 13824 x 7680 pixels e uma distância focal “virtual” de 120mm. Cada imagem ocupa cerca de 300 Mb em disco.

Por se trate de imagens digitais, não existem marcas fiduciais e considera-se que a imagem final não tem distorções, visto as distorções das várias câmaras, determinadas por calibração analítica, serem corrigidas no processo de elaboração da imagem final. A orientação interna das imagens originalmente digitais é intrínseca às suas dimensões, isto é, não é necessário definir a posição de uma imagem na câmara, uma vez que se trata de um registo digital da imagem em sensores.

Esta cobertura fotográfica foi realizada com um sistema GPS/IMU associado. Foi disponibilizada pelo IGP uma listagem dos parâmetros de orientação externa para cada imagem adquirida. Foi, no entanto, aconselhada a realização de uma aerotriangulação com esses mesmos parâmetros, de forma a verificar e melhorar, se possível, a precisão dos mesmos. Tendo sido em 2006 adoptado o sistema de referência geodésico ETRS89 como sistema de referência geodésico nacional [CATALÃO, 2007], os parâmetros em questão referiam-se ao novo sistema de referência denominado PT-TM06.

Foi realizada uma primeira aerotriangulação utilizando *a priori* os parâmetros originais disponibilizados, em PT-TM06, e com auxílio de pontos de ligação entre imagens (6 por imagem, bem distribuídos por toda a área), numa operação denominada ISO – Integrated Sensor Orientation. Esta operação consiste em determinar as orientações externas das imagens combinando os dados de um sistema IMU e o posicionamento GPS, juntamente com o apoio de pontos de ligação entre as imagens. A ISO permite

grande flexibilidade especialmente em regiões costeiras em que apenas parte da imagem está coberta por superfície emersa e a ligação entre as imagens é fraca [JACOBSEN, 2004]. Foram também medidos nas imagens os pontos fotogramétricos da cobertura INAG-2002 que se puderam identificar nas imagens de 2007. As coordenadas dos pontos fotogramétricos, originalmente referidas a *datum 73*, foram transformadas para PT-TM06 com o programa oficial TransCoord PRO (IGP), utilizando o método de transformação por bases, o mais adequado a uma região geograficamente limitada uma vez que a transformação se baseia nas coordenadas dos Vértices Geodésicos da mesma região. Optou-se por manter o sistema de referência original durante esta operação uma vez que a mesma instituição também disponibiliza uma aplicação de transformação de ficheiros vectoriais para PT-TM06, ferramenta essencial para a continuidade do trabalho. A aerotriangulação foi bem sucedida.

De forma a verificar a compatibilidade entre a informação produzida num e noutra sistema procedeu-se à estereorrestituição de um sector limitado de arriba, em 2007, onde se sabe não terem ocorrido alterações de 2002 para 2007, já restituído para a data de 2002 em *datum 73*. Este último foi transformado em PT-TM06 com o auxílio do referido programa e, em SIG, foram sobrepostos os dois conjuntos de dados vectoriais em PT-TM06. Embora os resultados dos ajustamentos de uma e outra cobertura fossem satisfatórios, a comparação entre os dois conjuntos demonstrou um desvio sistemático de 3 a 5 m na componente horizontal.

Considerando que as soluções aceites no ajustamento individual de cada cobertura aérea são satisfatórias e assumindo a precisão não inferior a 20 cm (IGP) que a transformação de coordenadas entre os sistemas *datum 73* e PT-TM06 permite obter com a transformação por bases, poderá eventualmente atribuir-se a responsabilidade da não compatibilidade entre os ficheiros vectoriais testados à aplicação referida utilizada para a transformação dos ficheiros. Em todo o caso, esta suposição carece, obviamente, de verificação.

Assim, verificou-se ser impossível a implementação deste método em fases seguintes do processamento. Foi ainda testada a hipótese de realizar uma transformação para *datum 73* das coordenadas XYZ dos centros de projecção das imagens com recurso ao mesmo TransCoord PRO. Não foi esperado um resultado válido, uma vez que os valores dos ângulos de orientação externa das imagens estão também dependentes do sistema de referência a que se referem. Tal expectativa foi confirmada aquando da geração de um modelo com condições adequadas à estereoscopia, o qual não permitiu a visualização tridimensional do terreno.

Dado o intervalo de tempo 2002-2007 e a diferença de resolução das imagens, apenas 58 pontos fotogramétricos de INAG-2002 foram identificados nas imagens de IGP-2007. Para além destes pontos, foram medidos os já referidos 367 pontos pseudo-fotogramétricos cujas coordenadas se conheceram com a aerotriangulação da cobertura INAG-2002.

A extensa abrangência geográfica de cada imagem, comparativamente às restantes coberturas, faz com que esta cobertura seja fonte de pontos pseudo-fotogramétricos para as regiões que são cobertas por outras coberturas e não pela INAG-2002. Assim, foram ainda medidos 57 pontos pseudo-fotogramétricos para apoiar zonas mais fracas da cobertura SPLAL, 31 pontos pseudo-fotogramétricos para a cobertura IGP-1991 e 18 para a cobertura IGP-1995.

Para além destes pontos, e porque o apoio fotogramétrico está concentrado na faixa costeira, facto originado pela diferença de escala entre esta cobertura e a INAG-2002, adicionou-se na fase da aerotriangulação os pontos de ligação entre imagens e fiadas, medidos aquando da ISO. Na Figura 35, pode observar-se a distribuição dos pontos medidos.



Figura 35: Distribuição de pontos incluídos na aerotriangulação, numa imagem da cobertura IGP-2007.

Burgau - Lagos:

O ajustamento realizado para as 2 fiadas deste bloco contou com 5055 observações e foram utilizados 37 pontos fotogramétricos de INAG-2002. A solução aceite foi a mais precisa de várias iterações, apresentando uma precisão de 33 μm . É também caracterizada pela seguinte estatística (Tabela 11).

Tabela 11 - Exactidão obtida para o ajustamento Burgau-Lagos - IGP2007.

RMSE (m)	X	Y	Z
	0.336	0.380	0.877

No que concerne os pontos pseudo-fotogramétricos, os desvios contabilizados são os constantes na Tabela 12.

Tabela 12 - Desvios nos pontos fotogramétricos Burgau-Lagos – IGP2007.

RMSE (m) PFs	X	Y	Z
	0.327	0.369	0.841

A Figura 36 mostra a configuração do bloco processado, com os pontos medidos projectados.

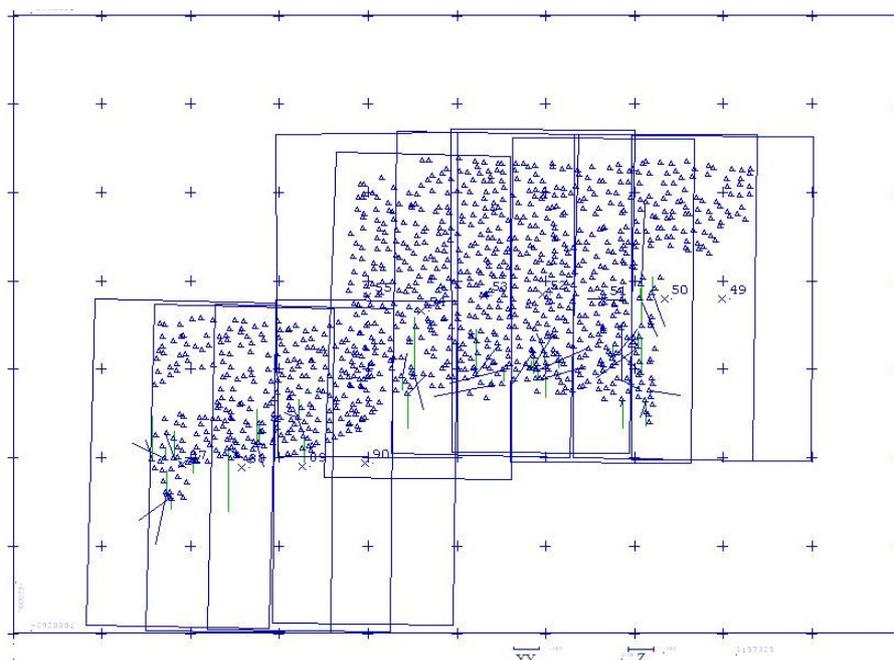


Figura 36: Configuração do bloco Burgau - Lagos para a cobertura IGP-2007, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.327m e 0.841m, respectivamente).

Discussão: Os resultados são considerados satisfatórios tendo em conta a geometria irregular, a fraca distribuição de pontos fotogramétricos que, mais ainda, não foram coordenados para esta cobertura. A grande quantidade de pontos que populam quase completamente a área das fotografias resulta também da detecção de um grande número de pontos homólogos entre imagens, através de correlação automática de imagem.

Alvor - Olhos de Água:

Como se poderá verificar na Figura 37, as 3 fiadas que compunham o bloco foram trianguladas em conjunto, numa geometria bastante estável.

A solução aceite para o ajustamento retribuiu uma precisão de 16.47 μ m, e foi conseguida com base em 1841 observações e 51 pontos fotogramétricos. A exactidão do ajustamento nas componentes posicionais é a que se apresenta na Tabela 13.

Tabela 13 - Exactidão obtida para o ajustamento Alvor-Olhos de Água - IGP2007.

RMSE (m)	X	Y	Z
	0.289	0.284	0.753

Nos pontos fotogramétricos, o erro médio quadrático das diferenças é o que se apresenta na Tabela 14.

Tabela 14 - Desvios nos pontos fotogramétricos Alvor-Olhos de Água – IGP2007.

RMSE (m) PFs	X	Y	Z
	0.283	0.278	0.730

A configuração do bloco é apresentada na Figura 37, onde se observam os pontos pseudo-fotogramétricos e os desvios nos mesmos.

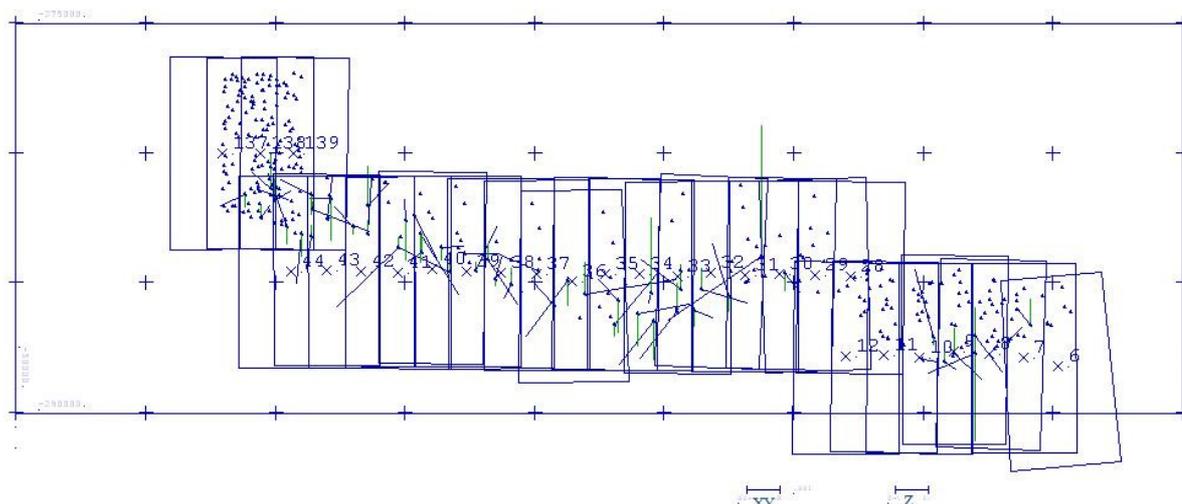


Figura 37: Configuração do bloco Alvor - Olhos de Água para a cobertura IGP-2007, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.283m e 0.730m, respectivamente).

Discussão: As dificuldades associadas às variações de orientação da costa ao longo do sector são minimizadas, neste caso, pela área de terreno abrangida por cada imagem. Verificam-se alguns erros em algumas zonas menos apoiadas, como seja junto à linha de costa, mas apresentam características aleatórias (distribuídos ao longo das fiadas e em todas as direcções). Neste bloco, ao contrário do anterior, apenas a fiada composta por imagens cuja área de terreno é superior à área abrangida por água foi bem sucedida aquando da actuação do algoritmo de detecção automática de pontos homólogos. Verifica-se que, em cada imagem das fiadas seguintes, os pontos projectados correspondem na grande maioria aos pontos de ligação medidos manualmente.

Olhos de Água - Ancão:

A melhor solução obtida para este bloco, composto por 4 fiadas, retribuiu uma precisão de 7.76 μm , bastante elevada relativamente aos resultados dos restantes blocos da mesma cobertura. Os cálculos foram realizados com recurso a um total de 1146 observações e 58 pontos fotogramétricos e retribuíram a exactidão constante na Tabela 15.

Tabela 15 - Exactidão obtida para o ajustamento Olhos de Água-Ancão - IGP2007.

RMSE (m)	X	Y	Z
	0.274	0.353	0.639

Relativamente aos pontos fotogramétricos, o erro médio quadrático das diferenças nas 3 componentes posicionais é a constante na Tabela 16.

Tabela 16 - Desvios nos pontos fotogramétricos Olhos de Água-Ancão – IGP2007.

RMSE (m) PFs	X	Y	Z
	0.270	0.346	0.623

A Figura 38 permite a análise gráfica da configuração do bloco e dos pontos utilizados no ajustamento.

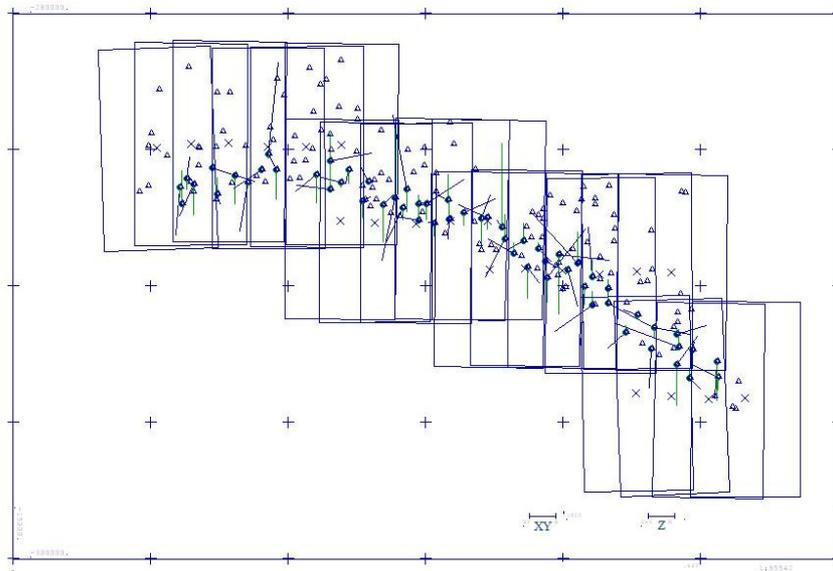


Figura 38: Configuração do bloco Olhos de Água - Ancão para a cobertura IGP-2007, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.270m e 0.623m, respectivamente).

Discussão: Os resultados obtidos destacam-se dos blocos anteriores pela superior precisão do ajustamento e, conseqüentemente, nos menores desvios nos pontos pseudo-fotogramétricos. A geometria, ainda que pouco tradicional, mantém-se regular ao longo

do sector, possibilitando, através de pontos de ligação, uma ligação bem apoiada entre fiadas. Não se verificam erros sistemáticos ou grosseiros: os desvios têm diferentes direcções e a sua presença é homogénea ao longo do bloco.

É de extrema importância evidenciar a distribuição de pontos fotogramétricos e pseudo-fotogramétricos nas imagens desta cobertura, bem visível nas figuras representativas da configuração dos blocos processados. Esta distribuição é forçada na medida em que houve necessidade de usar pontos fotogramétricos não definidos originalmente para esta cobertura e obter pontos pseudo-fotogramétricos a partir das imagens de uma cobertura muito menos abrangente geograficamente que a cobertura das imagens em questão. Por outro lado, esta mesma característica possibilitou uma geometria muito mais favorável ao processamento fotogramétrico, principalmente nos blocos Alvor - Olhos de Água e Olhos de Água - Ancão, onde se obtiveram precisões muito satisfatórias. No caso do bloco Burgau - Lagos, não só a geometria é mais irregular, como se verifica a ausência de pontos pseudo-fotogramétricos medidos especificamente para as imagens que o compõem, diminuindo as possibilidades de franco sucesso.

Mais uma vez, o processamento foi dificultado pelo grande domínio da superfície marinha nas imagens, ocupando perto de 50% da área total de cada imagem.

Voo SPLAL

Esta cobertura aérea é de extrema importância na medida em que se trata do voo de melhor escala mais antigo do país, permitindo alargar a janela temporal até cerca de 60 anos.

A cobertura fotográfica deverá ter sido executada em blocos bem definidos, ao longo de vários anos, de acordo com a necessidade de produção cartográfica [REDWEIK et al., 2009]. Para o litoral algarvio, o cartograma da cobertura indica um intervalo de tempo de obtenção das fotografias entre 1951 e 1952, como se observa na Figura 39, na página seguinte.



Figura 39: Pormenor do cartograma da cobertura para a região do Algarve demonstrando que o Barlavento deverá ter sido coberto em 1952 e o Sotavento em 1951 (adaptado de [REDWEIK et al., 2009]).

As informações relativas a esta cobertura fotográfica aérea são ainda escassas e dotadas de incertezas importantes, que influenciam resultados e conclusões. Pequenas variações na data de obtenção das imagens, por exemplo, perturbam resultados como taxas temporais, fundamentais para a compreensão correcta do fenómeno e decisões subsequentes.

Para o processamento fotogramétrico digital correcto é essencial conhecer-se o sistema de coordenadas fotográfico, definido pelas coordenadas foto das marcas fiduciais e presente num certificado de calibração da câmara. No entanto, à data de obtenção das imagens, a realização de uma calibração resultava num relatório onde constavam os resultados dos testes à lente, um teste métrico à câmara, como instrumento de cartografia, e um negativo da placa de vidro onde constava o ponto principal e as marcas fiduciais [ASP, 1944]. Uma vez que o processamento fotogramétrico era realizado com recurso a meios mecânicos, era apenas requerido que as marcas fiduciais fossem bem visíveis para que pudessem ser fisicamente enquadradas e orientadas num porta-placas, não havendo, por isso, necessidade das informações que, actualmente, são fundamentais.

O processamento fotogramétrico deste voo desenvolveu-se então em diversas fases, trabalhosas e prolongadas, principalmente devido à ausência de informações relevantes. O único parâmetro conhecido sem ambiguidades aquando do início do processamento era a distância focal da câmara, impressa nas margens de cada imagem. Posteriormente, REDWEIK et al. [2009] avançam a possibilidade de a câmara usada nesta cobertura ser a RMK S1818 ou RMK HS1818, ambas de Carl Zeiss Jena, distribuída a partir de 1935. Por razões históricas, a ASP não faz qualquer caracterização de câmaras de origem alemã, pelo que não se tem, à data, informações oficiais acerca desta câmara. Também

não foi, até à data, identificado qualquer certificado de calibração pertencente a esta cobertura pelo que não se possui coordenadas foto calibradas para as marcas fiduciais e ponto principal, nem informações relativas às distorções das lentes.

As fotografias SPLAL estavam disponíveis em cópias de papel fotográfico, adquiridas ao IGeoE em 1992. Sabe-se que, actualmente, o filme original se encontra conservado em condições especiais de refrigeração, numa sala dedicada. No entanto, a idade e a “história” do filme introduzem inevitáveis distorções no suporte. As cópias usadas neste trabalho apresentam, na generalidade, boa qualidade radiométrica mas uma pequena percentagem de imagens apresenta problemas significativos de distorção.

Utilizando um *scanner* plano comercial de qualidade superior, realizou-se a digitalização de 74 fotografias, com resolução de 1200 dpi, o que permitiu um pixel de $21\mu\text{m}$, ou seja 0.38m no terreno.

As imagens apresentam 4 marcas fiduciais que se localizam a meio de cada margem e que consistem num pequeno ponto branco, bem definido no interior, como se verifica na Figura 40.

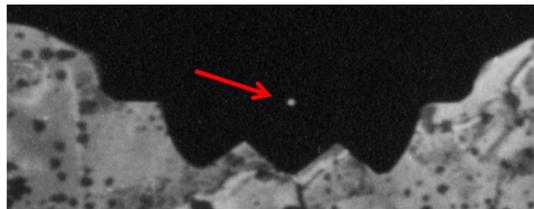


Figura 40: Marca fiducial na margem de uma fotografia SPLAL, onde se salienta o pequeno ponto branco que constitui a marca.

No entanto, em todas as fotografias há uma marca fiducial que não está presente, facto que, adicionado à ausência de informações já referida, dificultou significativamente a operação de orientação interna das imagens. Teve então que ser repensada a estratégia e definiu-se novas marcas fiduciais recorrendo a elementos geométricos concretos, que estivessem presentes e fossem simétricos em todas as margens. O elemento seleccionado como nova marca fiducial é o que se apresenta na Figura 41.

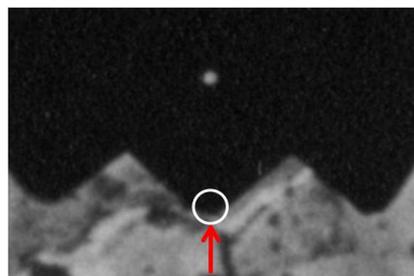


Figura 41: Redefinição do elemento a usar como marca fiducial, por ausência sistemática de uma das marcas fiduciais originais nas imagens.

Uma vez definidas as novas marcas fiduciais, foi necessário atribuir identificação às marcas para, posteriormente, serem atribuídas coordenadas foto. Foi definido, então, que a marca número 1 seria a localizada na margem que contém a identificação da imagem e, as restantes, seriam identificadas sequencialmente por ordem numérica, em sentido retrógrado (Figura 42).



Figura 42: Definição da identificação e medição das marcas fiduciais.

O software de fotogrametria LISA apresenta uma ferramenta bastante útil, a *pseudo-camera definition*, dedicada especialmente a situações em que é impossível definir uma câmara e todos os seus parâmetros correctamente. Assim, informando acerca da resolução de digitalização da fotografia, da resolução do pixel, da distância focal e do número e distribuição das marcas fiduciais, é possível obter-se, para cada imagem, as coordenadas foto de cada marca relativamente ao ponto principal da imagem.

Ora, para se definir coordenadas foto pseudo-calibradas de marcas fiduciais para aplicar a todas as imagens, e assim realizar a transformação entre coordenadas pixel e foto, foram escolhidas, das 74 imagens SPLAL disponíveis, 56 imagens que não apresentavam deformações de suporte e radiométricas, de forma a minimizar erros na medição da posição real das marcas.

Para cada marca 1 a 4 de cada imagem medida, foi calculada a média das coordenadas x e y, bem como o desvio-padrão. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Coordenadas foto para as 4 marcas fiduciais das imagens SPLAL.

Coordenadas	Marca 1		Marca 2		Marca 3		Marca 4	
	x	y	x	y	x	y	x	y
Média	86.290	0.040	-0.054	-86.217	-86.272	0.040	-0.054	86.148
Desvio-padrão	0.171	0.019	0.024	0.171	0.152	0.0192	0.024	0.169

Desta forma, foi possível definir uma pseudo-câmara com coordenadas foto de marcas fiduciais e distância focal conhecidas. Uma vez novamente medidas as mesmas marcas, ficou recuperada a orientação interna.

A cobertura fotográfica foi executada, no litoral algarvio, na direcção Norte-Sul. Sendo o litoral o objecto de estudo, dispunha-se apenas das imagens que compunham um par estereoscópico dessa faixa, ou seja, ao longo de todo o litoral dispõe-se de fiadas compostas por duas imagens que se sobrepõem em cerca de 70%. A sobreposição entre as fiadas é, na maior parte dos casos, muito baixa ou mesmo inexistente. No entanto, existem fiadas que, nitidamente, terão sido realizadas após a cobertura original, com o objectivo de preencher lacunas fotográficas. Este facto é apoiado pela existência de fiadas em que apenas uma fracção central das fotografias não está coberta pelas fiadas anterior e posterior.

Tal como referido, foi estabelecido um primeiro bloco de fotografias para testes e definição da metodologia, o bloco Burgau – Lagos. Este bloco é constituído por 8 fiadas de duas fotografias cada, às quais estão associadas 58 pontos pseudo-fotogramétricos. O segundo bloco, Alvor - Olhos de Água consiste em 19 fiadas e foram registados 126 pontos pseudo-fotogramétricos para o seu processamento. O último bloco, Olhos de Água - Ancão, consiste em 6 fiadas onde foram registados 39 pontos pseudo-fotogramétricos.

É importante referir que, embora seja considerado que a qualidade radiométrica das imagens é bastante boa a nível de contraste e luminosidade, a aplicação do algoritmo de correlação de imagem para a detecção automática de pontos homólogos entre imagens não teve sucesso. O algoritmo conseguiu apenas detectar e registar pontos supostamente homólogos para um coeficiente de correlação de 0.6. A fraca confiança num parâmetro de correlação bastante baixo foi corroborada pela pequena quantidade de pontos de facto registados e pela verificação de que esses pontos eram incorrectos: muitos resultavam de correlações em água e, outros, eram classificados como erros grosseiros na fase de aerotriangulação e eliminados do ajustamento.

Burgau – Lagos:

Os melhores resultados obtidos para este sector resultam de um ajustamento com precisão geral de 22.56 µm, conseguido através de 36 pontos pseudo-fotogramétricos (dos quais 2 foram utilizados nas suas componentes planimétricas), e 988 observações. Os erros médios quadráticos para as 3 componentes posicionais são os apresentados na Tabela 18:

Tabela 18 - Exactidão obtida para o ajustamento Burgau-Lagos - SPLAL.

RMSE (m)	X	Y	Z
	0.823	0.690	1.426

Para os pontos pseudo-fotogramétricos, o erro médio quadrático das diferenças é um pouco mais baixo (Tabela 19):

Tabela 19 - Desvios nos pontos fotogramétricos Burgau-Lagos - SPLAL.

RMSE (m) PFs	X	Y	Z
	0.800	0.670	1.362

A configuração do bloco e a distribuição de pontos pseudo-fotogramétricos (e respectivos resíduos) e pontos de ligação podem ser observados na Figura 43.

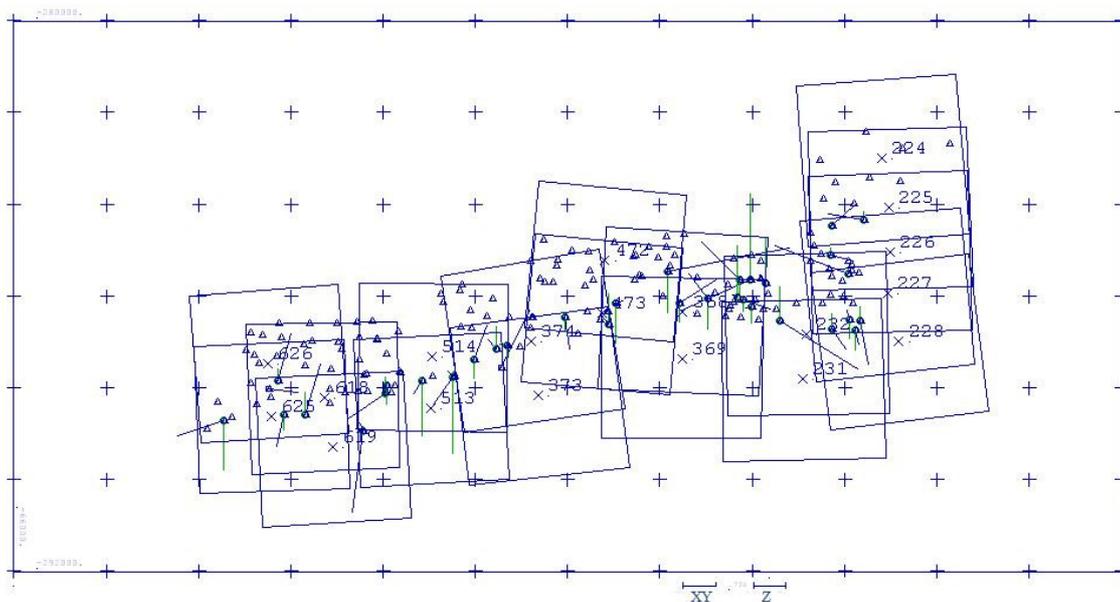


Figura 43: Configuração do bloco Burgau - Lagos para a cobertura SPLAL, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.823m e 1.426m, respectivamente).

Discussão: A aerotriangulação deste bloco contou apenas com pontos pseudo-fotogramétricos obtidos a partir da cobertura INAG-2002, pelo que a sua disposição no bloco se concentra ao longo da linha de costa. Verifica-se também que a fiada da extremidade Este se encontra pouco apoiada, embora os desvios verificados nos pontos nela medidos não apresentem valores muito superiores aos restantes. Não se verificam erros grosseiros ou sistemáticos, estando os desvios bem distribuídos por todas as direcções e ao longo de todas as fiadas.

Alvor – Olhos de Água:

Este bloco é constituído por 19 fiadas que, numa primeira fase, totalizavam 38 fotografias.

Embora estivessem garantidas as condições para uma aerotriangulação bem sucedida, as primeiras tentativas com este bloco não retribuíram resultados positivos. Foi feita uma análise geral do bloco e fiada a fiada, com o objectivo de assinalar zonas de fraca

geometria e apoio, após a qual foram requisitadas ao IGeoE mais 11 fotografias, impressas em papel fotográfico, perfazendo um total de 49 imagens. As novas imagens disponibilizadas pelo IGeoE resultam da impressão directa, em papel fotográfico, da digitalização do filme original, num *scanner* fotogramétrico, não se tratando, por isso, de provas de contacto.

À semelhança das primeiras, estas fotografias foram novamente digitalizadas, no mesmo *scanner* comercial, e a metodologia desenvolvida para a recuperação da orientação interna foi aplicada. No entanto, na fase de medição de pontos verificou-se que a resolução das imagens diminuiu relativamente às primeiras, dificultando significativamente a medição de elementos pontuais (Figura 44).



Figura 44: Comparação da visualização, com *zoom* de 200%, de um mesmo pormenor nas imagens SPLAL em prova de contacto fotográfica (processo fotográfico clássico, à esquerda) e impressas em papel fotográfico (com impressora de jacto de tinta, à direita).

Para a aerotriangulação, foram registados 126 pontos pseudo-fotogramétricos obtidos a partir das coberturas INAG-2002 e IGP-2007, e medidos ao longo de todas as 49 fotografias.

Foram realizadas várias tentativas de ajustamento, utilizando diferentes combinações de pontos fotogramétricos e utilizando centenas de pontos de ligação, de forma a garantir o máximo apoio entre fiadas. Não atingindo um ajustamento aceitável, o bloco foi dividido em 2 sub-blocos, Alvor – Carvoeiro e Carvoeiro - Albufeira (Figura 45), na tentativa de atingir uma geometria mais estável através da definição de conjuntos fiadas com maior sobreposição e melhor ligação.



Figura 45: Configuração dos sub-blocos Alvor – Carvoeiro (em cima) e Carvoeiro – Albufeira (em baixo), com projecção das várias fiadas e pontos pseudo-fotogramétricos.

Não foi possível chegar a resultados satisfatórios, não só a nível da precisão mas também a nível da exactidão, cujos valores ultrapassavam largamente 1m nas três componentes posicionais.

Olhos de Água – Ancão:

Este bloco era, primeiramente, composto por 6 fiadas e 16 fotografias. Foram registados, ao longo das fiadas, 39 pontos fotogramétricos. Verificou-se que entre duas fiadas deste bloco a sobreposição era quase inexistente, pelo que foi necessário dividir o bloco em dois sub-blocos de 2 e 4 fiadas, entre Albufeira e Praia da Falésia, e Praia da Falésia e Ancão, respectivamente.

As primeiras tentativas de aerotriangulação não retribuíram resultados aceitáveis pelo que foram, da mesma forma que no sector anterior, adquiridas mais 6 fotografias, com as mesmas características já descritas.

A aerotriangulação do primeiro sub-bloco de 2 fiadas, cuja configuração se pode observar na Figura 46, não retribuiu resultados aceitáveis após várias tentativas, utilizando diferentes configurações de pontos fotogramétricos.



Figura 46: Configuração do sub-bloco de 2 fiadas, com projecção dos pontos fotogramétricos (a verde) e alguns dos pontos de ligação medidos entre as fiadas.

Dada a importância do sector abrangido por estes pares, não só a nível geológico como de relevância para a instituição requisitante do trabalho, insistiu-se no processamento destas duas fiadas, realizando o processamento de cada imagem através da recuperação das orientações externas individualmente no *software* PCI Geomatica.

Assim, utilizando as imagens que constituiriam um par estereoscópico com a maior área possível coberta por terreno, abrangendo toda a linha de costa, foi novamente realizada a orientação interna e, de seguida, a orientação externa à custa dos mesmos pontos pseudo-fotogramétricos e pontos de ligação novos.

Os resultados obtidos para cada modelo e, mais particularmente, para cada imagem são os que se apresentam na Tabela 20. O software utilizado não retribuiu estatísticas para a componente vertical, pelo que não se pôde contabilizar os erros em Z. No entanto, foi feita uma comparação sistemática entre a primeira edição da folha 602 da carta militar 1: 25000 e as diferenças foram consideradas aceitáveis.

Tabela 20 - Resultados obtidos para os modelos, bem como na orientação individual de imagens, do bloco Albufeira – Praia da Falésia, e número de pontos fotogramétricos e de ligação utilizados para o efeito.

Imagem	Nº. PF	Nº. PL	RMSE X (m)	RMSE Y (m)
80	8	6	7.27	6.37
81	5	6	1.90	3.23
377	7	27	1.22	1.82
376	7	27	1.71	2.76
Modelo 81-80	13	6	5.66	5.21
Modelo 376-377	14	27	1.43	2.25

Discussão: Facilmente se observa que a imagem 80 retribuiu resultados significativamente piores que a imagem 81, com que se forma o modelo estereoscópico. Tal resultado é atribuível à fraca qualidade radiométrica da imagem 80, que é parte integrante do grupo de imagens impressas em papel fotográfico e, posteriormente, digitalizadas. Os resultados do processamento desta imagem não só inviabilizam automaticamente a sua utilização em operações subsequentes de medição de alterações, como não permitiram sequer a visualização tridimensional do terreno num modelo epipolar gerado com a imagem 81.

A aerotriangulação do segundo bloco com 4 fiadas foi bastante trabalhosa. Foram, em primeiras tentativas, utilizados 17 pontos pseudo-fotogramétricos para o ajustamento. No entanto, por apresentarem desvios significativos, acabaram por ser rejeitados 11 desses pontos, que foram remetidos a pontos de ligação, obtendo-se então um ajustamento aceitável com 6 pontos pseudo-fotogramétricos e vários pontos de ligação, contabilizando um total de 554 observações. O melhor valor de precisão geral obtida para o bloco foi de 47.07 μm e os valores de exactidão para as componentes posicionais são os apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Exactidão obtida para o ajustamento Olhos de Água-Ancão - SPLAL.

RMSE (m)	X	Y	Z
	0.960	0.466	1.486

Nos pontos fotogramétricos, os valores do erro quadrático médio das diferenças são os constantes na Tabela 22.

Tabela 22 - Desvios nos pontos fotogramétricos Olhos de Água-Ancão - SPLAL.

RMSE (m) PFs	X	Y	Z
	0.924	0.346	1.036

A configuração do bloco (Figura 47) demonstra a geometria desfavorável do bloco, bem como a fraca ligação entre fiadas consecutivas e as irregularidades dentro de uma mesma fiada.

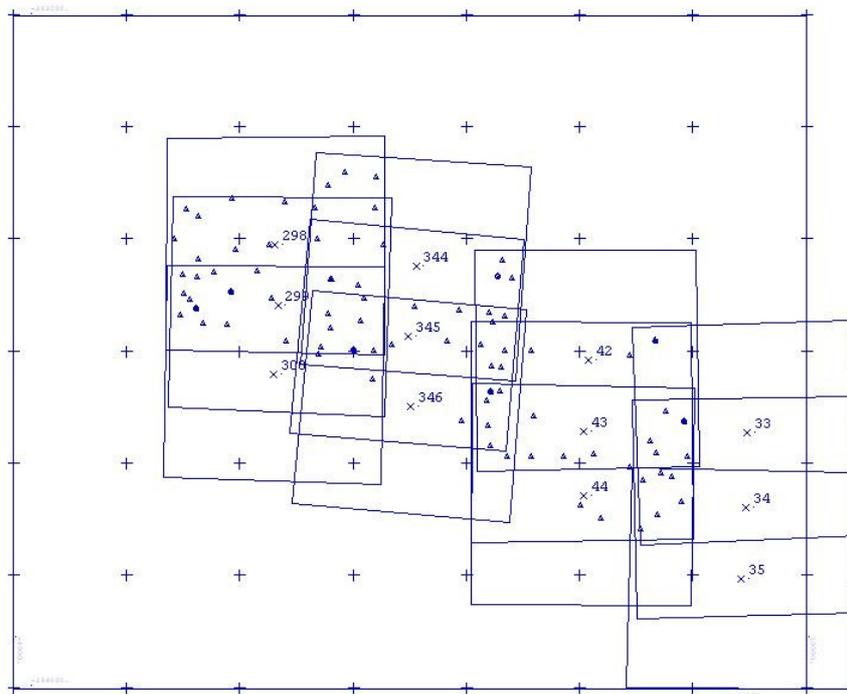


Figura 47: Configuração do bloco Praia da Falésia (Oeste) - Ancão para a cobertura SPLAL, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.823m e 1.426m, respectivamente).

Foram diversas as dificuldades encontradas ao longo do processamento fotogramétrico desta cobertura, tanto na fase de pré-processamento como na fase de aerotriangulação.

A operação de orientação interna foi realizada à custa da definição de metodologias que minimizassem os problemas associados à ausência de uma marca fiducial em todas as imagens e de um certificado de calibração. Os elementos usados como marcas fiduciais introduzem erros importantes na operação de orientação interna: trata-se, de facto, de elementos geométricos, localizados simetricamente nas margens das fotografias, mas constituem formas pouco conspícuas que, em alguns casos, dificultam bastante a manutenção do rigor na medição em todas as imagens. Associando o facto das coordenadas foto das marcas fiduciais terem sido calculadas a partir da média das coordenadas foto medidas individualmente para cada foto, os parâmetros de transformação entre coordenadas pixel e foto são considerados “aproximados”.

É ainda importante sublinhar o facto de terem sido usados pontos pseudo-fotogramétricos, derivados da aerotriangulação da cobertura INAG-2002 e, à excepção do bloco Burgau – Lagos, também da cobertura IGP-2007. Para além de estarem dotados dos RMSE associados aos ajustamentos das coberturas mais recentes, a medição dos pontos na cobertura SPLAL reveste-se de alguma imprecisão na medida em que, mesmo com o auxílio de *zooms*, é extremamente difícil a identificação de elementos como esquinas de casas ou cruzamentos de estradas. A experiência prática com esta cobertura fotográfica permite adiantar, para a precisão de medição dos pontos nas imagens, um valor não inferior a 3 pixels.

Finalmente, na fase de aerotriangulação, verificou-se ser fundamental o papel dos pontos de ligação. O número de pontos de ligação medidos corresponde directamente ao número de observações utilizadas nos ajustamentos realizados (à excepção dos pontos fotogramétricos), uma vez que a aplicação do algoritmo de detecção automática de pontos não foi bem sucedido.

As Figura 45 e Figura 46 de configuração dos blocos foram desenhadas manualmente, à escala das fotografias, e nelas estão espelhadas a irregularidade de posição das fotografias dentro de uma mesma fiada e entre fiadas. Estes esquemas demonstram bem a irregularidade da geometria da cobertura e as lacunas fotográficas que, num primeiro voo fotográfico, existiriam e que, posteriormente foram ultrapassadas com a adição de fiadas intercalares.

Relativamente ao bloco não triangulado (Alvor – Albufeira), por motivos de calendário, e dada a significativa extensão do sector em falta, não foi possível proceder da mesma forma que para os pares trabalhados individualmente noutro *software*. O processamento através deste método retribuiu piores resultados do que os conseguidos para outras zonas do litoral, para a mesma cobertura fotográfica.

Existe alguma dificuldade em definir factores ou obstáculos aos quais atribuir responsabilidades pelos maus resultados do processamento. Neste caso, não é possível atribuir “somente” à fraca geometria, ao menos rigoroso apoio fotogramétrico e à menor confiança na operação de orientação das imagens, a origem dos problemas verificados nestes modelos: fotografias nas mesmas condições radiométricas e geométricas, processadas com os mesmos pontos de controlo, orientadas segundo os mesmos procedimentos e aplicando o mesmo nível de rigor, apresentaram resultados finais bastante distintos, impossibilitando mesmo, em alguns casos, a sua posterior utilização na aquisição de informação.

É importante relembrar que as imagens processadas originalmente resultaram da digitalização de provas de contacto, de boa qualidade, utilizando apenas um *scanner* comercial, ainda que de qualidade elevada, e ainda que as imagens posteriormente adquiridas foram digitalizadas no mesmo scanner comercial, a partir de impressões em papel fotográfico das imagens digitalizadas a partir do filme. Embora com as imagens digitalizadas a partir das provas de contacto, os resultados tenham sido aceitáveis (mediante as condições já discutidas), no processamento individual das imagens da

região Albufeira - Praia da Falésia, a pior qualidade radiométrica da imagem resultante da digitalização da impressão em papel fotográfico inviabilizou a sua utilização para produção de informação métrica e a visualização tridimensional do terreno.

As dificuldades sentidas nos trabalhos com a cobertura SPLAL evidenciam muito bem a complexidade da aplicação do processamento fotogramétrico digital a fotografias antigas. A ausência de informações básicas fundamentais para a orientação interna das imagens, a dificuldade de obtenção de elementos naturais ou artificiais na superfície e a sua posterior medição, e ainda a geometria irregular dos blocos formados e fiadas constituintes, introduzem erros importantes que não são passíveis de comparação directa com o “ótimo”, isto é, situação na qual se estaria em posse de todas as informações correctas necessárias ao processamento fotogramétrico.

Como já referido, o planeamento inicial não previa o processamento das coberturas IGP-1991 e IGP-1995. Por uma questão de calendário, estas coberturas foram apenas trabalhadas para uma zona limitada entre Albufeira e Ancão, para a cobertura IGP-1991, e entre Albufeira e Rocha Baixinha (a Oeste de Quarteira), para a cobertura IGP-1995. Também devido ao desfasamento temporal, na fase de detecção de pontos comuns entre as várias coberturas expressa no fluxograma de trabalho, não foram registados pontos para estas coberturas.

Os pontos pseudo-fotogramétricos necessários ao processamento destas coberturas foram, numa fase posterior, identificados por comparação sistemática das imagens da cobertura IGP-2007 com as imagens de IGP-1991 e IGP-1995. Uma pequena percentagem de pontos foram obtidos através de medição estereoscópica nos modelos da cobertura IGP-2007, verificando-se, na altura do processamento, ser necessário incluir mais pontos fotogramétricos no ajustamento.

Voo IGP-1991

Esta cobertura fotográfica foi realizada em 1991 e, para a região do litoral algarvio, compõe-se de fiadas Este-Oeste com sobreposição longitudinal de cerca de 60%. São fotografias monocromáticas, obtidas à escala 1: 33000. Está disponível o certificado de calibração para esta cobertura.

As imagens utilizadas no processamento foram digitalizadas num *scanner* fotogramétrico, com uma resolução de 22.5 μm (0.74 m no terreno).

Para o processamento fotogramétrico, foram utilizados 29 pontos pseudo-fotogramétricos e um total de 1239 observações no ajustamento, retribuindo uma

precisão geral de 26.03 μm . Os erros médios quadráticos para as 3 componentes posicionais são os apresentados na Tabela 23 Figura 22.

Tabela 23 - Exactidão obtida para o ajustamento Albufeira-Ancão – IGP1991.

RMSE (m)	X	Y	Z
	0.706	0.942	1.537

O erro quadrático médio das diferenças nos pontos pseudo-fotogramétricos é o expresso na Tabela 24.

Tabela 24 - Desvios nos pontos fotogramétricos Albufeira-Ancão – IGP1991.

RMSE (m) PFs	X	Y	Z
	0.681	0.909	1.455

Na Figura 48, pode observar-se a configuração do bloco e a distribuição dos pontos pseudo-fotogramétricos e os desvios neles observados.

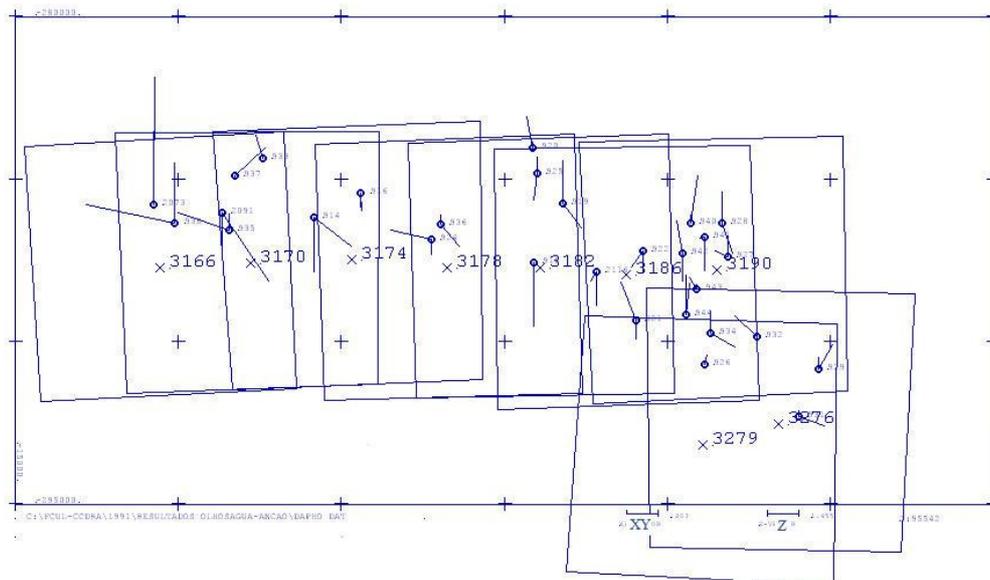


Figura 48: Configuração do bloco Albufeira- Ancão para a cobertura 1991, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.681m e 1.455m, respectivamente).

Discussão: Os resultados podem ser considerados satisfatórios, a nível da precisão e exactidão do ajustamento, considerando uma escala 1: 33000. Os desvios observam-se de maior valor na extremidade Oeste, onde a 2ª fiada, constituída por duas fotografias apenas, se liga por uma pequena área, enfraquecendo o apoio. De resto, os desvios

encontram-se bem distribuídos pelas fiadas, sem tendência na orientação. Não existem erros sistemáticos ou grosseiros.

Os valores apresentados para precisão e exactidão do ajustamento foram os melhores resultados obtidos, satisfazendo os objectivos do trabalho.

Ainda que o intervalo de tempo seja significativo, a diferença de 18 anos para a cobertura fotográfica de onde foi obtido o apoio fotogramétrico permitiu reunir um conjunto de elementos bem identificáveis entre os dois voos. No entanto, a escala 1: 33000 das imagens de IGP-1991 diminui bastante o rigor de medição dos pontos.

Voo IGP-1995

Esta cobertura foi realizada em 1995, à escala 1: 15000, e em fiadas de direcção Norte-Sul. Está disponível o certificado de calibração e o mapa índice, como se observa na Figura 49.

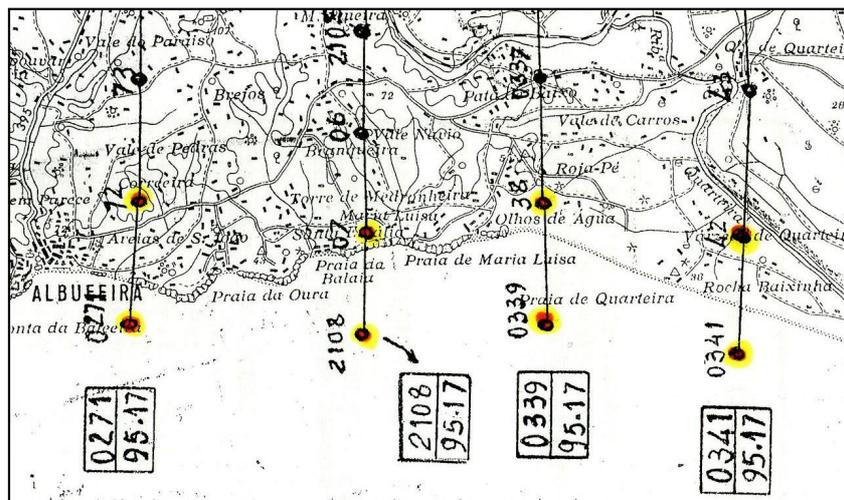


Figura 49: Excerto do mapa índice da cobertura fotográfica de 1995, para a região de Albufeira- Rocha Baixinha (IGP).

Para aerotriangulação da cobertura IGP-1995, foram utilizados 15 pontos pseudo-fotogramétricos e um total de 569 observações. O ajustamento retribuiu uma precisão geral de 20.07 μm para o bloco. A exactidão do ajustamento apresenta os valores que constam na Tabela 25.

Tabela 25 - Exactidão obtida para o ajustamento Albufeira-Rocha Baixinha – IGP1995.

RMSE (m)	X	Y	Z
	0.351	0.336	0.586

Nos pontos pseudo-fotogramétricos, o erro médio quadrático das diferenças está expresso na Tabela 26.

Tabela 26 - Desvios nos pontos fotogramétricos Albufeira-Rocha Baixinha – IGP1995.

RMSE (m) PFs	X	Y	Z
	0.326	0.313	0.524

A configuração do bloco (Figura 50) demonstra a geometria trabalhada e os pontos fotogramétricos com os desvios associados, e ainda os pontos de ligação medidos.

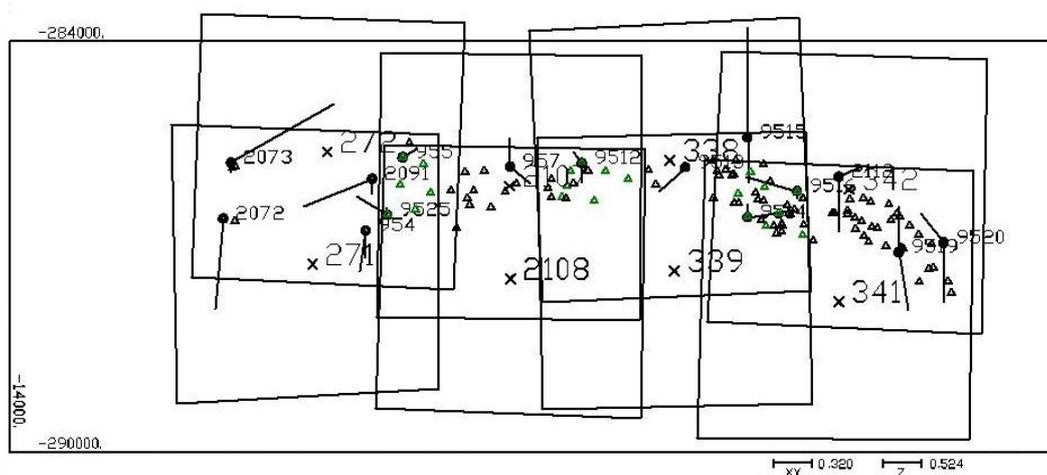


Figura 50: Configuração do bloco Albufeira – Rocha Baixinha para a cobertura SPLAL, após aerotriangulação (escala dos vectores XY e Z é 0.320m e 0.524m, respectivamente).

Discussão: Os resultados obtidos são considerados satisfatórios, tanto em precisão como em exactidão. Verifica-se a existência de dois pontos pseudo-fotogramétricos com resíduos superiores aos de outros pontos, na fiada da extremidade Oeste, cujo apoio é bastante fraco. De resto, os resíduos encontram-se bem distribuídos ao longo do bloco, sem demonstrar orientação preferencial, indicando a ausência de erros sistemáticos.

A detecção de elementos comuns entre esta cobertura e a cobertura IGP-2007 decorreu de forma célere, uma vez que muitos elementos artificiais permaneceram imutáveis entre as duas datas.

Verifica-se que a escala 1: 15000 deste voo é, indubitavelmente, uma vantagem pois compensa significativamente a fraca geometria do bloco definido, permitindo atingir valores de precisão e exactidão muito satisfatórios.

Considerações finais acerca do processamento fotogramétrico

De acordo com MARQUES [1997], os valores de área perdida por ocorrência de movimentos que foram observados na crista das arribas são superiores a 3 m², pelo que, tendo em conta o fenómeno a estudar, se considera que os resultados obtidos através de processamento fotogramétrico são, na generalidade, bastante satisfatórios e estão perfeitamente adequados aos objectivos do trabalho.

Estereorrestituição dos elementos da arriba

Uma vez definidos os modelos estereoscópicos para toda a região de interesse e para cada cobertura fotográfica, iniciou-se a estereorrestituição dos elementos crista de arriba, base de arriba, e ainda variações importantes que se detectassem na face da arriba.

A estereorrestituição foi realizada com dois objectivos em perspectiva: a obtenção dos elementos de interesse em formato vectorial para comparação directa, para o qual se restituiu de forma contínua a crista da arriba (Figura 51), e a obtenção de modelos digitais de terreno por correlação automática de imagem, para os quais é necessário o apoio de linhas de quebra (Figura 52).

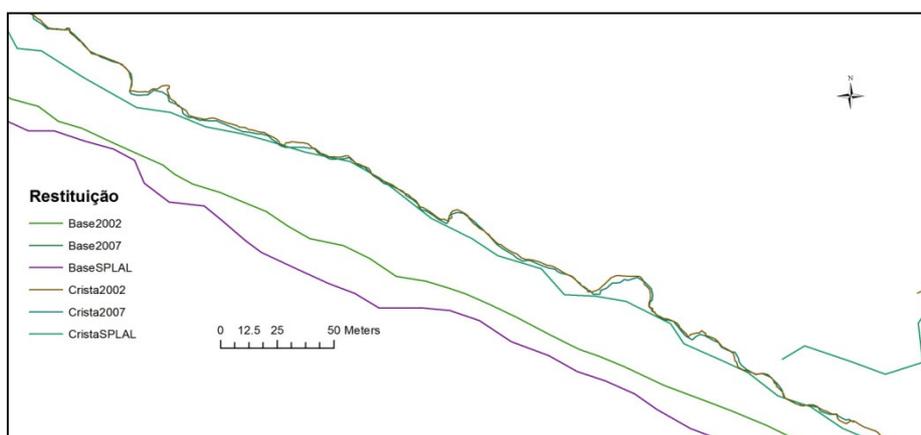


Figura 51: Restituição linear contínua da crista e base das arribas nas coberturas fotográficas SPLAL, INAG-2002 e IGP-2007 (pormenor da Praia da Falésia).

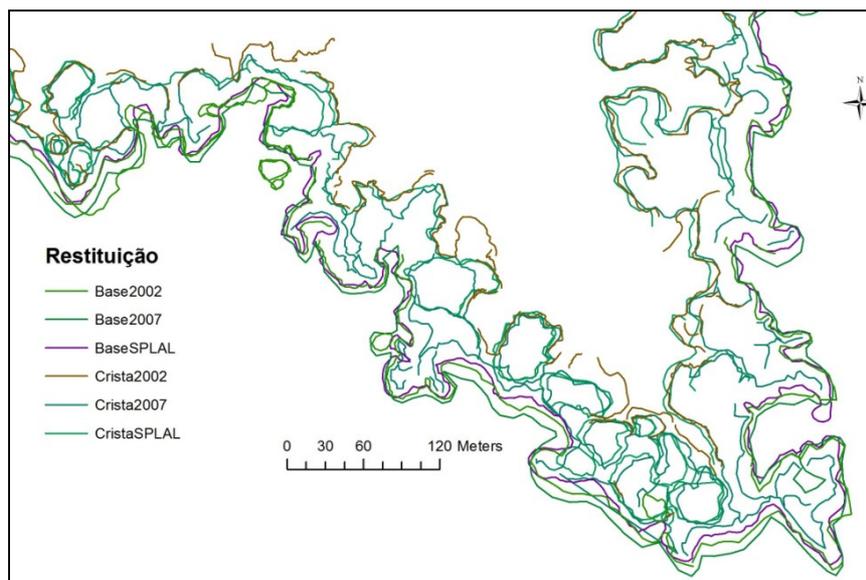


Figura 52: Restituição da crista e base das arribas, e de pormenores da morfologia da região nas coberturas fotográficas SPLAL, INAG-2002 e IGP-2007 (pormenor da Ponta da Piedade).

A obtenção da informação tridimensional foi executada no software PCI Geomatica, onde se geraram os pares epipolares de interesse. Este *software* apresenta um conjunto de ferramentas de vectorização muito completo, bem como um sistema de visualização tridimensional do modelo estereoscópico bastante flexível, possibilitando ajustes de contraste, luminosidade e *zoom* do mesmo. Permite ainda a organização da informação vectorizada em níveis, que podem ser directamente codificados numa tabela de atributos.

O processo de restituição obedeceu igualmente à divisão geográfica em blocos, já expressa no processamento fotogramétrico. Assim, para o bloco Burgau – Lagos, foi feita a restituição completa da crista e base das arribas para as coberturas SPLAL, INAG-2002 e IGP-2007. No bloco Alvor – Albufeira, foram restituídos os elementos de interesse na cobertura fotográfica INAG-2002 e IGP-2007. No último sector, Albufeira – Ancão, foram restituídos os elementos de interesse nas coberturas fotográficas SPLAL, IGP-1991, IGP-1995, INAG-2002 e IGP-2007.

Com o objectivo de apoiar a geração dos MDTs por correlação automática de imagem, a restituição foi bastante mais pormenorizada na região da Ponta da Piedade, de forma a conter as significativas variações que a morfologia das faces das arribas sofre. Também na região da Praia da Falésia foi, mais uma vez, pormenorizada a restituição realizada.

É importante salientar que a cobertura fotográfica INAG-2002, por constituir a informação de referência e de melhor escala, foi alvo de restituição linear completa dos elementos de interesse, ao longo de todo o litoral abrangido pelo estudo.

Por constituir o bloco de teste, a restituição da crista e base das arribas foi realizada integralmente no sector Burgau – Lagos. Também no sector Albufeira – Ancão a restituição foi completa; especialmente no segmento Forte Novo – Garrão, onde a

alteração por recuo da arriba é bastante significativa e requer uma nova linha em cada época, a restituição foi completa. Para o sector Alvor – Albufeira, no que se refere à cobertura IGP-2007, foram apenas restituídas as zonas onde se detectou alterações da crista da arriba entre 2002 e esse ano, por sobreposição da linha de crista de arriba em 2002 ao modelo estereoscópico.

De acordo com o exposto, foram estereorrestituídos 13 pares estereoscópicos da cobertura SPLAL, dois dos quais constituíram apoio à geração de MDEs, 118 pares estereoscópicos da cobertura INAG-2002, dos quais 6 apoiaram a geração de MDEs, 32 pares estereoscópicos da cobertura IGP-2007, dos quais 2 apoiaram a geração de MDEs.

Na cobertura fotográfica IGP-1991 foram restituídos de forma contínua os elementos de interesse nos sectores Praia da Falésia e Forte Novo – Garrão. Para a cobertura IGP-1995 foram restituídas as diferenças para a linha de crista em 1991, por sobreposição da restituição desta última, até à Ribeira de Quarteira. Nos modelos estereoscópicos a servir de base à geração de MDEs, a restituição também foi contínua, de forma a constituir linhas de quebra.

Devido à grande extensão do litoral de interesse, a operação de estereorrestituição constituiu uma fase prolongada dos trabalhos. A experiência prática permitiu concluir que o rigor e a velocidade de execução da restituição se prendem, não só com o pormenor visível nas imagens, que é função da escala e qualidade radiométrica das mesmas, mas que também é significativamente dependente da experiência do operador.

É importante salientar que a restituição dos elementos na cobertura SPLAL foi bastante complexa. O reduzido contraste em algumas imagens e o excesso de luminosidade, presente especialmente na face das arribas e nas zonas de areal, dificultaram significativamente a definição da linha de base e a interpretação de roturas de declive na face das arribas. A operação de estereorrestituição foi constantemente acompanhada de intensa interpretação geomorfológica, especialmente no que se refere à crista da arriba, de forma a minimizar erros.

Utilizando os parâmetros apresentados no Capítulo 2, foi calculada a precisão, em metros, para a estereorrestituição dos elementos através das expressões e indicações dos autores referenciados (Tabela 27).

Tabela 27 - Precisão, em metros, da estereorrestituição calculada pelas expressões e/ou indicações dos autores referenciados.

Voo	REDWEIK [2007]		BERBERAN [2003]		MATOS [2001]	
	σ_{XY}	σ_Z	σ_{XY}	σ_Z	σ_{XY}	σ_Z
SPLAL	0.81	0.92	0.27	-	0.26	0.21
IGP-1991	0.75	1.14	0.47	0.53	0.47	0.22

IGP-1995	0.38	0.57	0.24	0.26	0.24	0.11
INAG-2002	0.20	0.31	0.28	0.14	0.13	0.06
IGP-2007	1.1	1.32	0.35	-	0.37	0.34

Discussão: Os valores de precisão calculados para a estereorrestituição variam consoante os cálculos referido por cada autor, principalmente a nível da altimetria. O cálculo da precisão segundo REDWEIK [2007] tem associada alguma subjectividade, na medida em que é indicado, para a precisão da planimetria em elementos lineares, um valor de cerca de 45 μm , e acrescenta que tal valor pode ser melhorado através de *zoom* na imagem. Considerando que a restituição dos elementos de interesse foi realizada utilizando sempre um valor de *zoom* nunca inferior a 200%, definiu-se como valor aproximado para a restituição destes elementos 25 μm , apresentando-se na tabela este valor traduzido para o terreno, em metros. Foi definida, no entanto, uma excepção para o voo SPLAL cujas características de contraste e definição radiométricos não viabiliza um valor de “confiança” tão elevado, pelo que se escolheu atribuir o “pior cenário” de uma precisão de 45 μm para a restituição. Para a altimetria, foi multiplicado o factor de 0.25 ‰ pelas alturas de voo, calculadas através da escala da foto e distância focal. Para a cobertura IGP-2007, verifica-se que a aplicação directa destes parâmetros retribui valores que são significativamente compensados pela qualidade radiométrica das imagens digitais.

Os valores apresentados para BERBERAN [2003] são, para a altimetria, insuficientes para caracterizar a restituição nas fotografias dos voos a escalas que não constam da tabela comunicada. Para a planimetria foi aplicada a razão indicada, sendo os valores apresentados 70% da dimensão original do pixel.

Das três referências, o cálculo sugerido por MATOS [2001] retribuiu os melhores valores de precisão para a restituição e é aquele que considera mais factores quantitativos próprios para cada cobertura no cálculo, ou seja, os valores apresentados são calculados com base nos valores de dimensão do pixel, escala da imagem, distância focal e base fotográfica.

No entanto, só os parâmetros sugeridos por REDWEIK [2007] para a altimetria permitem entrar em consideração com o que é a qualidade radiométrica da imagem, possibilitando a aplicação de outros valores consoante a experiência prática da utilização de *zoom* na imagem.

Detecção directa de movimentos a partir dos elementos estereorrestituídos

Uma vez terminada a estereorrestituição, existem, para cada época processada, linhas que materializam a crista e a base das arribas, separadamente, para todo o sector litoral de arriba rochosa entre Burgau e Ancão.

Sobrepondo, num *software* CAD, os dados vectoriais tridimensionais resultantes da estereorrestituição de cada cobertura aérea, é possível, para áreas correspondentes e por análise visual, detectar áreas que, de uma época para a outra, sofreram alteração [MATILDES et al., 2008]. As diferenças observadas nas linhas de crista de arriba de uma época para outra, originadas por movimentos nas arribas, foram delimitadas através de polígonos (Figura 53).

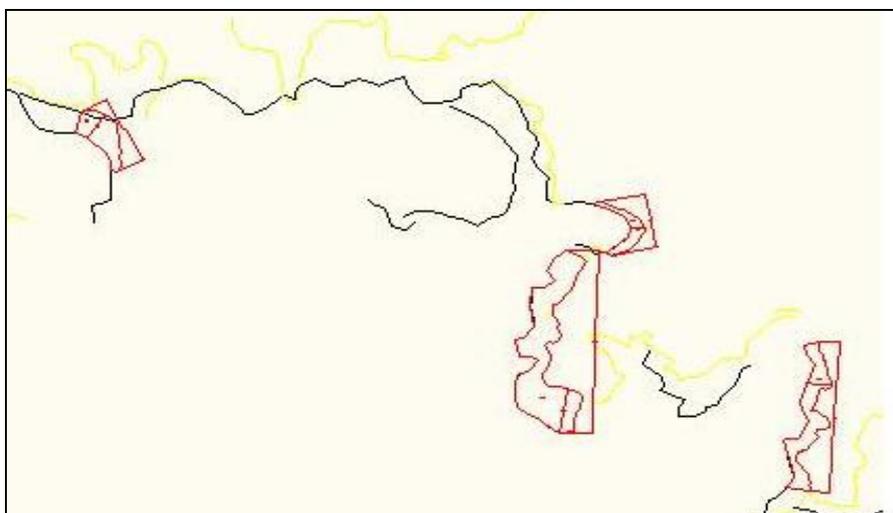


Figura 53: Delimitação e medição dos movimentos em AutoCAD.

A sobreposição das linhas de diferentes épocas constitui também uma forma indirecta de atestar a eficiência da estereorrestituição, e também da operação de aerotriangulação, para o objectivo do trabalho. Ao longo dos vários sectores, para além dos movimentos detectados, foram identificadas zonas de arriba com evolução praticamente nula e não foram detectadas regiões onde a crista de arriba tenha ocupado uma posição mais exterior à de um voo de data anterior.

Para cada movimento, foram recolhidos os dados de largura máxima perpendicular à linha de crista, representando a largura máxima de terreno afectado, e comprimento máximo, representando o comprimento máximo de arriba afectado pelo movimento (Figura 53), informação que, posteriormente, foi introduzida numa tabela de atributos de um SIG.

Relembrando as informações de precisão e exactidão apresentadas para o processamento de cada cobertura fotográfica, e ainda a precisão da estereorrestituição, considerou-se ser necessária uma validação dos resultados obtidos por comparação

vectorial. Assim, para cada polígono registado, foi realizada observação sistemática de fotografias aéreas de diferentes datas intermédias e, caso aplicável ao intervalo temporal, fotografias oblíquas.

Num *software* SIG, a tabela de atributos é ainda completada com outra informação métrica importante, como coordenadas do centróide do polígono e área (de terreno perdido na crista da arriba), questão que será apresentada no Capítulo V.

Através deste processo, foram detectados 261 movimentos ao longo de todo o litoral de arriba estudado, cuja área de terreno perdido variam entre 1.5 e 10610 m². É importante relembrar que este número corresponde aos seguintes períodos e regiões: entre 1951 e 2007, de Burgau a Lagos, entre 2002 e 2007, de Alvor a Albufeira, e entre 1951 e 2007, de Albufeira a Ancão.

Detecção de movimentos a partir de Modelos Digitais de Elevação Diferenciais

Geração de Modelos Digitais de Elevação

Com os modelos estereoscópicos definidos e a informação restituída disponível, foi possível avançar para a fase de geração de MDEs.

Os *softwares* utilizados para a geração de MDEs baseiam-se na correlação automática de imagens, a partir de sucessivas e crescentes resoluções destas.

As primeiras tentativas de geração de modelos por correlação automática foram realizadas no software PCI Geomatica. Contrariamente ao módulo de aquisição de informação vectorial, a ferramenta de geração de modelos digitais é muito “fechada”, não permitindo flexibilidade a nível de introdução de informação adicional, como linhas de quebra.

Considerando que a qualidade de um modelo digital da superfície se prende com a sua proximidade à realidade do terreno, concluiu-se que os modelos gerados com este *software* não forneciam resultados aceitáveis. Verificou-se a ausência de informação em zonas de grande interesse, como a face das arribas, e a falha na reprodução da superfície em regiões de morfologia mais complexa.

Recorreu-se então ao *software* de fotogrametria já utilizado, LISA. Este *software* demonstrou-se bastante mais flexível à manipulação de dados de entrada e definição de parâmetros de cálculo por parte do operador, permitindo a introdução da informação vectorial proveniente da restituição.

Devido ao facto de a restituição ter sido executada noutra *software* e representar um objecto de desenho, foi necessário re-identificar os elementos vectoriais com códigos

internos de identificação de geometria, para que fossem interpretados, no LISA, como linhas de quebra e pontos resistentes. Esta fase foi bastante morosa, obrigando à edição manual dos ficheiros originais. Com a atribuição dos códigos correctos, as informações vectoriais forçam a modelação da superfície nessas regiões, em função das coordenadas, sem que ocorra alteração altimétrica, permitindo a correcta modelação da morfologia complexa das arribas litorais.

Uma vez finalizada a correlação na região de interesse, procedeu-se à interpolação do modelo gerado, uma vez que este primeiro produto se compõe apenas dos pontos onde foi possível estabelecer correlação entre as duas imagens do par. A interpolação dos modelos foi executada no mesmo *software*.

Foram gerados modelos digitais de elevação para as coberturas SPLAL, IGP-1991, IGP-1995, INAG-2002 e IGP-2007. De forma a homogeneizar a informação altimétrica produzida e porque, na execução das diferenças entre MDEs, é absolutamente necessário que os MDEs de *input* tenham a mesma resolução, todos os MDEs foram gerados com uma resolução de 1m. Esta resolução apresenta um valor que é ditado pela menor precisão planimétrica obtida nas diferentes aerotriangulações (cobertura SPLAL).

Os ficheiros *raster* resultantes foram transformados em ficheiros ASCII que foram, posteriormente, importados para um *software* SIG, para se efectuar a subsequente análise espacial. Nesta altura, e uma vez que existe interesse particular na faixa costeira, foi aplicado um buffer de 150m para o interior do terreno, a partir da linha de costa definida na cartografia do INAG, a todos os modelos digitais gerados.

Para se poder proceder à validação da altimetria dos modelos digitais gerados, foi gerado um TIN de referência, com base na topografia original da cartografia 1: 2000 do INAG. Sobre este, foram colhidos dois conjuntos de pontos de controlo: um com 200 pontos para a Ponta da Piedade, e outro com 450 pontos para a Praia da Falésia. Estes pontos de controlo foram implantados de forma a evitar zonas onde se verificou, por análise visual, terem sofrido alteração por acção humana ou erosiva de uma época para outra, dificuldade nem sempre fácil de ultrapassar, e os correspondentes valores de altimetria foram retirados do TIN gerado.

Para cada um dos MDEs gerados, foi criado um ficheiro de pontos individual utilizando o ficheiro original de pontos de controlo e extraída a altimetria correspondente. Numa folha de cálculo, para cada ponto, foi calculada a diferença entre a altimetria da superfície gerada e da superfície de referência, bem como os valores absolutos dessas diferenças. Foram criados novos ficheiros de pontos, para cada MDE, com as diferenças, valores que foram usados para interpolar uma superfície representativa da distribuição do afastamento entre cada MDE e a superfície de referência.

Uma superfície representativa das diferenças permite avaliar em que locais do modelo o resultado de cálculos de outros parâmetros, como volumes, pode estar afectado por defeito ou por excesso.

Ponta da Piedade

Após a geração dos modelos digitais de elevação, fez-se uma análise visual prévia dos modelos, projectando a ortofoto correspondente sobre o MDE, como forma de despiste de erros grosseiros (Figura 54).

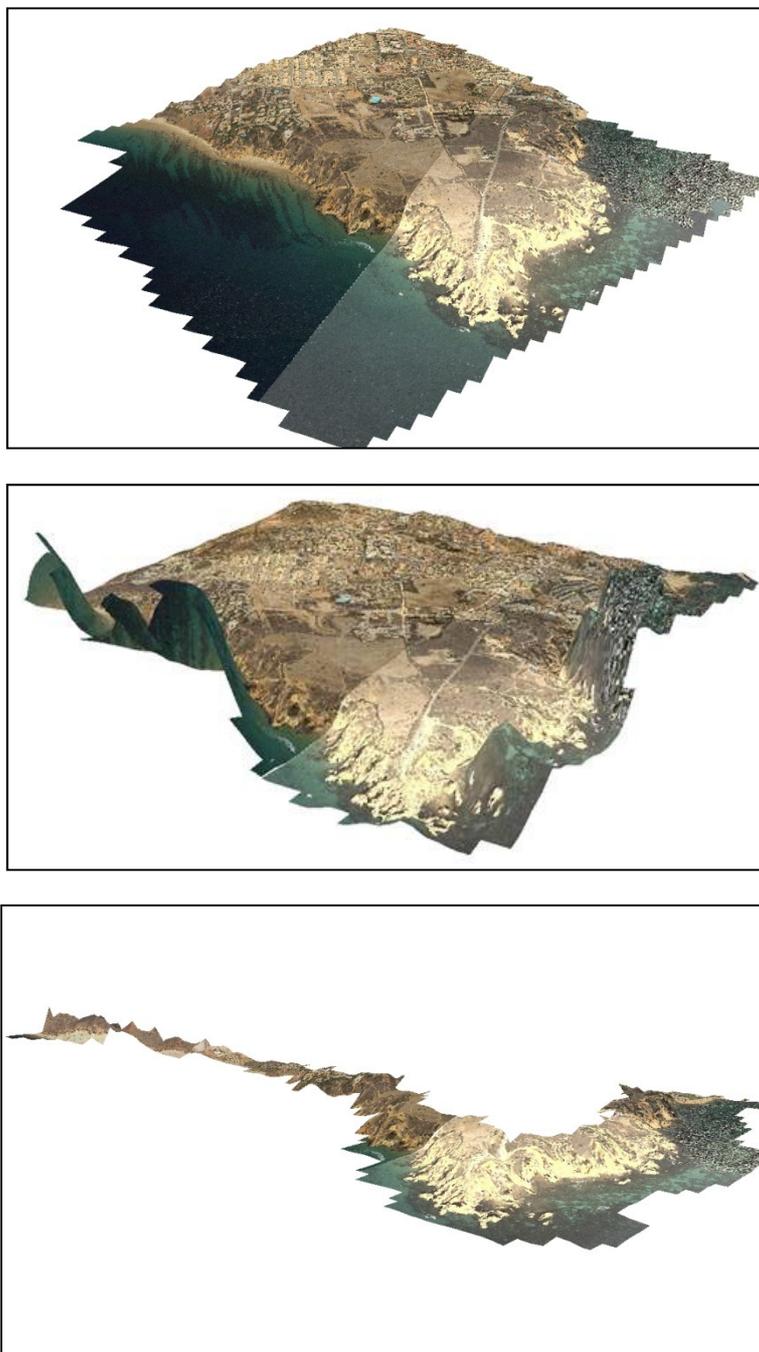


Figura 54: Modelos digitais de elevação para a Ponta da Piedade, sobrepostos por ortofotos do IGP, de 2005 (por ordem, 2002, 2007 e SPLAL).

No modelo de 2007, é notória a errada correlação que foi realizada na região do mar. No entanto, uma vez que o interesse se concentra na faixa de arriba e, posteriormente, foi

aplicado um *buffer* limitativo da região de estudo, este erro pode ser, nesta circunstância, ignorado.

A imagem do modelo do SPLAL é aqui colocada a título de exemplo, uma vez que nos primeiros resultados da correlação são visíveis diversos problemas, como por exemplo, o afundamento da Estrada da Ponta da Piedade e os “picos” na superfície terrestre ao longo da faixa costeira.

A comparação do TIN de referência e o MDE gerado por correlação automática para a cobertura INAG-2002 retribuiu, como esperado, valores de diferenças baixos, tendo sido calculadas as estatísticas referentes às diferenças apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 – Parâmetros estatísticos do MDE de 2002 da Ponta da Piedade.

Parâmetro	Valor (m)
Média	-1.51
Desvio padrão	2.69
Mínimo	-10.87
Máximo	16.51
Mínimo absoluto	0.05
Máximo absoluto	16.51

Tendo-se considerado que o valor máximo de diferença era significativamente mais elevado que o esperado para a diferença de modelos correspondentes, procedeu-se a uma inspeção individual do ponto específico e concluiu-se que se encontra localizado no interior de um algar. É importante salientar o facto de que, ao eliminar pontos situados em algares, o valor máximo das diferenças decresce para 10.55 m, correspondente a um ponto na face de uma arriba de declive acentuado.

É interessante verificar a distribuição das diferenças negativas e positivas ao longo dos modelos digitais, pois a sua distribuição condiciona os valores de volumes calculados para cada movimento, majorando-os ou minorando-os. Na divisão em classes, prestou-se especial atenção ao intervalo em redor do zero, cujos valores são o arredondamento por excesso ao número inteiro positivo e negativo mais próximo dos valores respeitantes à precisão em Z obtidas nas aerotriangulações de cada cobertura aérea, para a região da Ponta da Piedade.

Na Figura 55, que se apresenta de seguida, representa as diferenças entre as duas superfícies.

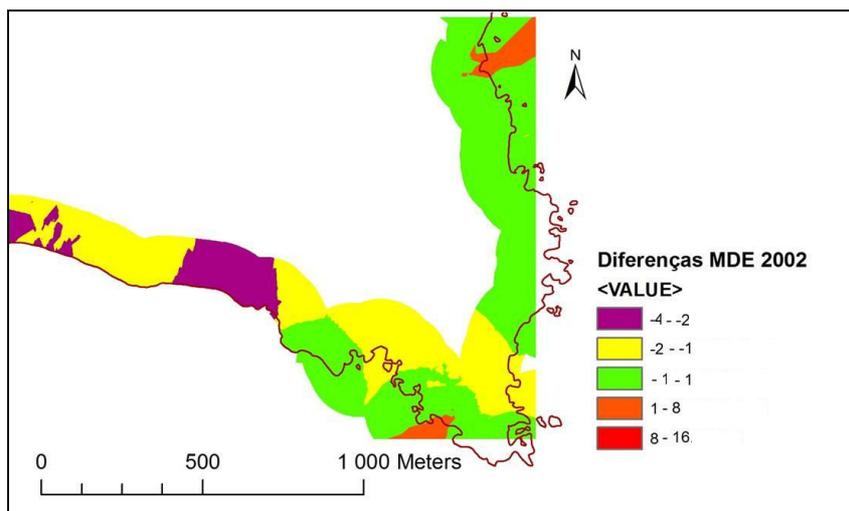


Figura 55: Distribuição das diferenças entre o TIN de referência e o MDE 2002 gerado por correlação automática de imagem, ao longo de uma faixa de 150 m, na Ponta da Piedade (1m x 1m).

Para comparar o MDE da cobertura IGP-2007, recorreu-se ao mesmo procedimento. As diferenças retribuíram os valores estatísticos constantes na Tabela 29, como se pode observar também na Figura 56, na página seguinte, que representa a distribuição das diferenças entre os dois modelos.

Tabela 29 – Parâmetros estatísticos do MDE de 2007 da Ponta da Piedade.

Parâmetro	Valor (m)
Média	-0.38
Desvio padrão	2.35
Mínimo	-4.58
Máximo	12
Mínimo absoluto	0.00
Máximo absoluto	12

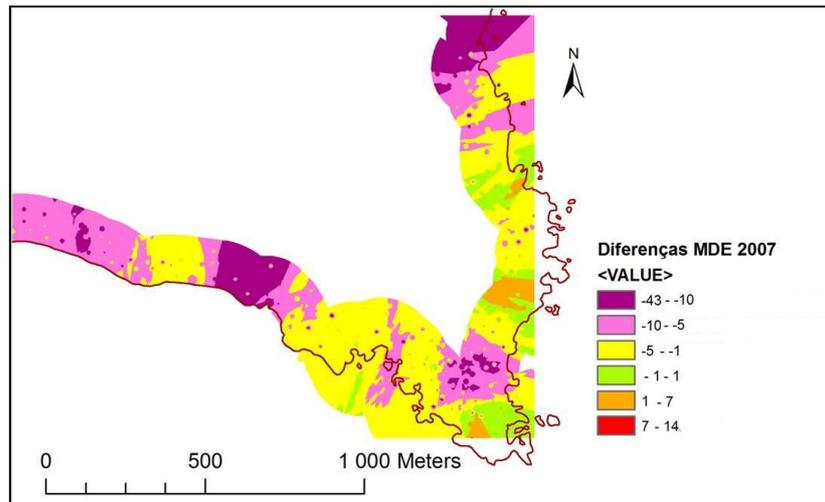


Figura 56: Distribuição das diferenças entre o TIN de referência e o MDE 2007 gerado por correlação automática de imagem, ao longo de uma faixa de 150 m, na Ponta da Piedade (1m x 1m).

Os valores mais elevados de diferenças entre as duas superfícies podem ser explicados pelo intervalo temporal de 5 anos que separa os dois modelos, bem como a diferença de escala das imagens de 2002 e de 2007, variação que se faz sentir na relação de pormenor entre a restituição de uma e outra cobertura.

O caso da cobertura SPLAL foi, novamente, bastante complexo. A correlação entre as imagens SPLAL, ainda que apoiada por linhas de quebra densamente restituídas para apoiar esta operação, não foi bem sucedida. Verificou-se haver diversas regiões sem correlação, algumas regiões em que a correlação retribuiu valores significativamente errados, criando morfologias inexistentes, e ainda zonas onde, embora os valores de altimetria se aproximem mais da realidade, mesmo após a aplicação de um filtro de valor médio, representavam grandes heterogeneidades no terreno. Verificou-se também a presença de erros sistemáticos na operação de correlação, patente por padrões repetitivos não presentes na morfologia da superfície (Figura 57).

De forma a apoiar ainda melhor as regiões onde a correlação falhou, restituiu-se um conjunto denso de pontos, que constituíram “pontos resistentes” na interpolação. No entanto, mesmo após a aplicação de informação mais resistente, a modelação da superfície não melhorou.

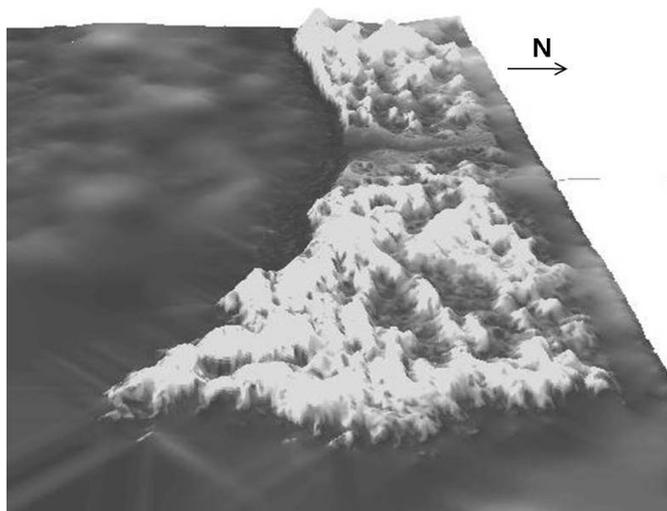


Figura 57: Ponta da Piedade: correlação errada em zonas do interior do modelo e atribuição de valores de altimetria errada (altitude máxima de 95m incorrecta).

Assim, decidiu-se utilizar as linhas de quebra e os pontos restituídos para apoiar a geração automática dos MDEs do SPLAL como amostra primária para a criação de um modelo digital de terreno baseado apenas em pontos restituídos.

Num *software* SIG, gerou-se um TIN com base na amostra primária que foi, posteriormente, validado. Na análise visual do modelo obtido não se verificaram incongruências similares em regiões extensas como as obtidas por correlação, conclusão posteriormente confirmada pela validação estatística.

Para este caso, a comparação entre a altimetria deste modelo gerado e o TIN gerado para a cobertura INAG-2002 retribuiu um valor de média das diferenças calculadas de 7.43 m, com valores máximo e mínimo de 43.90 m e 0.01 m, respectivamente, como se pode verificar na Tabela 30. A Figura 58 representa a superfície gerada a partir da interpolação dos mesmos pontos de controlo, com base nas diferenças calculadas em cada ponto.

Tabela 30 - Parâmetros estatísticos do MDE SPLAL da Ponta da Piedade.

Parâmetro	Valor (m)
Média	-5.64
Desvio padrão	9.52
Mínimo	-43.89
Máximo	15.215
Mínimo absoluto	0.01
Máximo absoluto	43.89

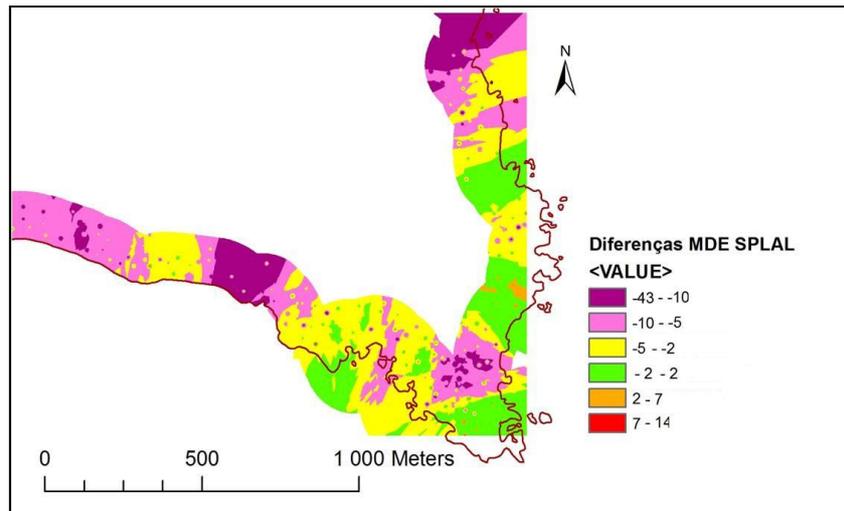


Figura 58: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE SPLAL gerado, ao longo de uma faixa de 150 m, na Ponta da Piedade (1m x 1m).

Verifica-se que os valores mais elevados de diferença ocorrem nas regiões de “rendilhado” mais complexo das arribas e na extremidade Norte do modelo, que, recorde-se, se encontra menos apoiada no ajustamento. Embora estes valores possam ser considerados pouco satisfatórios, é importante salientar, não só a profunda diferença temporal entre o modelo a controlar e a origem dos pontos de controlo, mas também que muitos dos pontos de controlo de qualidade se posicionam junto ou mesmo dentro de algares, aumentando significativamente as diferenças.

Praia da Falésia

Os procedimentos aplicados aos MDEs gerados para a região da Ponta da Piedade, foram reproduzidos para a geração dos modelos digitais que, de seguida, se apresentam (Figura 59).



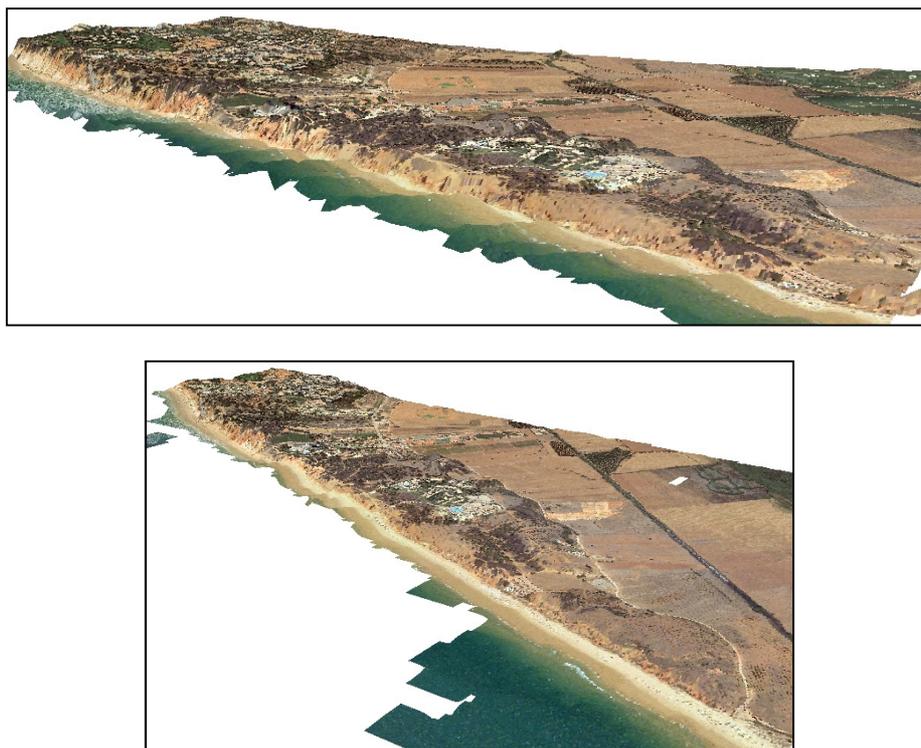


Figura 59: Modelos Digitais de Elevação da Praia da Falésia – em cima, à esquerda: 2002; em cima, à direita: 2007; seguidos do MDE 1991 e 1995.

No caso da Praia da Falésia, verificou-se ser bastante complexa a recolha de pontos de controlo uma vez que não existe praticamente nenhum local de terreno visível, isto é, a grande maioria da área de estudo está coberta por arbustos, árvores, relvados de campos de *golf* ou pequenos acessos a habitações, que constam como objectos modelados no MDE gerado automaticamente mas não no TIN de referência. Tal como para a região da Ponta da Piedade, a comparação entre o MDE gerado por correlação automática para a cobertura INAG 2002 e o TIN gerado com base nas curvas de nível da cartografia 1: 2000 retribuiu valores de diferenças elevados em algumas zonas.

Os parâmetros estatísticos caracterizadores do modelo da Praia da Falésia são apresentados na tabela seguinte (Tabela 31).

Tabela 31 - Parâmetros estatísticos do MDE de 2002 da Praia da Falésia.

Parâmetro	Valor (m)
Média	-0.80
Desvio padrão	5.46
Mínimo	-7.22
Máximo	33.55

Mínimo absoluto	0.02
Máximo absoluto	33.55

A Figura 60 representa a distribuição das diferenças entre a superfície de referência e a superfície gerada automaticamente para a cobertura INAG-2002, ao longo da Praia da Falésia.

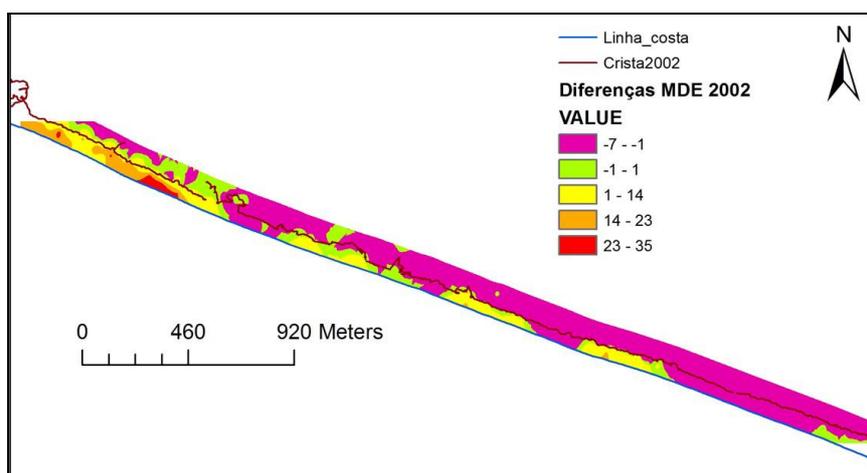


Figura 60: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE 2002 gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).

Para a cobertura IGP 2007, foi também gerado um MDE por correlação automática e, posteriormente, comparado com o TIN de referência de 2002. Os parâmetros estatísticos calculados apresentam-se na Tabela 32, e a distribuição das diferenças ao longo da faixa de interesse na Figura 61.

Tabela 32 - Parâmetros estatísticos do MDE de 2007 da Praia da Falésia.

Parâmetro	Valor (m)
Média	3.22
Desvio padrão	11.68
Mínimo	-37.53
Máximo	38.00
Mínimo absoluto	0.00
Máximo absoluto	38.00

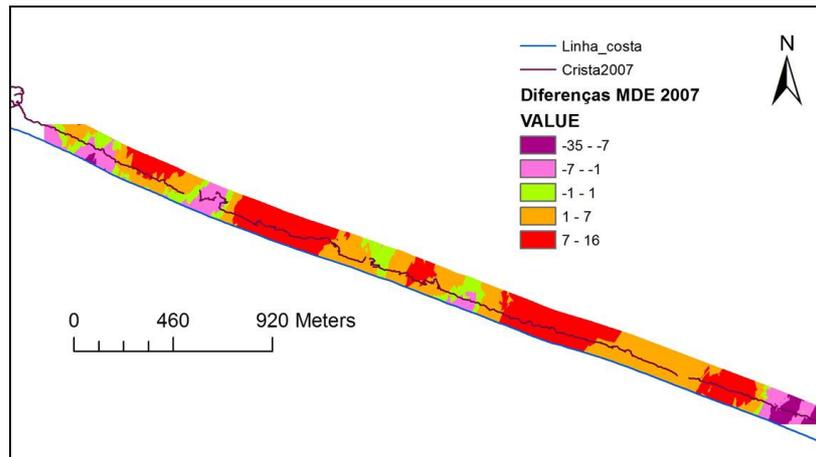


Figura 61: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE 2007 gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).

O caso da cobertura SPLAL mostrou-se, novamente, muito complexo. As primeiras tentativas de correlação automática não foram bem sucedidas, verificando-se regiões sem correlação ou mal correlacionadas. Mesmo após a aplicação de um filtro de valor médio, representavam grandes heterogeneidades no terreno (Figura 62).

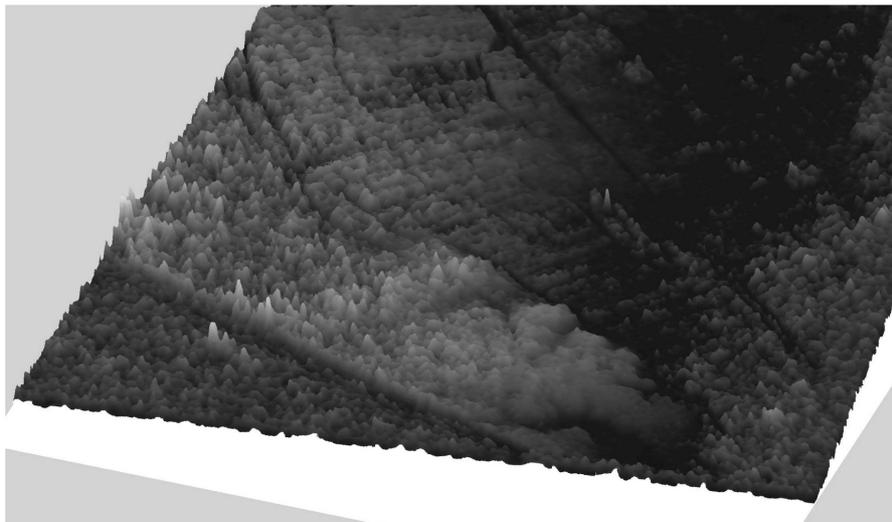


Figura 62: Praia da Falésia: correlação errada no modelo e atribuição de valores de altimetria muito heterogêneos no terreno.

À semelhança do que foi executado para a Ponta da Piedade com o modelo SPLAL, foram importados para um *software* SIG um conjunto de pontos restituídos ao longo de uma faixa paralela à costa, de forma a apoiar intensivamente a região de interesse, e as linhas de quebra, e com esta amostra foi gerado modelo digital de elevação em formato TIN, posteriormente verificado.

Dados os resultados obtidos para a cobertura SPLAL na região da Praia da Falésia, apenas um par estereoscópico foi considerado como válido para, de facto, ser utilizado

na geração de produtos. Assim, foi apenas utilizado para gerar um MDE, o par correspondente ao sector central-oeste da Praia da Falésia.

A verificação foi realizada, como para a Ponta da Piedade, através da comparação com o TIN de referência gerado com a cartografia 1: 2000, tendo sido calculados os parâmetros estatísticos das diferenças, que se apresentam na tabela seguinte (Tabela 33).

Tabela 33 - Parâmetros estatísticos do MDE SPLAL da Praia da Falésia.

Parâmetro	Valor (m)
Média	-8.51
Desvio padrão	7.08
Mínimo	-24.01
Máximo	12.12
Mínimo absoluto	0.04
Máximo absoluto	24.01

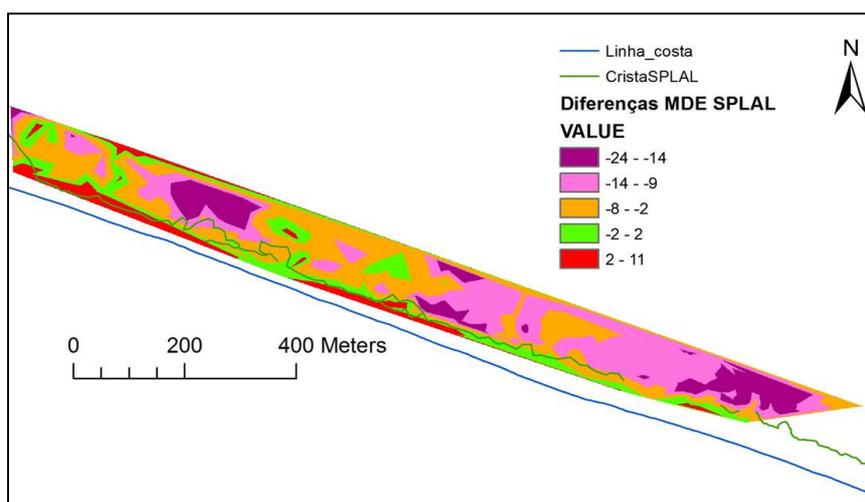


Figura 63: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE SPLAL gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).

No caso da cobertura IGP 1991, o MDE gerado retribuiu os resultados estatísticos para as diferenças que se encontram na Tabela 34. Na Figura 64 pode observar-se a distribuição das diferenças ao longo da região de interesse.

Tabela 34 - Parâmetros estatísticos do MDE de 1991 da Praia da Falésia.

Parâmetro	Valor (m)
Média	-0.21
Desvio padrão	4.12
Mínimo	-13.65
Máximo	19.94
Mínimo absoluto	0.06
Máximo absoluto	19.94

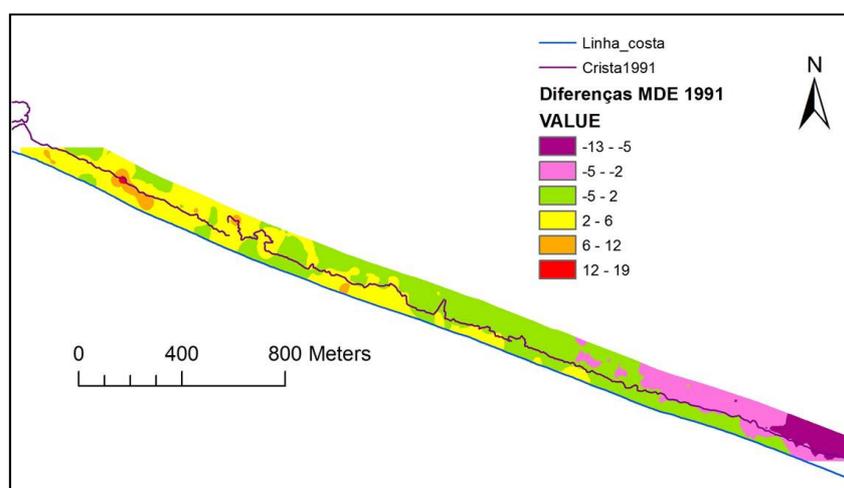


Figura 64: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE 1991 gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).

Finalmente, o MDE gerado com base num modelo estereoscópico da cobertura IGP 1995, retribuiu as seguintes estatísticas (Tabela 35). Na Figura 65 pode observar-se a distribuição das diferenças ao longo do MDE.

Tabela 35 - Parâmetros estatísticos do MDE de 1995 da Praia da Falésia.

Parâmetro	Valor (m)
Média	-2.15
Desvio padrão	5.11
Mínimo	-11.78
Máximo	36.08
Mínimo absoluto	0.02
Máximo absoluto	36.08

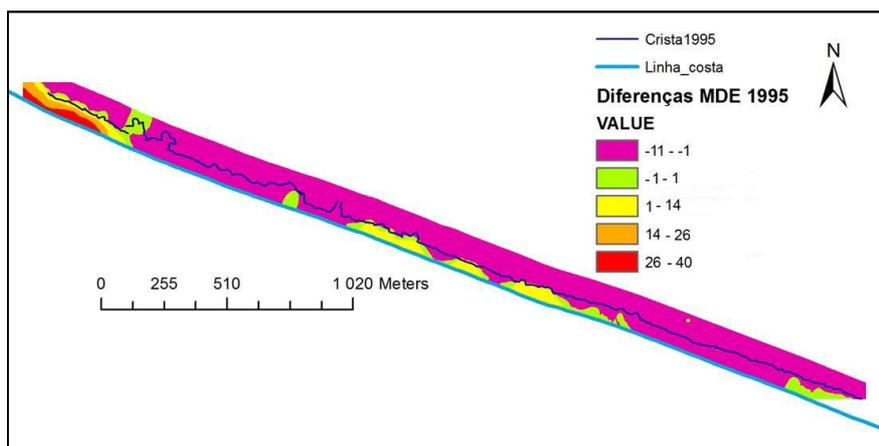


Figura 65: Distribuição das diferenças entre o TIN 2002 de referência e o MDE 1995 gerado numa faixa de 150 m para o interior, na Praia da Falésia (1m x 1m).

Discussão: Os MDEs gerados apresentam valores de diferenças relativamente à superfície de referência mais elevados do que o que desejado e, no caso dos modelos da cobertura INAG 2002 gerados automaticamente, diferenças mais elevadas do que o esperado, uma vez que se trata da mesma data.

No entanto, é importante salientar que as condições de comparação não são óptimas. A utilização dos pontos fotogramétricos para verificação dos MDEs poder-se-ia considerar válida apenas para a cobertura INAG 2002, e somente para a verificação da altimetria, tendo em consideração ainda que os mesmos pontos fotogramétricos constituíram *input* para a aerotriangulação e para a correlação automática de imagem que gera o MDE. Também o diminuto número de pontos fotogramétricos existentes ao longo da região, e a escassez de vértices geodésicos, uma outra alternativa de verificação, não possibilitaria o cálculo de uma estatística adequada.

A utilização de um modelo calculado com base nas curvas de nível da cartografia 1: 2000 do INAG é apenas parcialmente comparável ao modelo gerado por correlação automática de imagem. Enquanto o primeiro se refere à superfície topográfica *per se*, o último, pelo contrário, refere-se aos objectos implantados nessa superfície, havendo lugar a diferenças, por vezes, significativas. Este MDT de referência não inclui, ao contrário dos gerados para este trabalho, linhas de quebra executadas com recurso a estereorrestituição, pelo que elementos fundamentais como variações significativas nas arribas e as linhas de crista e base não estão individualizadas, diminuindo a proximidade entre esta superfície de referência e as geradas com apoio de linhas de quebra.

A recolha de pontos ao longo da região foi executada com base nas ortofotos, de forma a evitar locais onde, em 2005, existissem construções ou objectos naturais elevados no terreno, como árvores ou arbustos. No entanto, esta tarefa mostrou-se bastante

complicada, especialmente na região da Praia da Falésia, onde o desenvolvimento ao longo de 60 anos foi bastante profundo, verificando-se alterações importantes a nível da ocupação do solo. A título de exemplo, esta faixa do litoral que, em 1952, se apresentava coberta por um denso arvoredo, já em 1991 apresentava extensa ocupação de construções. Mesmo entre as datas de 2002 e 2007, verificam-se importantes diferenças localizadas. No caso da Ponta da Piedade, verificando-se dificuldade na modelação de estruturas morfológicas complexas, como os algares e “rendilhados” das arribas, não foram implantados pontos nessas regiões. Pelo contrário, dada a maior regularidade das arribas da Praia da Falésia, foram colhidos alguns pontos na face da arriba, local onde ocorre erosão contínua, pelo que seriam obrigatoriamente esperadas algumas diferenças.

De uma forma geral, verifica-se que as maiores diferenças ocorrem junto às extremidades do modelo estereoscópico a partir do qual se obteve os MDEs.

A verificação do modelo da cobertura SPLAL gerado para a Praia da Falésia retribuiu resultados bastantes insatisfatórios. Dados os valores obtidos nesta estatística e na estatística do ajustamento aquando da orientação do par, concluiu-se que este par não seria adequado para a geração de produtos de elevada importância para o estudo do fenómeno em questão, como sejam os modelos digitais diferenciais, e para produtos tradicionais da fotogrametria, como as ortofotos, uma vez que o erro associado a estas duas fases do processamento tem uma dimensão não aceitável.

No caso da Ponta da Piedade, verifica-se uma diferença mais significativa junto ao promontório, causada pela existência do farol da Ponta da Piedade. Enquanto em 1951 se tratava de um caminho, ladeado por um muro, actualmente o muro é inexistente, a via encontra-se modernizada e existem várias edificações de apoio às actividades turísticas da zona.

Modelos Digitais de Elevação Diferenciais

De forma a detectar alterações entre duas épocas temporais utilizando modelos de terreno, é necessário calcular as diferenças entre dois modelos de igual resolução. Assim, para cada intervalo de tempo para o qual se produziu um modelo digital de elevação, procedeu-se à subtracção dos modelos correspondentes, expressando as diferenças altimétricas para cada pixel.

De um modo geral, a diminuição de área no topo da arriba e o aumento de área na base corresponde a um movimento ocorrido no intervalo de tempo considerado (Figura 66), morfologia que se consegue detectar nos MDEs diferenciais.

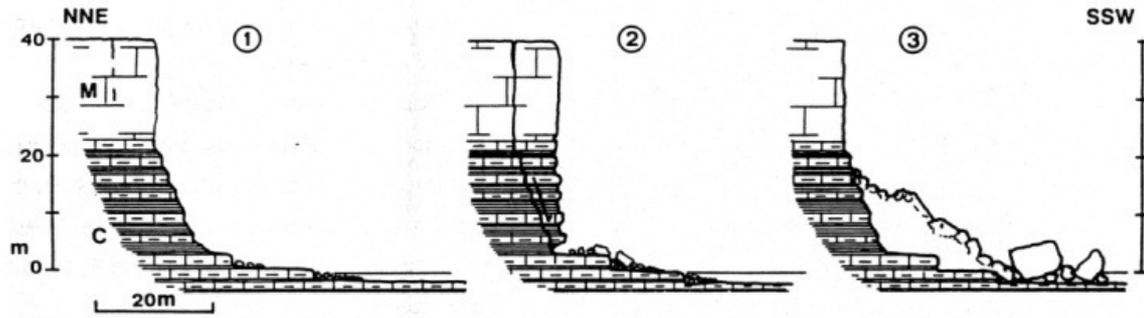


Figura 66: Exemplo de comportamento típico de ocorrência de movimentos, com perda de área no topo (crista) e acumulação de material deslocado na base (fonte: MARQUES [1997]).

O modelo resultante tem a mesma dimensão que os modelos que o originaram, cada célula representando a alteração em altura sofrida, e é obtido subtraindo ao modelo “recente” o modelo “antigo”. Esta ordem de execução permite obter valores positivos, representativos do aumento de altura (acumulação de material), e valores negativos, representativos da diminuição de altura (desaparecimento de material) (Figura 67).

Os MDEs diferenciais podem ser então codificados numa escala de cores adequada, apresentando zonas onde ocorreram aumentos ou diminuições de altitude. A visualização torna-se bastante mais facilitada aplicando uma escala de cores cromostereográfica, permitindo a detecção e percepção directas das variações do relevo, através de óculos específicos.

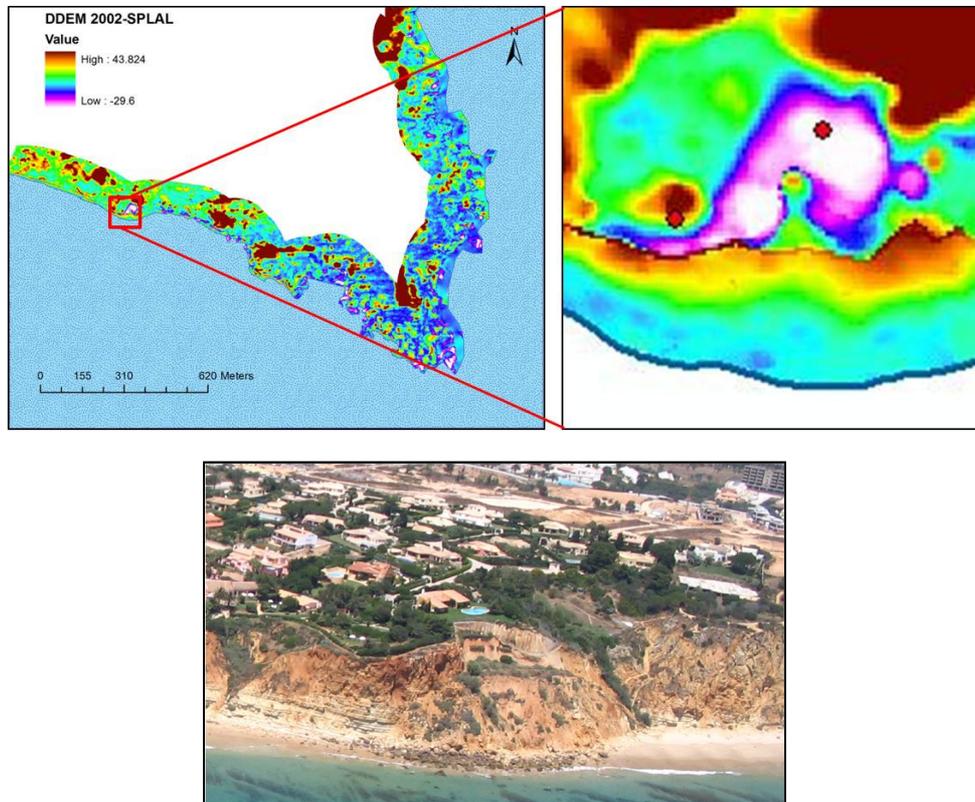


Figura 67: Em cima – MDE diferencial com o pormenor de um exemplo de uma zona de perda de material e respectiva acumulação de material, referente a um movimento na Praia do Canavial (em baixo).

À semelhança dos modelos digitais de terreno, foi aplicado o mesmo *buffer* de 150 m, de forma a facilitar a concentração do interesse na faixa costeira, onde os possíveis movimentos aparecem como pequenas áreas de material perdido ladeadas por também pequenas áreas de material acumulado. No caso de as acções dinâmicas dos processos da costa promoverem a remoção de material dentro do intervalo de tempo considerado, ocorrerão no modelo resultante apenas as áreas de perda de material.

Em cada MDE diferencial são evidenciadas inúmeras zonas de perda de material que podem não corresponder a regiões onde tenham, de facto, ocorrido movimentos na arriba. Foi necessário, por isso, levar a cabo uma verificação cuidada, baseada, em parte no inventário de movimentos realizado por MARQUES [1997], e em fotointerpretação sistemática.

O inventário anterior foi de grande utilidade na validação de possíveis movimentos ocorridos na região da Ponta da Piedade até 1991, uma vez que o autor só apresenta a localização de movimentos individuais para esta zona e não para a zona da Praia da Falésia, e porque, como referido, o inventário em questão apresenta os movimentos detectados até 1991. No caso dos restantes movimentos que foram evidenciados nos MDED, a validação foi realizada com base nos movimentos detectados por comparação directa das linhas de crista da arriba estereorrestituídas, por visualização estereoscópica sistemática de fotografias aéreas de diferentes épocas e observação das fotografias oblíquas do litoral.

Procedeu-se então a uma análise sistemática dos MDE diferenciais gerados. Para que fosse possível diferenciar as alterações na linha de arriba das regiões vizinhas, sobrepôs-se as cristas de arriba correspondentes às datas de cada MDE que originou o MDED e focou-se a região de desenvolvimento da linha de arriba. A sobreposição das linhas de crista de arriba permitiram circunscrever a zona de detecção de movimentos, mas verificou-se ser necessário sobrepor a informação acerca dos movimentos registados por comparação directa de linhas de crista de arriba. Desta forma foi possível validar as áreas que, de facto, correspondiam a movimentos ocorridos e registados.

A primeira codificação cromática aplicada permitiu diferenciar os níveis de ganho e perda, permitindo ainda a visualização tridimensional dessas variações. Para poder registar como válida ou errada uma ocorrência no MDED, realizou-se uma reclassificação nos MDED em 2 intervalos indicativos de perda e ganho, positivo e negativo, cujos valores superior e inferior dependem dos valores mínimo e máximo de cada modelo digital.

Nas páginas seguintes, apresenta-se os vários MDEDs gerados para os intervalos de tempo de interesse. No caso da Ponta da Piedade, foram gerados dois MDED, correspondentes aos intervalos de tempo entre SPLAL e 2002 (Figura 68), e entre 2002 e 2007 (Figura 69). Para a Praia da Falésia foram gerados quatro MDEDs, correspondentes aos intervalos temporais de 2002 a 2007 (Figura 70), 1995 a 2002 (Figura 71) e 1991 a 1995 (Figura 72). Adicionalmente, apresentam-se também os MDEDs codificados em ganho e perda, e os movimentos correspondentes sobrepostos.

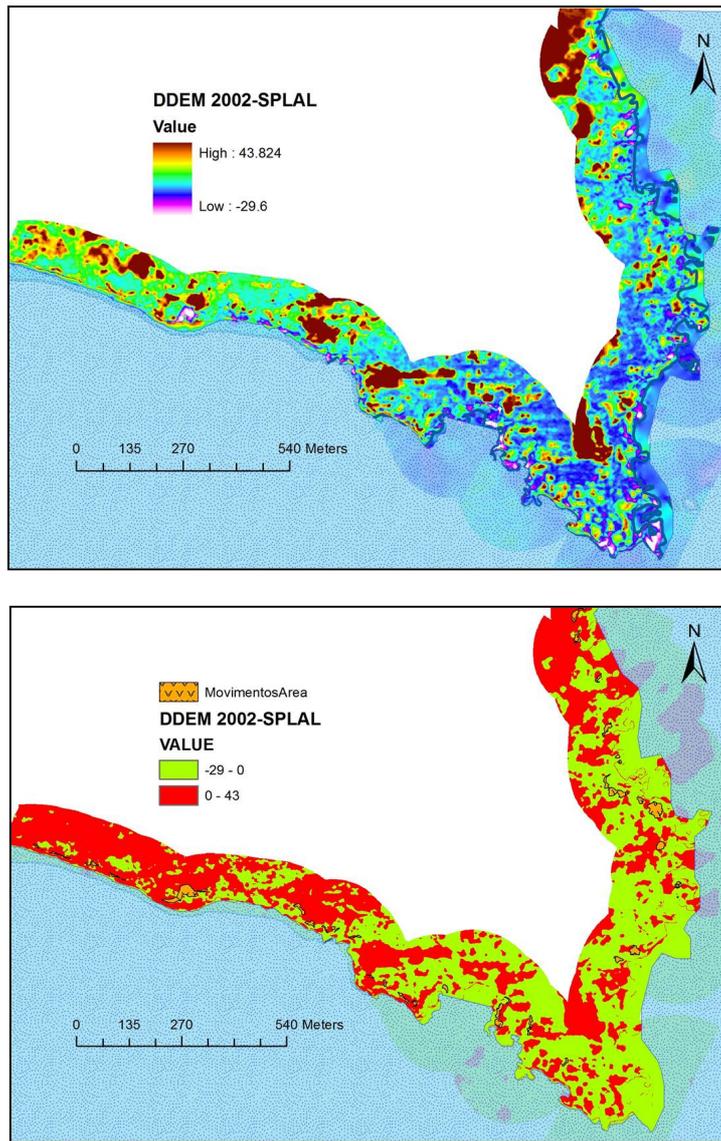
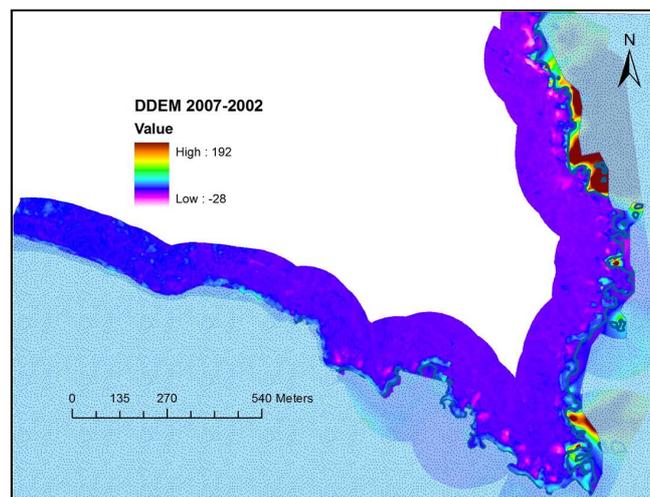


Figura 68: MDED da Ponta da Piedade, gerado para o intervalo de tempo SPLAL a 2002.



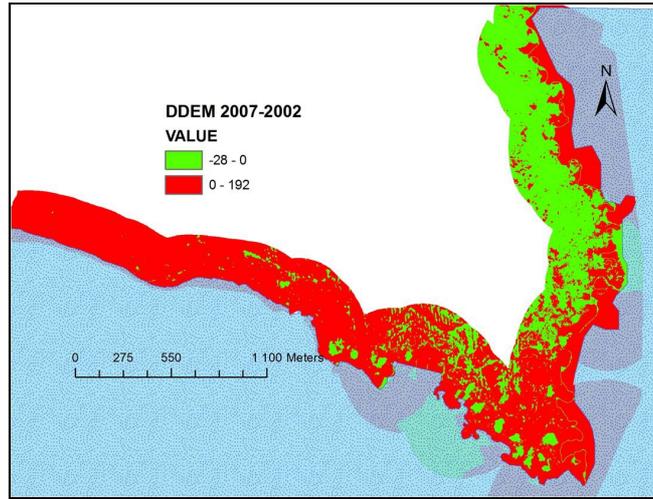


Figura 69: MDED da Ponta da Piedade, gerado para o intervalo temporal de 2002 a 2007.

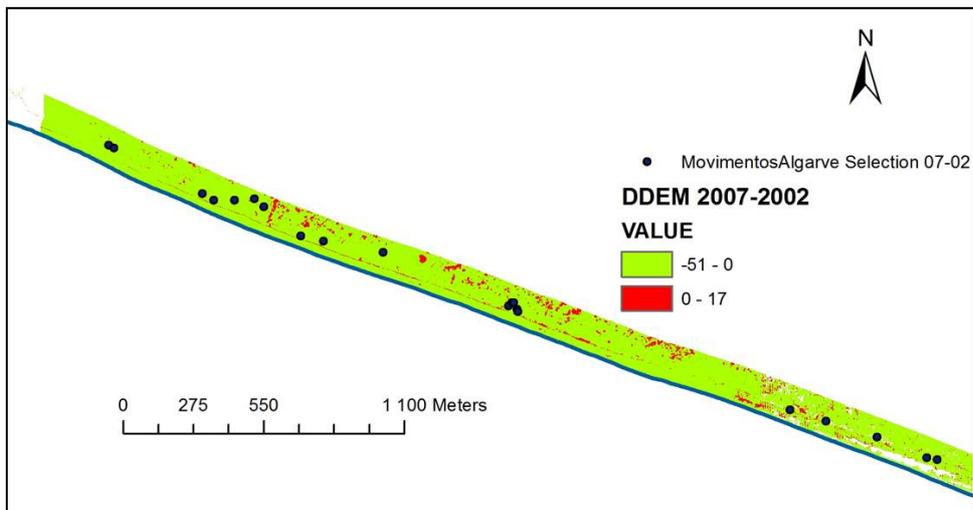
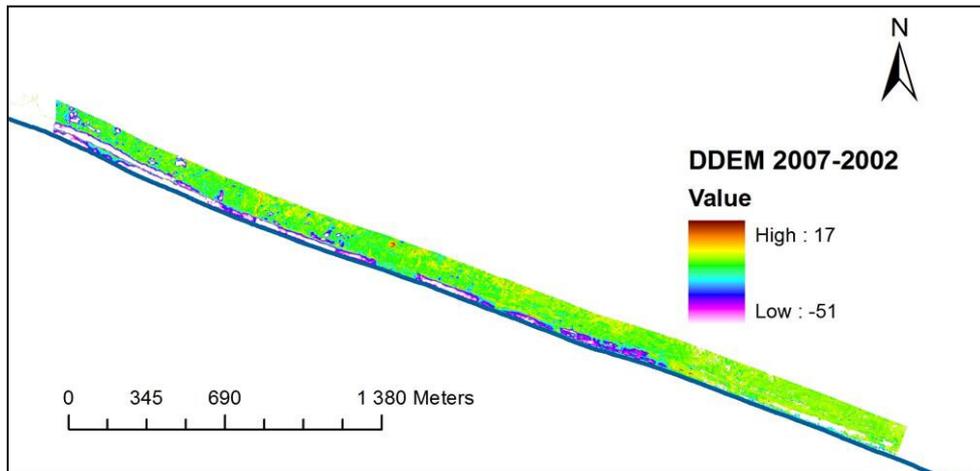


Figura 70: MDED da Praia da Falésia, gerado para o intervalo temporal de 2002 a 2007.

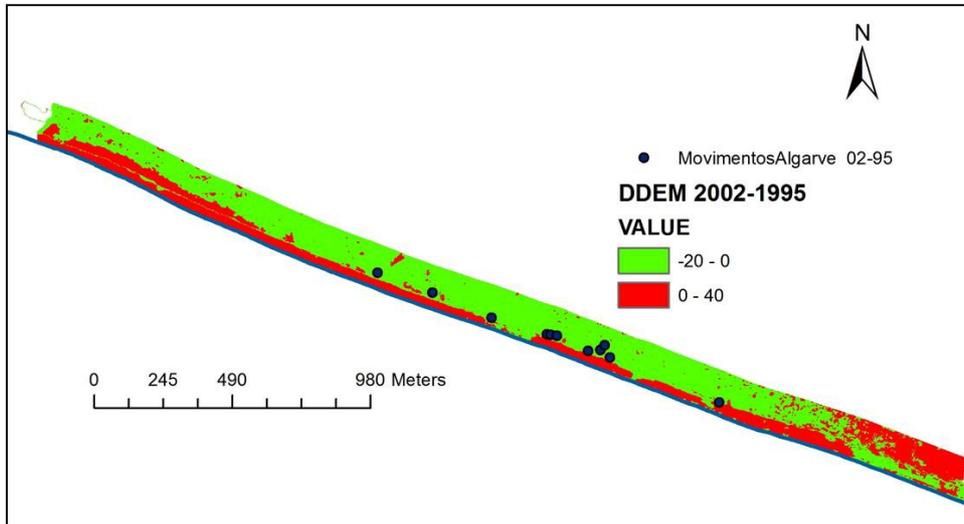
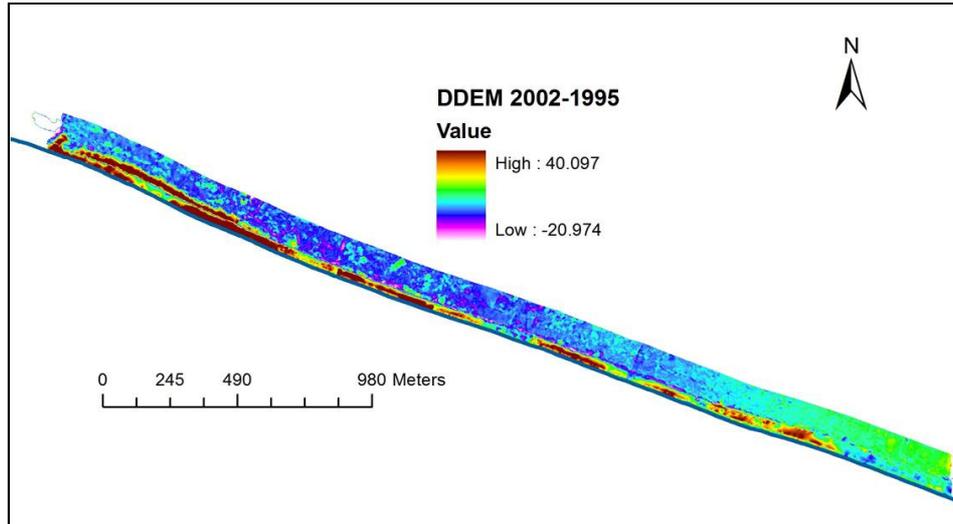
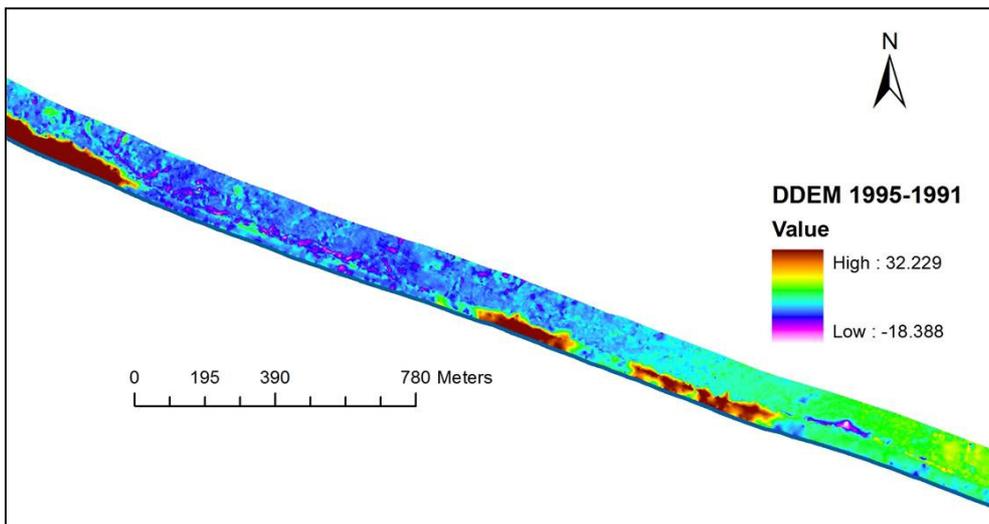


Figura 71: MDED da Praia da Falésia, gerado para o intervalo temporal de 1995 a 2002.



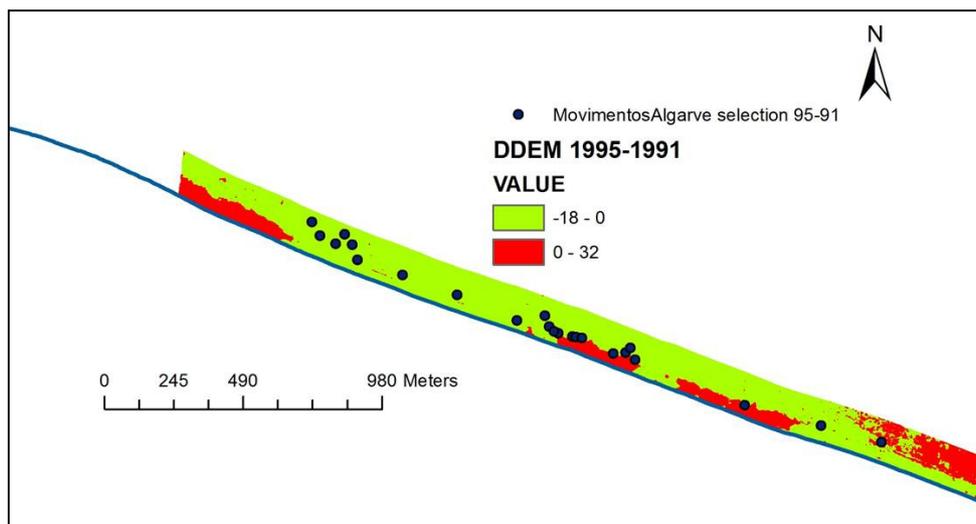


Figura 72: MDED da Praia da Falésia, gerado para o intervalo temporal de 1991 a 1995.

Os resultados obtidos com esta verificação constam na Tabela 36.

Tabela 36 – Registo de movimentos nos diferentes MDEDs gerados.

ZONA DE ESTUDO	MDED	MOVIMENTOS			Taxa de Sucesso
		Registados	Detectados no MDED	Não detectados no MDED	
Ponta da Piedade	2002-SPLAL	43	32	11	76%
	2007-2002	0	-	-	-
Praia da Falésia	1995-1991	11	11	-	100%
	2002-1995	11	11	-	100%
	2007-2002	20	18	2	90%

Discussão: A diferença de MDEs evidencia bem as regiões onde se verificaram perdas e ganhos de material, através da variação de altura em cada unidade de terreno. A principal vantagem da utilização de uma escala cromostereográfica é a fácil detecção visual de regiões alteradas.

O facto de se utilizar modelos digitais de elevação, onde estão presentes todas as estruturas à superfície numa determinada época, traz dificuldades adicionais, especialmente ao trabalhar com intervalos temporais alargados, que recuam até 1951, no caso do SPLAL, e em regiões onde a paisagem tenha sofrido alterações importantes, como a região do Algarve.

Na região da Ponta da Piedade, não se encontram alterações a nível de estruturas existentes junto à arriba, excepto na aproximação à cidade de Lagos onde a existência

de algumas edificações, parques de estacionamento e acessos às praias, alteraram a paisagem. Em termos de ocupação natural do solo junto à arriba, verifica-se que, em 1951, existiam bastantes campos de cultivo e baldios; para a actualidade, não se observam alterações importantes no uso do solo, sendo que a utilização dos terrenos para cultivo parece ter sido, na generalidade, abandonada, e em 2002 apenas se observa terreno livre. No entanto, algumas alterações evidenciadas pelo MDED junto aos terrenos próximos da arriba pode sugerir a intervenção a nível de remoção/deposição de terras, facilmente justificada pela intensa urbanização a ocorrer na região.

No sector da Praia da Falésia, as alterações ocorridas entre o intervalo de 1991 a 2007 referem-se a um aumento significativo da urbanização e construção de vias de comunicação, especialmente para o interior.

Em todo o caso, a utilização do *buffer* permitiu restringir as alterações do terreno à região interessada, facilitando a detecção de possíveis movimentos em arriba.

A diferença de MDEs, por si só, não permitiu a individualização directa de ocorrências. As diferenças inevitáveis já descritas, bem como os erros associados à geração dos MDEs originais, que influenciam o MDED resultante na magnitude desse valor, originaram regiões extensas de ganho e de perda de material, e muito raras zonas sem alteração, que englobam as áreas onde podem ter ocorrido movimentos. A detecção directa de alterações calculadas a partir de MDEDs parece, portanto, ser de difícil execução se realizada sem apoio extra. Verificou-se ser necessário recorrer aos registos de movimentos definidos a partir da comparação de linhas de crista para as diferentes datas.

As taxas de sucesso bastante elevadas, especialmente na região da Praia da Falésia, atestam a adequação do método à detecção de movimentos em arribas, embora a sua delimitação tenha de ser apoiada por informações adicionais, como os polígonos delimitados através das linhas da restituição. Em todo o caso, este processo não se desvia do fluxo de trabalho, uma vez que a restituição das linhas de crista, de base e de variações na morfologia da face de arriba é fundamental para apoiar a geração dos MDEs automáticos, e o registo desses polígonos pode ser feito simultaneamente.

É importante referir que os movimentos não detectados na região da Ponta da Piedade correspondem a eventos que tiveram lugar em zonas de algar, estruturas de difícil modelação automática, e nas extremidades do modelo.

A avaliação da qualidade num estudo multi-temporal como este não constitui uma tarefa simples. Na realidade, a única informação de terreno fidedigna utilizada é a informação dos pontos fotogramétricos coordenados para a cobertura INAG 2002, e todos os resultados derivam desta informação de base, o que tornou complexo o processamento das restantes coberturas, especialmente as mais antigas. Mostrou-se particularmente complexo o estudo da cobertura SPLAL, cujo processamento e posterior verificação foram quase exclusivamente baseados em informações recolhidas 50 a 51 anos mais tarde.

Cálculo de volumes

Estando na posse de um modelo digital de elevação diferencial e delimitando as zonas onde ocorreram movimentos, é possível estimar os volumes deslocados, correspondentes ao desaparecimento de área no topo da arriba [MATILDES et al, 2008]. Estas estimativas constituem também dados interessantes para outros estudos relacionados com a dinâmica sedimentar costeira.

Dada a natureza deste estudo, regiões ou dados de controlo de volumes calculados são quase impossíveis de definir. No entanto, o modelo implementado permite estimar volumes movimentados com base na área de terreno perdido no topo da arriba e, ainda, estimar a incerteza associada a essa estimativa [REDWEIK et al., 2008].

O volume de material movimentado foi calculado através de uma série de operações sobre cada MDED, utilizando as áreas definidas para cada movimento ocorrido. Em cada região de movimento, a área de um pixel no terreno é multiplicada pelo valor de cada pixel, que corresponde a uma variação altimétrica [REDWEIK et al., 2008], obtendo-se um valor para o volume de material contido nessa área. A soma dos volumes parciais (positivos e negativos) de uma região resulta no respectivo volume movimentado.

De forma a individualizar as regiões onde se localizam os movimentos ocorridos, extraiu-se, com base nos polígonos de movimentos, a informação correspondente do MDED, obtendo-se pequenas manchas de pixels equivalentes às áreas perdidas. Usando a opção *Region Group*, que regista, para cada conjunto de células no *output*, a identificação (através de um número único) da região agrupada (ou zona) a que cada célula corresponde. O conceito “zona” adoptado neste trabalho tem conotação espacial, isto é, uma zona consiste num conjunto de células que são adjacentes, numa vizinhança de 8 pixels.

No *software* SIG, nas diversas ferramentas de análise espacial disponíveis, encontra-se a aplicação *Zonal*. As ferramentas integrantes permitem realizar cálculos num *raster*, usando os valores das células, retribuindo estatísticas para cada zona.

Foram usadas as ferramentas *Zonal Statistics* e *Zonal Statistics as Table*, de forma a trabalhar com os dados resultantes das estatísticas sob a forma gráfica ou alfanumérica, respectivamente. A ferramenta *Zonal Statistics* gera um novo *raster* cujos valores representarão, para cada zona, a estatística escolhida, enquanto a *Zonal Statistics as Table* realiza os cálculos para todas as estatísticas de um *raster* nas zonas definidas e escreve o resultado numa tabela.

Para cada MDED foram aplicadas estas ferramentas, escolhendo a estatística Média, que retribui, para cada zona, a média dos valores de todas as células no MDED que pertencem a uma mesma zona, multiplicados pela área da zona correspondente.

Obtém-se então um novo conjunto de “zonas” *raster*, cujos valores individuais representam o volume deslocado em cada movimento. Apresenta-se os resultados

gráficos para a Ponta da Piedade (Figura 73), cujos valores de volumes associados à perda de terreno na crista da arriba ascende até 6937 m³, entre 1951 e 2002. No caso da Praia da Falésia, devido à pequena dimensão dos movimentos aí ocorridos, apenas são apresentados os resultados numéricos para cada intervalo estudado. Para o período de 1991 a 1995, foi movimentado terreno correspondente a volumes entre 1 e 7.7 m³; no período de 1995 a 2002, os valores situam-se entre os 1.6 e 7.3 m³; entre 2002 e 2007, os resultados distribuem-se entre os 1 e 7.5 m³ de terreno movimentado.

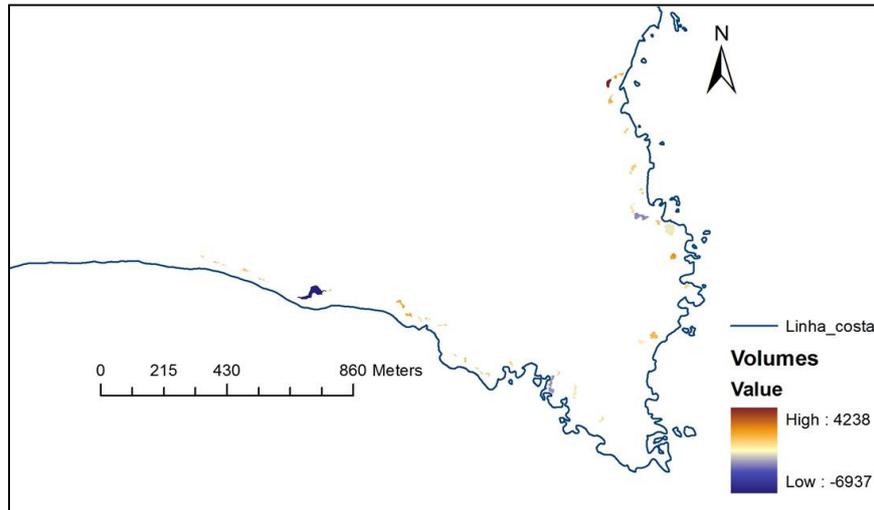


Figura 73: Volumes (m³) envolvidos em movimentos ocorridos entre 1951 e 2002, na Ponta da Piedade.

Assumindo que a incerteza do MDE corresponde aproximadamente à incerteza presente na componente altimétrica resultante da aerotriangulação, considerando as dimensões dos movimentos detectados e as linhas de quebra estereorrestituídas, pode considerar-se que os MDEDs apresentam uma incerteza equivalente ao maior valor da incerteza associada à altimetria calculado nas aerotriangulações das coberturas em questão [REDWEIK et al., 2007].

Segundo REDWEIK et al. [2007], sabendo que o volume de massa movimentada da crista da arriba, numa área de n pixels de dimensão a x a, resulta da soma de n volumes elementares, pode concluir-se que a incerteza associada é dada por

$$\sigma_v = \sqrt{\sum^n a^4 \sigma_{ZMDED}^2}$$

A incerteza no cálculo do volume aumenta, como se verifica, com o aumento da área correspondente.

Existe ainda a incerteza associada à delimitação dos polígonos de movimentos por parte do operador. Quando, entre duas épocas distintas, se cruzam as linhas de crista restituídas, a delimitação do polígono é imediata, diminuindo a introdução de subjectividade na definição do polígono. Esta situação ocorre, de forma bastante

simples, no caso da Ponta da Piedade, onde têm lugar movimentos pontuais, bem individualizados no espaço. No entanto, em regiões onde se verifica um recuo generalizado ao longo de uma costa extensa, como seja o caso da região de Quarteira a Ancão, a individualização de movimentos torna-se bastante complexa. À excepção dos intervalos de 2 e 3 anos entre as datas de 2002-2005 e 2005-2007, obtiveram-se, na realidade, polígonos de recuo e não de movimentos, uma vez que a velocidade de alteração entre épocas foi suficientemente elevada para não permitir contacto entre linhas de crista consecutivas no tempo. A definição do “fecho” dos polígonos assentou em critérios geomorfológicos baseados em interpretação das fotografias aéreas das diferentes épocas.

Outros produtos gerados

Ortofotos

As vantagens que a ortofoto tem sobre a fotografia aérea, em termos de propriedades geométricas, faz deste produto fotogramétrico uma ferramenta importante de apoio na aquisição de informação quantitativa sobre alterações sofridas pela superfície terrestre, neste caso particular, aquando da análise de ocorrência de movimentos e extracção de informação associada.

Utilizando os MDEs já apresentados, gerados automaticamente para as regiões de estudo, foram geradas ortofotos no *software* LISA que, posteriormente, foram importadas e integradas no SIG, apresentado no Capítulo V. A título de exemplo, apresenta-se uma ortofoto de 2002 da região da Ponta da Piedade (Figura 74) e uma ortofoto de 1991 da região da Praia da Falésia (Figura 75), ambas sobrepostas à linha de costa da cartografia 1: 2000 do INAG.

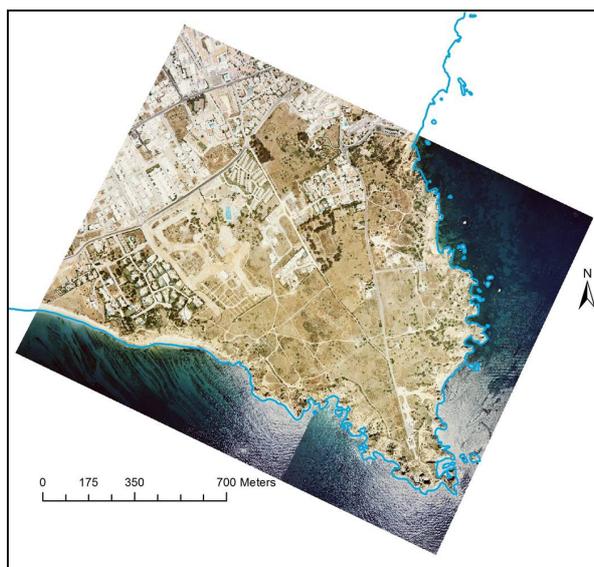


Figura 74: Ortofoto da Ponta da Piedade, obtida a partir do MDE gerado automaticamente para a cobertura INAG 2002.

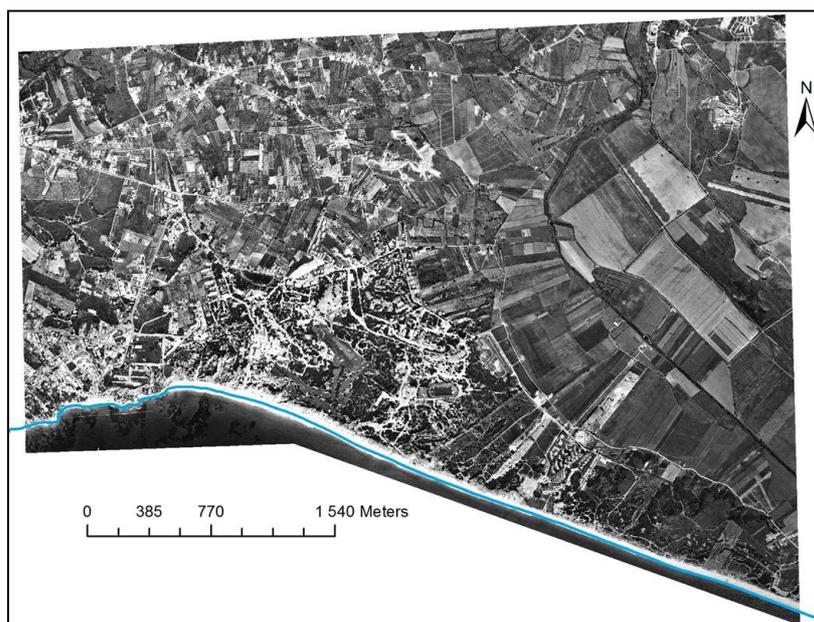


Figura 75: Ortofoto da Praia da Falésia, obtida a partir do MDE gerado automaticamente para a cobertura IGP 1991.

V. SIG – ARRIBA: Integração e gestão do inventário de movimentos em arribas

Actualmente, para levar a cabo uma análise rigorosa dos fenómenos dinâmicos que ocorrem no litoral, verifica-se ser de grande utilidade a utilização de sistemas de informação geográfica bem organizados e completos. Este tipo de análise, em SIG, tem vindo a sofrer rápidos progressos, muito apoiados pelos computadores mais eficiente, permitindo aplicações práticas, de baixo consumo de tempo, tanto na análise espacial como na visualização [LU *et al.*, 2002], dando a estes sistemas uma relevância significativa na compreensão das temáticas ambientais.

No decurso deste trabalho, verificou-se ser de extrema importância criar um SIG onde fossem sendo compiladas algumas das informações obtidas, nomeadamente, os resultados da detecção dos movimentos. Aliás, CARRARA [1999] constata que um SIG populado de dados relevantes assume uma importância fundamental quando se pretende avaliar o perigo total de movimentos numa região, quando têm lugar diferentes tipos de movimentos.

O conjunto de movimentos detectados e registados ao longo de todo o litoral justificam a implementação de um sistema deste tipo, que aborda de forma adequada a componente multi-temporal do estudo e permite gerir a grande quantidade de informação necessária a uma correcta análise dos fenómenos costeiros, como sejam os movimentos em arribas.

Foi então implementado o SIG-ARRIBA, um SIG de apoio à investigação e à decisão, onde constam diferentes tipos de dados e, fundamentalmente, o conjunto de movimentos de massa de diferentes tipologias, ocorridos em diferentes intervalos de

tempo, originados por um vasto conjunto de factores espaciais, fundamentalmente ligados à geologia e topografia.

O SIG-ARRIBA constitui, no fundo, o resultado final do projecto desenvolvido para todo o litoral de arriba do Algarve, onde se encontram integradas todas as informações adquiridas ao longo do trabalho e, ainda, informações adicionais importantes na análise do fenómeno.

As Instituições com jurisdição no litoral têm responsabilidades não só na gestão deste território como na produção de informação relevante que apoie decisões acerca dessa região, estando por isso interessadas em produtos de elevada qualidade, de rápida aquisição e produção, que ofereçam fiabilidade, e cujos encargos económicos não constituam uma barreira [BALTSAVIAS *et al.*, 1998]. Assim, o objectivo último será que o SIG-ARRIBA constitua uma fonte fidedigna de informação científica que sirva de forma efectiva os técnicos que estudam e intervêm no litoral, e que permita às respectivas Instituições tomar decisões bem sustentadas.

Estrutura do SIG-ARRIBA

O SIG-ARRIBA apresenta uma estrutura algo complexa mas de utilização bastante prática.

Segundo Ciolli *et al.* [1998], a integração de diferentes dados, em diferentes formatos, é essencial para construir uma base de qualidade para a análise e gestão ambiental. Assim, estão disponíveis 12 níveis de informação distintos:

- vectorial: movimentos, linhas de crista e base das arribas, topografia na forma de curvas de nível, cartografia (de estradas, caminhos, edificado, linha de costa, limite do areal e acessos a praias, que constituem, na prática, diferentes níveis) e mapa de densidade de movimentos;
- matricial: MDE, MDED, mapas geológicos, mapas topográficos, mapas pluviométricos, ortofotos e fotografias oblíquas.

Estes níveis constituem não só informação básica de apoio mas também *input* para operações de análise espacial mais complexas [REDWEIK *et al.*, 2009]. Foram ainda adicionadas algumas informações que, embora não constituam dados de aplicação directa no estudo do fenómeno, podem ser de grande utilidade aos técnicos para a execução do seu trabalho: pontos fotogramétricos do INAG, coordenados para a cobertura INAG-2002, mapa de sismicidade histórica do Atlas do Ambiente e a localização das estações meteorológicas da região do Algarve.

A avaliação da perigosidade associada à instabilidade de vertentes deve incluir as componentes espacial, temporal e de magnitude. A determinação desta perigosidade é realizada com base em modelos estatísticos empíricos que assentam no estudo de

inventários sistemáticos de movimentos [REDWEIK et al., 2008], como o realizado neste trabalho. É fundamental, por isso, que o registo de movimentos ao longo do tempo constitua uma base de informação científica completa, rigorosa e bem estruturada.

A ocorrência e o comportamento dos movimentos de massa são, como já foi referido, controlados por factores ligados à geologia e à topografia, o que faz com seja fundamental a análise de informação como mapas geológicos, mapas topográficos, modelos digitais topográficos, fotografias aéreas e/ou de satélite [YALCIN, 2006].

Descrição e aquisição/produção de informação

Dadas as diferentes fontes de informação e a quantidade de dados envolvidos no SIG-ARRIBA, é importante dar a conhecer brevemente o conteúdo de cada nível e, se aplicável, como a informação foi produzida.

Movimentos

Esta é a informação central do SIG-ARRIBA. Neste nível estão representados todos os movimentos, registados entre 1951 e 2007, para o Barlavento algarvio, entre Burgau e Albufeira, e entre 1952 e 2007, para o Sotavento, entre Albufeira e Ancão. Cada movimento, representado por um polígono, tem associadas as seguintes características que compõem a tabela de atributos: identificação, local, localização (referente ao sistema Hayford-Gauss *Datum* 73), largura média, largura máxima, comprimento de arriba afectado, área perdida, data de ocorrência, existência de protecção de sopé, presença de blocos na base, litologia, geologia e tipologia de movimento.

A identificação de cada movimento é feita por um código alfanumérico: uma letra que indica a geologia onde ocorre o movimento, e números sequenciais a partir de 1000 que foram sendo atribuídos na operação de detecção que foi realizada de Oeste para Este. Por exemplo, o movimento PQ1020 refere-se a um movimento que ocorreu em terrenos Plio-Quaternários e foi o vigésimo a ser detectado nesta geologia.

A localização é feita através da posição X e Y do centróide do polígono que define o movimento. Tanto o centróide como as suas coordenadas são calculados automaticamente pelo sistema. O local é uma informação retirada directamente dos dados de toponímia das folhas da Carta Militar 1: 25000.

As medições de largura máxima e comprimento de arriba afectado foram realizadas no AutoCAD segundo os critérios “observação directa do maior afastamento entre as duas linhas de crista, medido perpendicularmente à linha antiga da arriba” e “paralelamente à orientação da linha de costa, medido entre os dois pontos mais afastados do polígono”, respectivamente. Posteriormente, numa folha de cálculo foi calculada a largura média de cada polígono através da razão entre a área do polígono e o respectivo comprimento de arriba afectado.

A área do polígono correspondente à área de terreno perdido na crista da arriba, entre duas épocas, é determinada automaticamente pelo sistema.

Através da observação sistemática das coberturas fotográficas intermédias, foi possível identificar qual o intervalo de tempo em que cada movimento ocorreu, ficando definido o atributo Data de Ocorrência. Nesta operação de fotointerpretação, que incluiu a observação sistemática adicional de fotografias oblíquas do litoral, ficou também registada a existência ou ausência de protecção de sopé (existência de areal suficiente na base da arriba para constituir protecção contra a acção marinha) e a presença ou não de blocos na base da arriba, oriundos de movimentos anteriores.

Com base nas fotografias aéreas e oblíquas, nos mapas geológicos e na cartografia geológica de pormenor, e com o auxílio do inventário de MARQUES [1997], foi definida a litologia, a geologia e a tipologia de cada movimento.

Apresenta-se na Figura 76 um excerto da tabela de atributos compilada para os movimentos.

A cada movimento, para além da informação constante da tabela de atributos, foi ainda associada uma fotografia oblíqua, editada de forma a permitir analisar pormenorizadamente as características do mesmo (Figura 77).

FID	Movim	Local	XX_D73	YY_D73	Larg	Larg	Com	Area	Data	Proteccao	BlocosBase	Litologia	Geologia	TipoMovime
36	C1034	Cerro Lamy	-55012.2	-287661.6	1.19	1.59	1.7	2.02	SPLAL-1947	S	S	CaM;M	C	P
37	C1035	Cerro Lamy	-54980.0	-287659.1	3.01	4.99	13.16	39.7	SPLAL-1947	S	S	CaM;M	C	P
38	C1036	Cerro Lamy	-54961.0	-287657.6	0.76	1.84	11.12	8.50	SPLAL-1947	S	S	CaM;M	C	P
70	C1032	Cerro Lamy	-55046.8	-287657.7	2.28	3.47	8.493	19.4	SPLAL-1947	S	S	CaM;M	C	P
71	C1033	Cerro Lamy	-55037.8	-287659.1	2.91	4.72	9.909	28.8	SPLAL-1947	S	S	CaM;M	C	P
72	C1037	Cerro Lamy	-54835.8	-287578.0	0.77	1.29	5.922	4.56	SPLAL-1947	S	S	CaM;M	C	P
182	PQ1037	Forte Novo	4037.56	-289393.6	0.56	0.82	6.152	3.47	2002-2005	S (Praia)	N	A	PQ	S
183	PQ1038	Forte Novo	4042.79	-289397.7	0.84	1.38	3.700	3.14	2002-2005	S (Praia)	N	A	PQ	S
184	PQ1039	Forte Novo	4080.41	-289426.2	1.43	2.36	7.568	10.8	2002-2007	S (Praia)	N	A	PQ	S
185	PQ1040	Forte Novo	4097.15	-289436.3	1.36	3.27	23.09	31.5	2002-2005	S (Praia)	N	A	PQ	S
186	PQ1041	Forte Novo	4131.86	-289463.4	1.71	2.72	71.00	121.	2002-2005	S (Praia)	N	A	PQ	S
187	PQ1042	Forte Novo	4179.89	-289487.3	3.00	3.13	5.105	15.3	2002-2005	S (Praia)	N	A	PQ	S
188	PQ1043	Forte Novo	4200.46	-289502.1	1.68	3.24	33.24	56.0	2002-2005	S (Praia)	N	A	PQ	S
189	PQ1044	Forte Novo	4233.62	-289524.7	2.95	5.49	21.18	62.5	2002-2005	S (Praia)	N	A	PQ	S
190	PQ1045	Forte Novo	4253.50	-289538.5	1.20	1.17	5.678	6.85	2002-2005	S (Praia)	N	A	PQ	S
191	PQ1046	Forte Novo	4276.07	-289550.8	1.85	2.56	27.78	51.4	2002-2005	S (Praia)	N	A	PQ	S
192	PQ1047	Forte Novo	4318.77	-289581.1	2.55	4.01	55.07	140.	2005-2007	S (Praia)	N	A	PQ	S
247	PQ1102	Forte Novo	4177.04	-289506.6	28.8	35.2	368.2	1061	1991-2002	S (Praia)	N	A	PQ	S
215	PQ1070	Garrão	7229.29	-291662.0	0.86	1.23	3.363	2.89	2005-2007	S (Praia)	N	A	PQ	S
2	C1044	Mata Porcas	-54041.3	-287095.4	2.59	3.90	15.13	39.3	2002-2005	N	N	CaM;M	C	Colapso(??)
42	C1045	Mata Porcas	-54007.9	-287073.9	4.56	7.32	35.22	160.	1958-1972	N	N	CaM;M	C	Colapso (??)
43	C1046	Mata Porcas	-53985.6	-287061.7	0.78	1.17	4.468	3.52	1947-1958	N	N	CaM;M	C	Colapso (??)

Figura 76: Extracto exemplificativo da tabela de atributos dos movimentos detectados ao longo do litoral de arriba algarvio, de 1951 (SPLAL) a 2007.

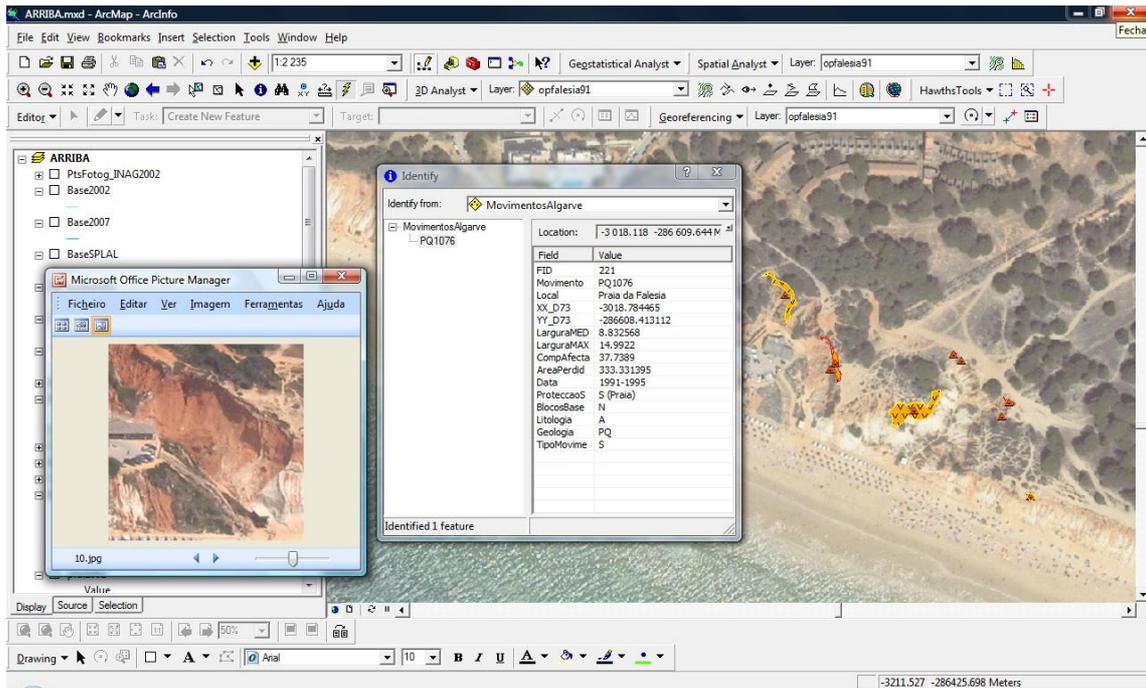


Figura 77: Tabela de atributos associada a cada movimento, e a fotografia aérea oblíqua do movimento.

Cartografia

A cartografia integrada nestes dois conjuntos de informação foi extraída da cartografia 1: 2000 no INAG, e editada e organizada em níveis distintos: topografia, estradas, caminhos, edificado, linha de costa, limite do areal e acessos a praias (Figura 78). Esta subdivisão é bastante interessante para estudos de avaliação de risco, a diversos níveis. As curvas de nível apresentadas têm equidistância de 1m e ocupam uma faixa até cerca de 200m para o interior.

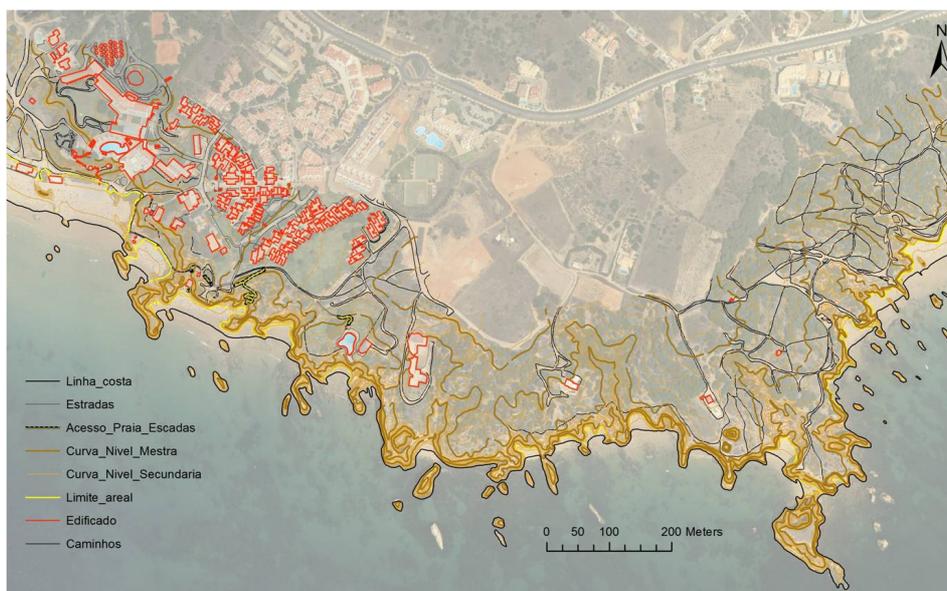


Figura 78: Extracto da cartografia subdividida em níveis de acordo com as características dos elementos (em transparência, a ortofoto IGP de 2005).

Linhas de crista e base das arribas

Estes níveis de informação consistem nas linhas tridimensionais adquiridas por estereorrestituição (Figura 79), acompanhada por interpretação geomorfológica constante dos elementos correspondentes, e que serviram de apoio à geração dos MDEs.



Figura 79: Pormenor das linhas de crista e base obtidas por estereorrestituição. Exemplo da Praia de Porto de Mós e do Canavial (Lagos).

Mapa de densidade de movimentos

Estando em posse dos dados já interpretados para a região Burgau - Lagos, foi possível realizar um mapa de densidade de movimentos nesse sector (ver Capítulo II).

O mapa de densidade de movimentos realizado para este sector baseia-se nas variáveis área horizontal perdida e no valor mais elevado de largura máxima perdida num movimento. A unidade cartográfica definida para a execução deste mapa foi a geologia/litologia, dando origem a 6 unidades: Calcarenitos e areias siltsas (Miocénico e Plio-Quaternário), Calcarenitos (Miocénico), Calcários e margas (Cretácico), Margas (Cretácico), Arenitos (Cretácico), e Calcários e margas (Cretácico Inferior), que ocorrem sequencialmente de Este (Lagos) para Oeste (Burgau) [REDWEIK et al, 2009].

Para cada uma das unidades referidas, foram reunidos os movimentos ocorridos e foi registado o somatório da área horizontal perdida bem como o valor máximo de largura máxima de arriba afectada por movimento. Dado que os movimentos têm lugar ao longo da crista da arriba, foi necessário definir um *buffer* representativo da distribuição da densidade de movimentos: o valor mais elevado de largura máxima de terreno perdido registado num movimento definiu, em cada unidade, a largura da faixa a cartografar em termos de densidade, uma vez que representa o “alcance” máximo, para o interior, do recuo da arriba. A definição de um *buffer* ao longo da linha de crista que se prolonga ao longo de uma determinada unidade gera um polígono e, consequentemente, uma área onde será definida a densidade. Neste trabalho, usou-se a

linha de crista de arriba obtida por estereorrestituição das imagens de 2002, uma vez que se trata de uma cartografia de apoio à determinação da perigosidade, informação que, posteriormente, será utilizada na definição de faixas de condicionamento à utilização a adoptar.

A densidade de movimentos, em cada unidade, foi calculada através da razão entre o somatório das áreas horizontais perdidas em movimentos ocorridos e a área do *buffer*.

Os resultados obtidos estão compilados na Tabela 37.

Tabela 37 – Valores registados de largura máxima e somatório das áreas de terreno perdido em movimentos, para cada unidade, e determinação dos valores de densidade de movimentos.

Unidade	Largura máxima (m)	Somatório da área horizontal perdida (m ²)	Densidade de movimentos (0-1)
Calcarenitos e areias siltosas (Miocénico e Plio-Quaternário)	11.5	43039.5	0.029
Calcarenitos (Miocénico)	7.3	14710.9	0.025
Calcários e margas (Cretácico)	5.9	12743.5	0.044
Margas (Cretácico)	9.4	33829.4	0.033
Arenitos (Cretácico)	32.6	96085.0	0.051
Calcários e margas (Cretácico Inferior)	23.0	74039.7	0.093

Apresenta-se na Figura 80, em dimensão reduzida, um pormenor do mapa de densidade de movimentos realizado para a região Burgau – Lagos, parte integrante do SIG-ARRIBA. O mapa num formato mais adequado, A3, é apresentado no Anexo D.3.

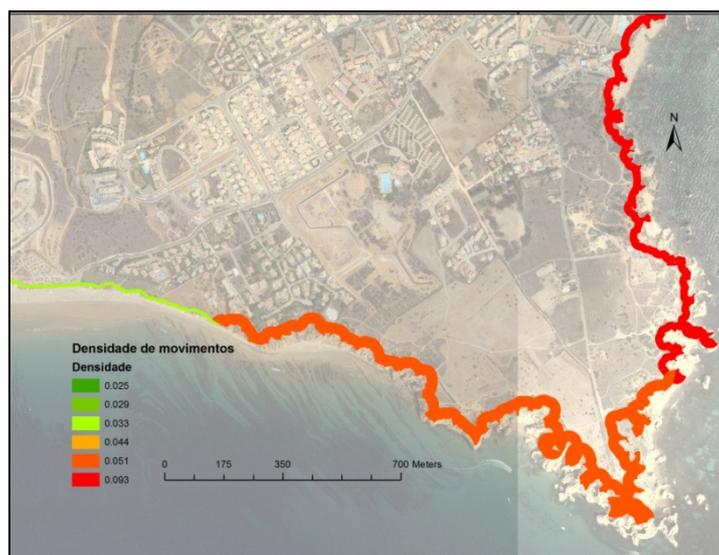


Figura 80: Pormenor do Mapa de Densidades na região da Ponta da Piedade.

A aproximação que se apresenta resulta das indicações dadas por GUZZETTI [2006], que desenvolveu as metodologias para extensas áreas de ocorrência de movimentos, como a região da Umbria, por exemplo.

No entanto, neste caso, a região de estudo estende-se ao longo do litoral, numa faixa muito estreita que varia de acordo com o “alcance” (largura máxima de terreno afectado por movimentos) e que é delimitada em toda a sua extensão pela crista das arribas. A utilização do parâmetro *área* para o cálculo da densidade implica a utilização de uma largura de *buffer* que foi definida, para cada unidade, como a largura máxima de terreno afectada num movimento. Claramente, a definição desta largura é subjectiva, pois depende directamente dos registos do operador, tanto na delimitação do movimento como na medição da largura máxima.

Esta situação confere a um mapa de densidade de movimentos, tal como se apresenta, algumas dificuldades de comparabilidade da densidade de uma unidade para outra, uma vez que a definição da área de actuação não é imparcial.

Uma outra alternativa para o cálculo de densidade de movimentos seria utilizar a razão entre o somatório dos comprimentos de arriba afectados por movimentos e o comprimento total da arriba, em cada unidade considerada. Obter-se-ia um valor de densidade de movimentos, próprio para cada unidade, e referente ao segmento de crista de arriba nela localizado.

Utilizando então o parâmetro “comprimento”, a densidade de movimentos em cada unidade passaria a ser a que se apresenta na Tabela 38.

Tabela 38 - Valores registados de comprimento de arriba e somatório do comprimento de arriba afectado por movimentos, para cada unidade, e determinação dos valores de densidade de movimentos.

Unidade	Comprimento de arriba (m)	Somatório do comprimento total afectado(m)	Densidade de movimentos (0-1)
Calcarenitos e areias siltosas (Miocénico e Plio-Quaternário)	3853.9	754.8	0.196
Calcarenitos (Miocénico)	3627.2	629.9	0.174
Calcários e margas (Cretácico)	3596.1	458.8	0.128
Margas (Cretácico)	2181.4	300.6	0.138
Arenitos (Cretácico)	2066.4	150.9	0.073
Calcários e margas (Cretácico Inferior)	3813.3	471.2	0.124

Uma forma de ultrapassar a desvantagem de basear os cálculos em parâmetros subjectivos é a utilização de modelos de probabilidade bem calibrados através dos dados

de rigorosos inventários de movimentos. Uma vez estabelecido um modelo de probabilidade, é possível estimar qual o parâmetro mais adequado ao cálculo da estabilidade, em primeiro lugar, de forma a garantir uma completa comparabilidade entre unidades, e, posteriormente, definir os valores a atribuir de forma imparcial a cada unidade.

Modelos digitais de elevação

Para cada época estudada, correspondente às datas de aquisição das coberturas aéreas processadas fotogrametricamente, foi gerado um modelo digital de terreno através de correlação automática de imagem e com apoio das linhas de crista e base de arriba estereorrestituídas. A resolução dos MDEs é de 1m, correspondente ao valor máximo de precisão obtido para a planimetria nas diferentes aerotriangulações. No SIG-ARRIBA constam apenas as faixas do litoral extraídas através da aplicação do *buffer* de 150 m, concentrando a informação na zona de interesse (Figura 81).



Figura 81: Modelo digital de terreno de 2002, na zona da Praia da Falésia.

Modelos digitais de elevação diferenciais

Como anteriormente referido, os MDEDs (Figura 82, na página seguinte) são gerados a partir da subtração de um MDE recente a um mais antigo. São de elevado interesse na determinação de volumes.

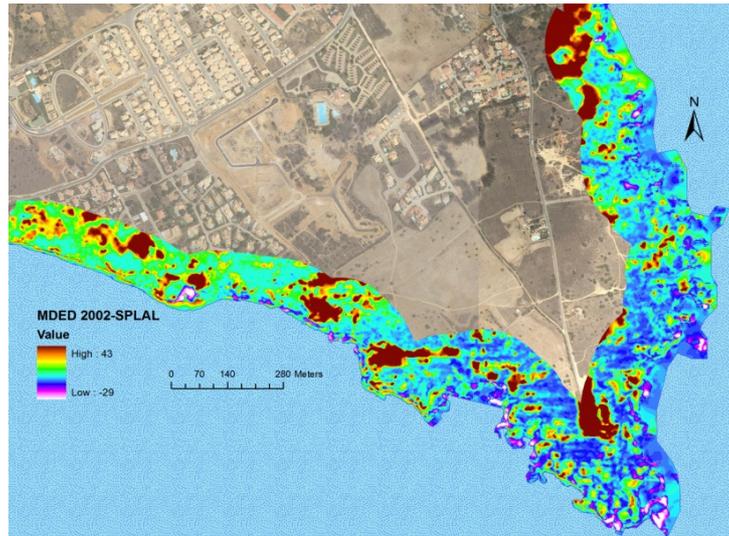


Figura 82: Modelo digital diferencial entre 1951 e 2002 para a Ponta da Piedade, em escala cromostereográfica.

Mapas Geológicos

Os mapas geológicos disponibilizados no SIG dizem respeito à Carta Geológica 1: 50000 e a um nível mais elevado de detalhe dado pelos levantamentos geológicos de pormenor realizados por MARQUES [1997] (Figura 83). São fundamentais na caracterização de movimentos detectados e em estudos de análise espacial que estejam dependentes dos factores geológicos.

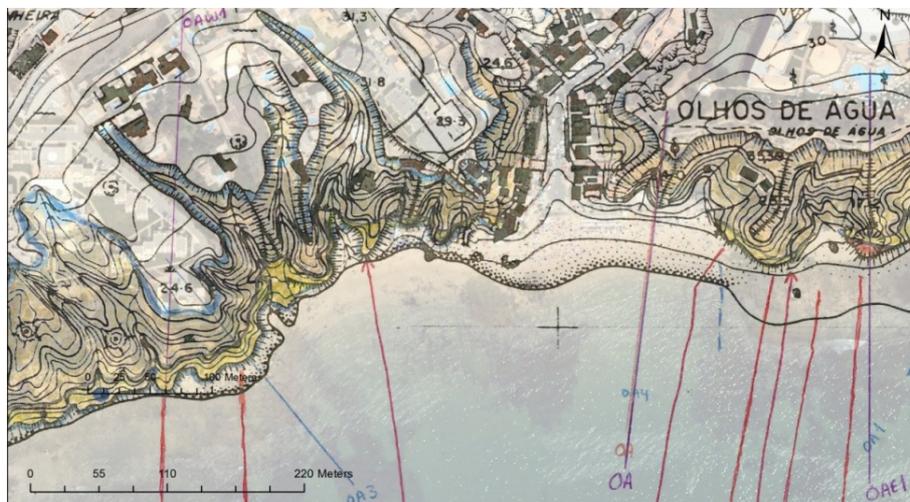


Figura 83: Pormenor do levantamento de pormenor realizado, constante no SIG em formato *raster*.

Fotografias aéreas oblíquas

As fotografias oblíquas que constam no SIG-ARRIBA datam de 2001, 2003 e 2006. Não estão, elas próprias, georreferenciadas, mas encontram-se associadas a pontos localizados ao centro da fotografia correspondente à localização do litoral (Figura 84). As 312 fotografias estão associadas a um símbolo ilustrativo, contêm a toponímia do

local, autor e data de obtenção, e dispõem-se ao longo de todo o litoral (Figura 84). Como já foi referido, cada movimento tem também associada uma fotografia aérea oblíqua de pormenor.

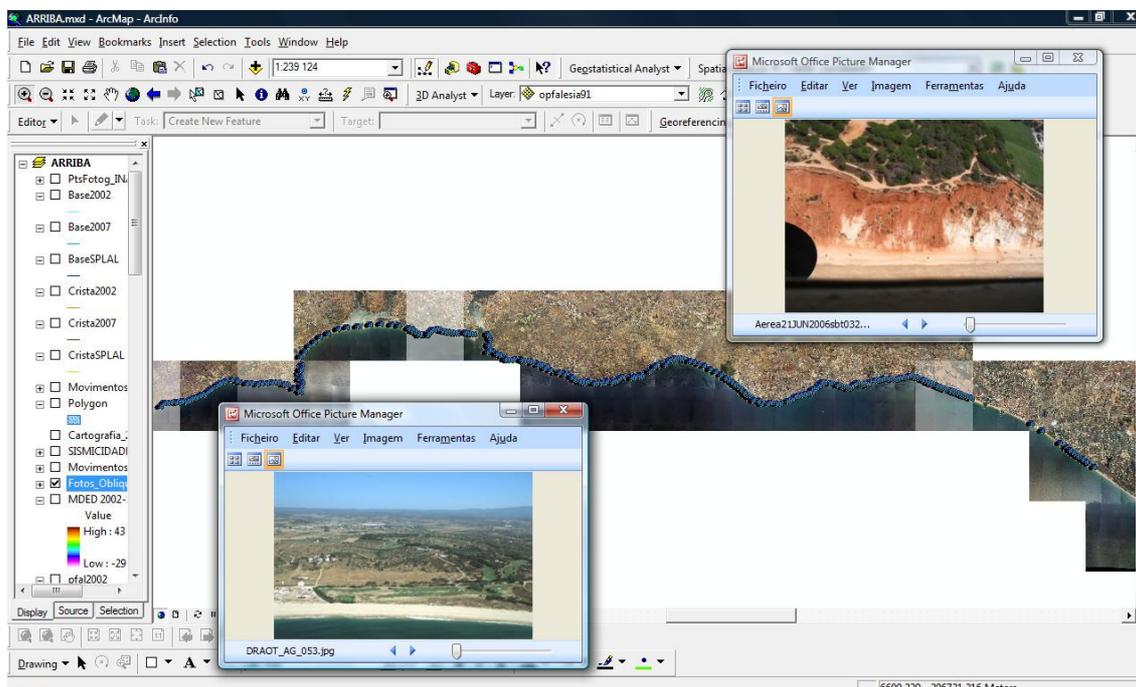


Figura 84: Distribuição das fotografias aéreas oblíquas ao longo do litoral algarvio entre Burgau e Ancão.

Mapas pluviométricos

Foram recolhidos, da base de dados do SNIRH, informações referentes às estações meteorológicas localizadas no Algarve, relativas ao período de interesse (1947 a 2007). Apesar de a rede de estações meteorológicas ser densa na região do Algarve (Figura 85) e existirem registos desde o séc. XIX, nem todas as estações apresentam dados contínuos no tempo, dificultando a execução de mapas pluviométricos por interpolação. O carácter recortado da costa e o facto de haver, em alguns anos, pouca expressão de estações junto ao litoral provoca, em muitos casos, lacunas de informação na região das arribas. Para cada período de 5 anos, compilou-se os dados existentes para a pluviosidade média anual e gerou-se uma superfície a partir de *kriging* para toda a região. Cada superfície foi gerada com base nas estações que apresentavam dados disponíveis para os anos do intervalo temporal considerado (Figura 86). Esta informação é relevante na medida que poderá apoiar a determinação da relação entre ocorrência de movimentos, factores geológicos e condições atmosféricas.

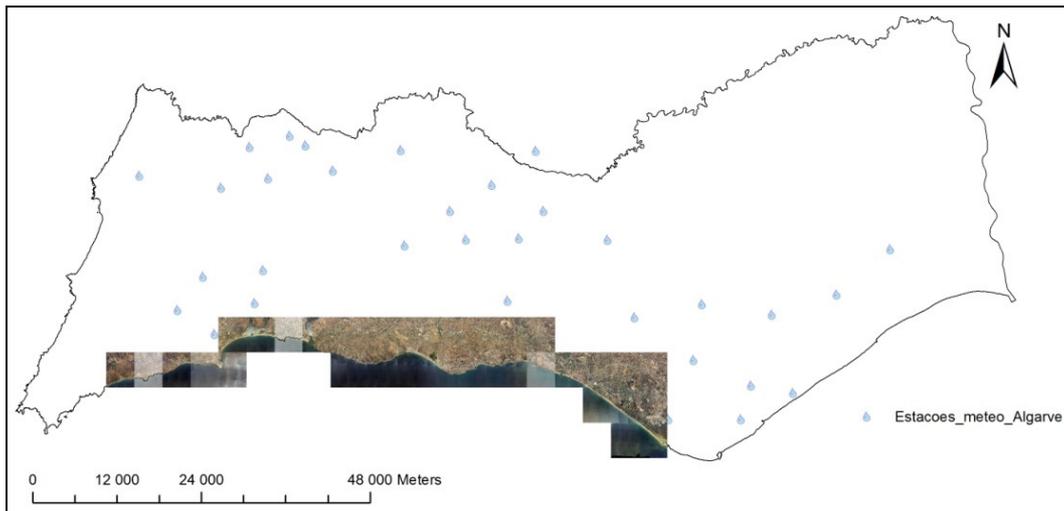


Figura 85: Distribuição das estações meteorológicas do Algarve (fonte dos dados: SNIRH).

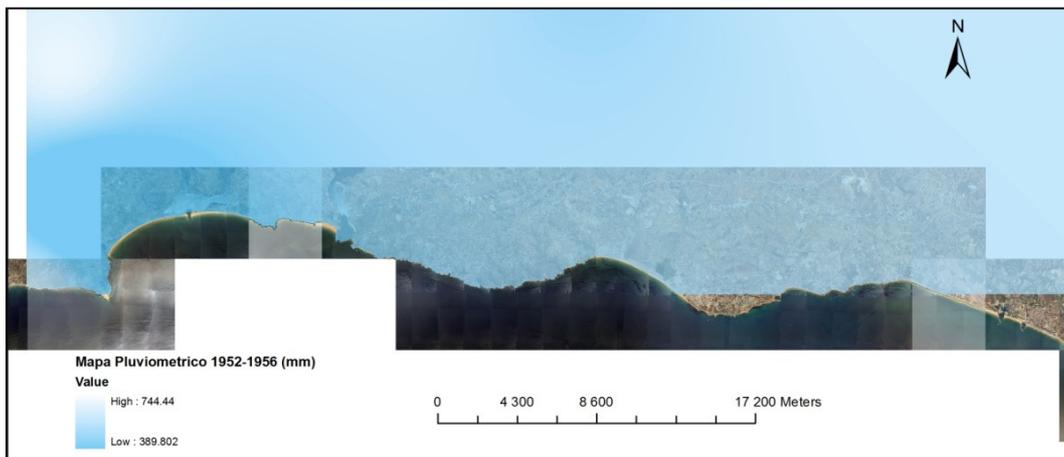


Figura 86: Mapa pluviométrico gerado com dados de pluviosidade média anual entre 1952 a 1996 (fonte dos dados: SNIRH).

Ortofotos

É disponibilizado um conjunto de ortofotos do litoral algarvio, executadas pelo IGP, com base em fotografias de 2005. Apresentam uma resolução espacial de 0.5 m, o que lhes confere grande utilidade na medida em que, mantendo as propriedades radiométricas da imagem original, permitem realizar directamente medições no terreno e interpretar fenómenos a ter lugar no litoral.

A informação apresentada foi, como referido, compilada e disponibilizada no SIG-ARRIBA. Desta forma, torna-se bastante simples a inquirição aos dados e o cruzamento de informações aquando da realização de diferentes operações de análise espacial. Facilmente se integram novos dados, obtidos aquando de uma nova cobertura fotográfica aérea após processamento fotogramétrico rigoroso: novas ocorrências de

movimentos, novas linhas de crista e base de arribas estereorrestituídas, etc., actualizando de forma eficiente o inventário e a base de dados já existente.

Trata-se de um conjunto de informações rigorosas, disponibilizadas num suporte flexível e organizado, que permitirá aos técnicos optimizarem a análise do fenómeno de movimentos em arribas do litoral e, de uma forma sustentada, através de inquirições e visualização rápidas, apoiar as decisões inerentes à responsabilidade de qualquer instituição que tenha jurisdição sobre o litoral.

VI. Conclusões e trabalho futuro

Os resultados obtidos permitem concluir que a aplicação dos métodos fotogramétricos se adequa à detecção de movimentos de massa em arribas rochosas no litoral. Encontram-se abaixo das tolerâncias indicadas por MARQUES [1997] e, com as excepções assinaladas, permitiram atingir uma precisão que melhora significativamente a resolução do inventário.

O processamento fotogramétrico das imagens possibilita também a sua visualização tridimensional com qualidade, e oferece a vantagem de se poder registar, sob a forma gráfica, cada movimento individual e retirar informação quantitativa rigorosa directamente do mesmo suporte.

A operação de estereorrestituição mostrou-se fundamental, não só na definição de áreas de terreno perdido por movimentos na crista das arribas, mas também no apoio à geração dos modelos digitais de terreno por correlação automática de imagem, onde a reprodução de morfologias altamente variáveis se torna significativamente complexa.

A geração automática dos MDEs verificou-se ser uma operação morosa mas que retribui resultados muito interessantes, especialmente em coberturas aéreas de escala mais favorável à detecção do fenómeno em causa. Verifica-se que a qualidade do MDE está dependente da qualidade do ajustamento na aerotriangulação e, obviamente, dos dados de base utilizados.

Constata-se, claramente, que os MDEDs são ferramentas essenciais para a determinação semi-automática do volume associado a cada movimento, ainda que necessitem do apoio adicional dos polígonos representativos dos movimentos. Verifica-se ser absolutamente necessário utilizar dados de base de elevada confiança para que estes produtos possam demonstrar a vantagem que traz a sua utilização.

A criação de um SIG onde se acede ao inventário dos movimentos detectados, às características de cada movimento, a informação adicional de apoio a novas operações

de análise espacial, que possibilita a integração de nova informação entretanto produzida e a fácil actualização da informação presente, permite estudar o fenómeno acedendo às informações relevantes com uma facilidade que, anteriormente, não era possível.

Facilmente se conclui, com a apresentação do projecto que foi desenvolvido, que este é um trabalho em permanente actualização: é importante que se apliquem as metodologias apresentadas, que se continue a adicionar novas ocorrências sempre que seja disponibilizada uma nova cobertura fotográfica sobre a qual seja possível o processamento fotogramétrico. Aliás, também nesse sentido se verifica ser fundamental a existência de um SIG criado para o efeito.

Neste trabalho foram apresentadas metodologias e procedimentos que permitiram compilar um inventário de movimentos rigoroso e caracterizado com pormenor. No entanto, considera-se que algumas tarefas podem ser melhoradas e até mais desenvolvidas no futuro.

Seria interessante aumentar o grau de automatização de alguns procedimentos, como a operação de orientação interna que, devido ao elevado número de fotografias a trabalhar, se torna bastante pesada em termos de consumo de tempo.

É de extrema importância aumentar o conhecimento acerca da cobertura SPLAL, especialmente a nível das informações críticas para o procedimento fotogramétrico, de forma a eliminar as incertezas introduzidas ao longo do processamento. Trata-se da cobertura aérea mais antiga do país, fundamental na prossecução de estudos multi-temporais rigorosos, com escala e radiometria muito adequadas à extracção de informação quantitativa e qualitativa sobre fenómenos localizados à superfície terrestre.

Seria extraordinariamente interessante testar a metodologia proposta, especialmente no que se refere à geração automática dos MDEs e aos MDEDs, com dados de base próprios para cada cobertura, obtidos com rigor após um planeamento cuidadoso. Tal tarefa poderia ser, desde já, realizada para a cobertura IGP 2007, com o objectivo de afinar os procedimentos e, principalmente, executar uma verificação com dados adequados de forma a obter-se uma validação mais apoiada do método.

No futuro, de forma a tornar o sistema sempre mais “leve” e prático, seria útil passar a formato vectorial alguma informação ainda em raster como os mapas geológicos oficiais e os mapas geológicos de pormenor.

É importante referir que um trabalho desta envergadura é extraordinariamente exigente do ponto de vista da necessidade de experiência prática dos operadores, de *software* e *hardware* específicos, e de material e informação de base.

A importância deste tipo de estudos e as vantagens da sua prossecução justificam plenamente os meios.

Bibliografia

- Baillard, C., (2003) - *Production of urban DSMs combining 3D vector data and stereo aerial imagery*. ISPRS Archives, Vol. XXXIV, Part3/W8.
- Baily, B., Collier, P., Farres, P., Inkpen, R., Pearson, A. (2003) – *Comparative assessment of analytical and digital photogrammetric methods in the construction of DEMs of geomorphological forms*. Earth Surface Processes and Landforms, 28, 307-320 (2003).
- Baldi, P., Coltelli, M., Fabris, M., Marsella, M. (2008) – *High precision photogrammetry for monitoring the evolution of the NW flank of Stromboli volcano during and after the 2002-2003 eruption*. Bulletin of Vulcanology (2008) 70: 703-715.
- Baltsavias, E., Käser, C. (1998) – *DTM and Orthoimage generation – A thorough analysis and comparison of four digital photogrammetric systems*. IAPRS, Vol. 32/4, ISPRS Commission IV Symposium on GIS – Between Visions and Applications, Stuttgart, Germany.
- Brabb E. (1993) - *Priorities for landslide during the international decade of hazard reduction*. In: Wagner P, Novosad S (eds) Landslides: seventh international conference and Field workshop. P. 7–14. Balkema, Rotterdam
- Briese, Ch., Pfeifer, N., Dorninger, P. (2002) – *Applications of the robust interpolation for DTM determination*. IAPRSIS. XXXIV / 3A, pp. 55 – 61.
- Catalão, J., Catita, C., Miranda, J., Dias, J. (2002) – *Photogrammetric analysis of the coastal erosion in the Algarve (Portugal)*. Géomorphologie: relief, processus, environment – Numéro 2. Avril-Juin 2002, 119-126.
- CCDRA (Comissão de Coordenação Desenvolvimento Regional do Algarve) (2007) – *Plano Regional de Ordenamento do Território*. Versão aprovada em Conselho de Ministros - 24 Maio 2007.
- Chacón, J., Irigaray, Fernández, T. (2006) – *Engineering geology maps: landslides and geographical information systems*. Bull. Eng Geol Environ (2006) 65: 341-411.
- Chandler, J. H. (1998) – *Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research*. Earth Surface Processes and Landforms, 24, 51-63 (1999).

- Chandler, J. H. (2001) – *Terrain measurement using automated digital photogrammetry*. Land Surface Evaluation for Engineering Practice. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 18, 13-18.
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédois, S., Silvera, N., Phachomphon, K. (2006) – *Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density*. *Geomorphology*, 77, 126-141.
- Ciolfi, M., Tabarelli, S., Zatelli, P. (1998) – *3D Spatial data integration for avalanche risk management*. IAPRS, Vol. 32/4, ISPRS Commission IV Symposium on GIS – Between Visions and Applications, Stuttgart, Germany.
- Costa, S., Delahaye, D., Freiré-Díaz, S., Nocera, L., Davidson, R., Plessis, E. (2004) – *Quantification of the Normandy and Picardy chalk cliff retreat by photogrammetric analysis*. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications; 2004; v. 20; p. 139-148.
- Cruden, D.M. (1991) - *A simple definition of a landslide*. *Bulletin International Association for Engineering Geology*, 43: 27-29.
- Devoli, G., Strauch, W., Chávez, G., Hoeg, K. (2007) – *A landslide database for Nicaragua: a tool for landslide-hazard management*. *Landslides* (2007), 4, 163-176.
- Dias, J. (1988) – *Aspectos geológicos do litoral algarvio*. *Geonovas* (Lisboa), Vol. 10: 113-128, 1988.
- Diário da República (2008) - Despacho n.º 27660/2008. Diário da República, 2ª série – N.º 210 – 29 de Outubro de 2008.
- Estes, J. (1999) – *Remote sensing core curriculum – Vol. I*. International Center for Remote Sensing of Environment.
(<http://userpages.umbc.edu/~tbenja1/umbc7/santabar/rscc.html>)
- Fernández, T., Jiménez, J., Fernández, P., El Hamdouni, R., Cardenal, F., Delgado, J., Irigaray, C., Chacón, J. (2008) – *Automatic detection of landslide features with remote sensing techniques in the Betic cordilleras (Granada, Southern Spain)*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII. Part B8:351-356.
- Fookes, P., Dale, S., Land, J. (1991) – *Some observations on a comparative aerial photography interpretation of a landslipped area*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 24, 249-265.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (2008) – *Comparing landslide inventory maps*. *Geomorphology* 94 (2008): 268-289.
- Guzzetti, F. (2005) – *Landslide hazard and risk assessment*. PhD Thesis. University of Bonn.

Hapke, C.J. (2005) – *Estimation of regional material yield from coastal landslides based on historical digital terrain modelling*. Earth Surface Processes and Landforms, 30, 679-697 (2005).

Hart, A., Griffiths, J., Mather, A. (2009) – *Some limitations in the interpretation of vertical stereo photographic images for a landslide investigation*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 42, 21-30.

Jacobsen, K. (2004) - *Direct Integrated Sensor Orientation – Pros and Cons*. Proceedings of the XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Tuquia.

Kraus, K., Briese, C., Attwenger, M., Pfeifer, N. (2004) – *Quality Measures for Digital Terrain Models*. ISPRS Archives. "Proceedings", O. Altan (ed.); Vol XXXV, Part B/2 (2004), ISSN: 1682-1750; 113 - 118.

Leberle, F., Perko, R., Gruber, M., Ponticelli, M. (2002) – *Novel Concepts for Aerial Digital Cameras*. ISPRS Archives, Volume 34, Part 1. Denver, USA.

Lim, M., Petley, D., Rosser, N., Allison, R., Long, A. (2005) – *Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution*. The Photogrammetric Record, 20(110): 109-129.

Lu, W., Doihara, T. (2002) – *GIS data maintenance and management with spatiotemporal model*. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications. Ottawa, 2002.

Manuppella, G.; Ramalho, M.; Telles Antunes, M.; Pais, J., (1987), *Carta Geológica de Portugal 1:50000: Notícia explicativa da Folha 53-A – Faro*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Marques, F. (1998) – *Evolução de arribas litorais: Importância de estudos quantitativos na previsão de riscos e ordenamento da faixa costeira*. Colectânea de Ideias sobre a Zona Costeira de Portugal. 67-86pp. Associação EUROCOAST – PORTUGAL, Porto.

Marques, F. (2006) – *A simple method for the measurement of cliff retreat from aerial photographs*. Zeitschrift für Geomorphologie - Supplementbände, 144, p. 39-59.

Matildes, R., Redweik, P., Marques, F., Santos, L. (2008) - *Detecção e medição de recuos nas arribas no litoral do Algarve para integração em SIG*. X Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica (Oeiras, Portugal), pp. 759-771.

Matthews, M., Clayton, C. (1986) – *The use of oblique aerial photography to investigate the extent and sequence of landslipping at Stag Hill, Guildford, Surrey*. Geological Society of London, Engineering Geology Special Publication N°2, 1986.

Miller, P., Mills, J., Edwards, S., Bryan, P., Marsh, S., Mitchell, H., Hobbs, P. (2008) – *A robust surface matching technique for coastal geohazard assessment and management*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 63, 529-542.

Mills, J., Buckley, S., Mitchell, H., Clarke, P., Edwards, S. (2005) – *A geomatics data integration technique for coastal change monitoring*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 651-664 (2005).

Oliveira, S., Catalão, J., Sousa, C., Dias, J.A. (2003) – *Aplicação de técnicas fotogramétricas e ambientes SIG no estudo do recuo da linha de costa – Área do Forte Novo – Trafal, Algarve*. *Finisterra*, XXXVIII, 76, Lisboa, p.35-49.

Oliveira, S., Catalão, J.; Ferreira, Ó., Alveirinho Dias, J. (2008) – *Evaluation of cliff retreat and beach nourishment in southern Portugal using photogrammetric techniques*. *Journal of Coastal Research*, 24(4c), 184-193. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Redweik, P., Marques, F., Matildes, R. (2008) – *A strategy for detection and measurement of the cliff retreat of the coast of Algarve (Portugal)*. *Earsel EProceedings Archive*, Vol. 7, N.º 2, 2008. 298-310.

Redweik, P., Matildes, R., Marques, F., Santos, L. (2009) – *Photogrammetric methods for monitoring cliffs with low retreat rate*. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 1577-1581. ICS2009 Proceedings. Portugal.

Redweik, P., Roque, D., Marques, A., Matildes, R., Marques, F. (2009) – *Recovering Portugal Aerial Images Repository*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXVIII-1-4-7/W5 ISSN 1682-1777.

Sesli, F., Karsli, F., Colkesen, I., Akyol, N., (2008) – *Monitoring the changing position of coastlines using aerial and satellite image data; an example from the eastern coast of Trabzon, Turkey*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, vol.153, n.º. 1-4, pp. 391-403.

Shears, J. C. (1995) – *Using digital photogrammetry for the rapid generation of digital terrain databases*. *Colloquium on Terrain Databases and Their Use in Navigation and Collision Avoidance*, IEE.

Takagi, M. (1998) – *Accuracy of digital elevation model according to spatial resolution*. *IAPRS*, Vol. 32/4, ISPRS Commission IV Symposium on GIS – Between Visions and Applications, Stuttgart, Germany.

Tate, E. (1998) – *Photogrammetry applications in digital terrain modeling and floodplain mapping*. *Página pessoal*, acedida em 5 de Abril de 2009 (<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/grad/tate/study/remote/TermProj.html>).

Teixeira, S. B. (2006) - *Slope mass movements on rocky sea-cliffs: A power-law distributed natural hazard on the Barlavento Coast, Algarve, Portugal*. *Continental Shelf Research*. Volume 26, Issue 9, June 2006, Pages 1077-1091 *Coastal Hazard Assessment in the Gulf of Cádiz*.

USGS (2007) – *Standards for Digital Elevation Models*. National Mapping Program, Technical Instructions. Part 3, Quality Control. U.S. Geological Survey.

Walstra, J., Chandler, J., Dixon, N., Dijkstra, T. (2007) – *Aerial photography and digital photogrammetry for landslide monitoring*. Geological Society, London, Special Publications; 2007; v. 283; p. 53-63.

Walstra, J., Dixon, N., Chandler, J. (2007) – *Historical aerial photographs for landslide assessment: two case histories*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 40, 315-332.

Zviely, D., Klein, M. (2004) – *Coastal cliff retreat rates at Beit-Yannay, Israel, in the 20th century*. Earth Surface Processes and Landforms, 29, 175-184 (2004).

Referências de Livros e Teses

Andrade, C. (1990) – *O ambiente de barreira da Ria Formosa (Algarve, Portugal)*. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Geologia do Ambiente, Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 645p.

ASP (1944) – *Manual of Photogrammetry (Preliminary Edition)*. Pitman Publishing Corporation. New York.

Berberan, A. (2003) – *Elementos de fotogrametria (aplicada à aquisição de informação geográfica)*. Editora Zavala, 2003.

Catalão, J. (2007) - *Projeções cartográficas*. Texto não publicado. Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Jacobsen, K. (2008) – BLUH Help. (pdf)

Lillesand, T.M, R.W. Kiefer (1994) - *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York, NY.

Linder, W. (2006) – *Digital Photogrammetry: A Practical Course*. 3rd Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

Linder, W. (2008) – LISA Basic Help. (pdf)

Linder, W. (2008) – LISA Foto Help. (pdf)

Marques, F. (1997) – *As arribas do litoral do Algarve. Dinâmica, processos e mecanismos*. – Tese de Doutoramento, 556p. Texto não publicado. Universidade de Lisboa.

Matos, J. (2001) – *Fundamentos de informação geográfica*. 3^a Edição. Editora Lidel, 2001.

- Mikhail, E. (2001) – *Introduction to Modern Photogrammetry*. John Wiley & Sons.
- PCI Geomatica (2005) – *Geomatica Orthoengine – User Guide, Version 10.0*. PCI Geomatics Enterprises Inc.
- Redweik, P. (2004) – *Fotogrametria Analítica*. Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Redweik, P. (2007) – *Fotogrametria aérea*. Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Sequeira, F. (2007) – *A fotogrametria aplicada ao estudo multi-temporal de movimentos de vertente*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra. Texto não publicado. Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Turner, K., Jayaprakash, G. (1996), Introduction. In: *Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report vol. 247*, National Academic Press, Washington, DC (1996), pp. 3–12.
- Turner, A., Schuster, R., Ed. (1996) – *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247*. Transportation Research Board. National Research Council. USA, 1996.
- Wolf, P. (2000) – *Elements of Photogrammetry, with applications in GIS*. 3rd Edition. McGraw-Hill, 2000.

ANEXOS

ANEXO A - Certificados de calibração das câmaras usadas nos voos processados.

ANEXO B – Listagem dos pontos fotogramétricos e mapa de localização.

ANEXO C – Listagem das fotos aéreas processadas e respectivos parâmetros de orientação externa calculados pelas ATs.

ANEXO D – Mapas executados:

D.1 – Mapa de localização de movimentos

D.2 – Mapa de áreas abrangidas por movimentos

D.3 – Mapa de densidade de movimentos

ANEXO A

Certificados calibração das câmaras usadas nos voos processados

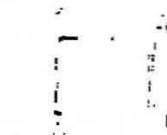
Certificado de calibração Wild RC20 – 08/03/2002 [INAG 2002]

FIDUCIAL MEASUREMENTS FOR LEICA RC20 FOUR FIDUCIALS

CAMERA 15/4 UAGA-F-13160
DATE 08 03 02

FIDUCIAL COORDINATES (CORNERS)

X1= 106.002	X2= -106.010	X3= -106.003	X4= 106.011
Y1= -106.003	Y2= -106.010	Y3= 106.003	Y4= 106.010
DISTANCES (DIAG)	1-3= 299.821	2-4= 299.832	
DISTANCES (SIDE)	1-2= 212.012	3-4= 212.014	
	2-3= 212.013	4-1= 212.013	



EVERY PAGE BEARS THIS SIGNATURE

Simmons  Aerofilms

LENS UNIVERSAL AVIAGON A-F NO. 13160 DATE: 08.03.02

CALIBRATED FOCAL LENGTH: 153.070 mm

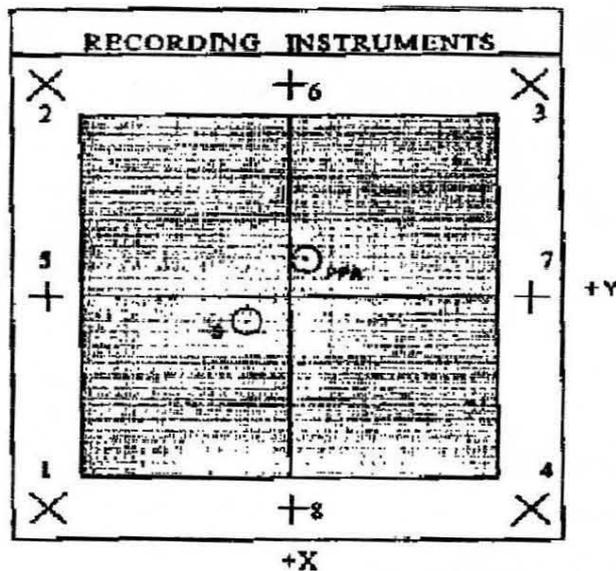
FIDUCIAL COORDS

POINT	X MM	Y MM
FC	0.000	0.000
S	0.005	-0.008
PPA	-0.007	0.002

FIDUCIAL MARKS REFERRED TO F.C.
ARE ACROSS THE CORNER FIDUCIALS

PPA: PRINCIPAL POINT OF AUTOCOLLIMATION

S: POINT OF BEST SYMMETRY



EVERY PAGE BEARS THIS SIGNATURE

[Handwritten Signature]
 Simmons  Aerofilms

CALIBRATION NO: AF/ 15/4 UAGA-F-13160 / 4
RESOLUTION

DATE : 08.03.02

LENS TYPE: UNIVERSAL AVIOGON A-F SERIAL NO: 15/4 UAGA-F-13160

FOCAL LENGTH: 153.070mm

APERTURE: 14

FILM TYPE : AGFAPAN 25 PROFESSIONAL

HIGH CONTRAST TEST CHART

DEGREES OFF AXIS	RESOLUTION	
	Radial	Tangential
0	106	106
5	106	105
10	104	82
15	81	79
20	70	74
25	61	69
30	73	71
35	77	57
40	65	49
45	42	42
50		
55		
60		

Measured by: LEICA 04.02.83

Approved by:

Every page bears this signature

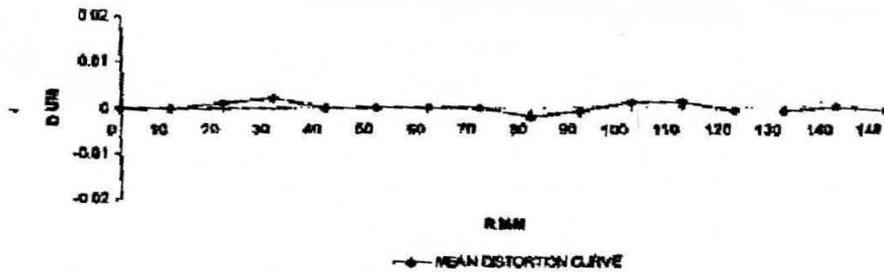
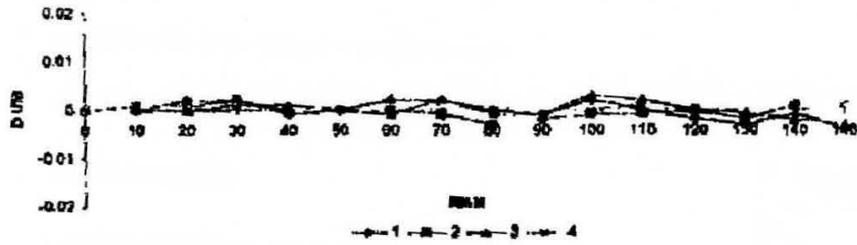

Simmons  Aerofilms

CALIBRATION NO : AF/15/4 UAGA-F-13160 / 4

DATE : 08.03.02

FILTER ON CAMERA : None Fitted

APERTURE : F4



ORIGIN-POINT OF SYMMETRY

PAGE 6 OF 8

EVERY PAGE BEARS THIS SIGNATURE


Simmons  Aerofilms

**Retirado de Certificado de Calibração DMC Intergraph – 10/07/2006
[IGP 2007]**



Calibration Protocol
DMC01 - 0037

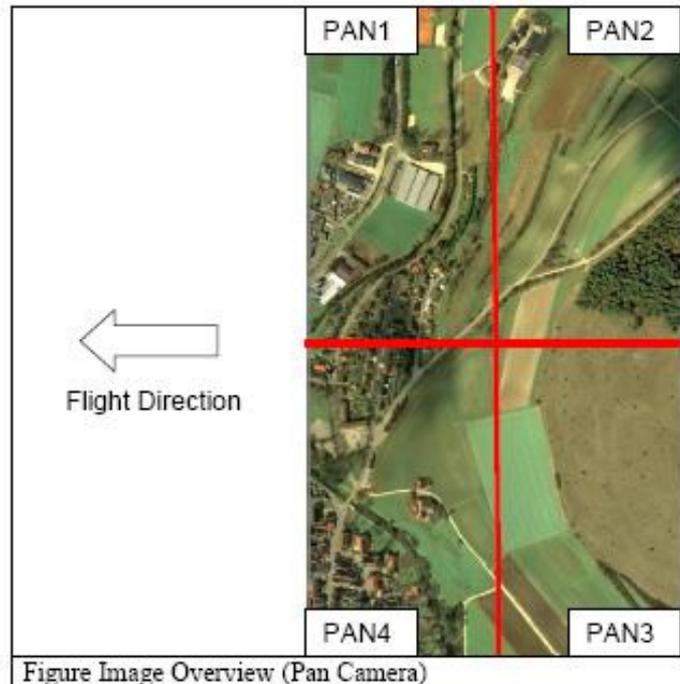


Figure Image Overview (Pan Camera)

Camera Parameter for Virtual Image (High Resolution)

Virtual Focal Length [m]	0.12
Virtual Sensor Size [Pixel]	13824 x 7680
Virtual Pixel Size [µm]	12
Virtual Principle Point [mm]	X = 0.0 Y = 0.0
Distortion Parameter	Distortion Free

Certificado de Calibração Wild RC10 – 04/03/1991 [IGP 1991]

CAMERA CALIBRATION CERTIFICATE

CAMERA TYPE : RC10
LENS TYPE : 15 UAG
LENS NO. : 1095

CALIBRATION DATE : 04.03.91

WILD LEITZ LTD

Leica

Leica Heerbrugg Ltd
CH-9435 Heerbrugg

Calibration Department
Supervisor



RA: RC10 LENS: 15 UAG NO.: 1095 CALIBRATION DATE: 04.03.91

RTURE : F / 4.0
 TER ON GONIOMETER : 450 NM
 TER ON CAMERA : --
 IRRATED FOCAL LENGTH : 151.64 MM

DIAL DISTORTION (MICROMETERS)

REFERRED TO PRINCIPAL POINT OF SYMMETRY (PPS)
 POSITIVE VALUES DENOTE IMAGE DISPLACEMENT AWAY FROM CENTER)

D MM	SEMI - DIAGONALS				MEAN
	1	3	2	4	
10	2.3	1.4	2.0	1.5	1.8
20	4.3	2.9	4.1	2.9	3.5
30	5.0	4.1	5.3	3.6	4.5
40	5.4	5.1	5.6	4.4	5.1
50	5.2	4.9	5.5	4.5	5.0
60	3.3	5.3	4.4	4.1	4.2
70	1.4	3.7	1.7	3.2	2.5
80	-1.3	2.0	-0.4	1.4	0.4
90	-2.9	-1.2	-2.9	-1.5	-2.1
100	-5.7	-4.4	-4.7	-4.4	-4.8
110	-7.0	-6.2	-6.3	-6.1	-6.4
120	-6.7	-5.1	-7.0	-4.8	-5.9
130	-4.3	-4.1	-4.2	-3.4	-4.0
140	0.5	0.2	3.2	1.0	1.2
148	11.2	5.7	10.3	8.2	8.8

D B C A

PHOTOGRAPHIC RESOLUTION (LINE PAIRS PER MILLIMETER)

INTERNATIONAL 3-LINE TEST-CHART, CONTRAST (LOG) : 2.0
 APERTURE : 4.0
 FILTER : 450 NM
 FILM : AGFAPAN 25 PROFESSIONAL (ASA SPEED: 25)
 DEVELOPER : KODAK HC110 PREPARATION 2 SOLUTION C

ANGLE: (DEGREES)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
RAD.	5353	53	52	51	55	38	51	49	26	8
TANG.	53	53	51	44	47	49	44	40	39	19

AWAR (AREA WEIGHTED AVERAGE RESOLUTION) IN LP/MM : 44



RA: RC10 LENS: 15 UAG NO.: 1095 CALIBRATION DATE: 04.03.91

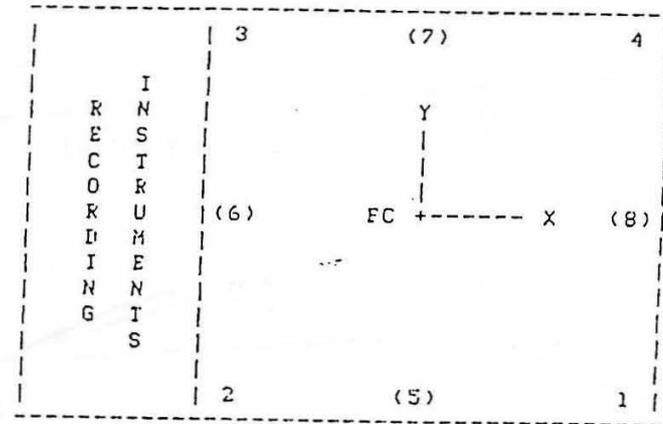
PRINCIPAL POINT OF AUTOCOLLIMATION (PPA) AND
PRINCIPAL POINT OF SYMMETRY (PPS)

REFERRED TO FC, SEE DIAGRAM

	X (MM)	Y (MM)
PPA	0.000	-0.007
S	0.000	-0.004

MUCIAL MARKS, REFERRED TO FC

	X (MM)	Y (MM)
1	105.989	-105.993 - 9
2	-105.991	-105.995 - 13
3	-105.998	106.002 - 1
4	106.002	106.006 - 5
	MÉDIA	MÉDIA
	211,990	211,998



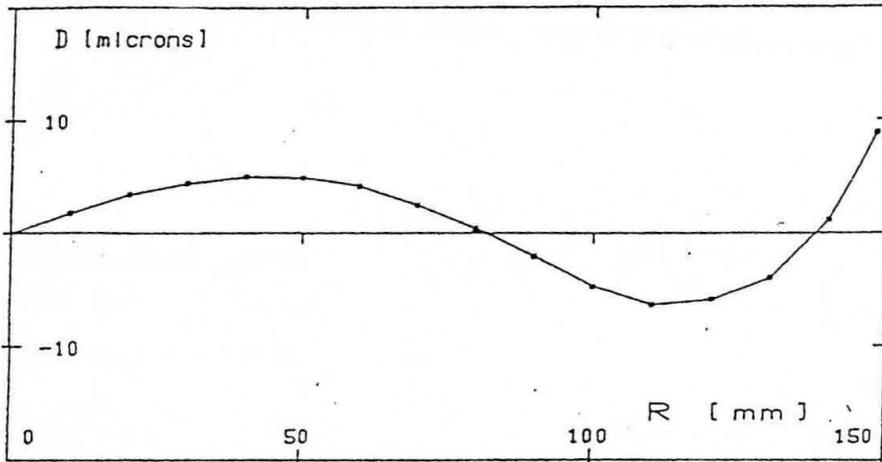
AS SEEN ON FOCAL PLANE FRAME



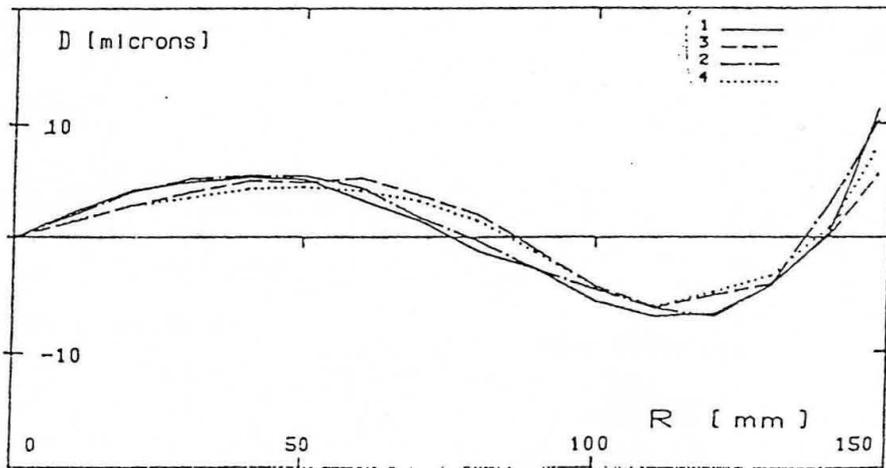
RC10 15. UAG NO. 1095

04.03.91

APERTURE : F / 4.0
 FILTER ON GONIOMETER : 450 NM
 FILTER ON CAMERA : --
 C.F.L. : 151.64 MM



MEAN RADIAL DISTORTION CURVE



RADIAL DISTORTION FOR SEMI-DIAGONALS
 REFERRED TO PPS



Certificado de calibração Wild RC30 – 24/02/1993 [IGP 1995]

CAMERA: RC30 LENS: 15/4 UAG-S NO.: 13216 CALIBRATION DATE: 24.02.93

APERTURE : F / 4.0
 FILTER ON GONIOMETER : VIS (400 - 700 NM)
 FILTER ON CAMERA : --
 CALIBRATED FOCAL LENGTH : 152.73 MM

RADIAL DISTORTION (MICROMETERS)

 REFERRED TO PRINCIPAL POINT OF SYMMETRY (PPS)
 (POSITIVE VALUES DENOTE IMAGE DISPLACEMENT AWAY FROM CENTER)

RADIUS MM	SEMI - DIAGONALS				MEAN
	1	3	2	4	
10	0.1	-0.5	-0.1	-0.3	-0.2
20	-0.1	-0.8	0.0	-0.3	-0.3
30	-0.7	-1.3	0.0	-1.1	-0.7
40	-0.9	-1.1	-0.4	-1.2	-0.9
50	-0.8	-1.7	-0.3	-1.3	-1.0
60	-1.5	-1.7	-0.1	-1.8	-1.2
70	-1.0	-1.6	-0.7	-1.3	-1.1
80	-1.1	-0.8	-0.2	-0.7	-0.7
90	-0.1	-0.3	0.0	-0.3	-0.1
100	0.1	0.1	1.2	0.7	0.5
110	0.6	0.2	1.7	1.4	0.9
120	1.1	0.3	1.0	1.1	0.9
130	1.0	0.3	0.6	0.9	0.7
140	0.2	0.4	-1.0	0.4	0.0
148	-0.9	0.7	1.4	1.6	0.7

PHOTOGRAPHIC RESOLUTION (LINE PAIRS PER MILLIMETER)

 INTERNATIONAL 3-LINE TEST-CHART, CONTRAST (LOG) : 2.0
 APERTURE : 4.0
 FILTER : 450 NM
 FILM : KODAK PANATOMIC X 2412
 DEVELOPER : KODAK HC110

ANGLE: (DEGREES)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
RAD.	83	93	92	101	87	95	101	121	113	83
TANG.	83	92	80	97	92	86	78	88	77	41

AWAR (AREA WEIGHTED AVERAGE RESOLUTION) IN LP/MM : 93



CAMERA: RC30 LENS: 15/4 UAG-S NO.: 13216 CALIBRATION DATE: 24.03.90

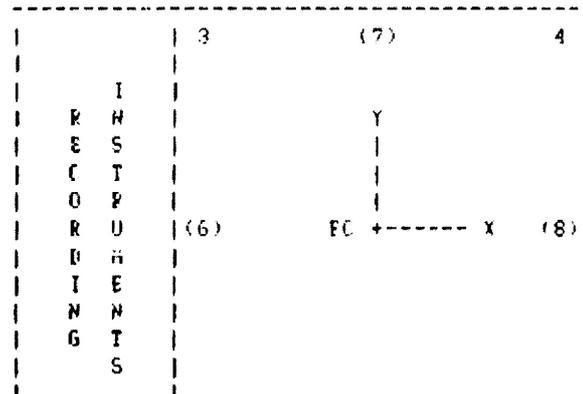
PRINCIPAL POINT OF AUTOCOLLIMATION (PPA) AND
PRINCIPAL POINT OF SYMMETRY (PPS)

REFERRED TO FC. SEE DIAGRAM

	X (MM)	Y (MM)
PPA	0.005	-0.002
SPS	0.006	0.012

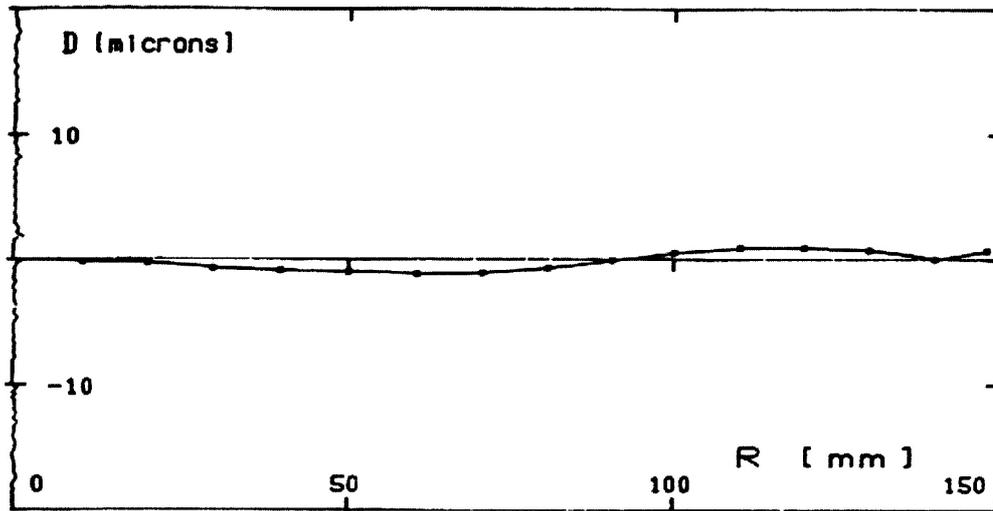
EIDUCIAL MARKS. REFERRED TO FC

	X (MM)	Y (MM)		X (MM)	Y (MM)
1	106.000	-106.001	5	0.002	-110.002
2	-105.999	-105.994	6	-109.995	-0.004
3	-105.998	105.999	7	-0.005	109.999
4	105.998	105.993	8	109.996	0.001

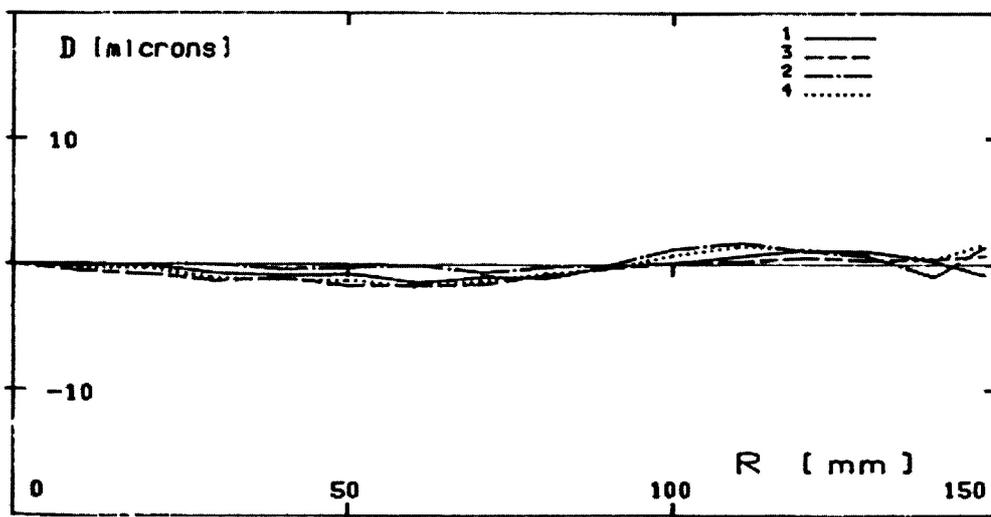


RC30 15/4 UAG-S NO. 13216 24.02.93

APERTURE : F / 4.0
 FILTER ON GONIOMETER : VIS (400 - 700 NM)
 FILTER ON CAMERA : --
 C.F.L. : 152.73 MM



MEAN RADIAL DISTORTION CURVE



RADIAL DISTORTION FOR SEMI-DIAGONALS REFERRED TO PPS



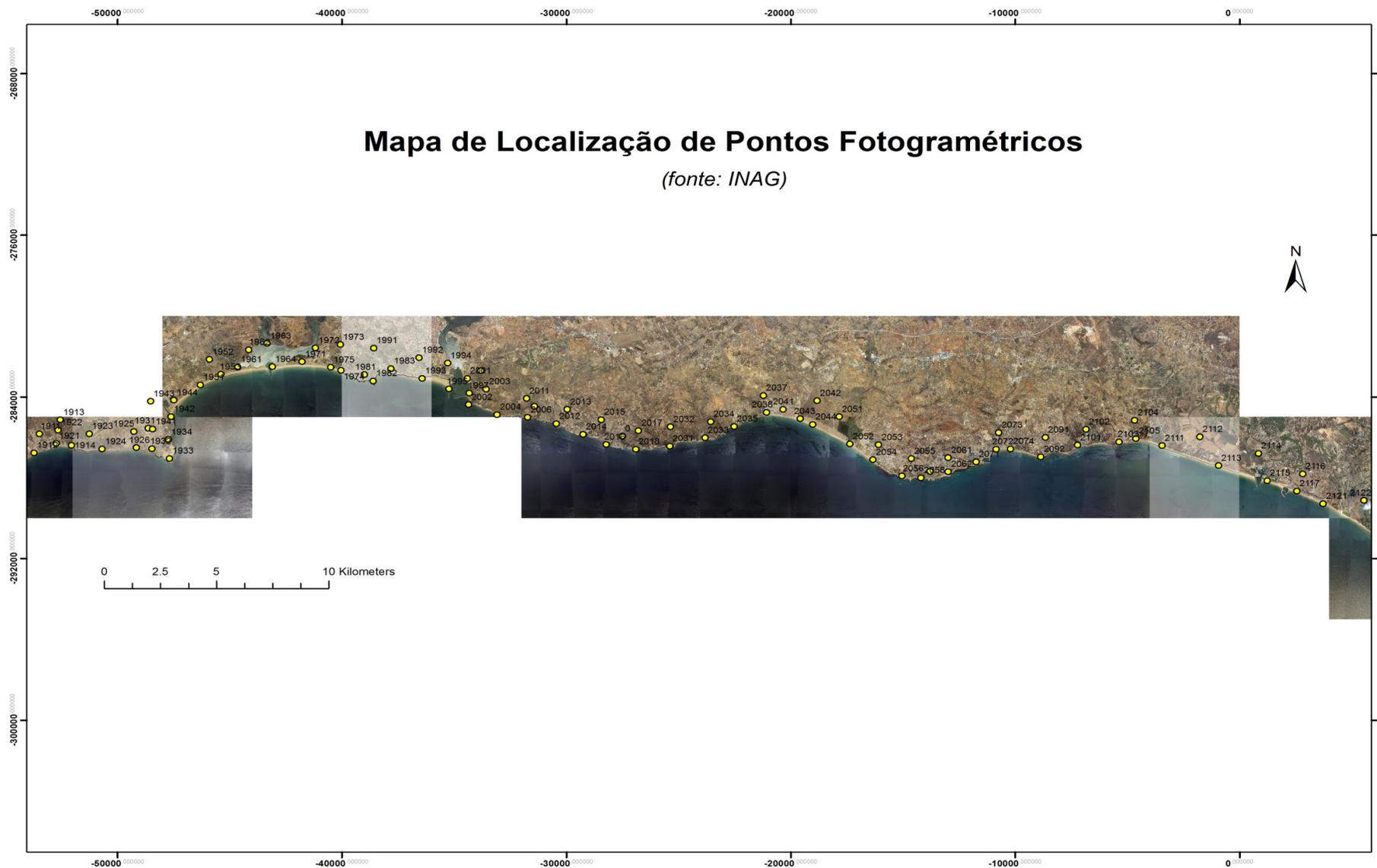
ANEXO B

**Listagem dos Pontos Fotogramétricos de referência (HG – Dt
73) utilizados e respectivo mapa de distribuição**

Ref.^a PF	M	P	Cota (terreno)
1834	-60696.44	-287440.35	26.23
1835	-60460.91	-288666.47	39.74
1841	-59749.59	-288561.45	65.84
1842	-58990.94	-288212.26	24.02
1843	-57899.89	-288133.43	45.37
1844	-58225.08	-288855.20	70.27
1851	-57474.68	-287150.50	58.42
1852	-56910.95	-287987.10	34.57
1861	-56114.59	-287152.97	31.84
1862	-55316.03	-287789.89	26.87
1863	-54886.96	-286638.73	69.82
1864	-54331.91	-287353.36	9.44
1911	-53482.90	-285833.72	67.61
1912	-53721.95	-286775.37	21.85
1913	-52555.29	-285140.73	45.96
1914	-52050.62	-286398.57	106.80
1921	-52739.86	-286308.35	4.28
1922	-52651.48	-285648.32	29.24
1923	-51260.47	-285826.79	97.47
1924	-50689.92	-286585.38	72.35
1925	-49280.80	-285711.49	28.01
1926	-49167.02	-286513.14	23.56
1931	-48631.47	-285552.31	55.36
1932	-48475.94	-286568.06	57.94
1933	-47685.22	-287050.23	45.33
1934	-47739.46	-286113.56	46.06
1941	-48438.19	-285594.07	46.43
1942	-47623.33	-284979.48	2.61
1943	-48531.56	-284219.81	6.52
1944	-47490.18	-284162.43	5.74
1951	-46313.25	-283404.22	4.33
1952	-45909.77	-282146.76	46.03
1953	-45396.98	-282887.67	2.39
1961	-44639.88	-282531.54	1.54
1962	-44153.91	-281667.20	4.73
1963	-43335.60	-281358.09	3.37
1964	-43103.98	-282513.77	5.63
1971	-41780.30	-282262.12	3.55
1972	-41180.49	-281577.37	2.49
1973	-40078.35	-281411.05	29.99
1974	-40048.82	-282681.86	5.19
1975	-40506.82	-282537.87	4.43
1981	-38996.10	-282901.30	39.91

1982	-38607.82	-283209.78	25.09
1983	-37816.59	-282603.31	15.64
1991	-38590.46	-281588.97	45.77
1992	-36563.98	-282057.44	38.56
1993	-36423.92	-283085.58	23.43
1994	-35293.38	-282332.17	4.41
1995	-35229.72	-283607.87	2.98
1996	-33816.04	-282699.92	30.12
1997	-34331.74	-283818.25	24.03
2001	-34415.81	-283084.62	6.81
2002	-34363.90	-284387.31	22.23
2003	-33574.92	-283618.55	47.11
2004	-33091.71	-284882.27	44.14
2005	-31430.40	-284470.33	51.90
2006	-31726.70	-285014.89	41.10
2011	-31772.80	-284083.04	63.33
2012	-30450.00	-285331.80	35.48
2013	-29963.88	-284622.20	54.05
2014	-29257.65	-285857.36	36.76
2015	-28448.57	-285133.67	65.61
2016	-28230.71	-286360.32	38.49
2016b	-27504.59	-285946.71	49.04
2017	-26794.76	-285672.32	58.26
2018	-26909.95	-286587.48	33.12
2031	-25396.55	-286437.53	27.74
2032	-25360.46	-285483.32	63.43
2033	-23826.29	-286030.49	19.17
2034	-23571.50	-285231.76	46.05
2035	-22531.34	-285461.59	22.68
2037	-21221.84	-283933.50	50.25
2038	-21076.31	-284766.82	12.13
2041	-20351.92	-284615.58	8.96
2042	-18828.26	-284193.87	2.60
2043	-19583.41	-285085.05	4.46
2044	-19030.19	-285365.68	5.65
2051	-17847.30	-284985.02	2.80
2052	-17363.43	-286331.35	5.60
2053	-16091.10	-286374.81	13.98
2054	-16341.18	-287112.26	4.26
2055	-14631.80	-287054.22	40.50
2056	-15051.13	-287918.24	8.93
2057	-13803.85	-287690.57	39.30
2058	-14194.64	-288009.83	22.47
2061	-12984.73	-287015.76	47.39
2062	-12990.48	-287702.53	15.33

2071	-11746.53	-287217.40	49.46
2072	-10855.14	-286590.73	25.31
2073	-10736.80	-285768.83	27.23
2074	-10211.24	-286578.56	21.85
2091	-8658.32	-286009.00	41.29
2092	-8856.36	-286964.99	7.95
2101	-7226.13	-286390.09	5.26
2102	-6846.83	-285613.85	44.55
2103	-5378.33	-286231.59	25.18
2104	-4670.64	-285157.86	42.00
2105	-4621.08	-286060.35	40.02
2111	-3460.22	-286415.73	37.41
2112	-1772.13	-285976.87	6.59
2113	-937.54	-287405.08	4.01
2114	842.29	-286801.04	8.67
2115	1230.50	-288145.21	4.37
2116	2814.63	-287811.93	19.97
2117	2552.73	-288659.41	5.39
2121	3725.90	-289290.32	5.41
2122	5546.25	-289128.13	5.40
2123	5072.91	-290032.79	3.17
2131	6448.42	-290983.24	23.71
2132	7238.01	-290598.22	23.53
2133	8212.14	-292262.12	2.99
2134	9705.62	-292303.17	3.36
2136	11346.19	-293486.44	2.80
2135	9627.31	-293333.69	3.46



ANEXO C

Listagem das fotografias aéreas processadas e respectivos parâmetros de orientação externa

Parâmetros de orientação externa das fotografias da cobertura INAG 2002

Sector	Fotografia	Omega	Phi	Kappa	X	Y	Z
Burgau-Lagos	222	0.49463	0.30424	193.0241	-61128.3	-288252	1246.554
	225	-0.06924	0.1033	193.3784	-60609.4	-288312	1243.981
	228	0.04259	0.03631	193.7593	-60104.1	-288374	1244.141
	231	1.25986	-0.18014	190.8711	-59585.7	-288441	1243.355
	234	1.41226	-0.38703	190.1207	-59079.6	-288519	1243.117
	237	0.84181	-0.41912	190.418	-58574	-288607	1243.261
	240	1.04784	-0.38658	190.0701	-58070.6	-288697	1243.334
	244	0.23923	0.27422	-165.086	-58612.7	-288596	1248.006
	247	-0.39142	0.02553	-164.704	-58174.2	-288338	1247.272
	250	0.20373	0.25499	-164.056	-57728.9	-288070	1246.115
	253	-0.17163	0.19662	-163.92	-57290.7	-287803	1244.838
	257	-0.76154	0.02227	-187.746	-57161.2	-287855	1244.078
	260	-1.0608	-0.15826	-187.288	-56649.2	-287758	1243.903
	263	-1.37412	-0.19477	-186.524	-56146.5	-287658	1243.691
	266	-0.50382	0.10261	-186.078	-55644.6	-287552	1243.598
	269	-1.1123	-0.02613	-185.956	-55131.3	-287440	1242.962
	272	0.48517	0.22065	-186.134	-54629.6	-287330	1242.472
	275	-0.48147	-0.04972	-164.869	-55027.5	-287392	1244.126
	278	0.93811	0.86107	-164.934	-54585.6	-287129	1243.658
	281	0.84186	0.99648	-165.578	-54151.9	-286875	1243.702
	284	0.455	0.60607	-165.42	-53708.3	-286616	1244.039
	287	-0.40654	0.13012	-164.453	-53260.9	-286356	1243.808
	290	-0.50567	0.35182	-163.511	-52827.6	-286096	1243.544
	293	-0.03139	0.43624	-163.08	-52385.3	-285824	1243.017
	296	0.46462	-0.63173	198.3145	-52496.8	-286235	1264.567
	299	-0.13078	-0.3536	198.5641	-51985.1	-286254	1267.031
	302	-0.27348	0.25934	199.0059	-51473	-286271	1269.232
	305	1.30561	0.36913	198.7443	-50949	-286286	1267.218
	308	0.40606	0.22749	198.2586	-50408.7	-286306	1266.239
	311	0.13754	0.10452	197.6269	-49867.5	-286330	1265.65
314	0.49674	-0.00965	197.5148	-49334.7	-286355	1265.14	
317	0.96048	-0.02473	172.2497	-49207.5	-286154	1264.394	
320	0.82659	-0.16405	171.6981	-48700.8	-286393	1264.668	
323	-0.60053	0.59753	172.4267	-48203.6	-286636	1264.892	
326	-0.34744	0.23119	172.634	-47714.6	-286868	1263.403	
Alvor-Albufeira	332	-0.10162	-0.02743	-102.556	-47857.7	-287028	1262.979
	335	-0.35741	0.31852	-101.945	-47829.1	-286501	1264.185
	338	-0.1699	-1.38098	-100.172	-47806	-285963	1264.976
	341	-0.35326	0.36364	-98.949	-47797.9	-285434	1264.252
	344	-0.51098	0.61391	-98.7052	-47796.6	-284906	1264.514
	347	-0.19078	0.76838	-98.5742	-47798	-284371	1264.589

403	1.2013	0.66995	0.23904	-41195.1	-282130	1265.296
406	0.73032	0.63623	0.46229	-40679.9	-282140	1266.68
414	1.04934	0.53131	-25.2533	-40161.6	-282332	1266.45
409	0.33972	0.51306	1.17165	-40165.9	-282146	1266.901
417	1.5283	0.32811	-25.6266	-39700	-282537	1264.989
420	0.87159	0.31492	-26.9406	-39232.1	-282749	1263.465
423	-0.1873	0.66611	-26.9447	-38767.5	-282967	1265.53
426	0.22829	0.68793	-26.5648	-38312.3	-283178	1265.677
428	0.29394	0.90911	-13.8954	-38561.5	-282280	1270.865
431	1.26773	0.94143	-14.7089	-38071.8	-282400	1269.18
434	0.94242	0.75379	-14.7152	-37573.2	-282525	1267.494
437	0.50459	0.55986	-15.3613	-37083.4	-282649	1266.779
440	-0.36874	0.68556	-15.0557	-36595.9	-282772	1267.799
443	-0.07925	0.61787	-14.2753	-36099.5	-282891	1268.839
446	0.5085	0.61908	-14.2641	-35612.9	-283006	1267.432
462	-0.15861	0.40103	-23.0805	-34983.2	-283814	1265.287
449	0.47446	0.58291	-14.2458	-35118.1	-283122	1267.341
465	0.09372	0.50164	-23.2811	-34588.7	-283971	1266.242
452	0.62131	0.70653	-14.6233	-34633.4	-283239	1267.423
468	-0.01022	0.43095	-23.5372	-34203.8	-284123	1266.189
455	0.52429	0.504	-15.5808	-34140.5	-283360	1266.402
471	-0.45175	0.46962	-23.6115	-33810.9	-284279	1267.003
474	-0.74131	0.93827	-22.9909	-33384.8	-284447	1268.289
477	0.18744	0.6762	-22.675	-32865.1	-284649	1268.057
480	0.32381	0.48816	-22.7548	-32337.1	-284852	1268.406
483	-0.06878	0.50619	-22.9099	-31807.3	-285057	1268.499
486	0.89589	0.488	-20.3691	-31816.6	-284717	1274.006
489	0.57713	0.66846	-19.6973	-31289	-284905	1273.024
492	0.74823	0.49994	-19.3985	-30747.5	-285093	1271.153
495	0.20789	0.5867	-18.7846	-30204.9	-285276	1269.944
498	0.45033	0.63801	-18.7472	-29658.5	-285455	1268.123
501	0.64738	0.41671	-18.8176	-29122.4	-285630	1267.696
504	0.73346	0.39313	-19.5927	-28576.1	-285808	1266.678
507	1.07374	0.22052	-20.7685	-28032	-285993	1267.434
510	2.11654	0.08714	-21.9313	-27499.6	-286183	1267.042
2011	0.54738	0.76962	17.8966	-27146.3	-286554	1271.71
513	-0.17233	0.26585	-21.4024	-26961.9	-286390	1268.006
2014	2.01781	1.1634	15.51307	-26606.1	-286413	1268.98
2017	1.66688	0.55386	14.14442	-26094.2	-286300	1268.262
2020	0.86409	0.45939	14.34566	-25572.3	-286195	1269.71
2023	0.26785	0.28595	14.58707	-25060.4	-286090	1269.265
2026	0.53885	0.43175	15.6696	-24549.7	-285981	1268.976
2029	0.68903	0.50773	15.93483	-24040.4	-285866	1268.851
2032	0.19677	0.44389	16.11391	-23531.5	-285748	1268.412
2035	0.63041	0.51828	16.54782	-23023.4	-285625	1268.268

Albufeira- Ancão	85	-0.89749	-0.01224	16.0374	-9051.06	-286720	1276.15
	89	-0.06844	0.21332	15.51018	-8274.53	-286557	1275.542
	93	-0.06364	0.12909	15.60491	-7516.59	-286401	1275.744
	97	-0.7138	-0.06256	16.71934	-6761.47	-286245	1276.136
	101	0.32713	0.28841	15.78112	-6038.79	-286088	1275.001
	105	0.34131	-0.04233	15.9809	-5315.15	-285942	1275.512
	112	0.5954	-0.06148	-21.4241	-5148.81	-285518	1274.121
	109	-0.12236	0.27029	17.2209	-4592.89	-285797	1276.921
	116	-0.29921	-0.28183	-21.3769	-4432.34	-285774	1274.922
	120	-0.48227	0.27728	-20.1671	-3716.96	-286029	1278.173
	124	-0.30996	0.31678	-21.703	-2997.6	-286281	1276.363
	128	0.46136	0.4526	-21.9178	-2279.26	-286537	1275.543
	132	-0.23914	0.18137	-20.5012	-1572.42	-286793	1275.526
	136	0.81473	0.1115	-21.6149	-852.91	-287049	1274.829
	140	0.08617	0.29191	-23.7445	-136.378	-287318	1273.393
	144	-0.89739	0.63849	-22.6809	573.439	-287596	1274.725
	148	0.52523	0.479	-21.2554	1277.781	-287867	1275.744
	160	-1.33544	1.17128	-28.4862	2459.05	-288563	1273.967
	152	0.76524	0.08903	-20.47	1993.789	-288138	1274.98
	164	-0.17738	0.40655	-30.0974	3139.883	-288903	1275.016
	156	0.90982	-0.08845	-20.2818	2713.188	-288401	1275.306
	168	0.18457	0.48603	-30.6233	3819.84	-289244	1276.602
	172	0.29093	0.82245	-29.2869	4497.011	-289582	1277.38
	176	0.97843	0.27958	-29.4839	5179.67	-289914	1277.356
	183	-0.33918	0.67817	-39.2277	5004.128	-289659	1277.97
	187	0.66448	0.1287	-40.0669	5600.989	-290100	1277.472
	191	-0.16803	0.02653	-40.348	6174.501	-290534	1276.239
	195	0.29595	-0.02791	-39.5989	6759.996	-290973	1277.371
	199	0.71458	-0.31032	-39.3609	7366.314	-291423	1277.618
	203	0.95415	-0.11908	-38.6387	7986.04	-291882	1277.619
207	1.0991	-0.63494	-38.6102	8607.318	-292339	1277.196	
211	0.54006	-0.44269	-38.5126	9227.64	-292799	1275.598	
215	0.97852	-0.59063	-38.3735	9850.448	-293255	1276.759	
219	1.23337	-0.76895	-38.7396	10467.09	-293713	1277.169	
223	0.53691	-0.02903	-38.6789	11090.83	-294174	1283.225	

**Parâmetros de orientação externa das fotografias da cobertura IGP
2007**

Sector	Fotografia	Omega	Phi	Kappa	X	Y	Z
Burgau-Lagos	49	0.52623	0.23743	199.754	-46018.4	-284477	5339.313
	50	0.79296	-0.47195	199.4979	-47377.2	-284486	5343.056
	51	0.01464	0.07275	199.533	-48725.9	-284464	5342.571
	52	1.6393	0.07561	199.6077	-50078.1	-284463	5338.443
	53	0.93151	-0.36933	198.6038	-51423.4	-284434	5333.101
	54	-3.29563	0.55972	198.9401	-52767.8	-284422	5357.162
	55	0.61906	-0.93377	-199.759	-54107.8	-284424	5349.945
	87	-0.10175	0.65943	-1.42767	-58139.1	-288156	5379.739
	88	-1.04865	0.61876	-1.11634	-56801.8	-288154	5369.771
	89	-0.84329	0.63649	-1.12587	-55445.5	-288158	5346.87
	90	0.30524	-0.30226	-0.85179	-54112.6	-288165	5342.298
Alvor-Albufeira	6	-4.23502	0.21364	-194.884	-9775.46	-287871	5331.4
	7	-0.33007	0.09749	-199.749	-11114.2	-287832	5329.07
	8	0.63038	-0.53599	198.2211	-12461.4	-287804	5316.54
	9	2.02989	-0.00149	199.719	-13806.8	-287810	5312.633
	10	-0.7311	-0.37256	199.4888	-15153.3	-287797	5310.865
	11	-0.28291	0.08363	199.4251	-16494	-287781	5326.079
	28	-0.34381	-0.02785	199.3286	-17807.8	-284744	5367.491
	12	-0.8615	1.22498	199.6481	-17848.7	-287771	5341.567
	29	0.62746	0.08214	-197.946	-19160.3	-284771	5363.24
	30	0.81325	-0.04393	198.7745	-20510.2	-284731	5366.367
	31	-0.18737	0.24995	-199.929	-21843.3	-284712	5362.005
	32	1.1602	-0.06639	197.7172	-23201.1	-284696	5367.822
	33	-0.72009	-0.73552	-199.884	-24534.2	-284695	5364.892
	34	0.11124	0.24848	199.7021	-25880.6	-284674	5366.428
	35	0.13928	0.27067	199.1683	-27226.3	-284652	5374.774
	36	-3.68256	-0.38636	-199.281	-28566.6	-284652	5365.604
	37	-0.54992	-0.09654	-199.939	-29901.6	-284634	5357.59
	38	0.09487	0.21898	-199.799	-31260.2	-284632	5357.216
	39	0.61323	-0.38107	-199.675	-32611.3	-284625	5359.008
	40	1.75726	0.03189	199.298	-33942.9	-284601	5358.994
	41	0.00993	-0.49593	-199.986	-35292.5	-284588	5348.664
	42	0.26613	0.34768	-199.744	-36635.3	-284580	5356.804
	43	0.62391	0.32652	-199.89	-37979.7	-284566	5359.37
	44	0.06464	0.18071	-199.972	-39332.4	-284570	5355.644
139	0.50488	0.03752	-0.80323	-39267.4	-280075	5365.031	
138	0.3862	-0.5088	-0.09598	-40610.6	-280046	5364.606	
137	0.34677	0.61365	-0.14054	-41954.9	-280034	5357.117	
Albufeira-Ancão	29	-0.97814	0.27361	-0.35162	11688.61	-294004	5181.041
	28	-1.53964	0.27575	-1.22372	10358.49	-293993	5173.978
	27	-0.51083	0.5488	2.31739	9012.386	-293975	5175.305

	61	0.08296	0.6569	199.4478	9037.58	-289489	5203.885
	26	0.45973	-0.43	1.37866	7663.618	-293967	5174.798
	62	0.40492	-0.18618	-199.478	7692.876	-289476	5205.555
	63	-1.0362	-0.44608	199.9083	6348.046	-289467	5195.658
	64	0.4052	-0.14424	199.7075	5003.71	-289451	5188.848
	65	1.02923	-0.14516	199.3543	3658.714	-289436	5201.771
	66	0.46721	-0.64017	199.1743	2309.928	-289425	5198.271
	1	1.59849	0.3522	199.3625	2323.478	-287732	5302.508
	2	1.56814	0.26661	198.8564	982.135	-287717	5314.115
	3	0.30479	-0.48666	199.8727	-361.802	-287713	5302.755
	4	0.47242	0.98853	199.4726	-1709.38	-287692	5298.924
	5	1.17927	-0.01352	199.2783	-3051.45	-287677	5313.001
	17	0.82846	0.06683	199.8904	-3025.68	-284879	5374.963
	18	0.20829	-0.75094	-199.891	-4367.08	-284888	5363.706
	19	-0.28833	-0.1534	-199.875	-5708.14	-284873	5360.449
	20	1.35848	0.6981	199.4538	-7057.95	-284845	5363.051
	21	0.5966	1.26507	199.726	-8394.15	-284838	5382.199
	22	-0.72224	-0.18535	-197.762	-9745.2	-284845	5379.333

Parâmetros de orientação externa das fotografias da cobertura SPLAL

Sector	Fotografia	Omega	Phi	Kappa	X	Y	Z
Burgau-Lagos	619	-1.06068	1.02655	-96.4752	-59010.1	-289231	3872.623
	625	-0.27961	-1.17644	102.5113	-60489.5	-288601	3878.351
	513	-1.17082	0.28446	103.2839	-56935.9	-288375	3884.441
	373	-0.60447	-2.0132	107.7584	-54763.4	-288131	4199.978
	618	1.70623	2.85945	-98.0752	-59087.6	-288305	3869.486
	231	-1.34008	-0.12383	101.3425	-48899.9	-287712	4203.701
	369	2.12271	1.81304	-100.804	-51378.6	-287505	4223.389
	228	0.28113	0.20267	-92.1044	-46790.5	-287002	4161.51
	626	0.56205	-1.30874	104.6996	-60557.1	-287511	3865.934
	514	-0.25398	-0.80886	99.24207	-56971.4	-287306	3863.589
	232	0.16444	-0.8312	101.4509	-48874.9	-286835	4214.569
	374	-0.37019	-1.52726	109.8844	-54880.2	-286951	4199.27
	473	-0.98673	0.17825	-105.7	-53229.6	-286315	3883.27
	368	0.69405	1.58105	-103.326	-51383.4	-286390	4225.272
	227	0.82569	1.96401	-93.8501	-46916.7	-285996	4160.281
	226	-0.34821	-0.27057	-98.1559	-47019.8	-285011	4144.131
	472	-1.01053	-0.1953	-105.925	-53188.7	-285161	3881.941
	225	-1.58255	-0.73336	-98.1774	-47069.8	-283961	4139.707
224	-1.67322	0.0416	-94.8556	-47166.5	-282891	4165.564	
Albufeira-Ancão	298	-0.15713	-2.0486	-100.267	471.308	-286071	4372.908
	344	-0.4471	-0.71729	-104.607	3056.683	-286433	4337.266
	299	0.76755	-2.93171	-101.761	466.755	-287216	4363.862
	345	-0.45261	0.99586	-105.562	3042.462	-287673	4331.685
	42	-0.30052	1.28355	-99.2814	6238.746	-288109	4455.212
	300	-0.09674	-1.96352	-101.127	456.39	-288371	4356.666
	346	-1.21258	0.08219	-105.558	3015.691	-288874	4342.377
	43	-0.75158	1.7536	-99.6104	6190.292	-289350	4458.34
	33	0.07536	0.50923	-97.3837	8980.998	-289436	4417.977
	44	0.56092	0.89062	-100.791	6123.031	-290600	4455.85
	34	-0.58368	0.68982	-98.4947	8972.401	-290715	4428.298
	35	-1.23877	1.16717	-100.917	8923.168	-291954	4433.677

Parâmetros de orientação externa das fotografias da cobertura IGP 1991

Sector	Fotografia	Omega	Phi	Kappa	X	Y	Z
Albufeira- Ancão	F115E-3276	2.69705	0.09175	-1.32249	8418.492	-292746	5257.94
	F114E-3190	1.27674	1.20648	-197.673	6650.232	-287887	5255.701
	F115E-3279	-2.49952	-0.92842	-2.63115	6050.009	-292961	5268.428
	F114E-3186	-0.81207	0.84916	-198.437	3825.61	-287851	5260.344
	F114E-3182	0.46899	-0.71302	-198.3	1071.876	-287748	5254.479
	F114E-3178	0.286	-0.55581	-197.878	-1760.68	-287740	5245.137
	F114E-3174	2.67478	0.04149	-197.35	-4658.4	-287674	5249.95
	F114E-3170	1.8281	1.22984	-198.659	-7643.57	-287715	5247.659
	F114E-3166	0.4444	-0.45185	-196.553	-10565.1	-287743	5254.999

Parâmetros de orientação externa das fotografias da cobertura IGP 1995

Sector	Fotografia	Omega	Phi	Kappa	X	Y	Z
Albufeira- Rocha Baixinha	272	0.39192	-0.52059	-102.556	-9343.6	-285625	2604.456
	338	-0.06963	-0.35716	103.0422	-4281.61	-285733	2664.755
	2107	-0.24178	-0.1982	99.08849	-6639.62	-286103	2593.147
	342	-1.31184	-0.39233	-102.485	-1641.97	-286108	2648.115
	271	0.86129	3.83959	-99.3739	-9386.46	-287290	2605.117
	339	-0.14991	-0.26607	101.5114	-4214.18	-287342	2663.77
	2108	-0.78176	-0.85464	98.27596	-6656.34	-287435	2603.64
	341	-0.26931	1.45198	-101.557	-1717.73	-287791	2654.822

ANEXO D

Mapas executados:

D.1 – Mapa de localização de movimentos

D.2 – Mapa de áreas abrangidas por movimentos

D.3 – Mapa de densidade de movimentos

