

João Paulo Miranda de Castro

**APLICAÇÃO DA DETECÇÃO REMOTA  
EM  
INVENTÁRIO FLORESTAL**



**UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO  
VILA REAL, 2004**

João Paulo Miranda de Castro

**APLICAÇÃO DA DETECÇÃO REMOTA  
EM  
INVENTÁRIO FLORESTAL**



**UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO  
VILA REAL, 2004**

Este trabalho foi elaborado como dissertação original com o objectivo da obtenção do grau de Doutor em Ciências Florestais, ao abrigo do Decreto-Lei n.º 216/92 de 13 de Outubro.

# RESUMO

Este trabalho é um contributo para melhorar o aproveitamento da tecnologia da Detecção Remota (DR) na gestão de povoamentos florestais de duas das principais espécies florestais de Portugal, *Pinus pinaster* e *Eucaliptus globulus*. Desenvolveram-se e aplicaram-se soluções económica e tecnicamente viáveis para o mapeamento destas duas espécies florestais, nomeadamente a tecnologia de fusão digital de imagem entre fotografias pancromáticas e imagens de satélite Landsat ETM+.

Realizou-se a cartografia de uso/ocupação de solo à escala 1:10 000 e estimou-se a precisão da interpretação, tendo-se obtido valores de Fiabilidade Global e Índices de Concordância de Cohen (KIA) superiores a 0.85 para todos os estratos considerados em separado e valores superiores a 0.90 de forma global.

Desenvolveu-se e aplicou-se uma tecnologia associada à Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato (FAPMF) para avaliação de características físicas de povoamentos florestais. Obtiveram-se coberturas aerofotográficas estereoscópicas de grande escala (1:5000), a baixo custo e em vários períodos do ano. Estas FAPMF foram utilizadas em inventário florestal para se obterem estimativas rápidas, precisas e expeditas de vários parâmetros dendrométricos (por ex.: altura total, diâmetro de copa, densidade de copa) permitindo preencher lacunas de informação regionais de imagens de DR.

Foi medido o índice de área foliar (LAI- do Inglês Leaf Area Index) dos povoamentos florestais, usando métodos de campo não destrutivos e dados de DR. Os valores de LAI calculados foram comparados com os dados dendrométricos recolhidos no campo por processos clássicos de dendrometria e inventário florestal que permitiram confirmar a correlação positiva existente entre a produção de matéria seca (MS) e a quantidade da radiação fotossintética útil (PAR - do Inglês Photosynthetically Active Radiation) interceptada pela copa das árvores.

Com base nas medições feitas no campo e sobre imagens de DR foram estabelecidas curvas hipsométricas, tabelas de volume e tabelas de volume aéreas. Construiu-se um Sistema de Informação Geográfica (SIG) associado a uma Base de Dados Relacional que integrou globalmente a informação.

Além das espécies florestais eucalipto e Pinheiro bravo também se analisaram as espécies bétula (*Betula celtiberica*) e pinheiro negral (*Pinus nigra*).

Pela análise dos resultados foi possível verificar as vantagens da integração das várias ferramentas de DR (Imagens de Satélite, fotografia aérea convencional e FAPMF) em Inventário Florestal Regional. Esta tecnologia também demonstrou ser económica, expedita e facilmente reproduzível.

**Palavras chave:** Inventário Florestal, Detecção Remota, Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato, Fotogrametria Digital, Processamento Digital de Imagem, Índice de Área Foliar, Fotografias Hemisféricas, Tabelas de Volume Aéreas.

# ABSTRACT

This work is a contribution to the improvement of the use of remote sensing (RS) technology in the management of stands of two major forest species in Portugal, maritime pine (*Pinus pinaster*) and eucalyptus (*Eucalyptus globulus*). Economically and technically viable processes were developed and tested for mapping stands of these species, namely image digital fusion of panchromatic photography and Landsat ETM+ imagery, with the purpose of improving discriminant capacity of original information and reducing limitations of outdated remotely sensed information.

We developed Land Use / Land Cover cartography at the 1:10 000 scale. Interpretation accuracy was high: global precision and Kappa index of agreement (Cohen) were above 0.85 for all layers considered separately and above 0.90 globally.

We developed and applied Medium and Small Format Aerial Photography technology (MSFAP) to evaluate physical properties of forest stands. We obtained large scale photography (1:5000) with stereoscopic coverage at low cost in several periods of the year. MSFAP photographs were used in forest inventory to obtain fast, accurate and expedite estimates of several dendrometric parameters such as total height, crown diameter and crown density, with substantial reduction in field work costs, allowing filling gaps in regional forest information obtained from current remote sensing imagery.

We also explored the relationship between dry matter and Photosynthetically Active Radiation (PAR) intercepted by tree crowns by estimating Leaf Area Index of forest stands using non-destructive field methods and remote sensing data.

Based upon field measurements and remotely sensed data we establish height curves, local single and double entry volume tables, and aerial volume tables. We built a Geographic Information System (GIS) associated to a relational database integrating all the information.

Besides eucalyptus and maritime pine, we analyzed other species such as birch (*Betula celtiberica*) and European black pine (*Pinus nigra*).

The overall analysis of results revealed that the integrated use of the remote sensing tools applied in this work (satellite imagery, conventional aerial photography, and MSFAP) has advantageous applications in regional forest inventory. MSFAP technology also demonstrated to be economical, expedite, and easily reproducible.

**Key words:** Forest Inventory, Remote Sensing, Medium and Small Format Aerial Photography, Digital Photogrammetry, Digital Image Processing, Leaf Area Index, Hemispherical Photography, Aerial Volume Tables.



# ÍNDICES

## Índice Geral

Resumo .....	iv
Abstract.....	v
Índices.....	vii
Índice Geral.....	vii
Índice de Quadros .....	xi
Índice de Figuras.....	xviii
Índice de Anexos .....	xxv
1 Introdução geral .....	1
1.1 Áreas de Estudo.....	5
1.1.1 Zona do Vale do Alto Tâmega: Vidago-Boticas .....	8
1.1.2 Zona de Amarante – Aboim .....	9
1.1.3 Zona do Vale da Campeã .....	10
2 Utilização de Sistemas de Informação Geográfica em Aplicações Florestais .....	11
2.1 Introdução.....	11
2.2 Aplicações de Sistemas de Informação Geográfica e ferramentas afins.....	13
2.2.1 Introdução.....	13
2.2.2 Base de dados para a gestão global.....	15
2.2.3 Altimetria digital e modelo digital do terreno.....	17
2.2.4 GPS.....	18
3 Detecção Remota.....	23
3.1 Introdução.....	23
3.2 Fotografia Aérea.....	24
3.2.1 Equipamento para Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato.....	24
Introdução.....	24
A câmara fotográfica .....	24
Focagem .....	25
Exposição.....	25
Películas químicas e formato digital CCD .....	29
Resolução .....	35
Filtros.....	36

Formatos.....	37
Objectivas.....	37
Aeronaves para Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato.....	40
Suportes para Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato.....	42
Intervalómetro e Sistema de Navegação.....	43
3.2.2 Estereoscopia e Ortofotografia digital.....	44
3.3 Imagens de Satélite.....	50
3.3.1 Processamento Digital de Imagens de Satélite.....	50
Introdução.....	50
Correcção radiométrica.....	50
Correcção atmosférica.....	58
3.4 Fusão de imagens.....	60
3.4.1 Introdução.....	60
3.4.2 Espaços coloridos RGB e HIS.....	62
3.4.3 Precisão da interpretação de imagens.....	66
3.5 Aplicações Florestais da Detecção Remota.....	71
3.5.1 Aquisição de Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato para Aplicações Florestais.....	71
Introdução.....	71
Material e equipamento fotográfico utilizado.....	72
Planeamento de voo - Parâmetros Técnicos.....	79
Condições Propícias para a Fotografia Aérea.....	80
3.5.2 FAPMF em Aplicações Florestais - Resultados e Discussão.....	81
Previsão Meteorológica.....	81
Análise operacional.....	84
Estimativa da deriva das linhas de voo.....	90
Organização do arquivo de fotografias de FAPMF.....	97
3.5.3 Ortorrectificação digital.....	97
Integração da informação cartográfica e geográfica de base em SIG.....	97
Ortorrectificação de FAC do INGA.....	98
Ortorrectificação de FAPMF.....	101
3.5.4 Processamento de Imagens de Satélite Landsat 5 e 7.....	105
Imagens.....	105
Georreferenciação das imagens.....	106
Correcção radiométrica e atmosférica.....	109
Resultados.....	110
3.5.5 Métodos de Fusão de Imagens Digitais.....	110

Introdução.....	110
Fusão de imagens pelo Método HIS (Croma-Intensidade-Saturação).....	111
Método da Análise em Componentes Principais (ACP) .....	112
Método de filtragem .....	112
Aplicação dos Métodos de Fusão de Imagens Digitais .....	114
3.5.6 Discussão e resultados de Fusão de Imagens Digitais .....	124
3.5.7 Estimativa da Precisão das Classificações .....	152
Introdução.....	152
Verificação de foto-interpretação.....	152
3.5.8 Conclusões.....	154
4 Inventário Florestal Convencional .....	159
4.1 Introdução.....	159
4.1.1 Justificação da escolha das espécies .....	160
4.2 Métodos.....	164
4.2.1 Equações de regressão – hipsométricas e de volume.....	164
4.2.2 Levantamentos de Campo.....	166
4.2.3 Processamento dos Dados .....	168
Bétula (Marão).....	170
Pinheiro negral (Marão).....	178
Eucalipto (Amarante-Aboim).....	185
Pinheiro bravo (Vidago-Boticas).....	193
Resumo dos modelos de regressão .....	202
5 Inventário Florestal Alternativo.....	203
5.1 Introdução.....	203
5.2 Medição de Parâmetros Dendrométricos através de Fotografia Aérea Estereoscópica ....	203
5.2.1 Altura de objectos.....	204
5.2.2 Medição de alturas através da paralaxe diferencial.....	206
Resultados e discussão .....	209
5.2.3 Distâncias entre objectos, contagem de árvores e densidades de ocupação .....	213
Resultados e discussão .....	216
5.3 Produtividade Primária e Índice de Área Foliar .....	220
5.3.1 Introdução.....	220
5.3.2 Estimativa do LAI através de medições da PAR .....	224
5.3.3 Estimativa do LAI através de medições da abertura de copa .....	226
5.3.4 Estimativa do LAI por Índices de Vegetação e por equações de regressão .....	229

5.4	Inventário com base na medição de radiação solar dentro do povoamento e através de Detecção Remota.....	231
5.4.1	Introdução.....	231
5.4.2	Recolha de dados de PAR com o ceptómetro.....	232
	Resultados .....	232
5.4.3	Abertura de copa por fotografias hemisféricas.....	235
	Resultados .....	237
5.4.4	Índices de vegetação em imagens de detecção remota.....	238
	Resultados .....	238
5.5	Tabelas de volume aéreas.....	240
5.5.1	Introdução.....	240
5.5.2	Métodos.....	241
5.5.3	Resultados e discussão.....	242
	Bétula (Marão-Campeã) .....	242
	Pinheiro negral (Marão-Campeã).....	243
	Eucalipto (Amarante-Aboim) .....	246
	Pinheiro bravo (Vidago-Boticas) .....	250
6	Conclusões Finais.....	255
7	Referências .....	259
7.1	Referências Bibliográficas .....	259
7.2	Páginas Internet consultadas .....	270
A.	Anexos .....	275
A.1.	Símbolos, Abreviaturas, Formulários, Tabelas e Figuras .....	275
A.2.	Características de Instrumentos referidos neste estudo .....	323
	Ceptómetro.....	323
	Equipamento para aquisição e processamento de fotografias hemisféricas .....	323
A.3.	Textos de apoio.....	324
	Critérios de Seriação e Validação dos Modelos de regressão.....	324
	Análise da Qualidade de Ajustamento .....	324
	Avaliação da Capacidade Preditiva dos Modelos.....	325
	Determinação da Capacidade Preditiva dos Modelos através de Validação Cruzada.....	326
	Teste t de Student heterocedástico.....	327

## Índice de Quadros

Quadro 1: Valores de exposição dum objectiva F/1.4 para várias combinações de abertura e velocidade do obturador .....	29
Quadro 2: Guia de exposição (adaptado de Langford, 1996).....	29
Quadro 3: Equivalência de rapidez (adaptado de Langford, 1996).....	34
Quadro 4: Dimensões dos negativos (ou matriz CCD) e características das objectivas utilizadas em fotografia aérea .....	39
Quadro 5: Gama de objectivas classificadas como normais disponível comercialmente.....	40
Quadro 6: Ficha Técnica de aviões ligeiros Cessna.....	41
Quadro 7: Valores das Irradiâncias espectrais solares ( $Wm^{-2}\mu m$ ) aplicados pela NASA nas imagens LANDSAT ETM+) .....	55
Quadro 8: Valores de calibração de cada banda utilizados na conversão dos NDs TM em valores de reflectância ( $a_0$ e $a_1$ – parâmetros da regressão).....	59
Quadro 9: Qualificação da classificação em função do valor de KIA.....	70
Quadro 10: Câmaras fotográficas e objectivas utilizadas desde 2001.....	72
Quadro 11: Filtros testados.....	73
Quadro 12: Películas utilizadas em FAPMF, VE padrão, e ajustes na aberturas a utilizar em aerofotografia, considerando uma velocidade 1/500 .....	74
Quadro 13: Velocidade e abertura das lentes recomendada por fotógrafos profissionais para iluminação natural e com a película Kodak Gold ISO 200 .....	74
Quadro 14: Resolução no terreno que é possível obter com a câmara digital Fuji S1 Pro, numa dada escala.....	80
Quadro 15: Combinação e regulação do equipamento nas diversas missões realizadas.....	87
Quadro 16: Desvios entre a rota planeada e realmente seguida em Vidago-Boticas no dia 15 Maio 2003.....	92
Quadro 17: Desvios entre a rota planeada e realmente efectuada em Amarante no dia 14 Maio 2003.....	93
Quadro 18: Desvios entre a rota planeada e realmente efectuada no Marão no dia 14 Maio 2003.....	94
Quadro 19: Informação do projecto de ortorrectificação de FAC.....	99
Quadro 20: Informação do projecto de ortorrectificação de fotografia aérea de médio formato analógico .....	103

Quadro 21: Informação do projecto de ortorrectificação de fotografia aérea de pequeno formato digital .....	103
Quadro 22: Amplitude espectral ( $\mu\text{m}$ ) das imagens TM e ETM+ .....	106
Quadro 23: Características gerais das imagens Landsat disponíveis .....	106
Quadro 24: Factores considerados na correcção atmosférica e radiométrica das imagens Landsat ETM+ .....	109
Quadro 25: Factores específicos das imagens Landsat ETM+ (correcção atmosférica e radiométrica) .....	110
Quadro 26: Sensibilidade espectral dos sensores SPOT-1, Landsat-5 TM e PAN1 .....	112
Quadro 27: Programas associados a cada fase do processamento digital de imagem.....	114
Quadro 28: Verificação da fotointerpretação de Vidago.....	153
Quadro 29: Verificação da fotointerpretação no Marão.....	154
Quadro 30: Distribuição das árvores por classe de d (cm) para ajustamento das regressões de volume e hipsométricas.....	169
Quadro 31: Distribuição das árvores por classe de d (cm) para validação das regressões de volume e hipsométricas.....	169
Quadro 32: Caracterização das variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para a Bétula no Marão (n = 14).....	170
Quadro 33: Correlações entre variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para a Bétula (Marão) (n =14).....	172
Quadro 34: Estatísticas associadas aos modelos de ajustamento do volume com o d (1 a 4) e com o d e ht (5 a 9) (Bétula) (n =60) .....	172
Quadro 35: Sieriação de modelos para validação (Bétula) (n =60) .....	173
Quadro 36: Equações finais de volume após ajustamento (Bétula) (unidades = $\text{m}^3$ ).....	173
Quadro 37: Estatísticas dos modelos de volume na fase de validação (Bétula) (n =64) (unidades = $\text{m}^3$ ) .....	173
Quadro 38: Ordenação dos modelos de volume na fase de validação (Bétula) (n =64).....	173
Quadro 39: Tabela de volume de simples entrada (Bétula).....	175
Quadro 40: Tabela de volume ( $\text{m}^3$ ) de dupla entrada (d e ht) (Bétula).....	176
Quadro 41: Estatísticas associadas aos modelos de regressão hipsométrica (Bétula) (n =60).....	177
Quadro 42: Sieriação dos modelos (Bétula) (n =60) .....	177
Quadro 43: Melhores equações finais hipsométricas após ajustamento (Bétula) (unidades = m).....	177
Quadro 44: Estatísticas dos modelos hipsométricos na fase de validação (Bétula) (n =64) .....	177
Quadro 45: Tabela hipsométrica (Bétula) .....	178

Quadro 46: Caracterização das variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para Pinheiro negral no Marão (n = 13).....	179
Quadro 47: Correlações entre variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Pinheiro negral (Marão) (n =13).....	179
Quadro 48: Estatísticas associadas aos modelos de ajustamento do volume com o d (1 a 4) e com o d e ht (5 a 10) (Pinheiro nigra) (n =63) .....	180
Quadro 49: Seriação dos modelos para validação (Pinheiro nigra) (n =63) .....	180
Quadro 50: Equações finais de volume após ajustamento (Pinheiro nigra) (unidades = m <sup>3</sup> ).....	181
Quadro 51: Estatísticas dos modelos de volume na fase de validação (Pinheiro nigra) (n =120).....	181
Quadro 52: Ordenação dos modelos de volume na fase de validação (Pinheiro nigra) (n =120).....	181
Quadro 53: Tabela de volume de simples entrada (Pinheiro negral).....	182
Quadro 54: Tabela de volume de dupla entrada (d e ht) (Pinheiro nigra) (unidades = m <sup>3</sup> ).....	183
Quadro 55: Estatísticas associadas aos modelos de regressão hipsométrica para o Pinheiro nigra (n =63) .....	184
Quadro 56: Seriação dos modelos (Pinheiro nigra) (n =63) .....	184
Quadro 57: Melhores equações finais hipsométricas após ajustamento (Pinheiro nigra).....	184
Quadro 58: Estatísticas dos modelos hipsométricos na fase de validação (Pinheiro nigra) (n =120).....	184
Quadro 59: Tabela hipsométrica (Pinheiro nigra) .....	185
Quadro 60: Caracterização das variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Eucalipto em Amarante-Aboim (n = 62).....	186
Quadro 61: Caracterização biofísica do estrato mais jovem do Eucalipto em Amarante-Aboim.....	187
Quadro 62: Caracterização biofísica do estrato mais velho do do Eucalipto em Amarante-Aboim.....	187
Quadro 63: Correlações entre variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Eucalipto (Amarante) (n =16) .....	187
Quadro 64: Estatísticas associadas aos modelos de ajustamento do volume com o d (1 a 4) e com o d e ht (5 a 10) (Eucalipto) (n =70) .....	189
Quadro 65: Seriação de modelos para validação (Eucalipto) (n =70) .....	189
Quadro 66: Equações finais de volume após ajustamento (Eucalipto) (unidades = m <sup>3</sup> ) .....	189
Quadro 67: Estatísticas dos modelos de volume na fase de validação (Eucalipto) (n =752) .....	189
Quadro 68: Ordenação dos modelos de volume na fase de validação (Eucalipto) (n =752) .....	189

Quadro 69: Tabela de volume de simples entrada (Eucalipto).....	190
Quadro 70: Tabela de volume de dupla entrada (d e ht) (Eucalipto) (unidades = m <sup>3</sup> ).....	191
Quadro 71: Estatísticas associadas aos modelos de regressão hipsométrica (Eucalipto) (n =70).....	192
Quadro 72: Selecção de modelos para validação (Eucalipto) (n =70).....	192
Quadro 73: Melhores equações finais hipsométricas após ajustamento (Eucalipto).....	192
Quadro 74: Estatísticas dos modelos hipsométricos na fase de validação (Eucalipto) (n =752) ...	192
Quadro 75: Tabela hipsométrica (Eucalipto) .....	193
Quadro 76: Caracterização das variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Pinheiro bravo em Vidago-Boticas .....	194
Quadro 77: Caracterização biofísica do estrato mais jovem do Pinheiro bravo em Vidago-Boticas.....	194
Quadro 78: Caracterização biofísica do estrato mais velho do Pinheiro bravo em Vidago-Boticas.....	194
Quadro 79: Correlações entre variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Pinheiro bravo (Vidago) (n =15) .....	195
Quadro 80: Estatísticas associadas aos modelos de ajustamento do volume com o d (1 a 4) e com o d e ht (5 a 10) (Pinheiro bravo ) (n =77).....	196
Quadro 81: Seriação de modelos para validação (Pinheiro bravo ) (n =77).....	196
Quadro 82: Equações finais de volume após ajustamento (Pinheiro bravo ) (unidades = m <sup>3</sup> ) .....	196
Quadro 83: Estatísticas dos modelos de volume na fase de validação (Pinheiro bravo ) (n =171).....	197
Quadro 84: Ordenação dos modelos de volume na fase de validação (Pinheiro bravo ) (n =171).....	197
Quadro 85: Tabela de volume de simples entrada (Pinheiro bravo ) .....	197
Quadro 86: Tabela de volume de dupla entrada (d e ht) (Pinheiro bravo ) (unidades = m <sup>3</sup> ).....	198
Quadro 87: Estatísticas associadas aos modelos de regressão hipsométrica para o (Pinheiro bravo ) (n =77) .....	199
Quadro 88: Selecção de modelos hipsométricos para validação (Pinheiro bravo ) (n =77).....	199
Quadro 89: Equações finais de volume após ajustamento (Pinheiro bravo ) (unidades = m <sup>3</sup> ) .....	200
Quadro 90: Estatísticas dos modelos hipsométricos na fase de validação (Pinheiro bravo ) (n =171).....	200
Quadro 91: Tabela hipsométrica (Pinheiro bravo).....	200
Quadro 92: Resultados do processo de selecção e validação de modelos de regressão (resumo).....	202

Quadro 93: Pré-afirmação da precisão da metodologia de medição de alturas por paralaxe diferencial com a barra de paralaxe e com um CAD (Microstation).....	207
Quadro 94: Medições de alturas através da diferença de paralaxe no Marão (FAPMF de 14 Maio de 2003) (nCAD=11; nPRX=11).....	211
Quadro 95: Alturas médias das árvores dominantes por parcela medidas através dos processos de campo (hd) e por desenho assistido por computador (hCAD) e respectivos valores estatísticos associados para todas as parcelas (nCAD=11) .....	212
Quadro 96: Diâmetros de copa (medições de campo e através de FAPMF) para a Bétula no Marão-Campeã (n =14).....	218
Quadro 97: Diâmetros de copa (medições de campo e através de FAPMF) para o Pinheiro negral no Marão-Campeã (n =13) .....	218
Quadro 98: Diâmetros de copa (medições de campo e através de FAPMF) para o Eucalipto em Amarante-Aboim (n =19).....	219
Quadro 99: Diâmetros de copa (medições de campo e através de FAPMF) para o Pinheiro bravo em Vidago-Boticas (n =22).....	219
Quadro 100: Correlações entre densidade de copa com restantes variáveis dendrométricas de campo e obtidas através de FAPMF para a Bétula no Marão-Campeã (n =14).....	220
Quadro 101: Correlações entre densidade de copa com restantes variáveis dendrométricas de campo e obtidas através de FAPMF para Pinheiro negral no Marão-Campeã (n =11) .....	220
Quadro 102: Correlações entre densidade de copa com restantes variáveis dendrométricas de campo e obtidas através de FAPMF para Eucalipto em Amarante-Aboim (n =16).....	220
Quadro 103: Correlações entre densidade de copa com restantes variáveis dendrométricas medidas no campo e obtidas através de FAPMF para Pinheiro bravo em Vidago-Boticas (n =20).....	220
Quadro 104: Correlação entre as variáveis obtidas por ceptómetro e variáveis obtidas por outros processos para a Bétula (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos) (n =14).....	232
Quadro 105: Correlação entre as variáveis obtidas por ceptómetro e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro negral (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos) (n =13).....	233
Quadro 106: Correlação entre as variáveis obtidas por ceptómetro e variáveis obtidas por outros processos para o Eucalipto (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos).....	234

Quadro 107: Correlação entre as variáveis obtidas por ceptómetro e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro bravo (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos).....	234
Quadro 108: Correlação entre as variáveis obtidas por fotografias hemisféricas e variáveis obtidas por outros processos para o Eucalipto (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos).....	238
Quadro 109: Correlação entre as variáveis obtidas por fotografias hemisféricas e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro bravo (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos).....	238
Quadro 110: Correlação entre as variáveis obtidas por fotografias hemisféricas e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro negral (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos).....	238
Quadro 111: Correlação entre as variáveis obtidas por imagem de satélite e variáveis obtidas por outros processos para a Bétula (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos).....	239
Quadro 112: Correlação entre as variáveis obtidas por imagem de satélite e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro negral (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos).....	239
Quadro 113: Correlação entre as variáveis obtidas por imagem de satélite e variáveis obtidas por outros processos para o Eucalipto (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos) (n =62).....	240
Quadro 114: Correlação entre as variáveis obtidas por imagem de satélite e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro bravo (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos).....	240
Quadro 115: Tabela de volume aérea de simples entrada por estimativa de vg para o Pinheiro negral no Marão-Campeã (unidades = m <sup>3</sup> ) .....	243
Quadro 116: Volume por hectare do pinheiro negral resultante das medições sobre FAPMF para cada parcela medida .....	245
Quadro 117: Equações de regressão para o Pinheiro negral com base em medições de PAR.....	246
Quadro 118: Tabela de volume aérea de simples entrada .....	247
Quadro 119: Volume por hectare do eucalipto resultante das medições sobre FAPMF para cada parcela medida .....	248
Quadro 120: Equações de regressão para o Eucalipto com base em medições de PAR e DR .....	250
Quadro 121: Tabela de volume aérea de simples entrada .....	250

Quadro 122: Volume por hectare do Pinheiro bravo resultante das medições sobre FAPMF para cada parcela medida .....	252
--	-----

## Índice de Figuras

Figura 1: Enquadramento geográfico de Portugal na Europa e no Mundo (Fonte: Diciopédia 2003).....	6
Figura 2: Mapa geral com realce especial das freguesias onde se inserem as 3 áreas de estudo e tendo como pano de fundo uma imagem resultante da fusão digital entre 3 bandas multiespectrais (TM 457) e a banda pancromática do sensor Landsat ETM+ (a imagem foi criada durante a preparação deste trabalho e apresenta-se propositadamente esbatida) .....	6
Figura 3: Enquadramento geográfico regional das áreas de estudo .....	7
Figura 4: Folha de rosto da base de dados principal “jpmc_doutoramento_BD_InventarioFlorestal.mdb” .....	16
Figura 5: Traçados da rede viária com GPS em correcção diferencial – exemplo de Amarante-Aboim .....	19
Figura 6: Localização de parcelas com GPS em correcção diferencial – exemplo de Amarante-Aboim .....	19
Figura 7: Variação dos diâmetros de abertura de uma objectiva de 50 mm .....	27
Figura 8: Valores de exposição ( $VE$ ) (Adaptado de Langford, 1996) .....	28
Figura 9: Componentes de uma curva característica – filme negativo preto e branco.....	32
Figura 10: Curva característica de uma película negativa preto e branco (Langford, 1996) .....	32
Figura 11: Latitude da exposição.....	33
Figura 12: Campo de visão angular de uma câmara de 35 mm equipada com uma objectiva de 50 mm.....	39
Figura 13: Diâmetros das objectivas e simulação das dimensões dos negativos (em mm) das 3 objectivas utilizadas neste estudo: (a) médio formato, (b) pequeno formato analógico, (c) pequeno formato digital.....	40
Figura 14: Cessna 172 SkyHawk .....	41
Figura 15: Suporte de câmaras retráctil desenvolvido por Ekin em 1988 com colocação na porta bagageira dum avião Cessna 172 .....	42
Figura 16: Determinação da geometria de uma fotografia aérea vertical (adaptado de Wolf, 1996).....	49
Figura 17: Fluxo de energia em DR (adaptado de Jensen, 1996) .....	51
Figura 18: Efeito combinado da absorção e difusão atmosféricas nos valores de cinzento registados a partir de imagens Landsat (Adaptado de: Jensen, 1996).....	54

Figura 19: Distância entre o Sol e a Terra ao longo do ano, em Unidades Astronómicas (UA) (1 UA = $149,6 \times 10^6$ km) .....	56
Figura 20: Alterações da elevação do Sol ao longo do ano. (Adaptado de Lillesand e Kiefer, 1987). .....	56
Figura 21: (a) RGB e HIS - sistemas de coordenadas (adaptado de Buchanan e Pendergrass (1980)); (b) Representação HIS simplificada (adaptado de Smith (1978) e Haydn <i>et al.</i> (1982)).....	65
Figura 22: Representação gráfica dos espaços coloridos RGB e HIS e sua correspondência mútua (adaptado de Schetselaar, 2001).....	66
Figura 23: Diagrama cromático CIE (Haydn <i>et al.</i> 1982).....	66
Figura 24: Suporte montada na janela do avião Cessna 150 .....	75
Figura 25: Suporte montado no tirante da asa do avião Cessna 172 .....	75
Figura 26: Suporte retráctil desenvolvido (à esquerda - vista exterior, à direita – vista interior).....	76
Figura 27: Suporte retráctil (à esquerda – pormenor do acondicionamento das câmaras fotográficas, à direita – equipamento de navegação e controlo das câmaras fotográficas).....	76
Figura 28: Vidago-Boticas - Rotas Planeada (tracejado) e Efectuada (ponteadado) em 2003 (Pormenor do Programa MapSite) .....	78
Figura 29: Parâmetros de transformação de coordenadas, HGML em HGD73 e HGML em UTM WGS84 .....	78
Figura 30: Parâmetros de ligação do GPS Magellan 320 ao programa MapSite .....	78
Figura 31: Previsão meteorológica para o dia 7 de Julho de 2001 ( <a href="http://www.accuweather.com">www.accuweather.com</a> , <a href="http://www.weather.com">www.weather.com</a> e <a href="http://www.publico.pt/tempo/">www.publico.pt/tempo/</a> ) .....	83
Figura 32: Previsão meteorológica para o dia 3 Julho de 2002 ( <a href="http://www.publico.pt">www.publico.pt</a> , <a href="http://www.weather.com">www.weather.com</a> ) .....	83
Figura 33: Previsão meteorológica para o dia 10 Julho de 2002 (sequência desde as 0:00h até 15:30h, <a href="http://www.weather.com">www.weather.com</a> ) .....	83
Figura 34: Previsão meteorológica para os dias 10 e 11 Julho de 02 ( <a href="http://www.publico.pt">www.publico.pt</a> , <a href="http://www.accuweather.com">www.accuweather.com</a> ) .....	84
Figura 35: Previsão meteorológica para os dias 14 e 15 de Maio de 2003 ( <a href="http://www.accuweather.com">www.accuweather.com</a> , <a href="http://www.weather.com">www.weather.com</a> ) .....	84
Figura 36: 200ASA com prioridade na velocidade (cobertura de 2001) e 50ASA com prioridade na abertura (cobertura de 2002 realizada pelo autor) .....	88
Figura 37: 200ASA com prioridade na velocidade, com boa qualidade de imagem (cobertura de 2001 realizada pelo autor).....	88

Figura 38: Leitura múltipla simultânea do fotómetro da câmara digital S1 Pro no modo automático ou AE lock e simples no modo manual.....	88
Figura 39: Fotografias captadas sobre a mesma zona: formato 70mm com película positiva 100ASA colorido normal e 35mm digital (fotografias captadas pelo autor).....	89
Figura 40: Kodak High Speed Infrared HIE 135-36 (Película 4). Negativo infravermelho preto e branco digitalizado a 600 ppp e convertido para positivo digitalmente (fotografia captada pelo autor).....	89
Figura 41: Imagem obtida a partir de filmagem vídeo (Câmara Sony) (imagens captadas pelo autor).....	89
Figura 42: Análise visual dos desvios de rota da missão aerofotográfica de 21 de Julho de 2001 (linhas mais escuras – rota planeada; linhas mais claras – rota efectuada).....	90
Figura 43: Missão aerofotográfica de 15 Maio de 2003 em Vidago – Boticas .....	96
Figura 44: Quadro resumo da orientação interna da fotografia 2242 (INGA2000) de Vidago.....	100
Figura 45: FAC 2242 e 3420 do INGA (2000) antes (à esquerda) e após a ortorrectificação (à direita) com o Orthoengine .....	101
Figura 46: Georreferenciação de imagens no IRAS/C. Imagem do CNIG donde se retiraram PCT (à esquerda). Imagem de FAPMF a ortorrectificar (à direita) .....	101
Figura 47: Relatórios de orientação externa para uma fotografia aérea de médio formato analógico (esquerda) e outra de pequeno formato digital (direita) .....	104
Figura 48: FAPMF não métricas Vidago (esquerda) e de Amarante (direita) (propriedades da imagem) .....	105
Figura 49: Ortorrectificação da FAPMF não métrica 101005 de Amarante .....	105
Figura 50: Pontos de controlo para georreferenciação da imagem Landsat ETM+ .....	108
Figura 51: Composição colorida falsa cor 24-bit com as bandas TM 432 (sem fusão).....	116
Figura 52: Composições coloridas 24-bit da transformação RGB-HIS–BRUTO.....	116
Figura 53: Composição colorida 24-bit da transformação RGB-HIS-CP123.....	116
Figura 54: Composições coloridas 24-bit da transformação RGB-HIS–FUSAOMARAO1.....	118
Figura 55: Composições coloridas 24-bit da substituição directa da CP1 pela PANS.....	118
Figura 56: Composição colorida através das três primeiras componentes principais da transformação pca-invPca-pca (comp-8e24-bit-pca-str-apos-pca-tm1a7.imm).....	118
Figura 57: Composições coloridas 24-bit ACP todas as imagens .....	122
Figura 58: Composição colorida 24-bit (RGB = C3C2C1; B=C1, G=C2, R=C3).....	122
Figura 59: Composições coloridas falsa cor com as bandas ETM 432 (sem fusão).....	122

Figura 60: Carta de ocupação do solo da área de estudo, realizada por fotointerpretação sobre fotografia aérea PPB de 2000 e ortofotografia IVC de 1995 e verificação de campo (Marão) .....	127
Figura 61: Composição colorida ETM457 de 2001 sem fusão (Marão). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de ciano representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60.....	128
Figura 62: Mapa Marão – parcelas amostradas sobre ortofotografia PPB de 2000.....	129
Figura 63: Composição colorida resultante da fusão RGB-HIS das TM432 com PAN1 (Marão). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de ciano representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60. ....	130
Figura 64: Composição colorida 24-bit resultante da fusão RGB-HIS das TM457 com PAN15 (Marão) . As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60 .....	131
Figura 65: Composição colorida 8-bit resultante da fusão RGB-HIS das TM457 com PAN15 (Marão). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de ciano representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60 .....	132
Figura 66: Pormenor da imagem pancromática PAN1 numa área florestal seleccionada (Marão) .....	133
Figura 67: Pormenor da Fusão RGB-HIS das TM432 com PAN1 (Marão). As tonalidades de vermelho/magenta escuro representam vegetação; as tonalidades de vermelho/magenta mais claro representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60 .....	134
Figura 68: Pormenor da Fusão RGB-HIS das ETM457 com PAN15 (Marão). As tonalidades de vermelho/magenta escuro representam vegetação; as tonalidades de branco e amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; as tonalidades castanho claro representam mato rasteiro; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60 .....	135
Figura 69: Pormenor da composição colorida normal com as bandas ETM457 (sem fusão) (Marão). As tonalidades de vermelho/magenta escuro representam vegetação; as tonalidades de laranja representam solo nú ou zonas rochosas; as tonalidades ciano claro representam mato rasteiro, uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60 .....	136
Figura 70: Carta de uso e ocupação do solo (Vidago) .....	137

Figura 71: Mapa da dimensão do incêndio de Vidago-Boticas de 2002 com a inserção das parcelas de amostragem.....	138
Figura 72: Mosaico fotográfico (Vidago).....	139
Figura 73: Fusão RGB-HIS das TM 457 e PAN15 para Vidago-Boticas. As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 70.....	140
Figura 74: Fusão RGB-HIS das TM457 com PAN05 (Vidago). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 70.....	141
Figura 75: Ortofotografia do INGA (pormenor em Vidago).....	142
Figura 76: Ortofotografia do CNIG (pormenor em Vidago).....	143
Figura 77: Fusão RGB-HIS das TM457 com PAN01 (Pormenor em Vidago). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação, nestes, as texturas mais grosseiras representam povoamentos de mato e as mais finas mato rasteiro; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 70.....	144
Figura 78: Fusão RGB-HIS das TM457 com PAN05 (Pormenor em Vidago).....	145
Figura 79: Fusão ETM 457 com PAN15 (pormenor em Vidago). Neste caso a textura deixa de ser evidente, assumindo a tonalidade maior importância na discriminação de uso/ocupação de solo.....	146
Figura 80: Sobreposição das manchas de eucalipto e das parcelas de amostragem sobre imagem resultante da Fusão RGB-HIS das TM 457 e PAN15 para Amarante. As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas.....	147
Figura 81: Ortofotografia do CNIG (Amarante) com as parcelas inventariadas no terreno.....	148
Figura 82: Área de estudo de Vidago – Boticas, freguesias incluídas e parcelas de amostragem ...	149
Figura 83: Área de estudo de Amarante, freguesias incluídas e parcelas de amostragem.....	150
Figura 84: Área de estudo do Marão, freguesias incluídas e parcelas de amostragem.....	151
Figura 85: Imagem do Marão-Campeã “comp-24-bit-134bruto-RGB-HIS-RGB.rst” modelada com o terreno numa perspectiva tridimensional (inclinado 45° relativamente ao N).....	157

Figura 86: Mosaico fotográfico com fotografias aéreas de pequeno formato digital não ortorrectificadas captadas pelo autor em 2003 em Vidago-Boticas, ilustrando do lado esquerdo a forma como o incêndio de 2002 lavrou pela floresta.. Fotos do autor.....	162
Figura 87: Mosaico fotográfico com fotografias aéreas de médio formato, não ortorrectificadas, captadas em 2003 em Amarante-Aboim. Fotos do autor. ....	162
Figura 88: Mosaicos fotográficos com fotografias aéreas de pequeno formato digital não ortorrectificadas captadas em 2003 no Marão-Campeã. Fotos do autor.....	163
Figura 89: Cepo de bétula cortada pela DGF na zona do Marão-Campeã (à esquerda) sendo visíveis os anéis de crescimento (este cepo encontra-se marcado em relevo com carimbo oficial da DGF o que comprova que foi cortada por “Auto de Marca”); Biópsia de Pinheiro bravo em Vidago-Boticas com verruma de Pressler (executada pelo Sr. Carlos Lopes) para determinação da idade da árvore por contagem de anéis de crescimento (à direita). Fotografias do autor.....	167
Figura 90: Danos causados pela neve em povoamentos de Bétula no Marão observados através de FAPMF. Fotografia do autor.....	170
Figura 91: Curva de regressão estimada do Modelo 4 (Bétula) (unidades = m <sup>3</sup> ).....	174
Figura 92: Gráfico do histograma (esquerda) e gráfico Normal P-P Plot dos resíduos padronizados (direita).....	174
Figura 93: Curva hipsométrica (Bétula).....	178
Figura 94: Curva hipsométrica (Pinheiro nigra).....	185
Figura 95: Curva hipsométrica (Eucalipto).....	193
Figura 96: Curva hipsométrica (Pinheiro bravo ).....	201
Figura 97: Manipulações de B e H para determinação de alturas de objectos através de estereomodelos.....	204
Figura 98: A estereoscopia e a medição de alturas de objectos com a barra de paralaxe .....	206
Figura 99: Exemplo de medição de altura de um objecto com uma barra de paralaxe .....	208
Figura 100: Aplicação de CAD para a determinação das paralaxes absoluta e diferencial (valores adimensionais uma vez que as unidades são relativas – fotografia da direita; fotografia da esquerda).....	208
Figura 101: Medição de distâncias (à esquerda) e contagem de árvores (à direita) sobre FAPMF ortorrectificada.....	215
Figura 102: Resultados do módulo CLUSTER variante “broad” para avaliação da densidade de copa dum povoamento de Pinus negral no Marão-Campeã sobre fotografia aérea de médio formato digitalizada e ortorrectificada. (cluster vermelho: copas – 38.5% -;	

amarelo: sombra – 23.9% -; verde: pontos brilhantes dentro da sombra – 18.8% -; laranja: pontos escuros dentro das copas – 18.8% -) .....	215
Figura 103: Fluxo de radiação (Fonte: Decagon Devices Inc., 1989).....	221
Figura 104: Coeficientes de extinção da luz como função do ângulo zenital do Sol para vários valores de $x$ (típicos de várias copas) .....	227
Figura 105: Processamento digital das fotografias hemisféricas (i) fotografia hemisférica, (ii) Cluster grosseiro, (iii) Cluster fino e (iv) IsoCluster. (cluster vermelho: copas; amarelo: céu visível; verde: auréola da copa; laranja: pontos de luz que atravessam as copas e cluster azul: pontos de luz na auréola da copa) .....	237
Figura 106: Equação de volume para o Pinheiro nigra (Marão) (unidades = $m^3/ha$ ).....	245
Figura 107: Equação de volume para o Eucalipto (Amarante - Aboim) - Vest ( $m^3/ha$ ) .....	249
Figura 108: Equação de volume para o Pinheiro bravo (Vidago - Boticas) - gráfico dos resíduos e ajustamento da recta de regressão (tabela de volume aérea) (unidades = $m^3/ha$ ) ....	252
Figura 109: Ajudantes de campo Alzira e Afonso em regime de ocupação dos tempos livres.....	273
Figura 110: Curvas características das películas utilizadas .....	299
Figura 111: Curvas de sensibilidade espectral das películas utilizadas .....	300
Figura 112: Cartões Ultra CompactFlash para câmaras fotográficas digitais profissionais .....	301
Figura 113: Estreito de Gibraltar – (Fonte: Avery e Berlin, 1992).....	301
Figura 114: Câmara fotográfica analógica com objectiva “olho de peixe” ( <a href="http">http</a> 32) e Fotografia hemisférica em processamento no programa “Winscanopy” ( <a href="http">http</a> 18).....	324

## Índice de Anexos

Anexo I: Lista de símbolos e abreviaturas .....	276
Anexo II: Parâmetros e Formulário de inventario florestal.....	281
Anexo III: Valores de Transmitância ( $T$ ), Opacidade ( $O$ ) e Densidade ( $D$ ).....	282
Anexo IV: Funções utilizadas na modelação das curvas hipsométricas.....	282
Anexo V: Modelos de equação de volume de simples entrada .....	282
Anexo VI: Modelos de equação de volume de dupla entrada .....	283
Anexo VII: Quadro resumo das tentativas de ajustamento entre as variáveis dendrométricas altura e diâmetro à altura do peito medidas no campo para a Bétula no Marão-Campeã (n =14).....	283
Anexo VIII: Parâmetros e Formulário para determinação do LAI.....	284
Anexo IX: Coordenadas rectangulares das parcelas do Marão encontradas por GPS com e sem correcção diferencial, e ainda as diferenças entre ambos em X e em Y .....	285
Anexo X: Volume médio por parcela de acordo com os 3 processos de cálculo (unidades = $m^3/ha$ ).....	286
Anexo XI: Densidade de copa através das fotografias hemisféricas (DsdC_H) .....	287
Anexo XII: Densidade de copa e índice de área foliar através da análise das fotografias hemisféricas, considerando $k=1$ , $\theta=57^\circ$ , $LAI = -ln(\tau_{57})$ .....	288
Anexo XIII: Valores de LAI para a Bétula através da medição da PAR com o ceptómetro.....	289
Anexo XIV: Valores de LAI para a Eucalipto através da medição da PAR com o ceptómetro....	290
Anexo XV: Valores de LAI para o Pinheiro bravo através da medição da PAR com o ceptómetro .....	292
Anexo XVI: Valores de LAI para o Pinheiro negral através da medição da PAR com o ceptómetro.....	293
Anexo XVII: Valores de reflexão relativa e NDVI para a Bétula.....	293
Anexo XVIII: Valores de reflexão relativa e NDVI para o Pinheiro negral.....	294
Anexo XIX: Valores de reflexão relativa e NDVI para o Eucalipto .....	295
Anexo XX: Valores de reflexão relativa e NDVI para o Pinheiro bravo .....	297
Anexo XXI: Estereoscopia .....	301
Anexo XXII: Valores de reflectância (Landsat ETM+) cruzada com valores dendrométricos de campo por parcela .....	302
Anexo XXIII: Parâmetros de voo (formulário).....	305
Anexo XXIV: Planeamento de voo das missões efectuadas (missão do dia xx/xx/200x).....	306

Anexo XXV: Planeamento de voo das missões efectuadas (missão do dia 11/07/2002).....	307
Anexo XXVI: Planeamento de voo das missões efectuadas (missão do dia 03/07/2002).....	308
Anexo XXVII: Especificações teóricas de planeamento de voo para uma altura de voo de 800m.....	309
Anexo XXVIII: Especificações teóricas de planeamento de voo para uma altura de voo de 520m.....	310
Anexo XXIX: Folha de rosto da Base de dados das FAPMF – neste caso relativo ao voo de 21 de Julho de 2001 .....	311
Anexo XXX: Valores estatísticos das imagens.....	311
Anexo XXXI: Matriz de variâncias e covariâncias .....	311
Anexo XXXII: Matriz de correlações .....	311
Anexo XXXIII: Percentagem de variância de cada componente, valores e vectores próprios.....	312
Anexo XXXIV: Peso de cada componente.....	312
Anexo XXXV: Peso de cada imagem em cada componente na ACP Marão imagens TM .....	312
Anexo XXXVI: Cálculo do OIF (imagens TM Landsat5).....	313
Anexo XXXVII: Matriz de Variâncias/Covariâncias da ACP de todas as imagens.....	313
Anexo XXXVIII: Matriz de correlações da ACP de todas as imagens.....	313
Anexo XXXIX: Percentagem de variação por componente, valores próprios e vectores próprios da ACP de todas as imagens.....	314
Anexo XL: Pesos das componentes da ACP de todas as imagens .....	314
Anexo XLI: Cálculo do OIF (imagens ETM+ Landsat 7).....	314
Anexo XLII: Organigrama da suavização das imagens TM. Filtração passa baixo (média) numa matriz 3×3. ....	315
Anexo XLIII: Análise de componentes principais, com cálculo directo das covariâncias.....	315
Anexo XLIV: Organigrama da fusão RGB-HIS–BRUTO – imagens em bruto.....	315
Anexo XLV: Organigrama da fusão RGB-HIS – FusaoMarao1 .....	316
Anexo XLVI: Organigrama da fusão RGB-HIS (RGB-HIS-CP123) utilizando as componentes principais extraídas das imagens TM, com ampliação de contraste linear e ampliação de contraste linear das componentes H e S.....	316
Anexo XLVII: Organigrama da substituição directa da CP1 pela PAN, conversão IHS-RGB e composição colorida 8 e 24-bit [HIS-RGB-comp-(pca1)-pan-pca2-pca3.imm].....	316
Anexo XLVIII: Organigrama da substituição directa da CP1 pela PAN (ampliação de contraste linear de todas as imagens) e composição colorida 8 e 24-bit [comp-8e24-bit-str-pca2.imm] .....	317

Anexo XLIX: Organigrama da substituição directa da CP1 pela PAN (ampliação de contraste linear de apenas a PAN) e composição colorida 8 e 24-bit [comp-8e24-bit-(pca1)-pan-pca2-pca3.imm] .....	317
Anexo L: TransformacaoQueAntecedeACP-apos-pca-tm1a7 (operação escalar para evitar dados negativos; ampliação de contraste linear).....	318
Anexo LI: Ampliação de contraste (stretch) da imagem pancromática, forçando o mínimo = 58 e o máximo = 271 obtidos na CP1 .....	318
Anexo LII: Nova transformação de ACP com extracção de 3 componentes e que constituirão uma composição colorida (na composição colorida pode variar-se a ordem RGB para tentar realçar mais ou menos determinados fenómenos).....	319
Anexo LIII: Organigrama relativo ao caminho inverso da ACP das imagens TM, após substituição da CP1 pela imagem pancromática devidamente transformada (a ponderação das componentes consta do Anexo XXXIV). Ilustra-se neste caso a determinação da imagem apos-pca-TM2.....	319
Anexo LIV: Operações escalares efectuadas no Idrisi necessárias para a transformação inversa do processo da ACP com substituição indirecta da CP1 (nomes entre parêntesis rectos referem-se a imagens; a parte cinzento claro foi retirada, uma vez que as três primeiras componentes já explicam 98.07% da variância total; consultar macros d:\...\apos-PCA-TM1.imm, ..., apos-PCA-TM7.imm) .....	320
Anexo LV: Criação de composição colorida através das três primeiras componentes principais da transformação pca-invPca-pca (comp-8e24-bit-pca-str-apos-pca-tm1a7.imm) com a criação das imagens comp-8-bit pca-str-apos-pca-tm1a7.rst e comp-24-bit pca-str-apos-pca-tm1a7.rst.....	320
Anexo LVI: Opções de composição colorida.....	320
Anexo LVII: Scal-str-pca-todas-cmp.imm .....	321
Anexo LVIII: Stretch-linear-componentes-principais.imm .....	321
Anexo LIX: ACP usando variáveis padronizadas, de todas as imagens após transformação, com extracção de seis componentes .....	322
Anexo LX: Organigrama das composições coloridas 8 e 24-bit da ACP de todas as imagens (Comp-8e24-bit-str-pca-todas-cmp123.imm).....	322
Anexo LXI: Organigramas da transformação HIS a imagens Landsat 7 e criação de composições coloridas 8 e 24-bit (bandas 457 e pan) .....	322
Anexo LXII: Pesquisa da hora com ângulo zenital do Sol próximo de 57° (intervalos de meia-hora) para a latitude do Marão .....	329



# 1 INTRODUÇÃO GERAL

O Inventário Florestal Nacional foi definido, em sentido lato, pela Direcção Geral das Florestas (DGF) – Relatório Final da 3.<sup>a</sup> Revisão do Inventário Florestal Nacional (IFN) de 2001 - como sendo um conjunto de operações que visam avaliar e monitorizar a extensão e condição dos recursos florestais nacionais. Em Portugal cabe à DGF a responsabilidade da execução periódica dos IFN, mas tem contado também com a colaboração doutras entidades do sector público e do sector privado, com especial realce para a Associação das Celuloses e Papel (CELPA) e Universidades. Cada IFN tem sido normalmente iniciado pela realização duma cobertura aerofotográfica, seguido por fotointerpretação, identificação das manchas florestais e, construção duma carta de uso/ocupação do solo. Através da adopção dum esquema de amostragem apropriado, seguido do estabelecimento e observação dum número variável de parcelas de amostragem no terreno, caracteriza-se a estrutura, produção e condição dos povoamentos florestais nacionais (DGF, 2001). Este procedimento tem sido adoptado desde 1965, data do primeiro IFN, e repetido com uma periodicidade de cerca de 10 anos, tem permitido obter informação oficial acerca da floresta em Portugal.

A cartografia das duas primeiras revisões baseou-se na interpretação visual de fotografias aéreas pancromáticas com uma escala aproximada de 1:15 000 e obtidas em várias coberturas, auxiliada por estereoscópicos de espelhos. A 3.<sup>a</sup> revisão baseou-se na interpretação visual estereoscópica de fotografia infravermelho colorido com escala semelhante, captada em 1990, e actualizada através da interpretação de ortofotografia resultante duma cobertura aerofotográfica executada em 1995, também em película infravermelho colorido, mas com escala aproximada de 1:40 000. Esta última cobertura resultou da parceria estabelecida entre a DGF, o recentemente extinto Centro Nacional de Informação Geográfica (CNIG) (integrado agora no Instituto Geográfico Português - IGP) e a CELPA.

Conforme se apurou por comunicação pessoal de Marques (2004), está prevista para breve a 4.<sup>a</sup> revisão do IFN. À semelhança das anteriores revisões, também se realizará uma nova cobertura aerofotográfica, antevendo-se inovações tecnológicas importantes, nomeadamente a captação de imagens digitais no formato 23×23cm com alta resolução espacial (até 30cm) e grande discriminação espectral através do sistema LH Systems da Leica Geosystems [http 1]. O sector florestal em Portugal deverá assim, mais uma vez, acompanhar a evolução tecnológica da detecção remota, à semelhança do que noutros países também tem ocorrido, conforme referem Avery e Berlin (1992).

A periodicidade de 10 anos entre IFN consecutivos não satisfaz as necessidades das indústrias florestais associadas às espécies de rápido e médio crescimento (eucalipto e pinheiro), que necessitam de realizar quase que anualmente inventários florestais intercalares para verificarem a disponibilidade de matéria prima em Portugal, e avaliar portanto a eventual necessidade de abastecimento no estrangeiro. Note-se que um povoamento de eucalipto nalgumas estações florestais pode atingir a idade de explorabilidade em menos de 10 anos. Por outro lado, muitas manchas florestadas são destruídas por incêndios florestais.

Dado o custo avultado de cada cobertura aerofotográfica, tem sido tentada a utilização de imagens de satélite como ferramenta de detecção remota para avaliar e monitorizar os recursos florestais (por ex.: controlo de fogos florestais pelo CNIG). No entanto, para a realização de cartografia temática de uso/ocupação do solo, tem continuado a preferir-se a fotografia aérea porque a precisão de classificação numérica ainda não é suficiente para substituir completamente a fotointerpretação (Castro, 1997), e ainda porque os custos envolvidos são elevados, quer das imagens digitais quer do software de processamento, tendo em consideração a escala dos mapas produzidos, e o seu processamento muito especializado, requerendo frequentemente a utilização de outras fontes de informação (Fahsi *et al.*, 1999) e uma formação específica.

Concretamente, no presente trabalho, tentou-se dar um contributo para melhorar o aproveitamento da tecnologia da Detecção Remota na gestão de povoamentos florestais, de duas das principais espécies florestais de Portugal, *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*, através da utilização e da manipulação da informação de detecção remota que se encontrava disponível no início deste estudo (Fotografia aérea do CNIG, do Instituto Nacional de Garantia Agrícola (INGA) e imagens de satélite Landsat ETM+). Para isso, desenvolveram-se e analisaram-se soluções económica e tecnicamente viáveis para o mapeamento destas duas espécies florestais, nomeadamente a tecnologia de fusão digital de imagem entre as fotografias pancromáticas do INGA e as imagens de satélite Landsat ETM+, com o objectivo de melhorar as capacidades discriminantes das imagens originais e atenuar a sua desactualização. Realizou-se a cartografia de uso/ocupação de solo à escala 1:10 000 e estimou-se a precisão da interpretação, tendo-se obtido valores de Fiabilidade Global e Índices de Concordância de Cohen (KIA) superiores a 0.85 para todos os estratos considerados em separado e valores superiores a 0.90 globalmente.

Acredita-se que a utilização das imagens Ikonos e QuickBird (ou outras análogas) em cartografia temática seja brevemente muito mais generalizada em Portugal, porque apresentam várias vantagens relativamente às fotografias aéreas ortorrectificadas. Por exemplo, relativamente às fotografias aéreas ortorrectificadas comercializadas pelo INGA ou pelo CNIG, apresentam melhor resolução espacial (0.60m no formato pancromático contra 1m nos ortofotos), maior resolução espectral (4 bandas multiespectrais com resolução espacial de 5m), disponibilidade de

imagens actuais (várias coberturas por ano) e de arquivo, e com menor custo de aquisição por unidade de superfície (22 euros /km<sup>2</sup> contra 110 euros /km<sup>2</sup>). Pretendem-se aproveitar estas potencialidades em futuros trabalhos de investigação.

Mas as potencialidades de utilização da detecção remota em estudos florestais não se restringem apenas à cartografia de uso e ocupação do solo, existindo a possibilidade de se efectuarem medições fiáveis de características físicas dos povoamentos florestais (por ex.: a altura total, diâmetro de copa, densidade de copas, etc.) a partir de fotografias aéreas, facto reconhecido por vários autores (Avery e Burkhart, 1994, Doruska, 1998, Zeide, 1999). Por exemplo, Marques (1980) e mais recentemente Aranha (1998), demonstraram ser possível estimar o volume de madeira em pé por hectare de *Pinus pinaster* em Carrazeda de Ansiães e Vale do Tâmega com erros padrão da estimativa de 6.81m<sup>3</sup>/ha e 11.28m<sup>3</sup>/ha, respectivamente, através da medição da densidade de copas por fotografia aérea convencional, com escala média 1:15 000. A escala destas fotografias e a sua resolução espacial são apontadas como os principais factores limitantes à sua aplicação em dendrometria (Gering *et al.*, 1989). Efectivamente, a escala original das fotografias aéreas comercialmente disponíveis em Portugal (1:40 000) e a resolução espacial produzida após a ortorrectificação (1m) não são as ideais para a estimativa de parâmetros dendrométricos. Considerando os recentes trabalhos executados com Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato (FAPMF) por Martins (2004) e Castro *et al.* (2004) na monitorização da doença da Tinta do castanheiro em Trás-os-Montes, demonstrou-se ser esta tecnologia económica, expedita e facilmente reproduzível, podendo-se obter fotografias aéreas com grande escala (1:5 000), com cobertura estereoscópica, a baixo custo e em qualquer momento do ano, desde que as condições atmosféricas o permitam. Estas FAPMF poderão ser utilizadas em inventário florestal para se obterem estimativas rápidas, precisas e expeditas de vários parâmetros dendrométricos (por ex.: altura total, diâmetro de copa, densidade de copa e densidade) e com redução substancial nos custos de trabalhos de campo (Avery e Burkhart, 1994), permitindo ainda preencher lacunas de informação regionais de imagens de DR actuais a grande escala (Macedo, 1997).

Por outro lado, Monteith (1977) também verificou que a produção de matéria seca (MS) nas copas está directamente relacionada com a quantidade da radiação fotossintética útil (PAR – do Inglês Photosynthetically Active Radiation) (Wm<sup>2</sup>sr<sup>-1</sup>) interceptada pela copa. Assim, sabendo que o índice de área foliar (LAI- do Inglês Leaf Area Index) (m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>) está directamente dependente da PAR interceptada pelas copas, e que a quantidade de luz que é reflectida pelas copas de povoamentos florestais depende fortemente da PAR interceptada, então a relação entre a PAR interceptada e a reflexão dum povoamento florestal poderão constituir uma base de análise das propriedades estruturais e fisiológicas das árvores, com base em medições de PAR sob coberto e reflexão de luz em imagens de DR.

O Inventário Florestal aqui apresentado reuniu assim um variado número de ferramentas cujos princípios e objectivos se têm mantido inalteráveis ao longo do tempo, embora com evolução e inovação tecnológica dos instrumentos utilizados, sendo por isso integrados nos métodos de Inventário Florestal Convencional ou Clássico, e um outro tipo, Inventário Florestal Alternativo, que resultou do desenvolvimento de metodologias que raramente puderam ser postas em prática até hoje, por falta de meios adequados, e que, através das recentes tecnologias e meios, pôde ser finalmente aplicado. Pretende-se alargar a metodologia apresentada neste estudo a outras áreas com melhor ordenamento florestal, num futuro próximo. Conforme se verá ao longo desta tese, os dados obtidos apresentaram em certos casos reduzida variabilidade (dimensão, idade).

Para possibilitar a aplicação das metodologias propostas foi necessário desenvolver um variado número de tecnologias e pôr em prática variados procedimentos:

- Estabelecimento de curvas hipsométricas e tabelas de volume locais de simples e dupla entrada com dados obtidos em inventário de campo por Inventário Florestal Clássico;
- Tecnologia de Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato (FAPMF) (plataformas, câmaras fotográficas, películas, filtros, tecnologia digital, navegação aérea com GPS, fotogrametria digital, etc.);
- Medição de parâmetros dendrométricos através de FAPMF (densidade de copa, densidade de árvores por hectare, altura total de árvores dominantes, e diâmetro de copa) (Avery e Burkhardt, 1994, [http 8]) e estabelecimento de tabelas de volume aéreas;
- Processamento Digital de Imagem (PDI) (fusão digital de imagens e extracção de índices de vegetação por imagens de DR);
- Estimativa de índices de área foliar (LAI) por processos não destrutivos através de medições de campo da quantidade de luz fotossinteticamente activa retida pelo copado florestal com medições de campo com um ceptómetro) (Aranha, 1998), e através da medição da percentagem de fecho do copado por fotografias hemisféricas captadas no campo (Odum, 1997, Gill *et al.*; 1999, Gill *et al.*, 2000, Coops *et al.*, 2002, Lin e Chiang, 2002), e a partir de imagens de detecção remota (índices de vegetação e densidade de copa);
- Estabelecimento de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) associado a uma Base de Dados Relacional para integração global da informação.

Esta componente (SIG) foi de facto a primeira a ser criada porque foi através dela que se realizou a integração de toda a informação colhida. O SIG foi por isso ligado a uma base de dados relacional, permitindo em cada momento produzir tabelas para tratamento estatístico, produzir mapas temáticos, auxiliar a navegação aérea para aquisição fotográfica, etc., sendo constantemente desenvolvida ao longo do trabalho. Todos os mapas que se apresentam nesta tese foram gerados

através desse SIG. Esta aplicação foi construída sobre os programas Geomedia v.5.0 e Microsoft® Access 2000 e programação em Visual Basic e SQL, e foi sendo gradualmente completada de modo a fornecer em cada momento a informação fundamental para a normal prossecução dos trabalhos.

Foram estudadas principalmente as espécies florestais eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e Pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) mas também se analisaram secundariamente as espécies bétula (*Betula celtiberica*) e pinheiro negral (*Pinus nigra*).

A organização do conteúdo desta tese foi uma das tarefas mais complicadas, porque todos os aspectos abordados se encontram estreitamente relacionados. A organização que se apresenta foi a que nos pareceu realizar o melhor encadeamento da informação.

## 1.1 Áreas de Estudo

Este trabalho incidiu sobre 3 áreas de estudo situadas no Norte de Portugal, nas províncias de Trás-os-Montes e Alto Douro e Douro Litoral (Figura 1, Figura 2 e Figura 3, ):

- Vale do Alto Tâmega – Vidago/Boticas
- Amarante – Aboim
- Marão - Vale da Campeã



Figura 1: Enquadramento geográfico de Portugal na Europa e no Mundo (Fonte: Dicipédia 2003)

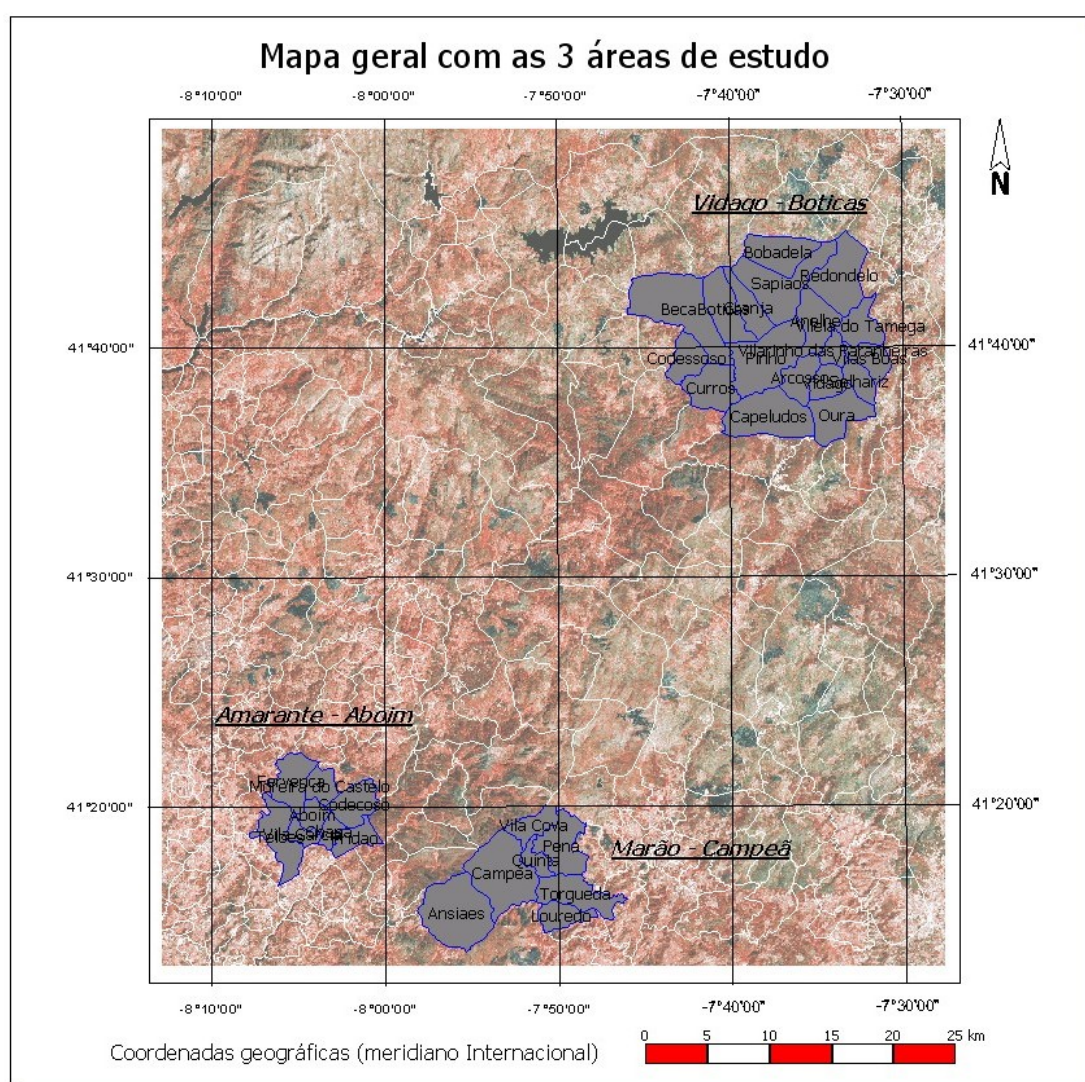


Figura 2: Mapa geral com realce especial das freguesias onde se inserem as 3 áreas de estudo e tendo como pano de fundo uma imagem resultante da fusão digital entre 3 bandas multiespectrais (TM 457) e a banda pancromática do sensor Landsat ETM+ (a imagem foi criada durante a preparação deste trabalho e apresenta-se propositadamente esbatida)

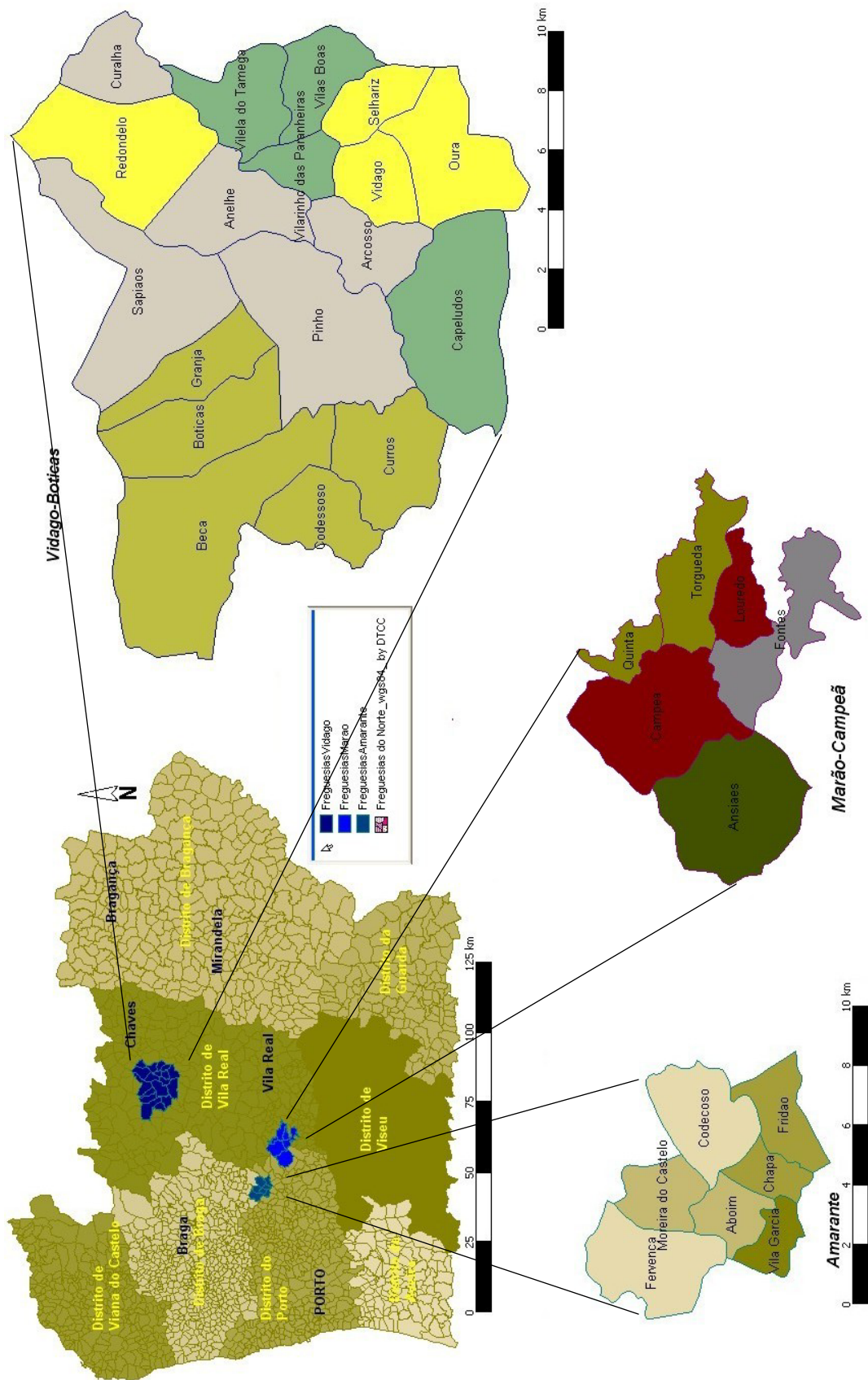


Figura 3: Enquadramento geográfico regional das áreas de estudo

### 1.1.1 Zona do Vale do Alto Tâmega: Vidago-Boticas

A zona escolhida do Vale do Alto Tâmega compreende uma região entre Vidago e Boticas, situada nos distritos de Ribeira de Pena e Chaves respectivamente, entre as coordenadas geográficas 41° 43' 08.088" N; 07° 41' 14.252" W do meridiano de Greenwich, e 41° 37' 54.616" N; 7° 32' 37.992" W, equivalendo no sistema cartográfico rectangular de Hayford Gauss Militares Datum de Lisboa<sup>1</sup> (HGML) as coordenadas (x,y)=(237000,528000) e (x,y)=(249000,518400). Encontra-se nas folhas 46 e 47 de cartografia topográfica nacional militar à escala de 1:25.000. Para efeitos de processamento de imagem e fotogrametria foi seleccionada uma zona rectangular com 10080×6300 m de lado, distância múltipla de 30 m adequada às imagens Landsat ETM+, compreendida pelas coordenadas HGML (x,y)=(237900,526200) e (x,y)=(247980,519900). Será aqui analisada a espécie *Pinus pinaster*.

Esta área de estudo insere-se na bacia hidrográfica do Rio Tâmega sendo por este atravessada no sentido NE-SW. Este curso de água e os seus afluentes e linhas de água situam-se num relevo relativamente acidentado. Dentro desta área de estudo a altitude mínima é 280m (Arcossó) e máxima 1145m (Boticas). No entanto, ao longo da bacia hidrográfica, as diferenças altitudinais são maiores, variando desde 190m em Ribeira de Pena, junto ao rio Tâmega, até 1250m nas montanhas vizinhas da Barragem do Alto Rabagão. É evidente o fenómeno de abandono da agricultura tradicional, vendo-se ainda alguns vestígios de vinha e de pomares abandonados, assim como culturas cerealíferas de subsistência que derivaram naturalmente para matos. Como agricultura apenas há a referir culturas hortícolas, batata, algum cereal e pastagem ou forragem, nas parcelas de terreno mais férteis e frescas próximas das povoações e ainda algum olival e soutos. A floresta mais importante é o pinhal, que se encontra de forma geral bastante mal gerido, com muito mato e com alta densidade de árvores. A rede viária também é bastante deficiente. As freguesias de Anelhe, Vilarinho das Paranhos, Pinho e Curros possuíam grandes extensões de pinhal que ardeu quase todo em 2002.

A temperatura média anual varia entre 7.5 e 10.0°C nas zonas mais frias e altas, e 12.5 e 15.0°C nas zonas mais quentes, nos vales mais profundos. A precipitação varia entre cerca de 710mm em Chaves e 1050mm nas Pedras Salgadas, apresentando um período estival normalmente seco entre Maio e Setembro. Existem 3 tipos de solo distintos: Fluvissoles (solos ricos junto de rios e em vales, ricos e profundos), Leptossolos (solos esqueléticos das encostas, alguns com muitos afloramentos rochosos, normalmente bastante pobres) e Cambissolos (de origem ígnea).

(Agroconsultores e Coba, 1991, Araújo *et al.*, 2004). Esta área é caracterizada ecologicamente por Albuquerque (1954) como Mediterrânica-Atlântica \* Atlântica-Mediterrânica (SA\*MA) nos andares 400-700m (espécies florestais indicadoras: *Taxus baccata*, *Betula celtiberica*, *Castanea sativa*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea*, *Quercus pyrenaica*, *Quercus robur*, *Quercus faginea*) e Atlântica \* Sub-Atlântica (A\*SA) nos andares 700-1000m (espécies florestais indicadoras: *Taxus baccata*, *Betula celtiberica*, *Castanea sativa*, *Quercus pyrenaica*, *Quercus robur*).

### 1.1.2 Zona de Amarante – Aboim

A zona de Amarante – Aboim situa-se entre as coordenadas geográficas 41° 20' 39.561" N; 8° 06' 11.636" W do meridiano de Greenwich, e 41° 18' 42.715" N; 8° 01' 40.852" W, correspondendo ao distrito de Amarante. Localiza-se na folha 100 de cartografia topográfica nacional militar à escala de 1:25.000 compreendida pelas coordenadas HGML (x,y)=(202400,486300) e (x,y)=208700,482700). Foi aqui analisada a espécie *Eucaliptus globulus*. Selecionou-se uma zona rectangular (2550x4950m) para processamento de imagem e fotogrametria, compreendida pelas coordenadas HGML (x,y)=(203000,485700) e (x,y)=(207950,483150).

Esta área de estudo também se insere na bacia hidrográfica do Rio Tâmega, embora apenas atravessada por alguns dos seus afluentes (por ex.: Ribeira de Santa Ana). A orografia do terreno caracteriza-se por ser ondulada, com alguns vales cavados e com declives normalmente inferiores a 30%, embora nas encostas para a Ribeira de Santa Ana os declives possam ser superiores. O ponto mais alto está a 430m de altitude e o mais baixo a cerca de 200m. Situa-se primordialmente no andar Basal (inferior a 400m) e enquadrada ecologicamente na região Atlântica \* Mediterrânica-Atlântica (A.MA) (espécies florestais indicadoras: *Castanea sativa*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea*, *Quercus robur*, *Quercus suber*). Esta área de estudo é essencialmente de vocação florestal, estando geralmente ocupada com Eucalipto, havendo algumas manchas residuais de Pinheiro bravo. Junto às povoações existe alguma agricultura característica do Douro Litoral e Minho interior, tal como vinha estreme, vinha em latada, culturas forrageiras, batata e produtos hortícolas e alguma oliveira. Existe grande fragmentação do território nas parcelas de terreno mais férteis próximas das povoações. A temperatura média anual varia entre 12.5 e 15.0 °C. Podem ocorrer geadas entre 2 e 4 meses. A precipitação situa-se entre 1200 e 1400 mm, apresentando um período estival normalmente seco entre Maio e Setembro. Os solos são Cambissolos (Cambissolos húmicos),

---

<sup>1</sup> Latitude e Longitude de origem: 8°07'54.8620"W, 39°40'00.0000"N. Falsa origem cartográfica: 200000m para oeste, 300000m para sul

derivados de xistos (associados a Luvisolos, forte influencia atlântica). (Albuquerque, 1954, Cardoso e Marado, 1971, Atlas do Ambiente, 1974a, 1974b e 1974c).

### 1.1.3 Zona do Vale da Campeã

A zona seleccionada do Vale da Campeã situa-se no distrito de Vila Real, freguesias de Campeã, Fontes e Ansiães, entre as coordenadas geográficas 41° 18' 12.978" N; 07° 53' 49.106" W do meridiano de Greenwich e 41° 15' 22.365" N ; 07° 50' 36.429" W. Encontra-se na folha 114 da cartografia topográfica nacional militar 1:25.000 compreendida pelas coordenadas HGML (x,y)=(202400,486300) e (x,y)=(208700,482700). Foram consideradas duas sub-zonas para testes de processamento de imagem: a primeira compreendida entre as coordenadas HGML (x,y)=(219676,481804) e (x,y)=(224176,478504) e uma segunda compreendida entre as coordenadas HGML (x,y)=(219000,480000) e (x,y)=(222000,476500). Foram aqui estudadas principalmente as espécies *Pinus nigra* e *Betula celtibérica* e secundariamente a *Pinus pinaster*.

Esta área de estudo insere-se no vale da Campeã junto à EN15 e IP4, entre Campeã e o Alto Espinho, estendendo-se para sul até próximo das Minas de “Maria Isabel”. É uma zona tipicamente de montanha, situada nos andares Montano (700 a 1000m) e Altimontano (1000 a 1300m). Apresenta alguns planaltos de declive pouco pronunciado contrastando com outras zonas de declive acentuado, podendo em certos casos ultrapassar os 30%. Ecologicamente enquadra-se nas regiões Subatlântica (SA) e Atlântica \* Subatlântica \* Altimontano (A.SA.AO) (caracterização fitofítica: *Betula celtibérica*, *Castanea sativa*, *Quercus pyrenaica*, *Pinus sylvestris*, *Quercus pyrenaica*, *Quercus robur*, *Taxus baccata*). A temperatura média anual varia entre 10.0 e 12.5 °C. Podem ocorrer geadas entre 3 e 4 meses. A precipitação situa-se entre 1200 e 1600 mm, apresentando um período estival normalmente seco entre Junho e Agosto. Apresenta aptidão florestal, sobretudo de conservação. As florestas aqui existentes são na sua maioria públicas - perímetro florestal de Marão e Meia Via, resultantes de plantações iniciadas em 1916 pelo Estado e doutras mais recentes na década de 60. Como principais objectivos foram considerados a produção lenhosa e a protecção hidrológica. Os solos são principalmente Cambissolos (Cambissolos húmicos) derivados de xisto. (Araújo, 2004, Rego, 2001, Atlas do Ambiente, 1974a, 1974b, 1974c, Cardoso e Marado, 1971 e Albuquerque, 1954). Junto às povoações existe alguma agricultura característica de planalto de montanha, culturas forrageiras, batata para consumo e batata de semente, produtos hortícolas e soutos de castanheiro.

## 2 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA EM APLICAÇÕES FLORESTAIS

### 2.1 Introdução

Informação e tecnologia caminham juntas desde que os computadores se tornaram equipamentos comerciais. No início, as aplicações eram construídas isoladamente, o que obrigava à existência de duplicação de processos e dados, dificultando a sua manutenção e/ou actualização. A abordagem sistémica da informação tornou-se uma necessidade nas organizações. Surgiu, então, o conceito de Sistemas de Informação, que segundo Dias e Gazzaneo, “veio dar ao computador uma nova dimensão, transformando-o de mero processador de dados em elemento preponderante na racionalização e na dinamização do trabalho na empresa” (Dias e Gazzaneo, 1975, Rezende, 2003).

Subsistia ainda uma grande barreira à partilha da informação - a grande dificuldade de conversão de dados entre os diferentes sistemas de informação, exigindo a utilização de formatos intermédios com o risco de se perder o modo como os dados estavam organizados e relacionados.

Em 1970, E.F. Codd, desenvolveu um modelo relacional de bases de dados que primou pela sua simplicidade, representando dados descritivos em tabelas (relações), organizadas em linhas e colunas. Através do uso desta abstracção (tabela), este modelo garantiu a independência entre programas de aplicação e as estruturas de dados utilizadas nas bases de dados. Esta teoria relacional rapidamente se disseminou pela comunidade de programadores de bases de dados; assim, a conversão de dados entre aplicativos como ORACLE, INFORMIX, ACCESS e SQL SERVER passou a ser um problema com solução relativamente simples. A fundamentação teórica dos sistemas de informação adquire portanto uma importância vital no desenho dos mesmos, criando-se o chamado “modelo semântico” do sistema de informação, termo que designa o conjunto de conceitos próprios a cada sistema. Só através da plena compreensão dos conceitos em que se baseiam os diferentes sistemas de informação será possível de estabelecer o melhor processo para a conversão (partilha) de dados entre sistemas. (Câmara, 1998).

As bases de dados exigem o desenvolvimento de métodos e técnicas que permitam executar as diferentes etapas necessárias à sua criação e posterior utilização. Segundo Fayyad *et al.* (1996) *in*: Bassalo *et al.* (2002), essas etapas são as seguintes: selecção da informação, pré-processamento, transformação e preparação dos dados, processamento, interpretação/avaliação. A principal crítica feita aos sistemas de informação para apoio à decisão é a sua construção com base

num processo linear de causa e efeito funcional, que obedece a um raciocínio analítico, não sendo considerados os aspectos que fazem parte da personalidade de quem toma a decisão. As dimensões da informação devem considerar a sua interacção com o indivíduo.

Actualmente continuam a subsistir barreiras na partilha da informação, sobretudo ligadas aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), especialmente pelas dificuldades de integração entre as várias ferramentas envolvidas (por ex.: vectorização por CAD, manipulação e análise vectorial e/ou raster) e ainda entre os vários SIG existentes comercialmente. Como nenhum programa de SIG reúne todas as características ideais de cada uma das suas componentes o utilizador necessita frequentemente de utilizar programas específicos para cada uma das tarefas, confrontando-se com dificuldades de interligação entre eles. Por outro lado, a informação em cada segmento pode apresentar-se com distinta georreferenciação. Assim, outra das barreiras no uso dos SIG reside nas transformações correctas entre cada um dos sistemas de coordenadas possíveis de encontrar (Ilfte, 2000).

O Sistema de Posicionamento Global revolucionou o conceito de Sistema de Informação Geográfica e Cartografia Digital porque tornou finalmente possível a navegação em tempo real, em simbiose com cartografia digital previamente desenhada, verificando-se que, actualmente, todas as aeronaves e embarcações comerciais realizam a navegação assistida por GPS. Também no sector florestal se verifica a aplicação generalizada desta tecnologia. O posicionamento geográfico é assim feito actualmente de forma rigorosa e a baixo custo em qualquer parte do globo terrestre, usando um pequeno dispositivo portátil (receptor GPS).

Como é sabido, durante a Presidência Americana de Bill Clinton foi removido o erro sistemático que era introduzido pelo gestor do Sistema GPS para evitar a utilização plena das suas potencialidades em tempo real por potenciais inimigos (Disponibilidade Selectiva). Este facto melhorou significativamente a precisão do sistema para o utilizador civil e, as vendas de pequenos receptores de navegação aumentaram. Graças a isso o sistema avançou tecnologicamente (miniaturização dos seus componentes electrónicos, capacidades de recepção, etc.) e reduziram-se os custos dos aparelhos. Actualmente é possível ligar receptores GPS com outros dispositivos portáteis tais como PDA, TabletPC, LapTop, etc., e supõe-se que num futuro muito próximo se disponibilizem comercialmente telefones portáteis com GPS (Câmara, 2004). Tal como com os telemóveis as inovações nestes aparelhos são frequentes e por isso qualquer referência que aqui se fizesse rapidamente se desactualizaria. Assim prefere-se a consulta das páginas Internet dos fabricantes de receptores GPS onde se podem obter informações detalhadas sobre sistemas e modelos actuais.

O rigor do posicionamento geográfico por GPS depende das necessidades do utilizador. Assim, quando o rigor requerido é elevado, os dados recolhidos no terreno são combinados com

outros recolhidos exactamente à mesma hora numa estação base de referência de posição perfeitamente conhecida - correcção diferencial, que se pode efectuar após o levantamento (pós-processamento diferencial) ou em tempo real caso se justifique. Para navegação (aérea ou terrestre) é normalmente suficiente o posicionamento com receptores menos complexos e sem correcção pós-diferencial (Castro, *et al.*, 2004, Martins, 2004)).

## **2.2 Aplicações de Sistemas de Informação Geográfica e ferramentas afins**

### **2.2.1 Introdução**

No presente trabalho foram utilizadas além das técnicas de Inventário e Dendrometria Florestal outras metodologias usadas em actividades florestais (SIG, DR, GPS, CAD<sup>2</sup>), e dado que se necessita de informação georreferenciada em todas elas (por ex.: na recolha de dados de campo, no planeamento de rotas de voo, na correcção e processamento das imagens, etc.) foi imperioso desenvolver um SIG para integrar toda essa informação. Todos os mapas apresentados nesta tese foram obtidos através do SIG aqui desenvolvido, retirados directamente de DR ou através da sua manipulação integrada com outras componentes do SIG.

Avaliadas as disponibilidades de programas SIG optou-se pelo Sistema Geomedia Professional v.5.0, porque foi efectivamente aquele que melhor satisfaz as necessidades requeridas por um trabalho de investigação desta natureza:

- organização por objectos em tabelas (temas)
- ligação directa recíproca com privilégios de leitura e escrita entre as tabelas do Access e do Geomedia,
- ligação directa com privilégios de leitura ao CAD Microstation (dgn),
- ligação directa com privilégios de leitura ao CAD AutoCad (dxf, dwg),
- ligação directa a vários tipos de bases de dados com privilégios de leitura e escrita (Access, Oracle, SQL Server, ...),
- ligação disponível também via ODBC a outras bases de dados,
- ligação com privilégios de leitura a praticamente todos os sistemas de SIG concorrentes (ArcView, ArcInfo, MapInfo),

---

<sup>2</sup> Nota: o significado das siglas é apresentado no Anexo I: Lista de símbolos e abreviaturas (PÁG. 276)

- importação e exportação em vários formatos,
- transformação entre sistemas de coordenadas, ligações e importações e exportações, feitas de forma simples e eficiente, conhecidos os parâmetros de transformação,
- inserção de imagens georreferenciadas de vários formatos, mesmo os comprimidos (GeoTiff, MrSid, ERS, etc.), embora tenha vantagem nos formatos comprimidos georreferenciados nativos da Intergraph (COT, RGB, etc.),
- parametrizações com Microsoft Office através de programação e desenvolvimento em Visual Basic ou Visual C++.

Além das capacidades supracitadas deste SIG incluem-se outras que serão ilustradas ao longo do trabalho. Devemos realçar desde já as capacidades espaciais de análise (análises de vizinhança, auréolas de influência, “*buffer*”) e a sobreposição espacial entre temas. Este sistema permitiu organizar a componente espacial do trabalho, em associação com outros programas Raster (Orthoengine, Geomatica, ErMapper, I Ras/C), outros programas SIG raster (Idrisi32 e Idrisi Kilimanjaro), outros programas vectoriais (MapSite), por exemplo. Foi ainda possível criar toda a cartografia que se apresenta ao longo do trabalho. Não foram utilizadas todas as potencialidades de impressão porque se optou por não imprimir mapas que ficassem com dimensões além do formato A4. Foi possível produzir cartografia em escala pré-definida e com todos os objectos gráficos normalmente usados (escala gráfica, Rosa dos Ventos, grelha ou quadrícula personalizada de coordenadas geográficas ou cartográficas, etc.)

O sistema Geomedia v.5.0 apresenta no entanto limitações nas operações 3D carecendo de extensões para esse fim. Optou-se portanto por utilizar o CAD Microstation 95 nas operações 3D. Embora já existam versões mais recentes, esta continua a proporcionar boas capacidades de operação. As principais utilizações deste programa foram na correcção dos dados obtidos com GPS em modo diferencial, na avaliação da deriva das linhas de voo (XYZ), na avaliação da altura das árvores pelo processo CAD, na medição da paralaxe diferencial. Esta última operação também necessitou duma extensão específica do Microstation, para tratamento de imagem raster (I Ras/C), com a qual se realizaram várias operações com imagens raster, além desta, durante este trabalho.

Com os outros programas Raster (Orthoengine, Geomatica, ErMapper, I Ras/C), realizaram-se diversas operações fundamentais, entre as quais a ortorrectificação de fotografias aéreas convencionais, de fotografias aéreas de pequeno e médio formato, processamento de imagem de satélite. Com os programas SIG Raster (Idrisi32 e Idrisi Kilimanjaro), realizou-se o processamento digital de imagens em geral, desde as fotografias aéreas digitalizadas até às fotografias hemisféricas e também das imagens de satélite. Aliás, no que se refere a imagens de satélite, apenas se realizou a correcção geométrica através do ErMapper. As restantes operações foram efectuadas no Sistema

Idrisi Kilimanjaro. Através do ErMapper ainda se realizaram também algumas tentativas de fusão de imagens digitais mas como não foi possível ter acesso directo aos algoritmos optou-se por se utilizar o Idrisi. Aliás, o mesmo aconteceu com o Geomatica v.9.1, porque também este sistema apresenta um módulo específico de fusão de imagem, designado por “Pan Sharpening”, embora sem acesso aos algoritmos. Foi no entanto muito interessante verificar que se conseguem obter imagens de excelente qualidade com o Idrisi Kilimanjaro, não inferiores às obtidas com programas muito mais dispendiosos e exigentes em hardware. No entanto, a facilidade com que através destes se processa a operação de fusão de imagem vulgarmente designada por suavização pancromática e as capacidades de explorar imagens de 11 bits tornam-nos obviamente ferramentas muito mais eficazes em regime de produção contínua.

O programa MapSite foi de extrema importância na navegação aérea porque permitiu realizar uma interface com o GPS, e com o computador portátil. O plano de voo era feito no SIG e introduzido no sistema, realizada a navegação em tempo real e simultaneamente registada a rota seguida, com registo segundo a segundo, da hora, data, e coordenadas XYZ. A exportação deste ficheiro vectorial para o Microstation permitiu realizar a aferição da qualidade da navegação em cada uma das missões realizadas. Este programa permitiu ainda fazer a transferência directa dos dados da memória interna do aparelho receptor GPS (PC→GPS ou GPS→PC).

O Sistema de Informação Geográfica criado para o trabalho que agora se apresenta, compreendeu as seguintes componentes:

- base de dados para a gestão global,
- altimetria digital das 3 áreas de estudo e modelo digital do terreno (MDT),
- ficheiros GPS relativos à rede viária e divisional actual,
- cartas de ocupação do solo,
- ortofotografia do CNIG e do INGA,
- etc. ...

### **2.2.2 Base de dados para a gestão global**

Construiu-se uma base de dados relacional com arquitectura Microsoft® Access 2000 que proporcionou uma forma segura de introdução, armazenamento, relacionamento e consulta dos dados. Os diversos tipos de levantamentos efectuados durante este trabalho deram origem a numerosa informação espacial e temática interligada, a qual foi organizada em tabelas temáticas. A ligação directa com privilégios de leitura e escrita, entre as tabelas do Microsoft® Access 2000 e do programa SIG Geomedia v.5.0, possibilitaram cruzamentos de informação entre ambas as bases de dados, gráfica e alfanumérica.

Foram criadas várias tabelas, relações, consultas, formulários e relatórios. A ligação lógica e segura do utilizador à informação foi feita através de formulários. Criou-se na base de dados alfanumérica um formulário dito “base”, a partir do qual se acede a outros quatro sub-formulários, “Parcelas”, “Fotografias”, “Paralaxe” e “Resultados Globais” (Figura 4). Cada um deles acede por sua vez a outros sub-formulários de acordo com uma lógica hierárquica.

No sub-formulário “Parcelas” acede-se à informação fixa de cada parcela amostrada no terreno, o sub-formulário “ParcelasG” acede a uma tabela externa do SIG consistindo sobretudo a informação gráfica georreferenciada da parcela. Através do sub-formulário “GPDF” é feita a introdução dos dados de campo do inventário dendrométrico e do ceptómetro.

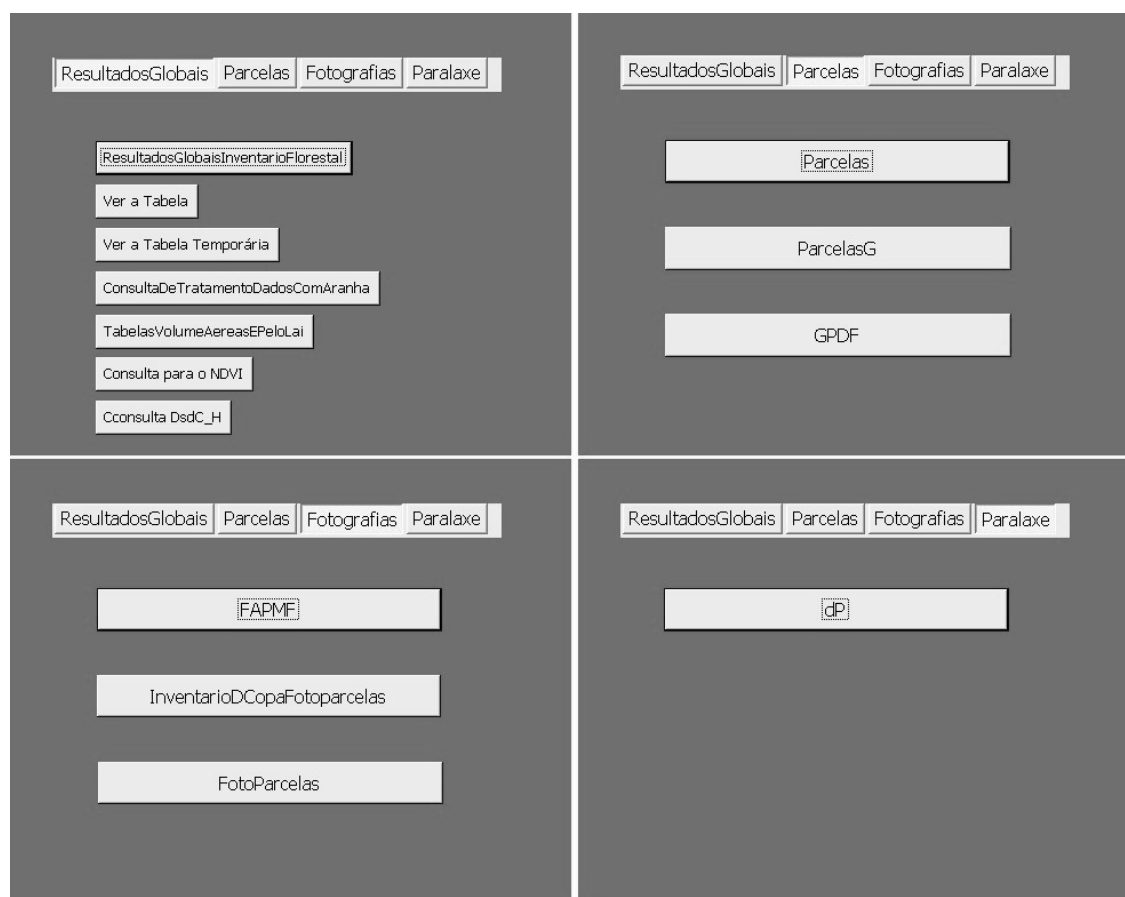


Figura 4: Folha de rosto da base de dados principal “jpmc\_doutoramento\_BD\_InventarioFlorestal.mdb”

No sub-formulário “Fotografias” são organizadas as FAPMF, incluindo toda a informação acerca das condições de aquisição, através do seu sub-formulário FAPMF. São introduzidas as medições dendrométricas realizadas sobre as FAPMF (sub-formulário “InventarioDCopaFotoparcels”). No sub-formulário “FotoParcelas” organizam-se as FotoParcelas.

A introdução das alturas das árvores, obtidas com a barra de paralaxe e com o método CAD foi feita através do sub-formulário “dP”.

O sub-formulário “ResultadosGlobais” calcula internamente os parâmetros dendrométricos resultantes das medições efectuadas no terreno e ainda o LAI através das medições com o ceptómetro. São aqui efectuados os cálculos e criada uma matriz com todos os dados numa só tabela, a qual pode ser acedida também através do SIG para posteriores análises espaciais.

Para facilitar a consulta das tabelas criadas, algumas das quais com mais de 6000 registos, foram criadas consultas e relatórios específicos.

O desenvolvimento desta base de dados para a gestão global foi feito por programação em *Visual Basic for Applications* (VBA) e *Structured Query Language* (SQL).

### **2.2.3 Altimetria digital e modelo digital do terreno**

Desde meados do século XX até quase à década de 90, a altimetria das cartas militares nacionais 1:25 000 foi desenhada directamente em papel através de estereorestituidores analógicos, com uma equidistância natural de 10m, sempre auxiliada por pontos cotados da rede nacional dos vértices geodésicos. Com o início da “Era Digital” esta altimetria passou a ser desenhada num sistema CAD, primeiro com estereorestituidores analíticos e mais recentemente através de sistemas de fotogrametria digitais. No entanto os princípios gerais de funcionamento continuam os mesmos.

A altimetria numa carta em papel é representada graficamente sob a forma de curvas de nível e por pontos cotados. Existem variadas aplicações informáticas que conseguem manipular esta informação e transformá-la noutros formatos digitais como por exemplo os polígonos de Thiessen ou Modelos Digitais do Terreno (MDT). De acordo com PCI Geomatics (2003), um MDT é um ficheiro digital georreferenciado de elevações de terreno acima do nível médio das águas do mar<sup>3</sup>. É uma representação raster da elevação do terreno em que cada pixel assume um dado valor numérico de acordo com a elevação nesse local.

Os polígonos de Thiessen são sobretudo utilizados em Engenharia Civil, por exemplo no cálculo de volumes de movimentação de terra. Os MDT, que são os que mais interessam para este trabalho, permitem realizar variadas operações, desde a criação automática de cartas temáticas, de declive, de exposição, de níveis de altitude, ou ainda a separação automática de linhas de fecho e de linhas de água, etc. Além disso são também utilizados para a ortorrectificação das fotografias aéreas, pela correcção geométrica do rebatimento do terreno e obtenção dos valores altitudinais

---

<sup>3</sup> No nosso caso em relação ao Marégrafo de Cascais.

dos pontos de controlo no terreno (PCT), recolhidos por exemplo através de consulta de ortofotografia georreferenciada, a qual apenas indica a posição X,Y.

A criação dos MDT é uma potencialidade disponibilizada pela maioria dos programas de Processamento Digital de Imagem (PDI) (por ex.: Idrisi, Orthoengine v.6.2, Geomatica v.9.1). Neste estudo a criação dos MDT foi efectuada com o programa Orthoengine v.6.2, através da interpolação espacial das curvas de nível em formato 3D do Microstation. Foi escolhido este programa porque apresenta um algoritmo de interpolação mais poderoso do que o Idrisi (o manual do programa Orthoengine v.6.2 não refere o algoritmo usado para a criação de MDT a partir de isolinhas de altitude; no programa Idrisi o algoritmo usado para esse efeito designa-se por CONSURF tendo sido desenvolvido por David Douglas, University of Ottawa, Canada – in: Eastman, 2003a).

Os MDT produzidos neste estudo foram utilizados principalmente para a ortorrectificação das fotografias aéreas convencionais e de pequeno e médio formato. Mas também tiveram muita utilidade no planeamento e verificação posterior das missões aerofotográficas. Quer o Idrisi Kilimanjaro, quer o Geomatica v.9.1, permitem colar na superfície dum MDT uma qualquer imagem com conteúdo geográfico, e produzir, por exemplo, imagens em perspectiva (Figura 85) e simulações de voo.

#### **2.2.4 GPS**

As operações auxiliadas por GPS apresentam-se em várias partes deste trabalho porque este dispositivo foi indispensável em várias situações (levantamento de pontos de controlo no terreno, navegação terrestre, navegação aérea), algumas sem necessidade de correcção diferencial e outras sim. Para a correcção diferencial foram utilizadas as bases fixas de Bragança (IPB) e de Vila Real (UTAD) e o processamento dos dados com o programa GPS Pathfinder Office v.2.80. Exemplos de levantamentos de campo que normalmente devem ser feitos com correcção diferencial são as redes viárias (Figura 5), as parcelas de amostragem (Figura 6), os PCT para ortorrectificação e/ou georreferenciação de imagens, entre outros.

Para verificar a precisão de receptores GPS de navegação, sem correcção diferencial, no terreno determinaram-se as posições dos pontos de amostragem simultaneamente com o GPS 320 Magellan, sem correcção diferencial, e com o GPS Trimble Pro Xr, com correcção diferencial. Esta efectou-se no programa PathFinder Office v.2.80, comparando os dados do receptor móvel GPS Pro XR com os dados da *Community Base Station (CBS) PathFinder* da ESAB ou da UTAD consoante a proximidade destes.

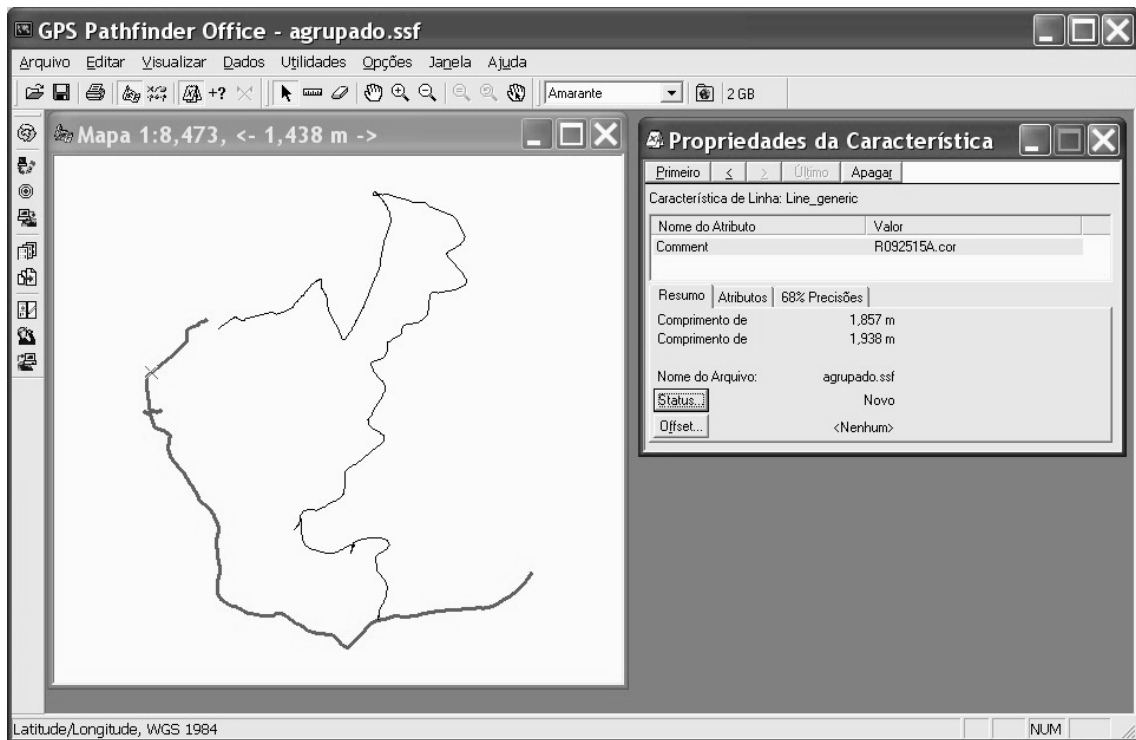


Figura 5: Traçados da rede viária com GPS em correcção diferencial – exemplo de Amarante-Aboim

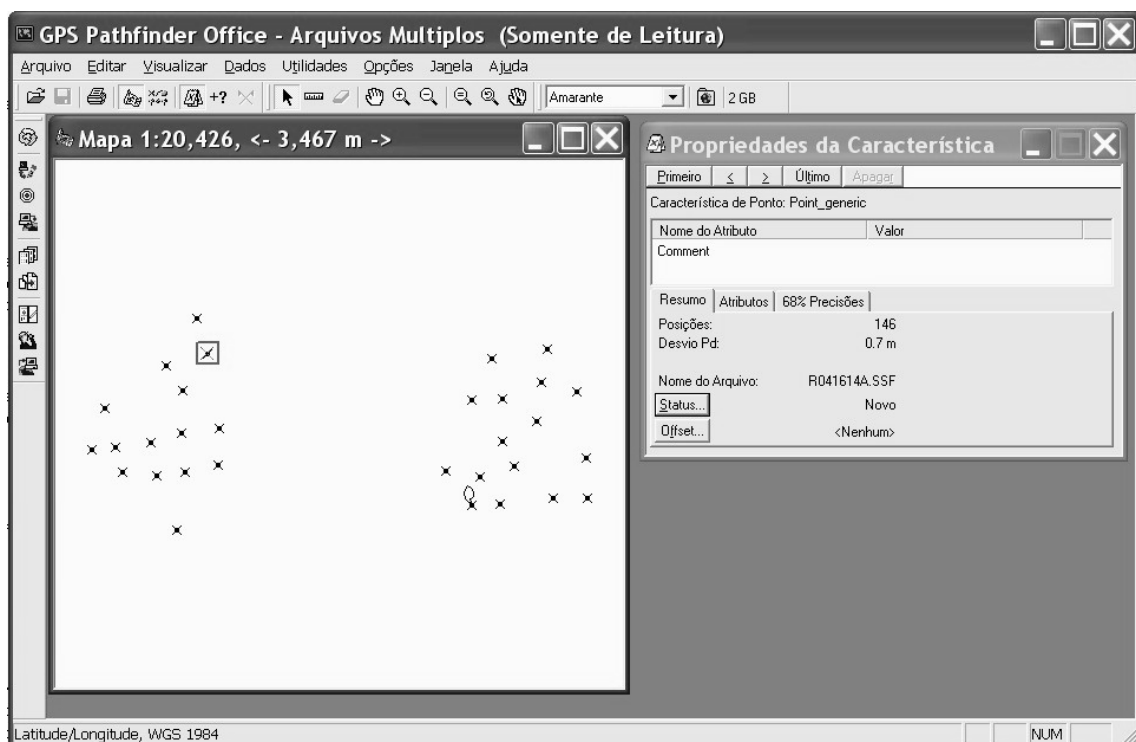


Figura 6: Localização de parcelas com GPS em correcção diferencial – exemplo de Amarante-Aboim

Inicialmente, a transferência dos pontos do GPS 320 Magellan para o computador foi feita através do programa DataSend da Magellan, que acompanha o próprio GPS. Este programa foi posteriormente substituído com vantagens pelo programa MapSite, visto integrar também a informação 3D e ter uma interface com o formato Shape da ESRI, possibilitando a transferência de

informação de forma directa com o SIG Geomedia v.5.0., e ainda por permitir realizar a navegação em tempo real (MapSite, 2001).

Após a inserção no SIG das posições dos pontos de amostragem obtidos pelos diferentes processos e confirmada no terreno com auxílio da fotografia ortorrectificada, foi validado o sistema de localização por GPS, com e sem correcção diferencial. No Anexo IX apresentamos de forma tabular as coordenadas rectangulares por ambos os processos de localização e ainda as diferenças entre ambos, em X e em Y. Verificámos que estas diferenças foram maioritariamente inferiores a 1m. Ocorreram erros de localização superiores a 30m num grupo concentrado de parcelas de bétula, as quais distam entre si cerca de 30m. No entanto, a cerca de 100m ao lado, para Este, foi localizada noutra dia uma outra parcela por ambos os processos e com erro praticamente nulo. Uma vez que o PDOP<sup>4</sup> durante a recolha dos dados com o GPS era inferior a 6, julgamos ter sido deliberadamente introduzido um erro sistemático pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (“*Disponibilidade Selectiva*”), até porque os desvios de localização nessas parcelas foram iguais (parcelas 306, 308, 309, 310 e ainda as parcelas 351 e 352). Desprezando estes valores cujos desvios foram exagerados (7 pares de dados) e considerando os restantes 34, realizou-se um teste *t* de Student sobre os dados emparelhados verificando-se não haver diferença significativa nem em X ( $t=0.4663$ , g.l.=33,  $P= 0.6441$ ) nem em Y ( $t=0.4853$ , g.l.=33,  $P= 0.6307$ ). Não foi avaliado o erro em Z. A correcta localização de cada parcela no terreno foi assegurada como medida de segurança pela prévia marcação com estaca de madeira espetada no centro da parcela. Isso permitiu também verificar a capacidade de localização no terreno de cada uma das parcelas em prossequentes visitas com o auxílio do GPS.

O traçado das linhas de voo para navegação aérea dependeu essencialmente da localização das parcelas previamente amostradas no terreno. Procurou-se otimizar a sua localização de forma a reduzir o tempo de voo e a garantir a cobertura de todos os pontos de amostragem no terreno.

O sistema Geomedia v.5.0. revelou características particularmente favoráveis ao traçado das linhas de voo, especialmente por poder integrar informação com georreferenciação distinta e exportá-la num qualquer desses sistemas de coordenadas, e em distintos formatos SIG e CAD, por exemplo o formato ArcView ShapeFile da ESRI (mas também nos formatos MapInfo, ArcInfo, MicroStation, AutoCad, etc.). Este formato é compatível com o programa de navegação MapSite permitindo realizar a navegação aérea auxiliada pelo GPS 320 Magellan quando ligado ao

---

<sup>4</sup> PDOP – “Precision dilution of precision”: factor do GPS, que indica a qualidade do posicionamento, dependendo muito da organização espacial da constelação NAVSTAR no horizonte. Deve ser menor que 6 (valor ideal  $\approx 4$ ). O receptor GPS bloqueia a recepção do sinal para valores superiores a 6.

computador pela porta de série. A rota entretanto seguida foi registada pelo programa, sendo novamente exportada no formato ShapeFile e também integrada no SIG, permitindo analisar eventuais desvios de rota (secção 3.5.2).



## 3 DETECÇÃO REMOTA

### 3.1 Introdução

No Capítulo 1 foram realçadas as potencialidades de ligação entre as ciências florestais e a detecção remota. Também aí se referiu que embora a fotografia aérea convencional seja o produto de DR mais adequado para a maioria dos estudos florestais, actualmente em Portugal, não se dispõe de coberturas frequentes e as que existem apresentam baixa qualidade. Igualmente se enunciaram algumas das razões da reduzida aceitação das imagens de satélite pela comunidade técnica e científica florestal.

No entanto, as potencialidades quer da fotografia aérea quer das imagens de satélite justificam mais uma vez a sua abordagem técnico-científica sendo referidas como ferramentas extremamente úteis no ordenamento sustentado da floresta (Franklin, 2001). Neste capítulo são desenvolvidas algumas das interligações possíveis entre ciências florestais e a DR. Consideraram-se os seguintes temas: fotografia aérea convencional (FAC), fotografia aérea de pequeno e médio formato (FAPMF), imagem de satélite, fusão de imagem digital, cartografia temática (ocupação florestal do solo), tabelas de volume aéreas, índices de vegetação (VI).

Foram compradas ou obtidas graciosamente as mais recentes FAC dos locais de estudo e nas películas que existiam, algumas já ortorrectificadas e outras não. Estas últimas foram ortorrectificadas durante este trabalho, tendo sido também este um dos temas aqui desenvolvidos, i.e., a aplicação da técnica de ortorrectificação digital de fotografias aéreas, através de vários programas e equipamentos informáticos.

Relativamente às imagens de satélite, foi adquirida uma imagem multiespectral Landsat ETM+ e já se dispunha duma imagem Landsat5 anterior. Embora a resolução espacial de 30m seja demasiado grosseira para a dimensão média da propriedade de Portugal, este tipo de imagem já provou ser de grande utilidade na actividade florestal, especialmente quando associada com outras imagens de DR de resolução espacial mais fina. Foram desenvolvidos procedimentos de processamento digital de imagem (PDI) (correção geométrica, atmosférica, fusão de imagem, etc.) de possível extrapolação para outras imagens de satélite de melhor resolução espacial (por ex.: imagens Ikonos). Foram analisadas algumas metodologias de correção atmosférica propostas por vários autores (Chavez (1988), Chavez (1989), Chuvieco (1990),

Foram adquiridas expressamente durante este trabalho várias fotografias aéreas de pequeno e médio formato (FAPMF). Assim, são descritos neste capítulo alguns conceitos para melhor se entender todo o processo envolvido na sua aquisição, desde o equipamento utilizado (câmaras,

objectivas, películas, filtros, etc.) até ao equipamento acessório (aeronaves, suportes de câmaras fotográficas, intervalómetros, receptores GPS, etc.).

Os objectivos principais deste capítulo foram as aplicações florestais de DR, desde a realização de cartografia temática até à medição de parâmetros dendrométricos e realização de tabelas de volume aéreas, as quais são desenvolvidas neste capítulo com a profundidade necessária.

## **3.2 Fotografia Aérea**

### **3.2.1 Equipamento para Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato**

#### **Introdução**

O equipamento utilizado para FAPMF difere do equipamento para fotografia aérea convencional sobretudo na dimensão. Os princípios de funcionamento são semelhantes (Warner *et al.*, 1996). Existem câmaras fotográficas métricas com vários formatos sendo o seu custo bastante superior às equivalentes não métricas. Por isso, normalmente em FAPMF são utilizadas câmaras fotográficas reflex de 35 e 70mm analógicas, não métricas. Mais recentemente também foram referidas aplicações florestais com câmaras fotográficas digitais “*single lens reflex*” (SLR) de 35mm.

As análises florestais que poderão ser efectuadas com uma imagem aerofotográfica dependem sobretudo da escala, resolução espacial e tipo de película. Através da análise das fotografias aéreas convencionais disponíveis comercialmente é possível estudar grandes povoamentos florestais, mas não os pormenores dos bosquete nem tampouco das árvores. Assim, os factores a considerar nas aplicações de FAPMF serão a escala, as películas, a tecnologia analógico ou digital (CCD), a resolução espacial, filtros, a combinação da abertura do diafragma e da velocidade do obturador, o sistema de navegação com GPS e a integração da informação de DR com dados cartográficos num SIG.

#### **A câmara fotográfica**

Uma câmara fotográfica é um dispositivo constituído por uma caixa escura onde está o filme, um sistema de lentes (objectiva), com possibilidade de variar a sua distância focal (focagem), um diafragma, cuja abertura pode variar, e um disparador, que permite variar o tempo de exposição da película à luz.

Para se obterem fotografias com boa qualidade, tem que se ajustar correctamente a focagem, a abertura do diafragma e o tempo de exposição.

## Focagem

Três parâmetros estão envolvidos na focagem da câmara: a distância focal da objectiva da câmara ( $f$ ); a distância entre as lentes e os objectos a fotografar ( $o$ ); e a distância entre as lentes e o plano da imagem, ( $i$ ). A distância focal é a distância da lente ao ponto onde um feixe de luz paralelo está focado. Quando a câmara está focada para um objecto, a relação entre a distância focal, a distância ao objecto, e a distância à imagem é:

$$\text{Eq. 1} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i}$$

Dado que  $f$  é uma constante para uma dada lente, enquanto que a distância  $o$  muda, a distância  $i$  tem de alterar-se. Isso é feito movendo as lentes relativamente ao plano do filme. Quando focado um objecto a uma certa distância, a câmara pode fixar com nitidez todos os objectos atrás e à frente, com uma certa tolerância, para os quais se mantém a focagem de forma aceitável. Este espaço-objecto designa-se por *profundidade de campo*, o qual depende da abertura do diafragma (ver a seguir nesta secção).

Em fotografia aérea, a distância aos objectos terrestres considera-se ser infinita. Dado que o termo  $1/o$  da Eq. 1 tende então para zero,  $i$  deve igualar  $f$ . Assim, muitas das câmaras aéreas convencionais foram já fabricadas com o seu plano de filme precisamente localizado a uma distância fixa  $f$  das suas lentes. Caso contrário, aconselha-se a focagem para o infinito, fixando o anel de focagem com fita cola, para evitar modificações acidentais durante o voo (solução adoptada durante as missões aerofotográficas realizadas ao longo deste estudo).

## Exposição

A *exposição dum filme*,  $E$ , define-se como a quantidade de energia que incide na película fotográfica e que produz quimicamente uma imagem fotográfica na sua emulsão. A exposição dum filme num determinado ponto da imagem está directamente relacionada com a reflectância do objecto correspondente. Teoricamente, a exposição do filme varia linearmente com a energia luminosa reflectida pelo objecto, sendo ambos função do comprimento de onda.

A exposição em qualquer ponto do plano focal do filme da câmara é determinada pela irradiação ( $I$ ) (ou intensidade da irradiação) de qualquer ponto-objecto multiplicado pelo tempo de exposição ( $t$ ) (Eq. 2). Pode ser explicada de forma mais complexa a partir da Eq. 3 podendo ver-se que para uma dada câmara e cena, a exposição do filme varia com a regulação da velocidade do obturador  $t$  e do diâmetro de abertura do diafragma das lentes  $d$ , que limita o diâmetro do feixe luminoso que entra pela objectiva, havendo várias combinações possíveis de  $d$  e  $t$  para exposições equivalentes. O recíproco da exposição requerida para produzir uma densidade específica ( $\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$

ou ergs.cm<sup>-2</sup>), designa-se por **sensibilidade**, estando muito dependente das características da emulsão de cada película.

Eq. 2 
$$E = I \cdot t$$

Eq. 3 
$$E = I \cdot \frac{d^2 \cdot t}{4f^2}$$

em que:  $E =$  exposição do filme (J.mm<sup>-2</sup>)  
 $I =$  intensidade da irradiação (ou claridade da cena) (J.mm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)  
 $t =$  tempo de exposição (s)  
 $d =$  diâmetro de abertura das lentes (mm)  
 $f =$  distância focal da lente (mm)

Embora a exposição dum filme se possa medir de forma absoluta (J.mm<sup>-2</sup> ou ergs.cm<sup>-2</sup>), esta é normalmente medida de forma relativa, considerando-se uma medida fotométrica e não radiométrica (estão positivamente relacionadas) e que poderá ser feito através do fotómetro da própria câmara fotográfica ou com um fotómetro manual.

A abertura objectiva (F) é definida pela Eq. 4:

Eq. 4 
$$F = \frac{\text{distância focal}}{\text{diâmetro da abertura do diafragma}} = \frac{f}{d}$$

Quando aumenta  $d$  (valores  $F$  mais baixos) a exposição aumenta de acordo com a Eq. 3. A escala dos números  $F$  que constituem as aberturas possíveis de cada objectiva, dispõem-se segundo uma sequência internacionalmente aceite, definida de tal modo que quando se altera um número  $F$  para o imediatamente superior se reduz para metade a quantidade de luz que atravessa a objectiva, independentemente da objectiva, distância focal ou formato da máquina fotográfica, para a mesma cena e tempo de exposição.

Sejam  $F_1 > F_2$  dois valores consecutivos. Ter-se-á então  $E_1 = (s.t)/(4F_1^2)$ ,  $E_2 = (s.t)/(4F_2^2)$  e portanto  $E_1/E_2 = F_2^2/F_1^2$ . A escala que pretendemos construir é tal que  $E_1/E_2 = 1/2$  e portanto deverá ser  $F_1 = \sqrt{2} \cdot F_2$ . Deverá ser esta a relação entre valores consecutivos de  $F$ . Iniciando a escala com o valor  $F=1$ , o valor seguinte deverá ser  $1 \times \sqrt{2} = 1.414$ , etc.... A escala completa, com aproximação às décimas será 1.0-1.4-2.8-4.0-5.6-8.0-11.3-16.0-22.6-32.

Quando um objecto é iluminado por uma fonte de luz pontual, a intensidade da luz que ilumina a sua superfície é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte de luz (*lei do inverso do quadrado*). Duplicando a distância entre uma superfície e a fonte luminosa, reduz-se para um quarto a luz que a superfície recebe. Essa relação também está implícita na Eq. 3. Por

exemplo, uma objectiva com distância focal de 160 mm formará uma imagem quatro vezes menos luminosa que uma objectiva de 80 mm.

Para uma exposição constante, um aumento na velocidade de disparo tem de ser acompanhado por um aumento do  $F$ . Por exemplo, a exposição obtida a  $1/500$  seg. e  $F/1.4$  poderá obter-se a  $1/250$  e  $F/2$ . Um tempo curto de exposição é adequado para objectos em movimento e previne o tremido.

O valor  $F$  correspondente à maior abertura possível do diafragma designa-se por “velocidade ou luminosidade da objectiva”. Quando a abertura do diafragma é máxima (mínimo  $F$ ), é também máxima a quantidade de luz a atingir o filme. Uma objectiva que permita a abertura  $F/1.4$  é bastante mais luminosa (e cara) que uma que apenas permita a abertura  $F/1.8$ . Deve ser ponderada a real necessidade desta diferença. A intensidade luminosa registada por fotómetros e ainda, através da análise de imagens já entretanto recolhidas, com distintas aberturas do diafragma, indicam a necessidade de valores superiores a  $F/1.8$ .

Quanto menor a abertura do diafragma (valores de  $F$  elevados) maior a profundidade de campo (Figura 7).



Figura 7: Variação dos diâmetros de abertura de uma objectiva de 50 mm

Considerando que  $F = f/d$  pode-se relacionar a exposição do filme, a luminosidade da cena, o tempo de exposição, e  $F$  através da Eq. 5. Esta relação poderá ser usada em vez da Eq. 3 para determinar as várias combinações de  $F$  e velocidade de disparo que proporcionam igual exposição do filme. Existe uma tabela internacionalmente aceite de “valores de exposição”, abreviadamente conhecido por  $VE$ , característicos de cada objectiva. Cada valor de exposição indica um determinado tempo de exposição, que pode ser dado por qualquer combinação de abertura do diafragma e velocidade do obturador que emparelhe com ela (Figura 8 e Quadro 1). Para se verificar qual a luminosidade de cada cena são normalmente utilizados fotómetros

(aparelhos manuais) que indicam os valores de claridade pontual e também os valores de exposição (VE).

Eq. 5 
$$E = \frac{I \cdot t}{4F^2}$$

A baixa luminosidade de determinados objectos, nomeadamente copados de povoamentos densos de resinosas adultas, contrastando com outros alvos bastante mais luminosos, como é o caso dos caminhos tipo “McAdam” ou em saibro, fazem com que a selecção da correcta exposição, face à velocidade de disparo e sensibilidade escolhidas (adiante na secção 3.2.1), seja uma tarefa delicada, frequentemente requerendo a utilização dum fotómetro manual. A dificuldade aumenta quando se utilizam simultaneamente várias câmaras com distintas regulações.

Apenas a título indicativo e para casos gerais, Langford (1996) indica os valores de exposição que constam no Quadro 2.

A rapidez da película (sensibilidade da película), obviamente que também será de extrema importância conforme se poderá ver adiante nesta secção. Depois de estabelecidas as prioridades deve ser ajustado o VE em conformidade.

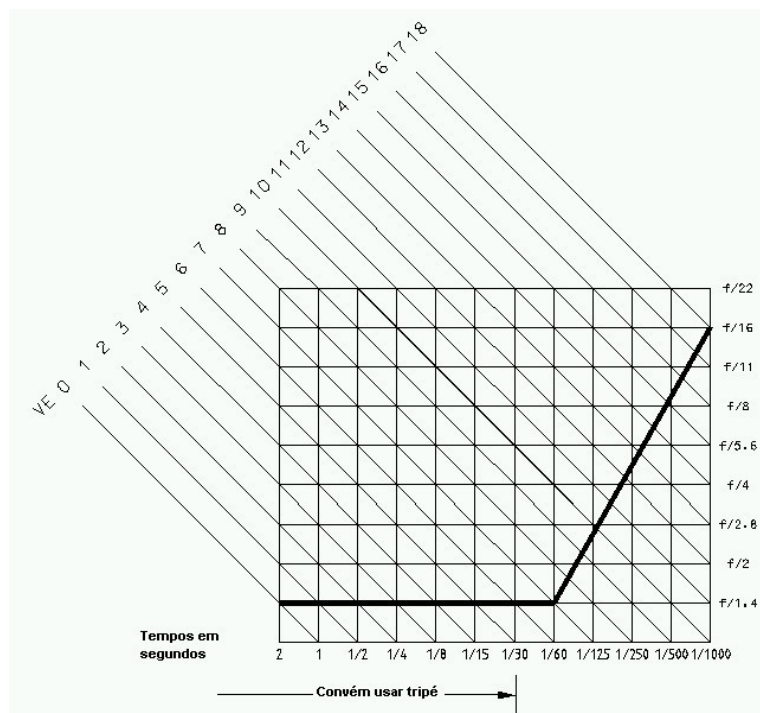


Figura 8: Valores de exposição (VE) (Adaptado de Langford, 1996)

Quadro 1: Valores de exposição dum objectiva F/1.4 para várias combinações de abertura e velocidade do obturador

VE	combinação de abertura e velocidade do obturador			
8	1/30 a f/2.8	1/15 a F/4	1/8 a F/5.6	1/4 a F/8 etc.
9	1/60 a f/2.8	1/30 a F/4	1/15 a F/5.6	1/8 a F/8 etc.
10	1/125 a f/2.8	1/60 a F/4	1/30 a F/5.6	1/15 a F/8 etc.
11	1/250 a f/2.8	1/125 a F/4	1/60 a F/5.6	1/30 a F/8 etc.
12	1/500 a f/2.8	1/250 a F/4	1/125 a F/5.6	1/60 a F/8 etc.
13	1/1000 a f/2.8	1/500 a F/4	1/250 a F/5.6	1/125 a F/8 etc.
14	1/2000 a f/2.8	1/1000 a F/4	1/500 a F/5.6	1/250 a F/8 etc.
15		1/2000 a F/4	1/1000 a F/5.6	1/500 a F/8 etc.

Quadro 2: Guia de exposição (adaptado de Langford, 1996)

Objecto	Velocidade	Abertura
Objecto iluminado de frente, aréa clara ou ambiente com neve	1/125	f/16
Exteriores, céu com nuvens (sem sombras)	1/125	f/8
Como o anterior mas muito enevoado	1/125	f/5.6
Exteriores, tempo claro	1/125	f/5.6
Interiores, interior doméstico com luz natural do exterior	1/125	f/4
Interior de estabelecimento, lâmpadas de luz fluorescente	1/30	f/2.8
Interiores iluminados com lâmpadas de filamento	1/15	f/2
Luzes do tráfego nocturno	10	f/11
Estádio iluminado com lâmpadas sobrevoltadas	1/60	f/2
Retratos à luz da rua	1/30	f/2
Paisagem iluminada pela luz da lua cheia	30	f/2.8

## Películas químicas e formato digital CCD

As películas de acetato com emulsões químicas continuam a ser o suporte mais comum para o registo de fotografia aérea. Actualmente já existem câmaras fotográficas digitais adequadas a fotografia aérea. É fundamental conhecer-se o modo de funcionamento de ambos os processos para registo de imagens. Foi inicialmente desenvolvido o processo químico, seguido depois pelo processo digital.

### Películas químicas - Densidade de filme e curvas características

As características radiométricas das fotografias aéreas determinam o modo como um filme específico (exposto e processado em condições específicas) responde a alterações de intensidade de energia da cena. O conhecimento destas características é particularmente importante quando se pretende estabelecer uma relação quantitativa entre os valores de tonalidade da imagem e os correspondentes objectos terrestres.

A sensitometria estuda o modo como as emulsões das películas fotográficas reagem à exposição e à revelação. Cada película fotográfica possui um comportamento específico, que se pode representar por uma curva de reacção, designada por “curva característica”, a qual é normalmente fornecida pelo fabricante. Estas curvas estabelecem a relação entre densidade do filme e o logaritmo da exposição.

Uma medida da escuridão ou iluminação de um dado ponto num filme é a *opacidade*. A opacidade é determinada pela medição da *transmitância*  $T$  do filme. Esta traduz a capacidade do filme ser atravessado pela luz. Num dado ponto  $p$  da película exposta e revelada, a transmitância  $T$  é:

$$\text{Eq. 6} \quad T_p = \frac{\text{luz que passa através do filme no ponto } p}{\text{luz total incidente no filme no ponto } p}$$

A opacidade  $O$  no ponto  $p$  da película exposta e revelada é:

$$\text{Eq. 7} \quad O_p = \frac{1}{T_p}$$

Embora a transmitância e opacidade descrevam adequadamente a “escuridão” da emulsão dum filme, é normalmente conveniente trabalhar com a expressão logarítmica *densidade*, uma vez que a visão humana responde logaritmicamente aos níveis de luz. (Anexo III). Há uma relação quase linear entre a densidade da imagem e o seu tom visual.

A densidade  $D$  no ponto  $p$  define-se pelo logaritmo (na base 10) da opacidade da película nesse ponto

$$\text{Eq. 8} \quad D_p = \log(O_p) = \log\left(\frac{1}{T_p}\right)$$

Pode-se analisar a densidade de um transparente fazendo passar através dele um feixe de luz. Quanto mais escura for a imagem menos luz a atravessa, menor a transmitância, maior a opacidade, maior a densidade.

Cada uma das camadas de emulsão de uma película colorida, sensível a dada cor, possui um comportamento bastante semelhante à película preto e branco. Daí que em processamento de imagem se pretendam separadas as diferentes bandas constituintes da imagem colorida. Foram então relacionados os valores da densidade na imagem fotografada com os valores de exposição que lhe deram origem, estabelecendo-se uma relação de causa (exposição) e efeito (densidade) que caracteriza uma dada fotografia.

Uma vez que a densidade tem uma expressão logarítmica ( $\log O_p$ ), é conveniente tratar da mesma forma a exposição ( $\log E$ ). Estabelecendo então um gráfico dos valores da densidade como função dos valores de  $\log E$ , obtêm-se curvas características de cada filme. São vulgarmente designadas por curvas  $D-\log E$  ou por curvas H & D, em homenagem a Hurter e Driffield que em 1890 estabeleceram esta relação (Langford, 1996) (Figura 9, Figura 10, Figura 11).

A maioria das curvas características pode ser dividida em três zonas distintas (Figura 9): o sopé; a parte recta; e o cimo.

*O sopé.* A parte inferior da curva característica que é praticamente horizontal. Aqui a película recebeu uma quantidade de luz insuficiente para reagir devidamente<sup>5</sup>. À medida que o valor  $\log E$  aumenta, o gráfico começa a subir lentamente, o que significa que os valores da densidade estão também a aumentar. Contudo, os tons da imagem estão muito comprimidos – as partes sombrias do objecto ficam ainda mal definidas (qualquer densidade de valor inferior a 0.1 acima do véu fica na prova praticamente negra). Gradualmente, com maior exposição, a parte superior do sopé entra na linha recta. O comprimento real do sopé varia de película para película.

*A linha recta.* No troço linear do gráfico os tons da imagem são ainda comprimidos, à medida que o material os traduz como densidades negativas, mas agora a relação  $\log E / \log O_p$  é mais constante: os tons são comprimidos uniformemente. Pode concluir-se que a exposição correcta da imagem ficará inteiramente dentro da parte linear do gráfico. Todavia, para aproveitar ao máximo a rapidez da película, e para evitar que as zonas iluminadas fiquem tão densas que se prejudique o recorte e o grão aumente demasiado, entende-se que a exposição correcta usará a parte superior do sopé acrescida, apenas no necessário, da parte inferior da recta (Figura 10).

O declive do troço linear do gráfico ( $\gamma$ ) mostra também qual o contraste que se deve esperar da película. Na Figura 11 indicam-se duas curvas características com declives distintos. Quanto maior for o declive maior o contraste que resulta dessa combinação de emulsão e de revelação. Assim sendo a película 1, proporcionará maior contraste do que a 2 para uma imagem com a mesma escala de luminosidade. Quando assim é, diz-se que a *latitude da exposição* da película 2 é superior ao da 1. Pode-se definir a latitude da exposição como o intervalo entre a sobreexposição e a subexposição no qual um filme produzirá imagens correctas. À medida que a taxa de luminosidade (série desde o preto até ao branco) baixa, a latitude de exposição aumenta. Num dia enevoadado, por exemplo, a série desde o mais escuro até o mais claro baixa, aumentando a latitude de exposição aparente. Contrariamente, a latitude de exposição baixa se o filme regista alvos com grande discrepância luminosa tais como árvores escuras num fundo de neve em dias de sol. Quanto maior for a diferença entre as sombras da imagem e as zonas iluminadas menor é a latitude de exposição disponível sem exceder os limites ideais ([http 29]).

*O cimo.* Na parte superior da curva característica o gráfico começa a achatar-se de novo. O aumento da exposição agora produz menor aumento da densidade. O material está aproximar-se

---

<sup>5</sup> O valor da densidade nunca chega a ser nulo devido à presença do efeito designado por “véu de densidade indesejável”, e que pode ser provocado por exposição accidental à luz. O processo de criação do gráfico é muito rigoroso pelo que não serão de esperar efeitos accidentais. Será por isso mais provável que este efeito se deva a reacções químicas. Traduz-se num aspecto esbranquiçado, nos materiais inversíveis.

do preto máximo, sob estas condições de revelação. Finalmente torna-se novamente uma linha horizontal. Esta parte não tem interesse. Conforme se referiu deve ser escolhida a parte recta imediatamente a seguir ao sopé e evitar ultrapassar os limites práticos de densidade e exposição estabelecidos (Figura 10).

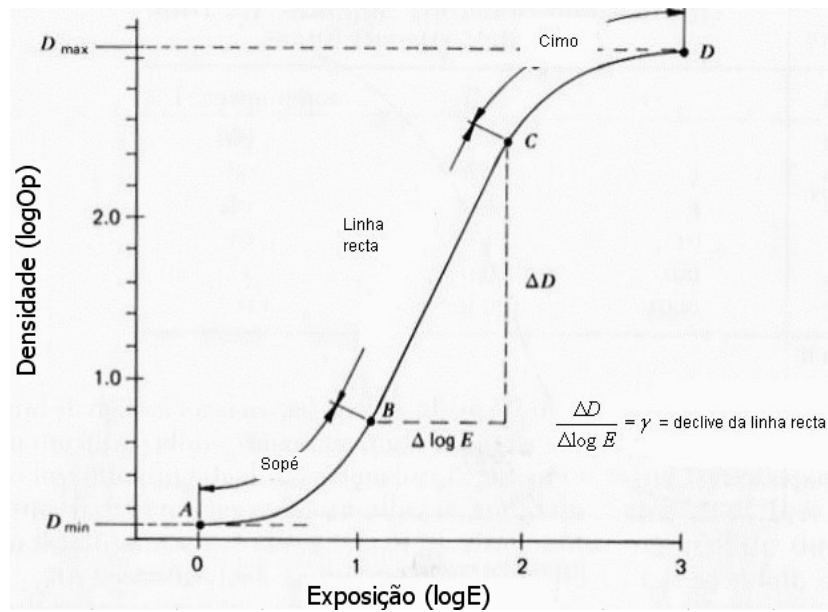


Figura 9: Componentes de uma curva característica – filme negativo preto e branco

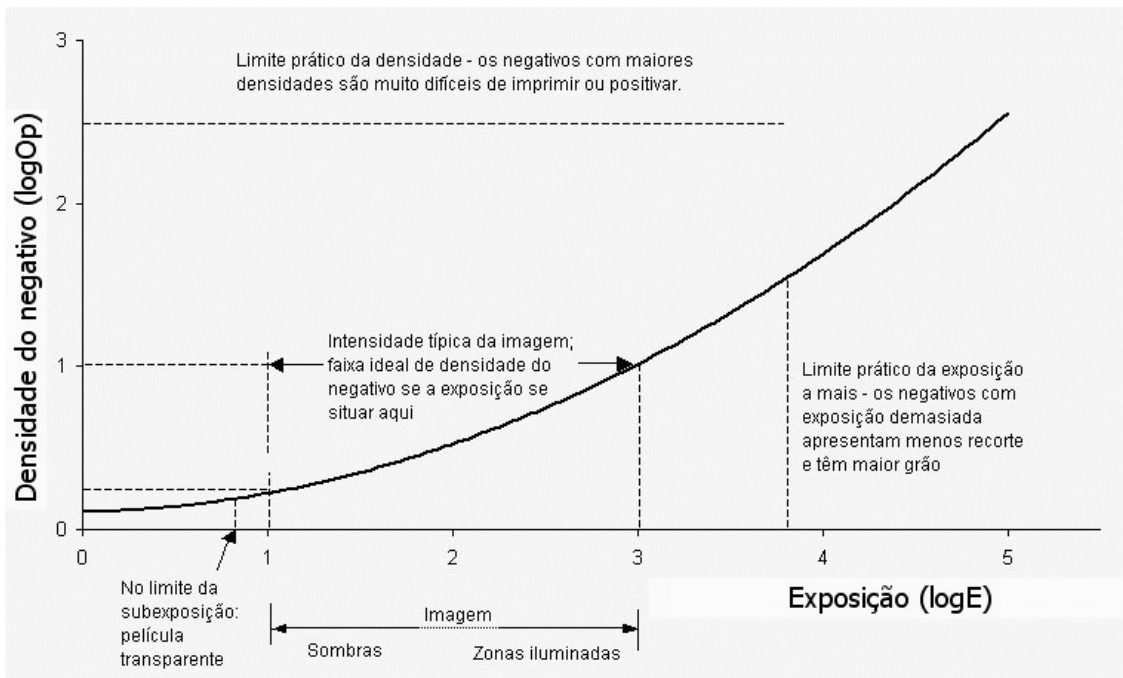


Figura 10: Curva característica de uma película negativa preto e branco (Langford, 1996)

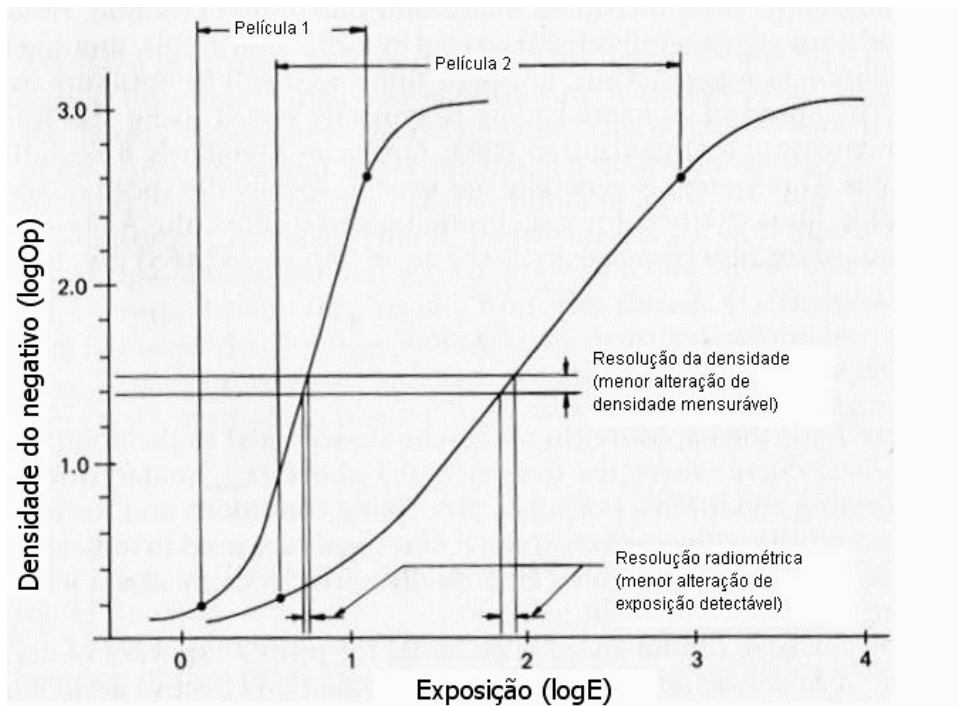


Figura 11: Latitude da exposição

Os fotómetros das máquinas fotográficas foram calibrados de modo que uma leitura geral no modo automático se localize a meio da curva característica, sensivelmente na zona inferior do troço linear. Considerando 100:1 como a escala média de contraste da imagem obtida na máquina fotográfica, isto significa que as sombras ficarão no sopé, mas não além da parte mais baixa utilizável [ $\log_{10}(100) = 2$ ]. As zonas iluminadas ficarão dentro do troço linear, mas nunca perto da parte em que a definição decai bruscamente, na parte superior do cimo (Figura 10).

Conforme se referiu na secção 3.2.1 poderá justificar-se a utilização de um fotómetro de leitura pontual tornando-se possível escolher os meios tons na cena quanto à sua colocação na curva. Pode-se regular o fotómetro para as zonas escuras, garantindo-se que fiquem no negativo com uma densidade da ordem de 0.2, ou por outro lado se as zonas iluminadas forem muito importantes regula-se a leitura do fotómetro para estas zonas.

Efectuando duas leituras pontuais – da sombra importante mais escura, e da zona importante mais iluminada – pode medir-se a escala de contraste da imagem. Se o valor obtido exceder o “normal”, lembrará ao operador que melhores resultados poderão obter-se com uma pequena sobreexposição e uma subrevelação. O inverso também é válido.

A rapidez de uma película assim como a dimensão do grão estão directamente relacionados com os valores de sensibilidade ISO ou ASA ou DIN característicos de cada película (Quadro 3). A latitude da exposição varia conforme o valor de sensibilidade. Por isso pretende-se analisar qual a sensibilidade ASA (ou ISO) mais adequada para a FAPMF.

ASA (American Standards Association). Sistema de normas americano entre os quais as relativas à rapidez dos materiais sensíveis fotográficos. Um valor ASA duplo de outro significa duas vezes maior rapidez na sensibilidade à luz. Actualmente substituído pela norma ISO.

ISO (International Standards Organization). Sistema de normas internacionais, entre os quais as relativas aos valores de rapidez ou sensibilidade ISO para as películas. Combina os anteriores valores ASA e DIN.

DIN (Deutsche Industrie Normen). Sistema de normas alemão entre as quais as relativas à rapidez das películas fotográficas, muito usado na Europa. Um aumento de 3 DIN significa um aumento de duas vezes a sensibilidade à luz. Substituído actualmente pela norma ISO.

Quadro 3: Equivalência de rapidez (adaptado de Langford, 1996)

Grão	ISO	ASA	DIN	Rapidez
Fino	25/15°	25	15°	Lenta
	32/16°	32	16°	
	50/18°	50	18°	
	64/19°	64	19°	
Médio	80/20°	80	20°	Média
	100/21°	100	21°	
	125/22°	125	22°	
	160/23°	160	23°	
	200/24°	200	24°	
Grande	400/27°	400	27°	Rápida
	800/30°	800	30°	
	1000/31°	1000	31°	
	2000/34°	2000	34°	
	3200/36°	3200	36°	

Outra característica importante em cada película é a sua *sensibilidade espectral* que se caracteriza pela faixa de comprimento de onda a que é sensível e como regista essa informação após a revelação. Indicam-se adiante no Quadro 12 as películas utilizadas em FAPMF, e na Figura 110 e na Figura 111 (em anexo) as curvas de sensibilidade espectral de cada uma das películas utilizadas.

### Fotografia Digital com sensor CCD

Estão perfeitamente vulgarizadas câmaras fotográficas e de vídeo digitais, com imagens captadas por dispositivos (matrizes) bidimensionais “*charge coupled devices*” (CCD), semi-condutores sensíveis à luz, produzindo imagens digitais num formato raster standard (JPEG, TIF, RAW, etc.).

Os fundamentos técnicos indicados para as películas químicas são também, em certa medida, válidos para o formato digital. Os valores de sensibilidade no formato digital, também se expressam por valores ISO. A dimensão dos grãos de sais de prata correspondem neste caso às dimensões dos elementos que formam a matriz CCD. Aparentemente, o formato digital pode ter

uma sensibilidade superior (velocidade do filme). Por exemplo, a câmara digital utilizada neste estudo, FujiS1Pro, permite uma variação da sensibilidade desde ISO320 até ISO1600.

A fotografia digital com sensores CCD tem vantagens sobre outras tecnologias, tais como fotografia tradicional, vídeografia e digitalização linear (varrimento). Em comparação com a fotografia tradicional, as câmaras digitais CCD apresentam maior *resposta linear*, grande sensibilidade radiométrica, grande amplitude espectral, grande estabilidade geométrica, sem necessidade de substituição de filmes (Lenz e Fritsch, 1990, King, 1992). Dado o rápido desenvolvimento da fotogrametria digital, prevê-se que a fotografia e a fotogrametria convencionais deixem de ter o papel que actualmente ainda possuem em mapeamento e reconhecimento dos recursos naturais. Provavelmente num futuro próximo, a fotografia digital com sensores CCD substituirá integralmente a película fotográfica em fotografia aérea (Graham, 1995, [http 55]).

As câmaras fotográficas digitais profissionais (comercializadas entre 2001 e 2003 ) usavam cartões de memória de dois tipos principais: CompactFlash ou SmartMedia. As capacidades de armazenamento variam desde um mínimo recomendado de 128MB até 4GB. Por razões de segurança é preferível a utilização de vários cartões de média capacidade (128 ou 256MB) em vez de um só de grande capacidade (1 a 4 GB).

Tecnicamente, os cartões CompactFlash são superiores aos SmartMedia porque têm maior capacidade de armazenamento e maiores taxas de transferência<sup>6</sup> (ou velocidade de registo). A segunda geração de CompactFlash, designada por Ultra CompactFlash permite velocidades ainda maiores (quer de registo quer de leitura).

Pesquisaram-se vários tipos de CompactFlash no mercado<sup>7</sup>: IBM Microdrive de 1GB, Toshiba de 128MB, Lexar Media Ultra CompactFlash de 256MB e SanDisk Ultra CompactFlash de 256MB. As velocidades de transferência dos dois primeiros tipos foram demasiado baixas. A velocidade do cartão Lexar Media Ultra CompactFlash é de 40× (ou seja 6MB.s<sup>-1</sup>) enquanto que a do SanDisk Ultra CompactFlash é de 60× (ou seja 9MB.s<sup>-1</sup>) tendo sido por isso seleccionado este último (Figura 112 em anexos).

## **Resolução**

A resolução duma imagem digital, quer tenha sido adquirida directamente neste formato quer resulte da digitalização de diapositivos ou de impressões de cópias em papel fotográfico,

---

<sup>6</sup> A taxa de transferência dos CompactFlash mede-se em kilobytes (KB) por segundo. Alguns fabricantes empregam também a terminologia usada na indústria dos CD-ROM em que 1× = 150 kilobytes (KB) por segundo.

<sup>7</sup> Sítios da Internet consultados: [http 53], [http 54], [http 56], [http 57], [http 58], [http 59], [http 60], [http 61]

mede-se em *pontos por polegada* (ppp)<sup>8</sup>. Cada pixel tem uma correspondência no terreno, em unidades métricas (m ou cm), sendo esta dimensão designada por resolução no terreno ou resolução espacial, que depende sobretudo da distância entre a câmara e o objecto fotografado.

Neste caso fez-se uma comparação entre fotografias aéreas verticais registadas directamente por sensores CCD e registadas em películas foto-sensíveis e com consequente digitalização num scanner. A distância entre a câmara e o objecto é neste caso a altura de voo.

Considerando igualdade de condições de aquisição (lentes iguais, mesma altura de voo, , etc.) a resolução num e noutro formato dependerá, por um lado, da dimensão da matriz CCD, e por outro, da granulometria da película (ou da sua sensibilidade) e da resolução óptica do scanner utilizado na digitalização.

## Filtros

O principal papel dum filtro é isolar um determinado comprimento de onda do espectro electromagnético e permitir que apenas este atravesse a lente. Cada filtro reduz por isso mais ou menos intensamente a luminosidade global que atravessa a objectiva, sendo necessário aumentar a abertura do diafragma para compensar a perda de luminosidade, de acordo com as características de cada filtro. Uma vez que o fotómetro incorporado nas câmaras fotográficas utilizadas mede a luz atrás da objectiva, essa compensação é efectuada automaticamente, se a câmara estiver no modo automático ou se for dada prioridade à abertura. No modo manual tem de se fazer a compensação manualmente (Langford, 1996).

Em FAPMF colorida, o único filtro que normalmente se aplica é o filtro UV ou “*Skylight*” ultravioleta, que remove exactamente esta radiação. É transparente, sendo sempre aconselhável colocá-lo para protecção da lente (Lillesand e Kiefer, 1987, Langford, 1996).

As películas infravermelho colorido devem ser protegidas com um filtro WRATEN12, de cor amarela, que filtra completamente a cor complementar, isto é, o azul. É também muitas vezes designado por “*minus blue*”. No caso das películas monocromáticas (pancromáticas ou infravermelho preto e branco), é também aconselhável aplicar um filtro amarelo, mas para eliminar apenas o efeito da dispersão e difusão atmosférica, sendo por isso um filtro menos intenso. O objectivo do filtro WRATEN12 é diferente e tem o seu fundamento no próprio espaço cromático RGB (adiante na secção 3.4.2) que apenas permite a inclusão de 3 cores para a formação de todas as outras. Em virtude de no IVC se pretender incluir uma outra radiação num espaço cromático RGB, a função do filtro é eliminar completamente a radiação azul (B) para que possa ser integrada a

---

<sup>8</sup> Também pode medir-se em  $\mu\text{m}$ .

radiação infravermelho (IVC), mas tingida de vermelho (R) na revelação. É por isso que neste tipo de película a vegetação se apresenta em tons de vermelho cuja actividade aumenta com a actividade fotossintética (Warner *et al.*, 1996, Marques, 1996).

### **Formatos**

As câmaras fotográficas analógicas classificam-se de acordo com as dimensões dos negativos:

- Câmaras de pequeno formato (35 mm): 24 × 36 mm
- Câmaras de médio formato (70 mm): 60 × 60 mm
- Câmaras de largo formato (230 mm): 240 × 240 mm

Além dos formatos considerados tem ainda de se referir o digital, nomeadamente as câmaras digitais com objectivas SLR que usam objectivas intermutáveis. A dimensão da matriz CCD das câmaras digitais deste tipo tem vindo a sofrer evolução no sentido de se aproximar das dimensões do filme de 35 mm. A câmara digital utilizada neste estudo apresenta uma matriz CCD com 23,3×15,6mm, que permite imagens com 6 milhões de pixels. Actualmente já existem matrizes CCD com formato 24×36mm, permitindo obter imagens com 11 milhões de pixels.

Utilizou-se também uma câmara de médio formato, Rolleiflex 6008 que, de acordo com o representante nacional da marca, tem um negativo com formato 42×56mm, sendo o formato 56×56 opcional. Convém referir que qualquer câmara fotográfica, mesmo de pequeno formato, pode teoricamente ser adaptada ao formato quadrado<sup>9</sup>. No entanto isso só é técnica e comercialmente possível no médio formato. Embora a matriz quadrada pudesse ser vantajosa, essa opção não foi considerada por razões financeiras.

### **Objectivas**

Em FAPMF aconselha-se a utilização de objectivas cuja distância focal seja próxima do comprimento da diagonal do negativo. Estas objectivas, designadas por “normais” (Langford, 1996), possuem um *campo de visão angular* (CVA) próximo de 45°, produzindo por isso imagens com menor rebatimento nas margens (Quadro 4). Todavia, em FAC, também se utilizam grandes angulares.

Conhecendo as distâncias focais das objectivas utilizadas e as dimensões dos negativos (ou da matriz CCD), é possível determinar a diagonal do negativo pelo teorema de Pitágoras, e através

---

<sup>9</sup> O formato rectangular é prático em fotografia convencional porque permite obter fotografias ditas de “corpo inteiro” ou “panorâmicas”, com menor desperdício de material.

da Eq. 9 encontrar o valor de CVA. Embora os valores de CVA e  $f$  possam ser fornecidos pelos fabricantes, este exercício é bastante expedito e útil para a sua compreensão. Na Figura 12 representa-se esquematicamente o CVA típico de uma câmara de 35 mm equipada com uma objectiva de 50 mm e considerando uma altura de voo de 800 m. Assumindo um terreno plano, a máxima extensão do terreno representada na diagonal do negativo é de 692.4 m.

Para as câmaras fotográficas utilizadas neste estudo indica-se no Quadro 5 a gama de objectivas disponíveis comercialmente para FAPMF de acordo com a sua distância focal.

No caso das novas matrizes CCD com 24×36mm deverá ser utilizada a objectiva com distância focal de 50 mm, daí resultando imagens com características semelhantes às obtidas com películas de pequeno formato.

Como se pode verificar no Anexo XXVII, para uma mesma altura de voo, utilizando as objectivas aqui descritas, existe uma ligeira diferença na extensão de terreno coberta pelas imagens adquiridas com uma objectiva de 28mm e com uma matriz CCD de 23.3×15,6mm por um lado e uma objectiva de 50mm com negativo com 24×36mm por outro lado, que se deve ao facto daquela possuir um CVA ligeiramente superior. Também por isso, o rebatimento nas margens no formato digital será ligeiramente maior do que no formato 24×36mm. A escala obtida em cada tipo de imagem varia consideravelmente.

Observando a Figura 13, verificamos que para uma dada objectiva, uma imagem rectangular permite cobrir uma área mais larga do que uma imagem quadrada e conseqüentemente, com maior rebatimento. Por isso, o formato quadrado das imagens é mais vantajoso do que o rectangular em FAPMF, tal como já se tinha referido atrás nesta secção.

Ainda através da Figura 13, verifica-se que as dimensões da diagonal da matriz CCD e o diâmetro da objectiva se igualam (28 mm). As restantes objectivas apresentam um diâmetro ligeiramente maior do que a diagonal dos seus negativos.

Pode verificar-se adiante na secção 5.2.2, que nem sempre serão requeridas imagens cujo rebatimento seja mínimo. Há situações em que um rebatimento ligeiramente exagerado pode ser desejável, nomeadamente para medição de alturas de objectos através da paralaxe diferencial, como sucede com a medição fotogramétrica da altura das árvores.

Quadro 4: Dimensões dos negativos (ou matriz CCD) e características das objectivas utilizadas em fotografia aérea

classificação	câmara	modelo	dimensões do negativo (mm)	diagonal (mm)	f (mm)	CVA (°)
super grande angular	largo formato profissional	profissional	240 × 240	339,41	90,00	124,123
grande angular	largo formato profissional	profissional	240 × 240	339,41	151,64	96,435
grande angular	largo formato profissional	profissional	240 × 240	339,41	210,00	77,885
normal	largo formato profissional	profissional	240 × 240	339,41	300,00	58,992
normal	médio formato	Rolleiflex 6008	56 × 42	70,00	80,00	47,259
normal	pequeno formato reflex	Nikon f503 ou f1	36 × 24	43,27	50,00	46,793
normal	pequeno formato reflex digital	Fuji S1Pro	23,3 × 15,6	28,04	28,00	53,196

Nota: (Campo de visão angular: até 75° = normal, de 75° a 100° = grande angular, superior a 100° = super grande angular)

Eq. 9 
$$CVA = 2 \times \arctg(D \times 0,5 / f)$$

Sendo:  $CVA$  = campo de visão angular (°)<sup>10</sup>

$D$  = diagonal da objectiva (mm)

$f$  = distância focal (mm)

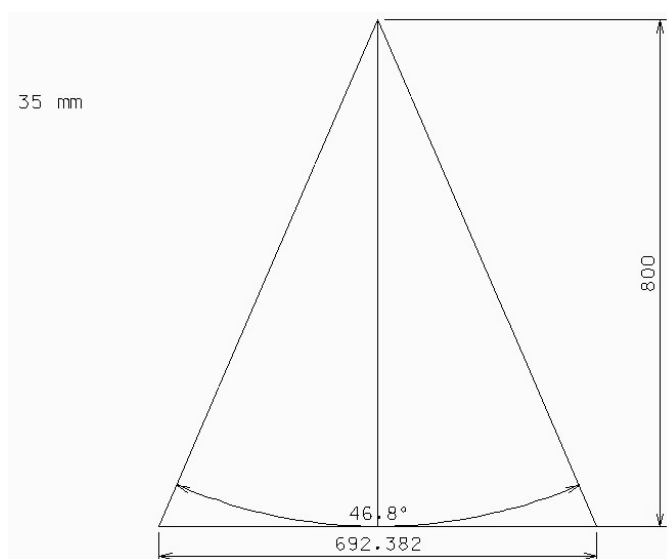


Figura 12: Campo de visão angular de uma câmara de 35 mm equipada com uma objectiva de 50 mm

<sup>10</sup> A função  $\arctg(x)$  dá o ângulo  $x$  em graus, radianos ou grados, dependendo da tabela utilizada [ $x \text{ rad} = x \cdot (180/\pi)$  graus]; [ $x \text{ rad} = x \cdot (200/\pi)$  grados]. Não esquecer, todavia, que a unidade SI de ângulo é o radiano.

Quadro 5: Gama de objectivas classificadas como normais disponível comercialmente

Tipo de fotografia	Diagonal (mm)	f (mm) gama disponível comercialmente
Película de Médio formato	$\sqrt[3]{56^2 + 42^2} = 70.00$	80 – 105
Película de Pequeno formato	$\sqrt[3]{24^2 + 36^2} = 43.27$	38 – 50
Digital Pequeno formato (CCD)	$\sqrt[3]{15.6^2 + 23.3^2} = 28.04$	28 - 38

Fonte: Langford, 1996

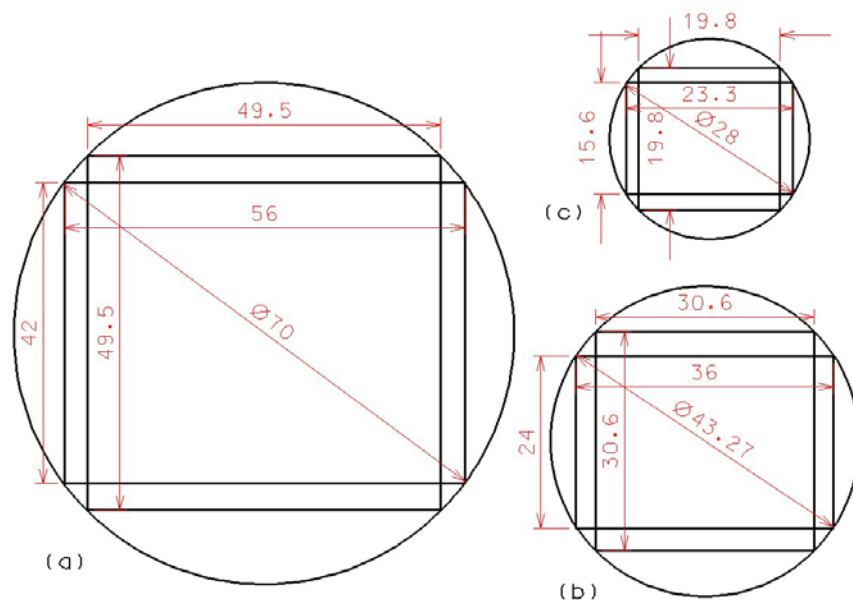


Figura 13: Diâmetros das objectivas e simulação das dimensões dos negativos (em mm) das 3 objectivas utilizadas neste estudo: (a) médio formato, (b) pequeno formato analógico, (c) pequeno formato digital.

### Aeronaves para Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato

Para FAPMF necessitamos de conjugar vários factores na escolha das aeronaves: modelo, custo de voo horário, disponibilidade em aeroclubes locais, capacidade de voar a baixa velocidade (80-90 nós), etc. A escolha incide sobretudo em aeronaves tipo “asa alta” monomotores. Apresenta-se no Quadro 6 a ficha técnica de 3 modelos de asa alta disponíveis em aeroclubes de Trás-os-Montes e Alto Douro.

O Cessna 150 é um dos mais versáteis aviões de treino existentes, contando-se por milhares o número de unidades fabricadas, dos quais muitos se encontram a voar. É um avião fiável e simples, com um trem de aterragem muito eficiente, características que o tornaram útil ao longo do tempo e que ajudarão a explicar a sua longevidade operacional. Foram fabricados nos Estados Unidos e em França, utilizando motores Continental ou Rolls Royce de 100 Cv. Podem estar equipados com depósitos de combustível normais ou de longo alcance.

O Cessna 152 é uma evolução do modelo Cessna 150. Para além de novo motor, levemente mais potente e mais económico, recebeu diversos melhoramentos aerodinâmicos que lhe melhoraram o desempenho.

O Cessna 172 é um modelo normalmente construído em Reims, França, sendo o avião de instrução mais utilizado em todo o mundo. É um avião de boa fiabilidade, fácil de pilotar, capaz de transportar 4 pessoas com relativa comodidade. O seu fabrico, que tinha sido suspenso na década de 80 por razões económicas, foi retomado em 1996 embora com algumas modificações (outro motor e equipamentos mais modernos). Tem ainda a grande vantagem de possuir uma bagageira, extremamente útil para a colocação do suporte das câmaras fotográficas (Figura 14).

Quadro 6: Ficha Técnica de aviões ligeiros Cessna

Modelo:	F 150	F 152	F 172
Fabricante:	Cessna Aircraft Corp.	Cessna Aircraft Corp.	Cessna Aircraft Corp.
Motor:	Continental O-200	Lycoming	Lycoming O-320-H2AD
Potência:	100 Cv	110 Cv	160 Cv
Velocidade Máx:	200 Km/h	250 Km/h	232 Km/h
Autonomia:	4 ou 6 horas	8,7 horas	7,4 horas
Raio de Acção:	825 ou 1.280 Km	1270 Km	1.389 Km
Consumo Horário Cruzeiro:	22 l/h	27 l/h	35,6 l/h
Peso Máximo autorizado:	726 Kg	841 Kg	1043 Kg
N.º de Lugares, incl. piloto:	2	2	4

Fonte: Cessna Aircraft Corp.

Skyhawk.Cessna.com



Figura 14: Cessna 172 SkyHawk

## Suportes para Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato

No que diz respeito aos suportes, ainda que a maiores custos, podem encontrar-se sistemas mais ou menos sofisticados. No entanto, mesmo com os sistemas mais simples, é possível obter excelentes fotografias. Por exemplo, Graham e Mills (1997), com um ultraleve e uma simples fixação de tripé adaptada à fuselagem, conseguiram obter excelentes fotografias digitais com uma câmara Kodak DCS460CIR, para utilização em fotogrametria e SIG. Também Knapp *et al* (1997) e Disperati *et al* (1998) captaram FAPMF de extrema importância para avaliações fitossanitárias em povoamentos florestais, quer através de fotografias oblíquas captadas directamente através da janela do avião quer através de fotografia vertical com um pequeno suporte colocado no rebordo da porta, também com uma câmara Kodak DCS460CIR. Por outro lado, Bäumker *et al* (1997) desenvolveram um suporte muito sofisticado com um sistema de estabilização de alta precisão e capaz de suportar vários dispositivos de detecção remota, excepto câmaras de largo formato. Este dispositivo está equipado com motores servos passo-a-passo coordenados por um sistema GPS diferencial e sistemas inerciais (INS), os quais permitem a rigorosa orientação em tempo real das câmaras, anulando as derivas e vibrações do avião e permitindo posteriormente realizar automaticamente a orientação interna das fotografias através de programas de fotogrametria apropriados (por ex.: Geomatica v.9.1). Este suporte foi montado na porta bagageira dum Cessna 172, semelhante ao utilizado neste estudo. Julga-se que este suporte possa ter evoluído a partir do concebido por Ekin (1988), que também nos aconselhou pessoalmente. Efectivamente este autor e piloto, já em 1988 tinha desenvolvido e construído um sistema que permitia realizar a aquisição de FAPMF a partir dum Cessna 172 pilotado e operado apenas com uma pessoa, conjugando um excelente suporte de câmaras, já com capacidade de correcção da deriva do avião em pleno voo, graças à integração de componentes electrónicos (bússolas electrónicas) e motores passo-a-passo. O suporte admitia uma câmara fotográfica de médio formato e uma câmara vídeo para auxiliar a navegação (Figura 15).



Figura 15: Suporte de câmaras retráctil desenvolvido por Ekin em 1988 com colocação na porta bagageira dum avião Cessna 172

Por consulta bibliográfica verificou-se que o modelo de avião de asa alta Cessna 172 é o mais utilizado para aquisição de FAPMF, embora qualquer um dos modelos Cessna descritos atrás fosse adequado para este fim. No entanto o modelo 172 é talvez o melhor porque tem uma lotação de 4 pessoas e possui uma bagageira com porta independente. Um ponto comum que se encontrou em todos os suportes de câmaras descritos na literatura é a sua capacidade de poder abrigar várias câmaras fotográficas e/ou vídeo, sem necessidade de alterar a estrutura do avião; a possibilidade da substituição dos rolos fotográficos em pleno voo; a orientação das câmaras paralela ao eixo do avião. Assim, a concepção do suporte deve incluir um sistema correção de deslizamento lateral do suporte que permita recolhê-lo (sistema retráctil).

### **Intervalómetro e Sistema de Navegação**

As fotografias aéreas são normalmente expostas em sequência numa linha de voo, com sobreposições, para se obter coberturas estereoscópicas completas. Para conseguir esta sequência utilizam-se dispositivos designados por intervalómetros, que controlam o disparo das câmaras fotográficas a intervalos regulares, de acordo com o planeamento de voo e sincronizados com sistemas de navegação aérea assistidos por GPS. Existem dispositivos mais ou menos sofisticados, desde aqueles inteiramente electrónicos até aos modelos mais simples de possível construção caseira (Graham e Read, 2002).

Tal como referem Heimes *et al.* (1992), é fundamental utilizar-se um sistema de navegação que permita cumprir rigorosamente a missão aerofotográfica planeada. Da cabina do avião não é possível observar o terreno que se está a sobrevoar, possuindo-se apenas uma visão frontal ou lateral. Por isso, antes de aparecer o sistema GPS, que permite uma navegação aérea automática, uma solução prática para obter a visão vertical consistia em utilizar uma câmara de vídeo ligada a um pequeno monitor (Ekin, 1994, Ekin, 1988), mas a navegação com GPS é mais eficiente (Henry *et al.*, 2002). Efectivamente, o sistema GPS pode indicar com grande rigor a posição geográfica, desde que seja feita a correcção diferencial em tempo real (Ackermann and Schade, 1993), o que exige todavia que o receptor GPS móvel, instalado na aeronave, esteja em comunicação via rádio com um receptor fixo, situado numa posição fixa conhecida. Castro *et al.* (2004) verificaram, no entanto, que os erros de deriva com navegação GPS, sem correcção diferencial, são suficientemente pequenos para permitir realizar a navegação aérea em missões destinadas à gestão florestal (neste caso fitossanitária), pois obtiveram um erro médio lateral na trajectória de 53.3m, e um desvio médio vertical de 35.1 m, cujo efeito conjugado sobre a sobreposição lateral foi de cerca de 21 %, no caso da fotografia analógica com uma câmara Nikon de 35 mm, à escala de 1:10400.

### 3.2.2 Estereoscopia e Ortofotografia digital

É muito frequente a utilização de ortofotografia em papel, em Portugal. Não sendo recente a sua utilização para estudos urbanos (escala de 1:10 000), para estudos agrícolas e florestais, só a partir de 1995 se tornou disponível a ortofotografia digital.

Foi feita em 1995 uma cobertura aerofotográfica pelas Companhias de Celulose de Portugal através da sua associação (ex ACEL agora CELPA) em parceria com a Direcção Geral das Florestas (DGF) à escala 1:40000, em película infravermelho colorido. Foram ortorrectificadas com resolução no terreno de 1m a partir de PCT retirados das cartas militares 1:25 000. A qualidade da ortorrectificação não é constante, apresentando algumas desvios consideráveis. A sua distribuição foi feita durante alguns anos pelo extinto CNIG, sendo actualmente da responsabilidade do Instituto Geográfico Português (IGP).

Também em 1995, algumas regiões vitícolas com denominação de origem controlada, por iniciativa do Instituto do Vinho e da Vinha (IVV), iniciaram a utilização de ortofotografia digital no cadastro rústico. O caso da Região Demarcada do Douro (RDD) foi o primeiro exemplo, quando executou em 1995 um voo exclusivo para esse fim à escala 1:5 000 e produziu ortofotografia digital de elevada resolução no terreno. Por estereorestituição foi criada a altimetria digital com curvas de nível a uma equidistância natural de 2 m.

O Instituto Nacional de Garantia Agrícola (INGA) também tem feito várias coberturas aerofotográficas desde a década de 90. Produziu ortofotografia digital com resolução no terreno de 1 m a partir da cobertura de 2000 à escala de 1:40000 em filme pancromático. Esta é a cobertura integral ortorrectificada mais recente.

Quer o IVV quer o INGA têm preferido a utilização de filme pancromático preto e branco em detrimento do filme colorido normal, cuja utilização tem vindo a aumentar para estudos urbanos.

Com o aumento de utilizadores de SIG aumentou o uso de ortofotografia digital. A vectorização da informação geográfica passou a ser feita sobretudo sobre essas imagens georreferenciadas, e cada vez menos, usando um estereorestituidor ou estação fotogramétrica digital, porque estes equipamentos são muito dispendiosos e requerem formação específica complexa, só se justificando em casos muito particulares, quando grande rigor planimétrico seja absolutamente indispensável.

A percepção tridimensional é por vezes necessária, por exemplo quando se pretende fazer a medição da altura dos objectos. Para isso são utilizados aparelhos específicos e pelo menos um par estereoscópico de fotografias. Estes aparelhos sofreram uma evolução tecnológica muito significativa, desde o estereoscópio de espelhos e barra de paralaxe, que ainda hoje se utilizam,

passando pelo estereorestituídor analógico, estereorestituídor analítico e finalmente o estereorestituídor digital (estação fotogramétrica digital). Os estereorestituídores analógicos e analíticos estão praticamente em desuso nos dias de hoje, mas derivaram por evolução tecnológica dos estereoscópios. Como é sabido, serviram para realizar praticamente toda a altimetria das cartas militares 1:25 000 do IGeoE. Também foram utilizados com sucesso noutros tipos de trabalho, por exemplo em cartografia temática digital em zonas de montanha (Castro, 1997). Mais recentemente foram desenvolvidas soluções inteiramente digitais - estações fotogramétricas digitais. Existem algumas instituições em Portugal que já há alguns anos utilizam estações fotogramétricas digitais “Intergraph Z-Image” nomeadamente, por exemplo o IGeoE, e a Câmara Municipal de Oeiras, entre outros. Embora os procedimentos sejam já mais simples que nos estereorestituídores analógicos e analíticos, estes aparelhos não deixam de ser estereorestituídores, implicando por isso operadores devidamente habilitados em fotogrametria. Independentemente da evolução tecnológica de cada sistema, a precisão na medição das alturas é semelhante em qualquer tipo de estereorestituídor, analógico, analítico ou digital. No entanto, a facilidade de operação é muito maior no digital. Tal como é referido por Castro (1997), só a orientação dum estereomodelo num sistema analítico pode demorar cerca de 3 horas, enquanto que a medição da altura dum qualquer objecto localizado nesse estereomodelo pode demorar apenas cerca 10 minutos. Isso quer dizer que é frequente dedicar-se um longo período de tempo na preparação do modelo estereoscópico para enquanto a medição propriamente dita, “parece ser relativamente banal”. Num estereorestituídor digital, uma vez criado e guardado em memória o estereomodelo, este poderá ser activado quase instantaneamente mais tarde, sempre que necessário, constituindo-se esse facto numa grande vantagem.

A observação do modelo tridimensional digital é na sua essência semelhante à do modelo tridimensional analógico. Implica a fusão no cérebro de duas imagens do mesmo local captadas com uma diferença de paralaxe. Depois de devidamente orientadas e corrigidas, estas imagens são sobrepostas no monitor do computador e observadas através de óculos especiais de cristais líquidos (LCD) que criam uma percepção tridimensional.

Actualmente, este tipo de ferramentas pode estar incluído opcionalmente em programas informáticos de PDI. Por exemplo, o sistema Geomatica v.9.1 da PCI inclui um pacote de fotogrametria digital que permite a sua utilização como estereorestituídor digital<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> Recursos mínimos de hardware: computador equipado com uma placa gráfica 3D, monitor com taxa de varrimento superior a 100 Hz, emissor infravermelhos e óculos LCD e memória RAM superior a 500MB.

Mesmo sem estes acessórios, é possível produzir ortofotografia digital caso se disponha de altimetria digital vectorial (curvas de nível em formato vectorial - dgn, dwg, dxf, etc.) ou directamente dum modelo digital do terreno (MDT) na forma matricial. Qualquer um destes produtos se encontra disponível comercialmente pelo IGeoE. A produção de ortofotografia implicará então a recolha de vários PCT, a criação ou aquisição do MDT, a digitalização de fotografia aérea e a ortorrectificação. Desde 1998 que o Departamento Florestal da Escola Superior Agrária de Bragança (ESAB) dispõe deste tipo de ferramenta (programa Orthoengine v.6.2 da PCI). Produziram-se neste estudo, com esta ferramenta, diversas ortorrectificações de FAC (adiante na secção 3.5.3). Em 2003 houve a possibilidade de testar a nova versão deste programa (Geomatica v.9.1 da PCI) com o qual se efectuou também a ortorrectificação de algumas FAPMF. Rodrigues (2000) e Castro (2004) utilizaram o programa Orthoengine na ESAB para ortorrectificar FAC antigas e avaliar a evolução do território no distrito de Bragança, desde 1950 até hoje. De referir ainda que este programa também permite ortorrectificar imagens de satélite. No entanto, a inserção e georreferenciação das imagens de satélite foi feita com o programa ErMapper 6.2 (secção 3.5.4).

Como exemplo de utilização de fotogrametria digital em inventário florestal indicamos Gong *et al.* (2002), os quais desenharam tridimensionalmente a forma da copa de árvores individuais de um povoamento cerrado de coníferas. Utilizaram para isso imagens fotográficas com escala média de 1:2400 e uma estação fotogramétrica digital. Conseguiram obter precisões na estimativa do raio da copa e altura da árvore de 90% e 94% respectivamente.

Quando a fotografia aérea se apresenta somente em papel, esta precisa de ser digitalizada por um sensor linear com varrimento, vulgarmente designado por *scanner*. Estes *scanners* podem ser específicos ou não (modelos profissionais ou modelos vulgares). Os modelos específicos são geometricamente mais rigorosos, mas a diferença de custo associada à qualidade pode não justificar o investimento. As principais limitações dum aparelho vulgar são as suas dimensões, as quais deverão ser superiores às das fotografias convencionais (23 × 23 cm), sob pena de não serem incluídas as marcas fiduciais dos cantos da fotografia, fundamentais para a ortorrectificação. A ESAB dispõe dum *scanner* Modelo Epson de dimensões superiores a A3, com elevada resolução, adequado para a digitalização de FAC.

A digitalização de negativos e de diapositivos pode ser feita com vantagem através de *scanners* apropriados. Como se verá adiante, quando tratarmos da fotografia de pequeno formato, é bastante mais económico adquirir um digitalizador de slides e negativos, encomendando-se apenas a revelação. Por outro lado, a área impressa por fotografia é ligeiramente inferior à existente no negativo. Isso não se verifica digitalizando o negativo, pelo que também neste aspecto haverá vantagens no digitalizador.

As fotografias captadas com câmaras não métricas ou digitais, não possuem marcas fiduciais. Para se realizar a orientação interna de cada fotografia durante o processo de ortorrectificação terão de se considerar como marcas fiduciais os pixeis dos cantos da imagem.

A utilização dum câmara fotográfica métrica apresenta sempre vantagens em relação a outra equivalente não métrica porque vem normalmente acompanhada dos parâmetros de calibração. Além disso contém marcas fiduciais. É assim possível realizar com rigor a orientação interna de cada fotografia, permitindo restituir a atitude do avião no momento da captação de cada imagem. Por este processo são removidos ou atenuados os erros introduzidos na fotografia devidos a distorções de curvatura das lentes, distância focal e efeitos de perspectiva. Outro parâmetro que é incluído no ficheiro de calibração é a auto colimação do ponto principal P (mm). Numa câmara ideal, o ponto principal coincide exactamente com a intersecção de duas rectas perpendiculares alinhadas por marcas fiduciais opostas. No entanto, a maioria das câmaras apresenta um ligeiro desvio, indicado no ficheiro de calibração, que causam efeitos de perspectiva radiais a partir deste ponto. No entanto, os efeitos causados pelas aberrações nas lentes são normalmente pequenos (1 a 2  $\mu\text{m}$ ), e acima de tudo, inferiores aos provocados pelo equipamento de digitalização (cerca de 25  $\mu\text{m}$ ). Embora as câmaras fotográficas não métricas também possam ser calibradas, optámos por aceitar esta margem de erro e não realizámos a calibração das câmaras fotográficas, até porque também desconhecíamos os erros introduzidos na digitalização das imagens.

A resolução no terreno que se pode obter através da digitalização das fotografias depende da escala, da qualidade granulométrica da película, da câmara, das objectivas e da resolução óptica do *scanner*. A resolução óptica (RO) dum bom modelo de escritório ultrapassa largamente a resolução no terreno possível de se obter através da granulometria da fotografia.

Para uma resolução no terreno pretendida, D, e um factor de escala da fotografia conhecido, E, a resolução óptica RO a aplicar num scanner é dada pela seguinte equação:

Eq. 10 
$$RO_{(ppp)} = \frac{1}{(D / E)}$$

Aplicando esta equação às fotografias da CELPA e do INGA, pode afirmar-se que, na sua digitalização, foi utilizada uma resolução óptica cerca de 1016 ppp. Obviamente que há uma resolução de digitalização limite, a partir da qual, já não acarretará acréscimo de resolução no terreno, porque irá estar directamente dependente da granulometria da película utilizada e da escala real da fotografia. Castro *et al.* (2004) verificaram ser essa a resolução óptica máxima possível a aplicar na fotografia do INGA porque, por medições directas com barra de paralaxe, não foi

possível obter uma resolução no terreno menor que 1m. A resolução óptica de 1016 ppp está ao alcance dum qualquer *scanner* vulgar disponível comercialmente.

O passo seguinte da ortorrectificação é a orientação externa. Esta consiste em transformar o sistema de coordenadas do terreno no sistema de coordenadas fotográficas. Este processo requer a recolha de numerosos e precisos PCT. Basicamente a orientação externa revela a posição e orientação da câmara do momento de captação duma imagem. Muitas câmaras fotogramétricas já estão equipadas com GPS e Sistema Inercial de Navegação (INS) ou Unidade de Medição Inercial (IMU). Estes sistemas recolhem a orientação exterior do avião em cada momento de acordo com um sistema ortogonal de 3 eixos XYZ (Figura 16), coincidindo o eixo X com a linha de voo. O GPS ajusta este sistema de coordenadas fotográficas ao sistema de coordenadas terrestres reduzindo-se substancialmente o número de PCT necessários. No nosso caso, como não dispúnhamos de tal equipamento, tivemos necessidade de recolher um número bastante grande de PCT por fotografia (mínimo de 16 PCT por imagem aplicando um polinómio de 4º grau). A orientação da câmara é dada por omega (eixo de rotação em X), phi (eixo de rotação em Y), e kappa (eixo de rotação em Z). As coordenadas X, Y e Z e os ângulos omega, phi e kappa são designados pelos 6 parâmetros da orientação externa. (Geomatica User Manual, 2003, http 65, Wolf, 9999). Lillesand e Kiefer (1987) indicam uma tolerância de 3º em cada eixo de rotação, a partir do qual os seus efeitos fotogramétricos deixam de ser negligenciáveis. O programa produz relatórios relativos a cada fotografia ortorectificada indicando estes desvios.

São muito frequentes as operações de georreferenciação em SIG. Por exemplo, quando se pretende integrar num SIG cartografia publicada em papel, esta é digitalizada num *scanner* e ajustada à cartografia existente através duma transformação afim (transformação polinomial de 1º grau que requer 3 pontos de controlo). Esta georreferenciação (e não ortorrectificação) é passível de se realizar através dum qualquer programa de SIG. Com programas mais especializados, como por exemplo o IRAS/C, é possível realizar transformações polinomiais de grau superior (2º, 3º ou maior) de maior complexidade e rigor. (Spencer *et al.*, 1997).

A ortorrectificação de fotografias aéreas, realizada por programas específicos, tais como o Orthoengine, permite a correcção integral das imagens de forma muito mais eficiente e rigorosa que os ajustamentos com o IRAS/C, porque considera directamente a modelação tridimensional do terreno e aplica uma transformação polinomial de grau superior. Necessita obviamente dum elevado número de PCT.

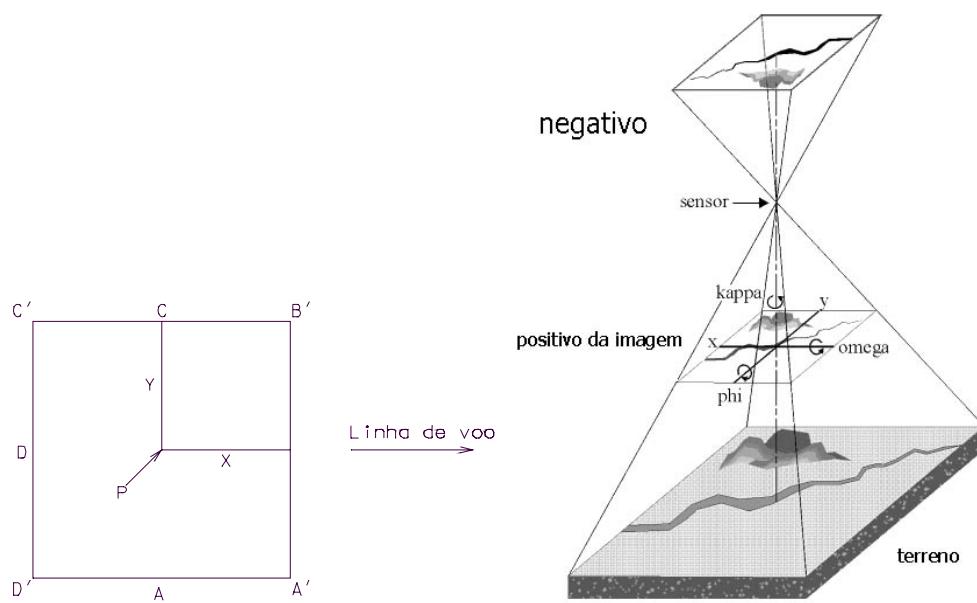


Figura 16: Determinação da geometria de uma fotografia aérea vertical<sup>12</sup> (adaptado de Wolf, 1996)

<sup>12</sup> De acordo com o manual do programa OrthoEngine o ângulo entre  $A'C' - B'D'$  é de  $90^\circ$  com uma tolerância de  $\pm 3$  segundos e o centro fiducial deve estar dentro dos limites de tolerância de  $0,01\text{mm}$  do ponto de auto colimação P.

## 3.3 Imagens de Satélite

### 3.3.1 Processamento Digital de Imagens de Satélite

#### Introdução

A realização de inventários periódicos florestais de eucalipto e Pinheiro bravo têm sido levados a cabo por parcerias entre as empresas de celulose e o Estado, tendo como base a fotografia aérea em película pancromática preto e branco (PPB) de 1985 e infravermelho colorido (IVC) de 1990 e de 1995. Também foram realizadas em Trás-os-Montes algumas tentativas de inventário florestal por classificação automática de imagens digitais captadas por satélite através da aplicação de algoritmos de classificação supervisionada e não supervisionada sobre imagens dos sensores SPOT e Landsat. Desses estudos destacamos os realizados por Castro (1997) e por Aranha (1998), os quais não conseguiram obter índices de concordância de Cohen (K e KHAT) superiores a 0.85, para os vários estratos florestais considerados, sobretudo devido ao grande fraccionamento da ocupação do solo florestal e também pela semelhança entre as reflectâncias de estratos florestais e arbustivos. No entanto, dadas as novas disponibilidades de imagens de satélite e ainda dos conhecimentos adquiridos no seu processamento, justifica-se uma nova tentativa de experimentação de cartografia temática florestal.

As imagens digitais de satélite são normalmente classificadas automática ou semi-automaticamente embora também possam ser interpretadas visualmente, tal como se de fotografia aérea se tratassem (Costa e César, 2001, Hoffman e Markman, 2001). Nos casos de interpretação visual, podem alterar-se os valores originais dos seus números digitais (ND), sendo apenas fundamental a correcção geométrica da imagem. No entanto, a avaliação quantitativa da reflexão solar da superfície terrestre registada sobre imagens multiespectrais requer a correcção atmosférica destas, a qual carece por sua vez da calibração absoluta da radiância do sensor (Goetz e Kindel, 1998).

#### Correcção radiométrica

De acordo com Jensen (1996), a energia electromagnética (EE) da radiação Solar que incide na Terra, é reflectida e posteriormente é captada por sensores em órbita terrestre sofrendo entretanto duas principais perturbações (ou atenuações) radiométricas (Figura 17): *atenuação atmosférica* e *atenuação topográfica*. Analisaremos aqui apenas o fenómeno da atenuação atmosférica.

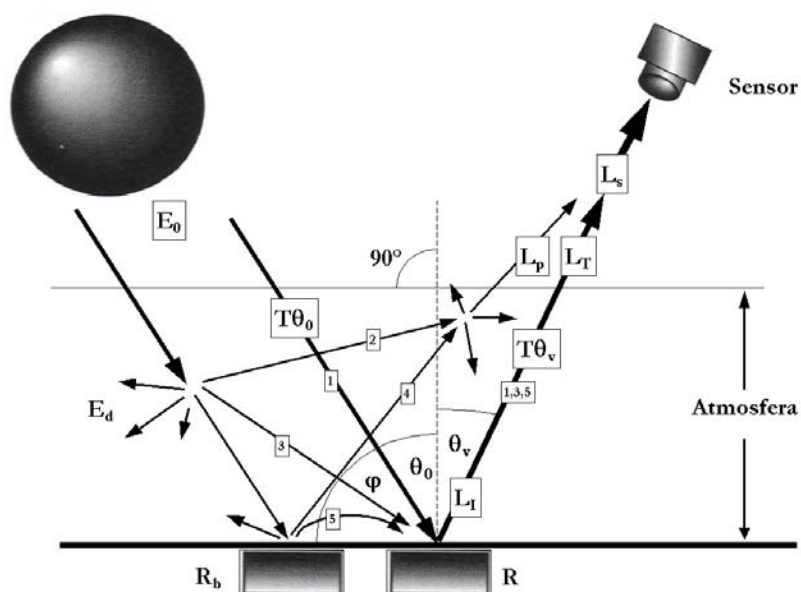


Figura 17: Fluxo de energia em DR (adaptado de Jensen, 1996)

$E_0$  - <sup>13</sup>radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$E_{0\lambda}$  - <sup>14</sup>radiação solar espectral no topo da atmosfera ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ )

$E_d$  - radiação difusa do céu ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$E_{d\lambda}$  - radiação espectral difusa do céu ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ )

$E_g$  - radiação global incidente na superfície ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$E_{g\lambda}$  - radiação global espectral incidente na superfície ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ )

$\tau$  - transparência óptica normal da atmosfera

$T_\theta$  - transmitância atmosférica sob um ângulo zenital  $\theta$

$\varphi$  - altura do Sol (ou ângulo entre o plano do horizonte e os raios solares, num dado instante)

$\theta_0$  - ângulo zenital do Sol

$\theta_v$  - ângulo zenital do satélite ou ângulo de varrimento

$\mu$  -  $\cos \theta$

$R$  - reflectância média do alvo (%)

$R_b$  - reflectância média do fundo de contraste resultante dum pixel vizinho (%)

$L_s$  - <sup>15</sup>radiação total registada no sensor ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ )

<sup>13</sup> Radiação solar: emissão e propagação de energia solar na forma de ondas electromagnéticas, medida em  $\text{Wm}^{-2}$

<sup>14</sup> Radiação solar espectral: radiação solar num dado intervalo de comprimento de onda, medida em  $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$

<sup>15</sup> É também uma medida de radiação, expressa em  $\text{Wm}^{-2}$  mas como se trata da radiação à entrada do sensor é uma medida absoluta de reflectância expressa em  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ . Os NDs das imagens resultam deste valor.

- $L_T$  - componente da radiação total registada no sensor, correspondente à irradiação do alvo de interesse ( $Wm^{-2}sr^{-1}$ )
- $L_I$  - radiação intrínseca do alvo ( $Wm^{-2}sr^{-1}$ ) (medido com um radiómetro portátil, isenta da influência atmosférica)
- $L_p$  - componente da radiação total que atinge o sensor, resultante de dispersões atmosféricas múltiplas ( $Wm^{-2}sr^{-1}$ )

Teoricamente a energia electromagnética que é captada por um sensor é uma função absoluta da quantidade do fluxo radiante, emitida ou reflectida pelo Campo de Visão Instantâneo (CVI) em estudo (faixa de território que é registado em cada imagem do sensor). No entanto, a situação real não é essa havendo outras fontes de energia ditas parasitas. O fluxo de energia pode esquematizar-se de uma forma muito realista através da análise da Figura 17:

Situação 1 - Energia electromagnética (EE) proveniente do sol ligeiramente atenuada pela atmosfera, antes de atingir o alvo, e reflectida neste para o interior do CVI do sensor.

Situação 2 - Parte da EE é direccionada directamente para o CVI devido a dispersões atmosféricas sem sequer atingir a superfície terrestre, traduzindo-se em ruído.

Situação 3 - Componente de EE que incide no alvo não proveniente directamente do Sol mas resultante de dispersão, absorção e re-emissão atmosférica.

Situação 4 - Componente de EE com a mesma origem da situação anterior, mas que não incide no alvo. Esta componente de EE é reflectida ou dispersa por terreno vizinho (neve, asfalto, solo, água, e/ou vegetação, etc.) e direccionada para o CVI, constituindo-se em ruído.

Situação 5 - Componente de EE com a mesma origem das situações anteriores e que depois de incidir em terrenos vizinhos do alvo é reflectida ou dispersa novamente pela atmosfera para a área de estudo e por sua vez para o interior do CVI.

Para um dado intervalo de comprimento de onda  $[\lambda_1, \lambda_2]$  a radiação solar que atinge a superfície da Terra,  $E_g$ , é o integral:

$$\text{Eq. 11} \quad E_g = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (E_{0\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda$$

No entanto, apenas uma pequena porção desta energia é reflectida em direcção ao sensor satélite. Assumindo que a superfície da Terra é um reflector difuso, o fluxo total radiante da superfície da Terra para o sensor é:

Eq. 12 
$$L_T = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RT_{\theta_v} (E_{0\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda$$

Esta equação não é totalmente exacta porque há outras fontes de energia parasitas resultantes da Radiação difusa do céu ( $E_d$ ), nomeadamente a Energia de Percurso ( $L_p$ ), representada na Figura 17 pelos caminhos ② e ④ e que não provém directamente do Sol, porque é previamente dispersa pela atmosfera ou reflectida por locais vizinhos do CVI.

A energia total recebida pelo sensor será então<sup>16</sup>:

Eq. 13 
$$L_S = L_T + L_p$$

No vazio assume-se que há transmitância total da energia que o atravessa. Isto quer dizer que há total transparência, o que não acontece na atmosfera. A transmitância da atmosfera expressa-se por<sup>17</sup>:

Eq. 14 
$$T_{\theta} = e^{-\tau / \cos \theta}$$

em que  $\tau$  = transparência óptica normal da atmosfera

$\theta$  = ângulo zenital do Sol.

A permeabilidade óptica da atmosfera, para um determinado comprimento de onda,  $\tau(\lambda)$ , resulta da soma de todos os factores atenuantes da atmosfera: a difusão de Rayleigh ( $\tau_m$ ), a difusão Mie (não-selectiva) ( $\tau_p$ ) e a absorção ( $\tau_a$ ):

Eq. 15 
$$\tau(\lambda) = \tau_m + \tau_p + \tau_a$$

sendo  $\tau_a = \tau_{H_2O} + \tau_{O_2} + \tau_{O_3} + \tau_{CO_2}$ , a absorção pelos principais gases da atmosfera (vapor de água, oxigénio, ozono e anidrido carbónico)

A difusão de Rayleigh, que ocorre quando o diâmetro das partículas é inferior ao diâmetro do comprimento de onda ( $d < \lambda$ ), é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda incidente ( $1/\lambda^4$ ) sendo por isso muito mais intenso nos comprimentos de onda mais curtos (azul, violeta e ultravioleta). Este fenómeno é responsável pela aparência azul do céu (Eastman, 2003).

A difusão de Mie, ou difusão por aerossóis<sup>18</sup>, vapor de água, ocorre quando  $d \approx \lambda$ , sendo vulgarmente conhecido por fenómeno de neblina. É uma difusão não-selectiva afectando igualmente todos os comprimentos de onda.

---

<sup>16</sup> A correcção atmosférica (secção 3.3.1) pretende minimizar os efeitos de  $L_p$ .

<sup>17</sup> Poderemos decompor a transmitância da atmosfera em duas componentes:  $T_{\theta_0}$  que é a capacidade da atmosfera transmitir energia desde o sol até o alvo e  $T_{\theta_v}$  que é a capacidade da atmosfera transmitir energia desde o alvo até o sensor

Os gases principais da atmosfera tais como oxigénio, dióxido de carbono, ozono e vapor de água (principalmente estes dois últimos) causam absorção atmosférica sobretudo nos comprimentos de onda superiores a 0,8µm (infravermelho).

Por estas razões, a difusão atmosférica poderá escurecer a cena (maior intensidade de cinzento) enquanto que a absorção poderá clarear a cena (menor intensidade de cinzento) (Figura 18).

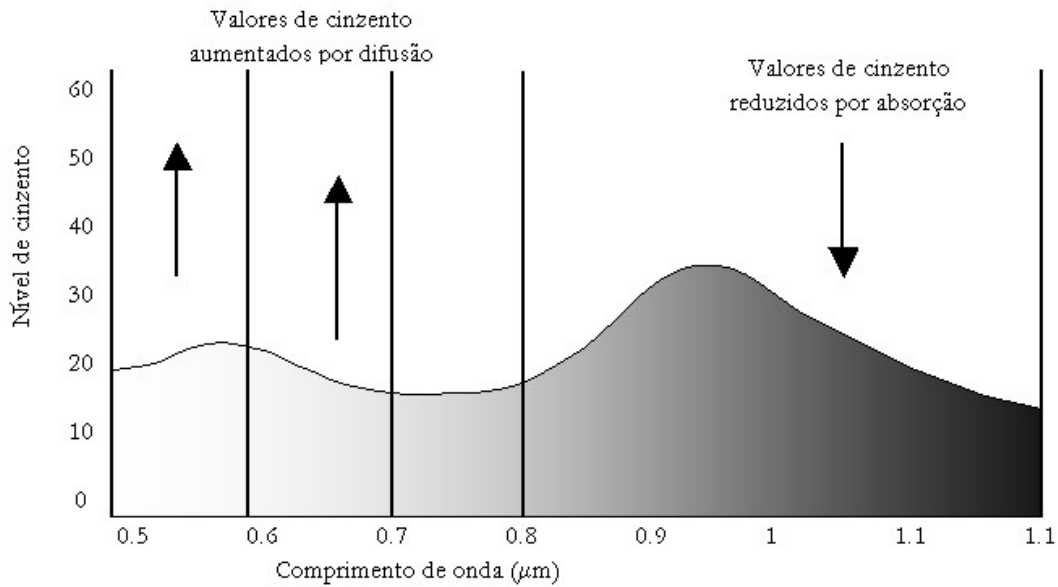


Figura 18: Efeito combinado da absorção e difusão atmosféricas nos valores de cinzento registados a partir de imagens Landsat (Adaptado de: Jensen, 1996)

Analisados os efeitos de difusão e absorção atmosférica e considerando que os sensores utilizados em DR captam intervalos relativamente estreitos de comprimentos de onda, é possível re-equacionar as Eq. 11 e Eq. 12, simplificando para:

Eq. 16 
$$E_g = E_{0\Delta\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 \Delta\lambda + E_d \text{ e}$$

Eq. 17 
$$L_T = \frac{1}{\pi} RT_{\theta_v} (E_{0\Delta\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 \Delta\lambda + E_d)$$

Sendo  $E_{0\Delta\lambda}$  = média da radiação espectral no intervalo da banda  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ . (Quadro 7)

<sup>18</sup> Um aerossol é uma suspensão gasosa de partículas sólidas ou líquidas microscópicas.

Quadro 7: Valores das Irradiâncias espectrais solares ( $Wm^{-2}\mu m$ ) aplicados pela NASA nas imagens LANDSAT ETM+)<sup>19</sup>

Banda	Irradiâncias espectrais solares
TM1	1969,00
TM2	1840,00
TM3	1551,00
TM4	1044,00
TM5	225,70
TM7	82,07
PAN	1368,00

Fonte: [http 22]

A radiação total que alcança o sensor ( $L_s$ ) será:

$$\text{Eq. 18} \quad L_s = \frac{1}{\pi} RT_{\theta_p} (E_0 \Delta \lambda T_{\theta_0} \cos \theta_0 \Delta \lambda + E_d) + L_p$$

Para um mesmo local e hora ao longo do ano a elevação do Sol acima do horizonte está dependente da época do ano porque a declinação do Sol se altera. Assumindo que, durante a aquisição da imagem, o ângulo zenital do Sol é o mínimo (meio dia solar), a normalização da altura do Sol consiste em dividir cada pixel pelo seno da elevação do Sol ou pelo cosseno do ângulo zenital do Sol.

Ao longo do ano também se altera a distância entre a Terra e o Sol (Figura 19). Ainda segundo Lillesand e Kiefer (1987) e pela análise da Eq. 19 a radiação solar na superfície da Terra decresce à taxa do quadrado da distância, ignorando os efeitos atmosféricos.

$$\text{Eq. 19} \quad E = \frac{E_0 \cos \theta_0}{d^2}$$

Em que: E = radiação solar normalizada

$E_0$  = radiação solar para uma distância média entre o Sol e a Terra

$\theta_0$  = ângulo zenital do Sol (indicado nos metadados da Landsat, ou em tabelas astronómicas ou náuticas)

d = distância entre o Sol e a Terra, em Unidades Astronómicas (UA) (1 UA =  $149,6 \times 10^6 km$ )

---

<sup>19</sup> O programa Idrisi aplica automaticamente um valor de Irradiância espectral solar muito próximo do apresentado pela NASA, para cada uma das bandas seleccionadas. Esse programa não refere a fonte dos dados nem a fórmula de cálculo.

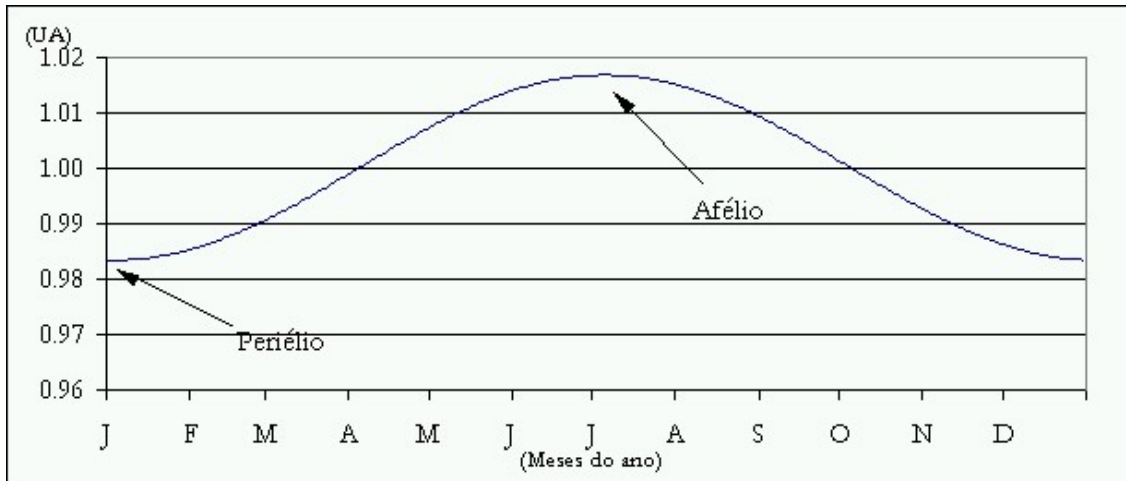


Figura 19: Distância entre o Sol e a Terra ao longo do ano, em Unidades Astronômicas (UA) ( $1 \text{ UA} = 149,6 \times 10^6 \text{ km}$ )<sup>20</sup>

Para melhor compreensão destas matérias foi-nos útil consultar as seguintes páginas da WEB: [http 10], [http 13], [http 14] e [http 16]

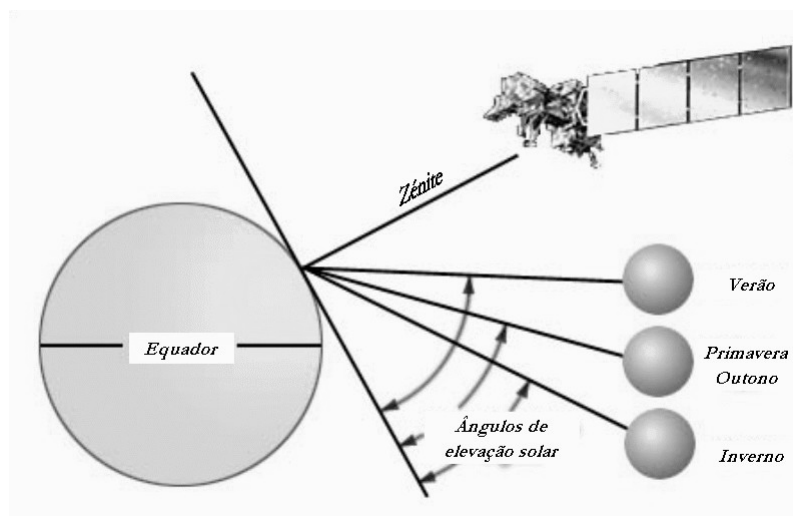


Figura 20: Alterações da elevação do Sol ao longo do ano. (Adaptado de Lillesand e Kiefer, 1987).

O valor ou número digital (ND) de cada pixel numa imagem de satélite Landsat ETM+ (8-bit) não é um valor calibrado de reflectância. Esta forma de representar reflectâncias em níveis de cinzento pressupõe uma relação linear entre os valores ND e a irradiação espectral num intervalo restrito de comprimentos de onda, correspondente a cada uma das bandas. A equação da recta

<sup>20</sup> Afélio:  $152,6 \times 10^6 \text{ km}$  (milhões de quilómetros). Acontece por volta do dia 3 de Julho de cada ano. Periélio:  $147,5 \times 10^6 \text{ km}$ .

resultante é a Eq. 20, cujos parâmetros constam dos metadados associados a cada uma daquelas imagens (Lillesand e Kiefer, 1987; Aranha, 1998, [http 25], [http 26]).

$$\text{Eq. 20} \quad ND_i = L_{s_i} \times \text{Ganho}_i + \text{OrdenadaNaOrigem}_i$$

Em que:  $ND_i$  = número digital de cada pixel para a banda  $i$

$L_{s_i}$  = radiação total que alcança o sensor no intervalo de comprimento de onda relativo à banda  $i$  expressa em  $Wm^{-2}sr^{-1}$ .

$\text{Ganho}_i$  = factor de ganho usado para a banda  $i$ , valor indicado nos metadados da imagem e que representa o declive da recta de regressão entre o ND e a radiação total que alcança o sensor.

$\text{OrdenadaNaOrigem}_i$  = ordenada na origem para a banda  $i$ , valor indicado nos metadados da imagem e que representa a ordenada na origem da recta de regressão referida, i.é., a radiação total que alcança o sensor ( $Wm^{-2}sr^{-1}$ ) correspondente ao ND mínimo.

A radiação total ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ) que alcança o sensor para gerar esta imagem de formato 8-bit, pode ser determinada através da Eq. 20. A radiação total que alcança o sensor, correspondente ao menor e ao maior valor digital possível numa dada banda, simboliza-se por  $L_{min}$  e  $L_{max}$  respectivamente. Estes valores são particularmente importantes na calibração de imagens Landsat 5 e anteriores, em que a radiação é calculada através da seguinte equação.

$$\text{Eq. 21} \quad \text{Radiância} = L_{min} + \left[ \frac{Dn}{MaxDn} \right] \times (L_{max} - L_{min})$$

Os metadados das imagens Landsat 7 já indicam os valores de Ganho, Ordenada na origem,  $L_{min}$ ,  $L_{max}$ , etc., e também um factor de conversão de radiação em reflectância para cada uma das bandas<sup>21</sup>.

Seguidamente, a reflectância absoluta no topo da atmosfera ( $\rho_i$ ), ( $Wm^{-2} sr^{-1}\mu m^{-1}$ ) num determinado intervalo de comprimento de onda correspondente a uma banda  $i$ , é determinada pela

---

<sup>21</sup> Aplicaram-se simultaneamente a Eq. 22 e este factor de conversão e obtiveram-se resultados semelhantes. (Consultar: [http 21], [http 26], [http 19], [http 52]).

Eq. 22 que entra em conta com valores tabelados de  $E_{0i}$  e com a data e hora da captação da imagem<sup>22</sup>.

Este procedimento está frequentemente integrado em algoritmos de correcção atmosférica como por exemplo o módulo ATMOSC utilizado pelo programa Idrisi, sendo ainda bastante útil para comparações entre imagens TM com datas diferentes.

Eq. 22

$$\rho_i = \frac{\pi L_s d^2}{E_{0i} \times \cos \theta_0}$$

### **Correcção atmosférica**

Eastman (2003) admitiu 4 métodos de correcção atmosférica: (a) método de Subtracção do Objecto Negro, (b) Método Cos(t) de Chavez, (c) Método da Equação de Transferência Radiactiva Total, e (d) o Modelo de Reflectância Aparente.

Em qualquer dos métodos, são introduzidas uma série de bandas, assim como os parâmetros atmosféricos e os parâmetros de visibilidade, resultando uma imagem de reflectâncias proporcionais, expressa em formato numérico real, assumindo valores entre 0 e 1.

### **Imagens Landsat 5 e anteriores**

Para a correcção atmosférica de imagens Landsat 5 e anteriores é normalmente aplicada uma metodologia anterior também proposta por Chavez, consistindo na correcção do histograma pelos seus valores mínimos, tendo em consideração que a dispersão atmosférica está correlacionada entre as várias bandas. Assim, é tomada uma banda como referência, normalmente a TM1 por ser a mais afectada pela dispersão, e a partir do valor mínimo dessa banda calcula-se a correcção atmosférica para as restantes bandas. (Chavez (1988), Chavez (1989)). São tomados em consideração os seguintes parâmetros: a) valores de calibração de cada banda (Quadro 8) publicados pela EOSAT (EOSAT Landsat Technical Notes No. 1, Agosto 1986), b) estimativa das condições atmosféricas no momento da aquisição da imagem. Foram consideradas por Chavez (1988) cinco modelos atmosféricos distintos: muito claro, claro, moderado, brumoso, muito brumoso. É assumido um modelo de acordo com a análise das condições desse dia e de acordo com a análise da importância do valor mínimo em cada uma das bandas.

---

<sup>22</sup> Na data e hora da captação dependem a distância entre o Sol e a Terra e o ângulo zenital do sol

Quadro 8: Valores de calibração de cada banda utilizados na conversão dos NDs TM em valores de reflectância ( $a_0$  e  $a_1$  – parâmetros da regressão)

banda	$a_0$	$a_1$	$E_0$ ( $Wm^{-2}$ )
1	-0,06662095	0,04197408	138,25
2	-0,15732250	0,10345120	139,04
3	-0,11269370	0,06499743	89,10
4	-0,23285630	0,11705160	147,70
5	-0,08640033	0,02726504	44,60
7	-0,05113922	0,01692211	21,33

Fonte: adaptado de Gilabert *et al.*, 1986 in Chuvieco, 1990

## Imagens Landsat 7

### *Método de subtração do objecto negro*

O efeito da dispersão atmosférica é normalmente um aumento uniforme dos valores digitais nas bandas do visível. É necessário encontrar na imagem locais com reflectância normalmente nula, tais como lençóis de água profunda. Qualquer valor acima de zero nestas áreas significa dispersão atmosférica e poderá ser subtraída a toda a série de valores.

Este método permite ainda, adicionalmente, compensar as variações da radiação solar e o ângulo de elevação solar dependente da época do ano. Necessita-se para isso que o ND de neblina seja determinado sempre da mesma maneira, a data e hora da imagem, o comprimento de onda central da banda espectral, a elevação solar e o parâmetro de conversão de radiação. Estes parâmetros estão normalmente incluídos na documentação apensa às imagens.

Este método assume que a transmitância atmosférica é 1 e a radiação espectral difusa do céu é 0. O efeito devido à difusão atmosférica estima-se especificando o ND de objectos que normalmente possuem reflectância nula (lagos de água límpida profunda).

### *Modelo Cos(t)*

Este método foi desenvolvido por Chavez (1996) e pretende reduzir dificuldades na correcção atmosférica, resultantes da frequente escassez de informação. Incorpora todos os elementos do modelo anterior (para a remoção do efeito de neblina). Adicionalmente, incorpora um procedimento de estimativa dos efeitos dos gases atmosféricos responsáveis pela dispersão Rayleigh, assumindo-se que a radiação espectral difusa do céu é nula e estimando-se a transmitância atmosférica pelo  $\cos\theta_0$  e simultaneamente normaliza-se o valor da reflectância o que permite a análise de imagens multitemporais. A dispersão atmosférica estima-se especificando o ND dos objectos que deveriam ter reflectância nula, tal como no “Método de subtração do objecto negro”.

### *Método da equação de transferência radiactiva total*

Este método é o mais exigente quanto a informação necessária para a sua aplicação. Além de todos os outros elementos já atrás enumerados, requer ainda uma estimativa da transmitância da atmosfera e a radiação espectral difusa do céu. Desconhecendo-se estes valores são assumidos por defeito respectivamente os valores 1 e 0.

### *Método de Reflectância Aparente*

É o Método mais simples. Não são feitas correcções relativas à absorção atmosférica uma vez que se assume a atmosfera transparente (assume transmitância da atmosfera de 1,0 e irradiância espectral difusa nula, e efeito na componente da radiação total que atinge o sensor devido a neblina também nula).

## **3.4 Fusão de imagens**

### **3.4.1 Introdução**

Há várias definições de fusão de imagem, de acordo com os objectivos. De modo geral, a fusão de imagens consiste em combinar duas ou mais imagens para formar uma nova imagem, utilizando um algoritmo apropriado com o objectivo de refinar e/ou melhorar a informação e a sua interpretação. Pode melhorar-se a interpretação uma vez que se combinam dados com diferentes características (espectrais, espaciais e temporais), dando uma visão mais abrangente dos objectos registados. Dos vários exemplos de fusão de imagem consultados, os mais frequentes referem a fusão de imagens multiespectrais com uma imagem pancromática. A operação de fusão deverá manter as características espectrais originais e maximizar a informação espacial oriunda das imagens de alta resolução (Carper *et al.*, 1990 e Chavez *et al.*, 1991).

Através da fusão de imagens de detecção remota a realização de inventários florestais poderá tornar-se menos dependente de coberturas aerofotográficas aproveitando-se assim a grande disponibilidade actual de imagens de satélite (cada sensor realiza várias coberturas por ano existindo vários sensores com aplicação possível) (Castro e Aranha, 2004).

Os factores prévios a considerar, de acordo com Pohl e Genderen (1998) são o objectivo / aplicação do utilizador, o tipo de dados, a técnica de fusão, o pré-processamento e a forma de combinação de dados. A técnica mais adequada depende dos objectivos do trabalho e frequentemente só se consegue afinar empiricamente. O sucesso desta técnica implica ainda uma nova aprendizagem interpretativa das imagens obtidas com recurso, quando necessário, a

reconhecimento de campo, porque a gama de cores obtida pode não ter uma correspondência directa com a nossa percepção cromática dos objectos naturais.

São vários os exemplos de fusão de imagens digitais com sucesso. Os mais frequentes envolvem a fusão de dados Landsat TM e SPOT XS com SPOT pancromático. Mais recentemente, são também referidas as possibilidades de aplicação sobre imagens com maior resolução espacial (IKONOS e QuickBird), fusão com imagens de sensores activos radar e ainda fotografia aérea digitalizada. (Franklin *et al.*, 2001, Richetti, 2001, Schetselaar, 2001, Hégarat-Masclé, *et al.*, 2000, Saraf, 1999, Pohl e Genderen, 1998, Mascarenhas *et al.*, 1996, Franklin e Blodgett, 1993, Chavez *et al.*, 1991, Ehlers, 1991, Carper *et al.*, 1990, Chavez e Bowell, 1988, Chavez, 1986, Welch e Ehlers, 1987, Cliche e Bonn, 1985).

Pohl e Genderen (1998), enunciaram vários exemplos de fusão digital com diversos objectivos:

- melhoria ou refinamento de imagem (Chavez *et al.*, 1991);
- correcções geométricas (Strobl *et al.*, 1990)
- melhoria de condições de visão estereoscópica para estereofotogrametria (Bloom, *et al.* 1988);
- realce de objectos dificilmente detectáveis sobre dados singulares (Leckie, 1990);
- adição de dados para melhor classificação (Schistad-Solberg *et al.*, 1994);
- detecção de alterações a partir de imagens multi-temporais (Duguay *et al.*, 1987);
- substituição de informação em falta numa imagem (por exemplo, devido a nuvens, sombras) por informação doutra imagem (Aschbacher e Lichtenegger, 1990).

Considerando uma floresta como uma entidade geográfica complexa, constituída por diversas comunidades de vegetação, caracterizadas por dominância de uma ou outra forma, quando analisada através de imagens de DR, é provável que se consiga definir um dado fenómeno físico ou geográfico dominante para cada intervalo de escala (Menges *et al.*, 2001). Num caso extremo, as árvores podem ser consideradas individualmente como a entidade principal quando analisadas através de imagens de DR de grande escala, por exemplo Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato (FAPMF). Para Marceau *et al.* (1994), in Menges *et al.* (2001), a representação visual numa imagem de DR dum determinado objecto é optimizada num dado intervalo de escala. Como a escala numa imagem de DR depende da sua resolução espacial, então, existe uma resolução espacial óptima dos dados de DR para cada estudo efectuado.

Conforme foi referido por Castro *et al.* (2004), a resolução espacial da DR comercialmente disponível em Portugal não é suficiente para determinadas análises em silvicultura pelo que a maximização da informação espacial oriunda de dados de alta resolução poderá trazer vantagens. No entanto, o acréscimo de resolução só deverá ser feito até um certo limite porque poderá

provocar ausência de agregação dos objectos pretendidos e, obviamente, também acarreta um acréscimo de volume de informação digital.

A fusão de imagens pode efectuar-se por um conjunto muito variado de metodologias ou suas combinações. Os três níveis de processamento mais frequentes são (Chavez *et al.*, 1991, Pohl e Genderen, 1998):

- Intensidade - Croma - Saturação (IHS)
- Análise de componentes principais (ACP)
- Filtragem passa alto associada a um processo de adição ou multiplicação pixel-por-pixel

Chavez (1984) refere que também é possível fazer a fusão por substituição directa de bandas numa composição colorida RGB. Por exemplo, em vez de se criar uma composição colorida RGB com as bandas TM 2, 3 e 4, combinar as bandas TM 2, 3 com fotografia aérea. No entanto, este autor refere que o método pode criar imagens de fraca qualidade quando a diferença de resolução espacial for muito grande, não tendo por isso sido aplicado esse método neste estudo.

Como principais objectivos da fusão de imagens de DR neste estudo estiveram a melhoria da informação espacial e a análise da melhor combinação espectral de todas as fontes de dados de DR disponíveis. As metodologias de fusão foram testadas neste estudo sobre imagens Landsat TM, ETM+ e ortofotografia digital (3.5.4) através dos programas Idrisi (versões Idrisi32 v.1, v.2 e Kilimanjaro) e ErMapper<sup>23</sup>.

### 3.4.2 Espaços coloridos RGB e HIS

Um sistema ou espaço cromático pode descrever-se a partir de um reduzido número de bandas com as quais é possível produzir toda a gama de cores visíveis. Por exemplo, os monitores coloridos manipulam as cores aditivas primárias, vermelho (R), verde (G) e azul (B), combinando diferentes percentagens de cada uma para produzir toda a gama de cores.

Os espaços cromáticos RGB e Croma (H) – Intensidade (I) - Saturação (S), designados abreviadamente por HIS, foram inicialmente descritos graficamente por Smith (1978), e posteriormente adaptados também por Buchanan e Pendergrass (1980) e Haydn *et al.* (1982) (Figura 21). Na forma simplificada, o espaço cromático RGB considera-se representado num sistema de três eixos, correspondendo cada um a uma das suas componentes aditivas primárias. A

---

<sup>23</sup> Embora não se coloque em causa a eficiência da operação de fusão de imagens com este programa, o utilizador não tem acesso directo aos algoritmos de fusão contrariamente ao que acontece com o Idrisi. As capacidades gráficas do ErMapper são superiores mas o Idrisi constitui uma boa alternativa eficiente e económica.

representação geométrica tridimensional do espaço cromático HIS é um cone (Figura 22) definido por um vector e dois ângulos (coordenadas esféricas). O eixo vertical define a Intensidade (I), a co-latidade define a Saturação (S) e a abertura angular da circunferência da base do cone define o Cromo (H). A correspondência entre ambos os espaços coloridos foi esquematizada graficamente por Schetselaar (2001), na forma de um cubo e de um cone (Figura 22). A “Commission Internationale de L'Eclairage” (CIE) baseia-se em três curvas espectrais, considerando que a representação cromática consiste na luminosidade de um objecto e dois quocientes de luminosidade relacionados com o Cromo e a Saturação. Também na Figura 23 se representa o formato RGB, característico deste tipo, associado a monitores.

O espaço de cor RGB é utilizado nos monitores de raios catódicos por manipulação das cores aditivas primárias. As impressoras de jacto de tinta utilizam o sistema CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black) com os mesmos princípios mas com as cores substractivas primárias, Ciano, Magenta, Amarelo, e ainda o preto para economia de tinta, evitando a produção de preto através da mistura em iguais percentagens das cores substractivas primárias. O espaço de cor HIS descreve fisiologicamente as cores de acordo com uma percepção humana das cores. Os programas informáticos de processamento de imagem permitem a transformação entre os dois espaços coloridos RGB e HIS (Eastman, 2003).

As vantagens principais do espaço cromático RGB residem na sua simplicidade e no facto deste sistema ser o usado em monitores coloridos.

A formação das cores no espaço RGB pode ser explicada matematicamente: os dados relativos a três bandas, R, G, B, representam-se numa escala de 8 bits, e mais recentemente de 11 bits, sendo processados digitalmente. Os distintos valores de cada banda permitem a sua interpretação. Os valores digitais correspondentes à intensidade do vermelho, do verde e do azul, são armazenados numa tabela designada por “look up table” (LUT), que regula as voltagens a transmitir pelo tubo catódico. As manipulações da LUT e do histograma da imagem permitem melhorar o contraste da imagem para interpretação visual (Russ, 1995).

De forma a realçar determinados objectos podem alterar-se as correspondências de bandas. Por exemplo, pode criar-se uma composição colorida normal utilizando as imagens TM3, TM2 e TM1 na ordem R, G, B, ou uma composição colorida falsa cor se utilizarmos as imagens TM4, TM3 e TM2. Este tipo de composição colorida é de certa forma usual devido à larga utilização da fotografia aérea infravermelho colorido em fotointerpretação. Em vez da TM4 também se podem utilizar as TM5 e TM7 que já pertencem ao domínio do infravermelho médio. É muito comum utilizar outras bandas para a diferenciação de materiais da superfície. A TM5, por exemplo, colocada entre duas bandas que absorvam a água, provou ser extremamente útil na determinação da humidade quer do solo quer das folhas da vegetação (Eastman, 2003).

Schetselaar (2001), apresenta como principal desvantagem do espaço cromático RGB a ausência de relação linear entre as variações numéricas nesse espaço e as correspondentes percepções humanas. Por exemplo, se aumentarmos a saturação, a correspondente variação nos valores RGB não segue uma relação linear e o seu efeito na alteração de cor poderá não ser perceptível. Esta limitação explica, por si só, a grande popularidade do espaço cromático HIS.

De acordo com Carper *et al.* (1990), o espaço cromático HIS contém a informação espacial na componente Intensidade e a informação espectral nas componentes Croma e Saturação. A intensidade caracteriza a claridade total (brilho ou luminosidade) de uma cor. O cromata caracteriza o comprimento de onda médio ou dominante que contribui para a cor. Pode descrever-se numa escala circular progressivamente a partir do vermelho para o verde e deste para o azul e novamente para o vermelho (Figura 21). A saturação especifica a pureza da cor relativamente ao cinzento. Está ligada ao conceito de cores vivas e pálidas, correspondendo respectivamente a saturações elevadas e reduzidas. Cores nada saturadas são totalmente cinzentas, independentemente do cromata.

Foram desenvolvidos numerosos algoritmos para converter valores de estímulos RGB em parâmetros da percepção cromática humana e vice versa, diferindo sobretudo no método de cálculo da componente intensidade da transformação. De modo geral, todos esses métodos tendem a produzir valores semelhantes para Cromata e Saturação.

Para se calcularem os valores HIS dum pixel necessita-se da definição do espaço cromático no qual a relação entre RGB e as coordenadas da cor HIS sejam conhecidas.

O Cromata dum pixel pode determinar-se pela proporção relativa dos seus inputs RGB.

A Intensidade dum cor RGB é função da magnitude dos input primários sendo nalguns algoritmos definida pela grandeza do seu maior input. Usando esta definição, o modelo ilustrado na Figura 21 produzirá valores de intensidade semelhantes para um pixel vermelho com um valor RGB [255, 0, 0] e para um pixel branco [255, 255, 255].

Nos modelos documentados por Smith (1978) e por Haydn *et al.* (1982), a Intensidade é calculada através da média dos três valores RGB. Usando este sistema, o pixel branco será três vezes mais intenso que o pixel vermelho.

A “Association for Computing Machinery” (ACM, 1979 *in* Carper *et al.*, 1990) aplica um algoritmo que calcula a intensidade baseada na média do maior e do menor input primário RGB.

Pohl e Genderen (1998) descrevem matematicamente a transformação RGB→HIS a partir da Equação 3-1.

Equação 3-1<sup>24</sup>

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{6} & -2/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Em que:  $H = \tan^{-1}(v_2/v_1)$

$$S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$

A transformação inversa HIS→RGB é muito útil no processo de fusão de imagens, convertendo-se os dados no espaço de imagem original (Equação 3-2).

Equação 3-2

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{3} & -2/\sqrt{6} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

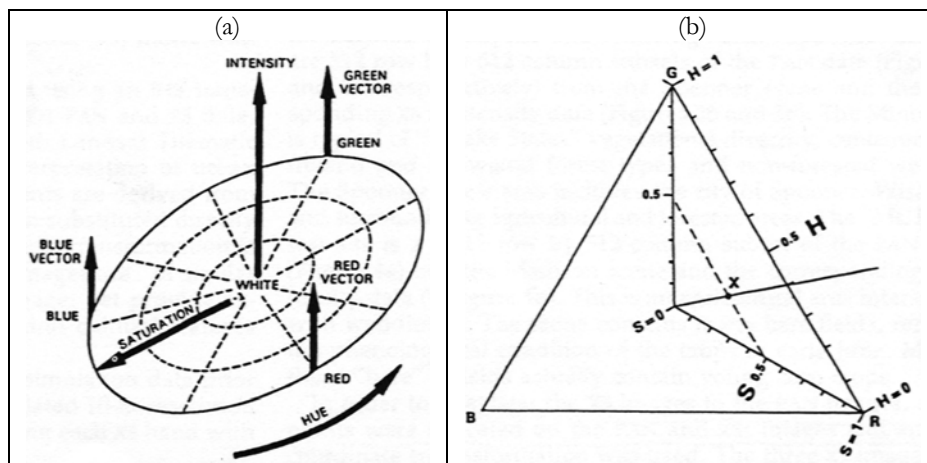


Figura 21: (a) RGB e HIS - sistemas de coordenadas (adaptado de Buchanan e Pendergrass (1980)); (b) Representação HIS simplificada (adaptado de Smith (1978) e Haydn *et al.* (1982)).

<sup>24</sup> Matriz de passagem ou de transição

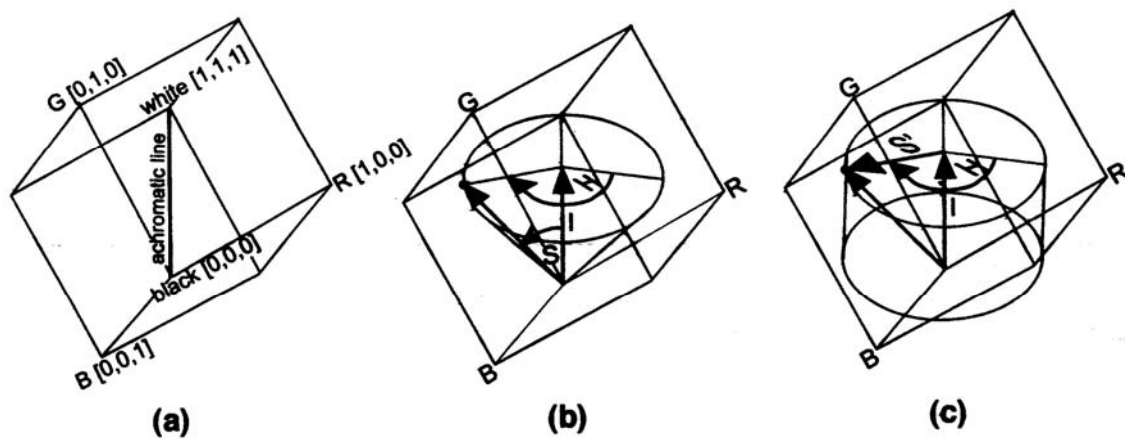


Figura 22: Representação gráfica dos espaços coloridos RGB e HIS e sua correspondência mútua (adaptado de Schetselaar, 2001)

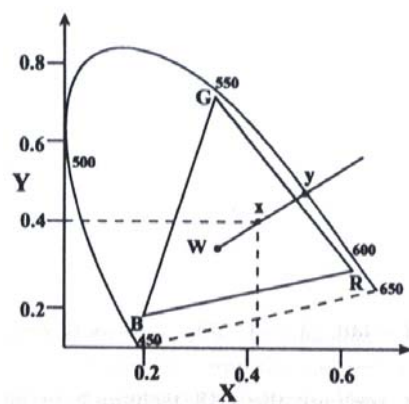


Figura 23: Diagrama cromático CIE (Haydn *et al.* 1982)

### 3.4.3 Precisão da interpretação de imagens

Uma carta de uso ou ocupação do solo deve referir o tipo e data de aquisição das imagens de DR utilizadas para a sua criação, assim como a forma de interpretação (visual ou automática) e ainda a precisão obtida. Para a estimativa da precisão da interpretação foram utilizados dois coeficientes, Índice de Fiabilidade Global ( $F_g$ ) (Marques, 1996), e Índice de Concordância de Cohen (KIA), proposto por Cohen (1960) e analisado por Rosenfield e Fitzpatrick-Lins (1986), que derivam de matrizes de contingência. Ambos se destinam a analisar dados qualitativos com distribuição binomial.

O procedimento implica uma prévia verificação de campo, através duma amostragem cuja intensidade por estrato considerado é determinada pela Eq. 23, usada no caso de distribuições binomiais (Congalton e Green, 1999, Congalton, 1988, Rosenfield *et al.* 1982).

Eq. 23 
$$n_j = \frac{\chi^2 \cdot p \cdot q}{SE^2}$$

Em que:  $n_j$  = intensidade de amostragem numa distribuição binomial por estrato  
 $\chi$  = abscissa da curva normal (tabela  $t$  de Student) para um determinado nível de probabilidade  $\alpha$  e para  $n-1$  graus de liberdade em que  $n$  é o número de parcelas na amostra de treino  
 $p$  = percentagem estimada de acertos ( $\geq 0.85$ )  
 $q$  = percentagem estimada de erros ( $\alpha = q = 1-p \leq 0.15$ )  
 $SE$  = erro de amostragem admissível que se assume igual a 10% ( $SE=0.10$ )  
 $N$  = número total de parcelas considerando a divisão da área total pela menor área interpretável  
 $n_i$  = número de amostras de treino relativamente ao estrato  $i$   
 $k$  = número de estratos  
 $n = n_i \times k$

No entanto, Tortora (1978) in Congalton e Green (1999), considerando que existem sempre  $k$  tipos de estrato em análise, preferiram calcular a intensidade de amostragem através da distribuição multinomial, apresentando uma forma simplificada de cálculo da intensidade de amostragem considerando um cenário pessimista (Eq. 24). Nesta perspectiva, a intensidade de amostragem será sempre algo superior mas a sua aplicação é bastante mais simples.

Eq. 24 
$$n = 0.25 \cdot B / (SE)^2$$

Em que:  $n$  = intensidade de amostragem numa distribuição multinomial  
 $B$  = valor de CHI quadrado com 1 grau de liberdade e probabilidade  $\alpha/k$   
 $k$  = número de estratos  
 $p$  = percentagem estimada de acertos ( $\geq 0.85$ )  
 $q$  = percentagem estimada de erros ( $\alpha = q = 1-p \leq 0.15$ )  
 $SE$  = erro de amostragem admissível que se assume igual a 10% ( $SE=0.10$ )

Relativamente à dimensão de cada amostra, Congalton e Green (1999) consideraram que não deve ser considerado o número total de pixels numa imagem. Consideram mais lógico realizar agrupamentos, por exemplo de 3x3 pixels. Alertam no entanto para o facto de que, tal como acontece com uma fotografia, em que a imagem não é interpretada ao nível do pixel, (o mesmo

acontece no nosso caso, porque a imagem resultante da fusão foi interpretada visualmente tal como se duma fotografia se tratasse) deve ser considerado como unidade de amostragem para interpretação o menor agregado homogéneo. Nesse caso o número total de amostras possíveis de identificar (N) pode ser obtido pela divisão da área total da imagem pela área do menor agregado homogéneo.

A selecção dos pontos de verificação no terreno poderá ser feita através dum esquema de amostragem aleatório simples, aleatório estratificado, sistemático, sistemático não alinhado ou finalmente por agregados. Ainda de acordo com Congalton (1988), o processo aleatório simples garante um bom compromisso entre custos e representatividade global desde que não haja grande discrepância de representatividade entre classes. Caso contrário deverá ser preferido o esquema aleatório estratificado. Deve notar no entanto que o espaço florestal se encontra normalmente estruturado espacialmente, pelo que é sempre preferível um esquema de amostragem sistemático ou aleatório estratificado.

Após a verificação de campo é construída uma matriz de contingência, representando-se os resultados de verificação no campo em colunas e os resultados da interpretação das imagens em linhas. Os valores da diagonal desta matriz quadrada, representam a concordância entre os resultados da interpretação e a realidade. Os valores marginais das linhas indicam *erros de omissão*, enquanto que os valores marginais das colunas indicam *erros de comissão*, isto é, estratos que não se ajustam à realidade. A relação entre o número de unidades de amostragem correctamente classificados e o número total, expressa a fiabilidade global ( $F_m$ ) da classificação (Eq. 25) (Marques, 1996, Chuvieco, 1990) com um intervalo de confiança (IC) expresso pela Eq. 26 para  $n > 30$  unidades de amostragem.

Eq. 25 
$$F_m = \frac{\sum X_i}{\sum \sum X_{ij}} \times 100$$

Em que:  $X_i =$  somatório dos pontos da diagonal  
 $\sum \sum X_{ij} =$  somatório total de pontos amostrados

Eq. 26 
$$IC = \pm z \cdot \sqrt{p \cdot q / n}$$

O  $F_m$  apresenta algumas limitações quando considerado globalmente porque poderá camuflar um distinto comportamento entre os vários estratos. Assim, são considerados marginalmente os erros de omissão e de comissão num dado estrato ( $E_{oi}$  e  $E_{ci}$ ), os quais são dados pela Eq. 27 e pela Eq. 28.

Eq. 27 
$$E_{oi} = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}}$$

Eq. 28 
$$E_{ci} = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}}$$

em que:  $X_{i+}$  = valor marginal da linha  $i$   
 $X_{ii}$  = valor diagonal da linha  $i$   
 $X_{+i}$  = valor marginal da coluna  $i$   
 $X_{ii}$  = valor diagonal da coluna  $i$

Para cada uma das categorias  $i$ , existem duas perspectivas distintas, a fiabilidade do utilizador e a do produtor ( $F_{ui}$  e  $F_{pi}$ ). A primeira está em relação inversa com os erros de comissão, enquanto que a segunda o está com os erros de comissão:

Eq. 29 
$$F_{ui} = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \cdot 100$$

Eq. 30 
$$F_{pi} = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \cdot 100$$

O Índice de Cohen além dos valores marginais também contabiliza as relações entre as diferentes categorias através duma análise (categórica) multivariada das matrizes de contingência, verificando se uma classificação discriminou as categorias de interesse com uma precisão significativamente maior do que a que se obteria aleatoriamente (Chuvieco, 1990). De acordo com Rosenfield e Fitzpatrick-Lins (1986) consiste numa medida de agregação do observador com os dados categóricos.

Suponhamos a classificação duma imagem de satélite com  $N$  pixels em  $q$  categorias. Assumindo um modelo de amostragem multinomial, a estimativa mais verosímil de KIA é dado pela Eq. 31.

Eq. 31 
$$KIA = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}$$

em que:  $P_0$  = proporção observada de concordância  $(\sum_{i=1}^q p_{ii})$

$P_e$  = proporção esperada de concordância puramente aleatória  $(\sum_{i=1}^q p_{i+} p_{+i})$

- $p_{ii}$  = percentagem de acertos observada ( $X_{ii}/N$ )
- $X_{ii}$  = número de observações correctamente interpretadas (traço da matriz)
- $N$  = número total de observações
- $p_{i+}$  = probabilidade marginal na linha  $i$  ( $X_{i+}/N$ )
- $p_{+j}$  = probabilidade marginal na coluna  $j$  ( $X_{+j}/N$ )

Os valores marginais de KIA podem ser estimados tendo como base de referência quer a interpretação, perspectiva do utilizador ( $KIA_{mapa}$ ), quer a verificação de campo, perspectiva do produtor ( $KIA_{verd}$ ):

Eq. 32 
$$KIA_{mapa} = \frac{p_{ii} - p_{i+}p_{+i}}{p_{i+} - p_{i+}p_{+i}}$$

Eq. 33 
$$KIA_{verd} = \frac{p_{ii} - p_{i+}p_{+i}}{p_{+i} - p_{i+}p_{+i}}$$

Os valores admissíveis de KIA (Chuvieco, 1990, Cogan e Edwards, 1994, Vieira, 1996) apresentam-se no Quadro 9.

Quadro 9: Qualificação da classificação em função do valor de KIA

KIA	Grau de qualidade
$\approx 0$	péssimo
$0 < KIA < 0,2$	mau
$0,2 < KIA < 0,4$	razoável
$0,4 < KIA < 0,6$	bom
$0,6 < KIA < 0,8$	muito bom
$0,8 > KIA < 1$	excelente

O KIA atribui igual importância a todos os erros, o que poderá ser desvantajoso. Como variante na determinação do KIA, vários autores referem a utilização do *índice de concordância ponderado* (KHAT) (Cohen, 1968, Rosenfield e Fitzpatrick-Lins, 1986, Naesset, 1996, Fleiss *et al.*, 1969 *in* Naesset, 1996). Este índice é pouco utilizado porque necessita duma prévia ponderação através da importância relativa atribuída a cada estrato, decisão que competiria a cada utilizador do inventário, portanto subjectiva. O KHAT apresenta ainda a desvantagem de ser de aplicação mais complexa. Castro (1997) aplicou este método, considerando como factor de ponderação a probabilidade de ocorrência dos estratos considerados, utilizando para isso uma carta de uso e ocupação do solo já existente da área de estudo, o que evita subjectividade na ponderação dos estratos.

O KHAT não foi aplicado neste estudo porque, conforme se verá adiante, foram encontrados valores excelentes de  $F_m$  e de KIA, o que prenuncia à partida um bom resultado de interpretação, e ainda porque também não dispúnhamos de dados prévios necessários para uma ponderação objectiva.

A variância de KIA é dada por:

$$\text{Eq. 34} \quad \text{VAR}(KIA) = \frac{1}{n} \left\{ \frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right\}$$

Em que:

$$\theta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_{ii}, \quad \theta_2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^k n_{i+n_i}, \quad \theta_3 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^k n_{ii}(n_{i+n_i}) \quad \text{e} \quad \theta_4 = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{ij}(n_{j+n_i})^2$$

Finalmente, de acordo com Fleiss *et al.* (1969), citado em Naesset (1996), o intervalo de confiança de KIA pode ser obtido através da seguinte equação:

$$\text{Eq. 35} \quad IC = t_{(\alpha;g,l)} \times \sqrt{\text{VAR}(KIA)}$$

## 3.5 Aplicações Florestais da Detecção Remota

### 3.5.1 Aquisição de Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato para Aplicações Florestais

#### Introdução

Neste capítulo apresentam-se as metodologias que tornaram possível a cobertura aérea de parcelas de amostragem previamente medidas directamente no campo e devidamente georreferenciadas, com o objectivo de obter imagens de FAPMF com características apropriadas ao Inventário Florestal Alternativo (elevada resolução no terreno, e sobreposição longitudinal de pelo menos 60%).

Foi utilizado um sistema de navegação proposto por Castro *et al.* (2004), que integrou vários equipamentos (computador portátil, receptor GPS, intervalómetro electrónico, etc.) e programas informáticos (SIG, programa de interface do GPS com o SIG), o qual permitiu percorrer com sucesso as linhas de voo previamente planeadas. Este sistema tem ainda a potencialidade de registar em tempo real a rota efectuada, num formato vectorial compatível com

o programa de CAD, o que permitiu a aferição posterior dos desvios entre a rota planeada e a efectivamente percorrida<sup>25</sup>. Os resultados obtidos abrem perspectivas de utilização deste sistema para além das propostas neste estudo.

Dados os custos de operação e complexidade envolvidos, cada missão aérea foi previamente planeada, definindo-se todo o equipamento a utilizar, e os parâmetros técnicos associados: avião, suporte de câmaras, câmaras, películas, escalas, áreas de estudo, sobreposição longitudinal e transversal, velocidade e altura do avião em relação ao solo, distância entre fotografias consecutivas, tempo entre disparos consecutivos, velocidade de disparo e abertura adequados, distância entre linhas de voo, etc. No planeamento das missões aerofotográficas foi extremamente importante uma previsão segura das condições atmosféricas, com uma antecedência razoável, para que tudo pudesse estar montado e preparado com antecedência. Devido a condições atmosféricas deficientes algumas missões foram canceladas e outras fracassaram. Indicam-se adiante alguns sítios da Internet que disponibilizam previsões atmosféricas regionais fidedignas.

## Material e equipamento fotográfico utilizado

### Câmaras fotográficas e objectivas

A aquisição de fotografia aérea de pequeno e médio formato (FAPMF) iniciou-se em 2001 com uma câmara fotográfica Nikon F501 AF de 35 mm, prosseguiu em 2002 com a mesma câmara e a partir de 2003 também com uma Rolleiflex de 70 mm e uma FujiFilm S1 Pro digital de 35 mm. Resumidamente apresenta-se no Quadro 10 o equipamento utilizado desde 2001.

Quadro 10: Câmaras fotográficas e objectivas utilizadas desde 2001

Ano	aeronave	Câmara fotográfica	Objectiva	Distância focal (mm)	Abertura máxima	Dimensão da película ou matriz CCD (mm)
2001	Cessna 150 e 172	Nikon F501	AF NIKKOR	50	F/1.8	24 × 36
2002	Cessna 172	Nikon F501	AF NIKKOR	50	F/1.8	24 × 36
2003	Cessna 172	Digital Fuji S1Pro	AF NIKKOR	28	F/2.8	23.3 × 15.6
2003	Cessna 172	Rolleiflex 6008	Carl Zeiss	80	?	45 × 60

<sup>25</sup> Foram utilizados os seguintes programas informáticos CAD, SIG e GPS: Microstation 95, I\_Ras C, Geomedia v.5.0, OrthoEngine v.6.2, Geomatica v.9.1, MrSidViewer, Adobe® Photoshop® Elements, PathFinder Office v.11, MapSite, DataSend, entre outros.

## Películas e filtros utilizados

As características dos filtros testados neste estudo são indicadas esquematicamente no Quadro 11. Os filtros polarizadores apenas foram testados em fotografias panorâmicas terrestres e não demonstraram vantagens evidentes para FAPMF.

No Quadro 12 indicam-se as películas testadas, apresentando-se para cada uma delas o VE óptimo para condições de luminosidade padrão (valores fornecidos pelos fabricantes) e a correcção a efectuar na abertura para compensar o aumento na velocidade de disparo requerido para evitar o arrastamento das imagens, no caso de se fazer a regulação manual quer da velocidade quer da abertura. Na Figura 110 e na Figura 111 em anexo, apresentam-se as curvas características e as curvas de sensibilidade espectral destas películas.

Apresenta-se ainda no Quadro 13 o resultado da consulta feita a vários fotógrafos profissionais relativa a uma película Kodak Gold ISO 200 nas condições de aquisição de FAPMF.

Quadro 11: Filtros testados

Filtro	Marca ou fabricante	Tipo	Cor ou nome	aumento do F	Efeitos
(1)	S&K	1A	Skylight	0.0 – 1.0	Absorve UV e uma reduzida fracção do azul. Recomendada para filmes coloridos. Serve também de protecção da própria objectiva, sendo recomendada sempre que se trabalhe com fotografia colorida, no caso de não se pretender aplicar um outro filtro especial
(2)	Tiffen	Polarizer	Polarizer	2.0	Com filmes coloridos, elimina as reflexões da superfície, brilho indesejável ou hot SPOT de qualquer fonte luminosa. Escurece o céu azul aumentando simultaneamente a saturação da cor.
(3)	SOLIGOR	C.P.L.	Circular P.L.	2.0	Semelhante ao anterior, mas os raios após atravessarem o filtro circular polarizador, vibram circularmente num plano apropriado, acentuando o contraste de cores e elimina os reflexos não metálicos; ângulo de 30-40°. Cores mais intensas. Elimina a neblina atmosférica. Absorve os UV até 400nm.
(4)	HTMC Filter Hama	Rot R8 (25) Equivalente ao R2	Vermelho 776 M 52	6.0 a 8.0	Absorve os raios UV, violeta, azul, verde e amarelo para aumentar fortemente o contraste. Bloqueia até 600 nm. Em paisagens, produz uma forte impressão de distância. Para filmes preto e branco e infravermelho Ektachrome em situações especiais.
(5)	HTMC Filter Hama	Y2 ou Wratten 8	Amarelo 771 M 52	2.0	Absorve o UV e azul-violeta (até 485nm) para aumentar o contraste. Para filmes preto e branco e infravermelho Ektachrome.
(6)	KODAK	Wratten 12	Amarelo	2.0	Filtro de gelatina. Absorve desde o UV até ao azul (500nm). Para filmes infravermelho colorido.

Quadro 12: Películas utilizadas em FAPMF, VE padrão, e ajustes na aberturas a utilizar em aerofotografia, considerando uma velocidade 1/500

Película	Descrição da película	Sensibilidade ISO	Dimensão (mm)	Formato (mm)	Velocidade e Abertura padrão	VE padrão	Abertura
Kodak Professional Portra 160VC [4]	Negativo colorida	160	24 × 36	35	1/125 ; F/16	15	F/8
Kodak Gold ISO 200 [4]	Negativo colorida	200	24 × 36	35	1/250 ; F/16	16	F/11
Agfachrome RSX II 50 Professional [4]	Positivo colorida	50	24 × 36	35	1/125 ; F/16	15	F/8
Kodak High Speed Infrared HIE 135-36[1]	Negativo PB infravermelho	50	24 × 36	35	1/125 ; F/11	14	F/8
Kodak TMAX 100 pro [3]	Negativo PB pancromático	100	24 × 36	35	1/125 ; F/11	14	F/8
Kodak Ektachrome pro EIR Infrared color film [2]	Negativo Colorido Infravermelho	40	24 × 36	35	1/300 ; F/5.6	13	F/4
Fujichrome Provia 100F Professional [4]	Positivo colorida 100ASA	100	24 × 36 e				
60 × 60	35 e 70	1/250 ; F/11	15	F/8			

<sup>[1]</sup>Tipo de película adequada para fotografar paisagens a longa distância devendo ser utilizado um filtro Wratten 25. Este tipo de película deve ser utilizado apenas em dias bastante claros

<sup>[2]</sup> Os valores de exposição padrão são baseados numa altitude solar de 40°, um dia limpo, altitude do avião de 10000 pés, utilizando um filtro KODAK Wratten No. 12. Como em FAPMF voamos a cerca de 6000 pés a velocidade relativa é maior havendo necessidade de se aumentar a velocidade de disparo. Por isso, deverá ser também ajustada a exposição em conformidade. Não é necessária compensação de exposição devido à utilização do filtro quando a velocidade de disparo estiver entre 1/1000 e 1/100 do segundo.

<sup>[3]</sup> Deve ser aplicado um filtro amarelo (Wratten No. 8) para eliminar o efeito de neblina.

<sup>[4]</sup> Deve ser aplicado apenas um filtro UV sem necessidade de correcção de exposição.

Grande parte da informação contida no Quadro 11 e no Quadro 12, foi obtida através de diversas consultas na Internet (efectuadas em 12/8/2002): [http 30], [http 6], [http 9], [http 27], [http 44], [http 23], [http 29], [http 55], [http 20].

Quadro 13: Velocidade e abertura das lentes recomendada por fotógrafos profissionais para iluminação natural e com a película Kodak Gold ISO 200

Luminosidade	F	Velocidade
maior	11	250
menor	8	
maior	8	500
menor	5.6	
maior	8	Automático
menor	5.6	

### Aeronaves utilizadas

Durante este trabalho foram utilizados dois aviões ligeiros de asa alta, Cessna 150 com capacidade apenas para duas pessoas e Cessna 172 SkyHank II, muito melhor equipado, com um motor mais potente e com capacidade para 4 pessoas. Além disso este último avião permitiu a utilização doutro tipo de suporte de câmaras muito mais eficiente, com capacidade para 3 câmaras fotográficas. As características técnicas dos aviões são apresentadas no Quadro 6.

## Suportes desenvolvidos para aquisição de Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato

Inicialmente, realizaram-se experiências de aquisição de FAPMF com um avião de asa alta, modelo Cessna 150, disponível quer no Aeroclube de Bragança quer no de Vila Real. Como este avião só tem capacidade para 2 pessoas (piloto inclusive), desenvolveram-se suportes de câmaras que apenas tinham capacidade para uma câmara fotográfica, montada ou na janela da porta do passageiro ou no tirante da asa. Enquanto que o primeiro sistema, desenvolvido por Martins *et al* (2001) necessitava de manter a janela aberta durante a aquisição da fotografia, o segundo, posteriormente desenvolvido por Martins e Castro (2002), já permitia fechar a janela durante a operação. Com o segundo sistema realizaram-se em 2001 várias missões aerofotográficas de aquisição de FAPMF para este trabalho.



Figura 24: Suporte montada na janela do avião Cessna 150



Figura 25: Suporte montado no tirante da asa do avião Cessna 172

Ambos os sistemas demonstraram simplicidade e funcionalidade, mas com operação desconfortável. Se o primeiro sistema obrigava a manter a janela aberta durante a aquisição, no segundo a tarefa de substituição dos rolos fotográficos era extremamente difícil. Uma vez que a partir de 2002 já se passou a utilizar o avião modelo Cessna 172, desenvolveu-se então um suporte

de câmaras semelhante ao construído por Ekin (1988) (Figura 15), que se apresenta na Figura 26. Como se pode ver na Figura 27, o suporte construído dispõe de espaço suficiente para incorporar 3 câmaras fotográficas (1 de 35mm analógica, 1 de 35mm digital e 1 de 70mm analógica) e cabos de ligação, ficando o restante equipamento de navegação e controlo das câmaras colocado remotamente no interior do avião. O suporte dispõe de um chassis corredeira robusto, capaz de suportar a pressão aerodinâmica quando em posição saliente, o que permite realizar confortavelmente a substituição dos rolos das câmaras fotográficas analógicas ou do cartão CompactFlash da câmara digital, dispondo de dispositivos para protecção das câmaras (forro de cortice, tampa transparente isolante, etc.). Refere-se finalmente que este suporte foi montado no avião sem qualquer alteração estrutural do mesmo e quando em posição saliente não provocou qualquer perturbação na estabilidade.



Figura 26: Suporte retráctil desenvolvido (à esquerda - vista exterior, à direita - vista interior)



Figura 27: Suporte retráctil (à esquerda - pormenor do acondicionamento das câmaras fotográficas, à direita - equipamento de navegação e controlo das câmaras fotográficas)

## Intervalómetro e Sistema de Navegação

Para o controlo do disparo das câmaras fotográficas foi utilizado um intervalómetro desenvolvido por Martins (2004) e descrito por Castro *et al.* (2004), o qual permitiu a integração de todas as câmaras fotográficas, com uma concepção simples e económica. Para a navegação foi utilizado um sistema desenvolvido por Castro *et al.* (2004), que inclui 2 receptores GPS de navegação (Magellan 320 e Garmin eTrex, ambos com 12 canais e de precisão similar), um PC portátil com o Programa MapSite (Figura 27 - direita) e ainda um programa SIG para as transformações necessárias (Geomedia v.5.0) e um programa CAD para o controlo de qualidade (Microstation 95).

A ligação do GPS Magellan 320 ao PC portátil fez-se através da porta de série com uma taxa de transferência de 9600 baud<sup>26</sup> (Figura 30). Quando em funcionamento, o sistema indica a posição instantânea através dum ícone específico (pequeno avião) que se sobrepõe ao mapa previamente preparado com um traçado das linhas de voo. Em rodapé é dada também a posição instantânea em coordenadas rectangulares UTM ou geográficas (latitude e longitude) assim como a altitude (Figura 28). Simultaneamente e como medida de segurança a rota percorrida é também registada com o receptor Garmin.

O programa SIG apresenta extrema utilidade integrado no sistema de navegação porque permite converter os dados vectoriais entre os vários sistemas de coordenadas (neste caso, HGML<sup>27</sup>, UTM WGS84<sup>28</sup> e HGD73<sup>29</sup>). Os parâmetros de transformação entre sistemas de coordenadas foram cedidos pela firma “Intergraph Portugal” e introduzidos internamente no programa (Figura 29). Conforme já se referiu anteriormente, optou-se pelo sistema de coordenadas HGML para toda a representação cartográfica, e o sistema UTM WGS84 para a navegação.

A metodologia aplicada para navegação aérea dividiu-se nas seguintes tarefas:

- reconhecimento do terreno e delimitação da zona a sobrevoar, através dum SIG (Geomedia Professional);
- estabelecimento no SIG das linhas de voo pretendidas;
- transformação do sistema de coordenadas original (Hayford Gauss Militares) para o sistema WGS84 e exportação das linhas de voo para o programa MapSite™;
- criação dum mapa de voo no programa MapSite™;

---

<sup>26</sup> Com o GPS Garmin eTrex só foi possível uma taxa de transferência de 4800 baud

<sup>27</sup> HGML - Hayford Gauss Militares Datum de Lisboa

<sup>28</sup> UTM WGS84 - Universal Transversa de Mercator Datum Internacional de 1984

<sup>29</sup> HGD73 - Hayford Gauss Militares Datum de 1973

- instruções ao piloto sobre o objectivo do trabalho e as linhas de voo a seguir;
- realização da missão de voo;
- importação para o SIG das linhas de voo realmente percorridas;
- análise dos desvios das rota percorridas em relação às rotas planeadas.

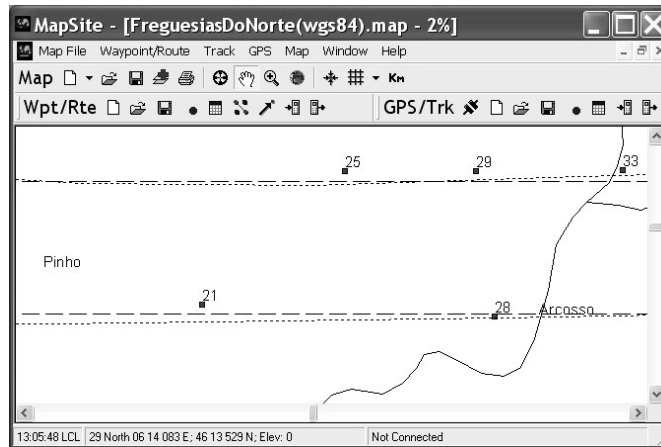


Figura 28: Vidago-Boticas - Rotas Planeada (tracejado) e Efectuada (pontead) em 2003 (Pormenor do Programa MapSite)

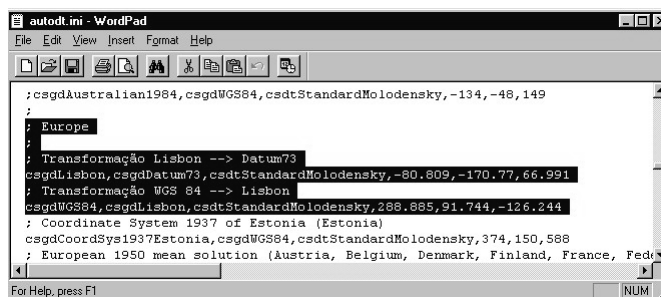


Figura 29: Parâmetros de transformação de coordenadas, HGML em HGD73 e HGML em UTM WGS84

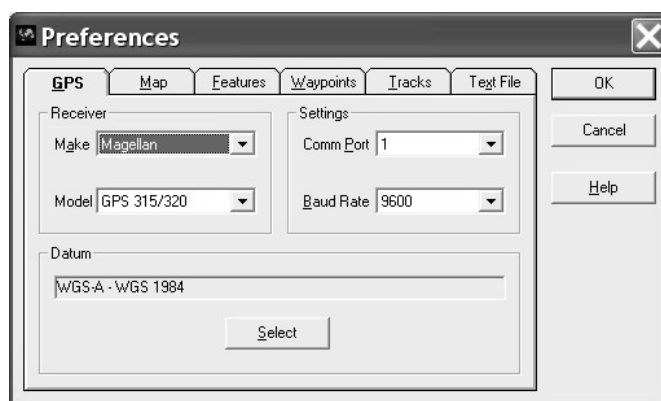


Figura 30: Parâmetros de ligação do GPS Magellan 320 ao programa MapSite

No final desta secção achou-se que se deveria referir que já em 2004 foram realizadas outras missões aerofotográficas, dentro dum Programa AGRO: Medida 8 - Desenvolvimento Tecnológico e Demonstração (Acção 8.1 - Desenvolvimento Experimental e Demonstração

(DE&D)) o qual o autor desta tese participa, tendo sido utilizado um pequeno PDA equipado com GPS e o programa ArcPad da ESRI, substituindo com vantagem o computador com o programa MapSite dado ser bastante mais pequeno e mesmo assim possuir um visor com dimensão suficiente para a visualização das linhas de voo e parcelas de amostragem. Apresenta ainda as mesmas vantagens do anterior pois regista também a rota percorrida para consulta e análise posterior.

### **Planeamento de voo - Parâmetros Técnicos**

O planeamento de voo baseou-se essencialmente em Lillesand e Kiefer (1987), Disperati (1991), Warner (1994), Warner *et al.* (1996) e Graham e Koh (2002). Apresentam-se de forma resumida no Anexo XXIII algumas das equações utilizadas no cálculo dos parâmetros de voo.

Os parâmetros de voo dependem sobretudo dos seguintes factores: tipo e modelo do avião (asa alta ou baixa), velocidade mínima e de cruzeiro, altitude mínima e óptima, lotação, capacidade de carga, etc.; tipo e formato das câmaras fotográficas, características das objectivas (distância focal, luminosidade, etc.); escala média pretendida; resolução espacial pretendida nas imagens a obter; sobreposição longitudinal e transversal dos pares estereoscópicos; comprimento de cada fiada e número de fiadas.

A altura de voo depende da escala pretendida e da distância focal da câmara fotográfica. Quanto mais baixa a altura de voo maior a escala, menor a extensão de terreno coberta por cada fotografia e menor o intervalo de disparo entre fotografias consecutivas.

Os factores que mais afectam a resolução no terreno das fotografias aéreas analógicas impressas e digitalizadas são a escala, a granulometria da imagem e a resolução do scanner. A digitalização das imagens por nós captadas fez-se directamente sobre as películas reveladas. Para o pequeno formato utilizou-se um digitalizador Nikon disponibilizado pelo Departamento de Protecção de Plantas da UTAD. Para as películas de médio formato, a digitalização foi feita no próprio laboratório que fez a revelação. No caso da fotografia digital, o cálculo da resolução no terreno depende da dimensão da matriz CCD, da sua resolução (máximo número de linhas e colunas) e da escala (Quadro 14).

Apresenta-se esquematicamente no Anexo XXVII o planeamento de voo e análise da dimensão do pixel, para as fotografias a captar com câmaras de médio e pequeno formato, considerando uma câmara de médio formato equipada com uma objectiva de 80 mm à escala de 1:10 000 e ao mesmo tempo outras câmaras de pequeno formato sendo determinados os parâmetros de acordo com a altura em relação ao solo pretendida (neste caso 800 m), sobreposição longitudinal de 60% e sobreposição transversal nula.

Como se pode verificar no Anexo XXVII, mantendo-se constante a altura de voo, e variando as câmaras, distâncias focais e dimensões do negativo ou da matriz CCD, a escala altera-se significativamente.

Assumindo a altura de voo de 800 m, é calculada no Quadro 14 a real resolução no terreno teoricamente possível de se obter com a câmara digital Fuji S1 Pro para cada uma das resoluções possíveis. Neste caso, considerando a escala de 1:18571, cada pixel representaria 0,14 m, 0,19 m e 0,30 m, respectivamente para cada uma das resoluções possíveis ( $18.571 \times 7,7 \mu\text{m} / 1.000.000 = 0,14 \text{ m}$ ). Com película química, para se obter igual resolução necessitaríamos de digitalizar o negativo a cerca de 2000 ppp. Perante isto, poderíamos concluir que utilização do formato digital seria vantajosa em relação ao processo químico uma vez que teoricamente possibilitaria melhor resolução no terreno. No entanto esta perspectiva foi demasiado optimista porque para isso também teríamos de seleccionar o modo de superior qualidade de imagem, em formato TIFF, cujo volume de informação se tornaria tecnicamente incomportável (imagens com cerca de 30 MB). A cadência de disparos consecutivos requerida não permitiria armazenar tal volume de informação, mesmo com o cartão de memória mais rápido do mercado em 2003 (secção 3.2.1).

Cada rolo fotográfico de médio formato tem 14 exposições (capacidade máxima do magazine da câmara de 70 mm). Por isso planeou-se a extensão de cada fiada de forma a evitar a substituição do rolo fotográfico a meio duma linha de voo. Assim, enquanto o piloto dava a volta para novo alinhamento com a linha de voo contígua fez-se a substituição do rolo fotográfico. Com a câmara digital essa tarefa foi mais eficiente uma vez que cada cartão CompactFlash de 256MB tinha capacidade para armazenar cerca 200 fotografias em formato JPEG sendo a sua substituição rápida e simples. Assim sendo, a substituição de rolo fez-se na Rolleiflex após cada fiada e na Nikon F1 a cada duas fiadas (rolo de 36 fotografias). O CompactFlash de 256MB da FujiS1Pro permitiu realizar 11 fiadas consecutivas.

**Quadro 14: Resolução no terreno que é possível obter com a câmara digital Fuji S1 Pro, numa dada escala**

resolução (pixeis)	dimensão (mm)	pixeis por mm	dimensões do pixel ( $\mu\text{m}$ )	escala	resolução no terreno (m)
3040 × 2016	23,3 × 15,6	130,47 × 129,23	7,66 × 7,74	18571,4	0,143
2304 × 1536	23,3 × 15,6	98,88 × 98,46	10,11 × 10,16	18571,4	0,188
1440 × 960	23,3 × 15,6	61,80 × 61,54	16,18 × 16,25	18571,4	0,301

### **Condições Propícias para a Fotografia Aérea**

Boas condições atmosféricas são fundamentais para uma boa aquisição de fotografia aérea (atmosfera límpida, sem vento e sem nuvens). À medida que o ar da atmosfera aquece torna-se

menos denso, proporcionando menor sustentação do avião. A partir das 13:00h, sobretudo em zonas montanhosas, ocorrem correntes de ar quente ascendentes, tornando a pilotagem difícil por causar instabilidade do avião (drift, tilt, tip). Convém realçar que embora existam sistemas complexos para aumentar a estabilidade do suporte das câmaras, corrigindo automaticamente a orientação relativa das câmaras fotográficas, tais sistemas seriam incomportáveis financeiramente. Implicariam ainda adaptações estruturais da aeronave por pessoal credenciado e posterior certificação pelas autoridades aeronáuticas. Deste modo estaríamos a eliminar algumas das grandes vantagens da FAPMF - a simplicidade e baixo custo do equipamento.

A previsão meteorológica é muito importante porque há necessidade de conjugar uma equipa e montar diversos equipamentos que necessitam de ajustamento. Além disso a missão tem de ser planeada com rigor para que durante as horas mais indicadas para a fotografia aérea nada falhe. Para a previsão meteorológica foram consultados alguns endereços Internet, dos quais indicamos aqueles com maior rigor na previsão: [www.accuweather.com](http://www.accuweather.com), [www.weather.com](http://www.weather.com) e [www.publico.pt/tempo/](http://www.publico.pt/tempo/).

Relativamente à escolha do período do ano e do dia mais propícios para a captação aerofotográfica o factor mais importante é a sombra dos objectos. Se por um lado não deve ser exagerada, porque encobre objectos sob coberto e escurece significativamente toda a cena, por outro, constitui um dos factores principais na fotointerpretação. Deve por isso evitar-se quer a sua total ausência quer o seu excesso. Pode no entanto afirmar-se que a situação ideal para uma situação não é certamente válida para outra. Por exemplo, se os objectivos da fotografia aérea são a medição de alturas de árvores num povoamento florestal com recurso à determinação da paralaxe diferencial, a sombra é prejudicial. Neste caso, as fotografias deverão ser tiradas preferencialmente durante o meio dia solar para reduzir o ensombramento do solo. Para realizar esta análise calculou-se a intervalos de 5 minutos ao longo de cada dia do ano, o ângulo zenital e a altura do Sol. Verificou-se que, à nossa latitude (41,750°N), nunca chega a haver total ausência de sombra, sendo a altura máxima do Sol de 71,68°, no dia 25 de Junho pelas 12:00:00h (solstício de Verão). De acordo com os objectivos estipulados inicialmente para a FAPMF conclui-se que, em princípio, as missões aerofotográficas se deverão efectuar de Maio a Julho entre as 11:30h e 14:00h.

### **3.5.2 FAPMF em Aplicações Florestais - Resultados e Discussão**

#### **Previsão Meteorológica**

Foram efectuadas previsões meteorológicas antes de cada uma das missões aerofotográficas com alguns dias de antecedência. Apresentam-se adiante as previsões efectuadas para os dias 7 de Julho de 2001 (Figura 31), 3 de Julho de 2002 (Figura 32), 10 e 11 de Julho de 2002

(Figura 33 e Figura 34), e 14 e 15 de Maio de 2003 (Figura 35). No exemplo ilustrado na Figura 32, referente ao dia 3 Julho de 2002, aparentemente as condições eram boas mas o dia viria a ser mau para a prática de fotografia aérea, por excesso de neblina. No entanto, e como o voo foi efectivamente realizado, esta missão serviu para testar metodologias de navegação e testar filtros. Foram ainda efectuadas nesse dia duas missões de simples navegação em Valpaços e Vidago. Para os dias 10 e 11 de Julho de 2002 (Figura 33 e Figura 34) realizou-se nova previsão meteorológica e executou-se a missão aérea com sucesso. Igualmente para os dias 14 e 15 de Maio de 2003, também se efectuou a previsão atmosférica, apresentada na Figura 35, sendo captadas as últimas FAPMF, utilizadas neste trabalho, tendo as restantes servido sobretudo para testes e desenvolvimento da tecnologia. Concluímos que as previsões atmosféricas foram extremamente importantes e aconselha-se que em trabalhos futuros se considere uma antecedência nas previsões de pelo menos 10 dias, as quais deverão ser revistas diariamente durante esse período, para garantir a sua consistência.

Relativamente à escolha do melhor período do dia para as aquisições aerofotográficas, efectuaram-se voos a várias horas do dia. Por exemplo, nos dias 20 e 21 de Julho de 2001 foram efectuadas duas missões em dias limpos e sem vento, no dia 20 entre as 12:30h e 13:00h, e no dia 21 entre as 11:00h e 12:00h. Verificou-se que no segundo dia as imagens apresentaram maior percentagem de sombras, mas em contrapartida houve melhores condições de voo porque ocorreram menores diferenças de temperatura do ar atmosférico e consequentemente menor turbulência atmosférica. Há efectivamente maior capacidade de sustentação do avião com o ar mais frio, porque está então mais denso. No entanto, para os objectivos deste trabalho pretendíamos imagens com pouca sombra e portanto nas últimas missões procurou-se realizar a cobertura nas horas do dia com maior altura do sol.



Figura 31: Previsão meteorológica para o dia 7 de Julho de 2001 ([www.accuweather.com](http://www.accuweather.com), [www.weather.com](http://www.weather.com) e [www.publico.pt/tempo/](http://www.publico.pt/tempo/))



Figura 32: Previsão meteorológica para o dia 3 Julho de 2002 ([www.publico.pt](http://www.publico.pt), [www.weather.com](http://www.weather.com))

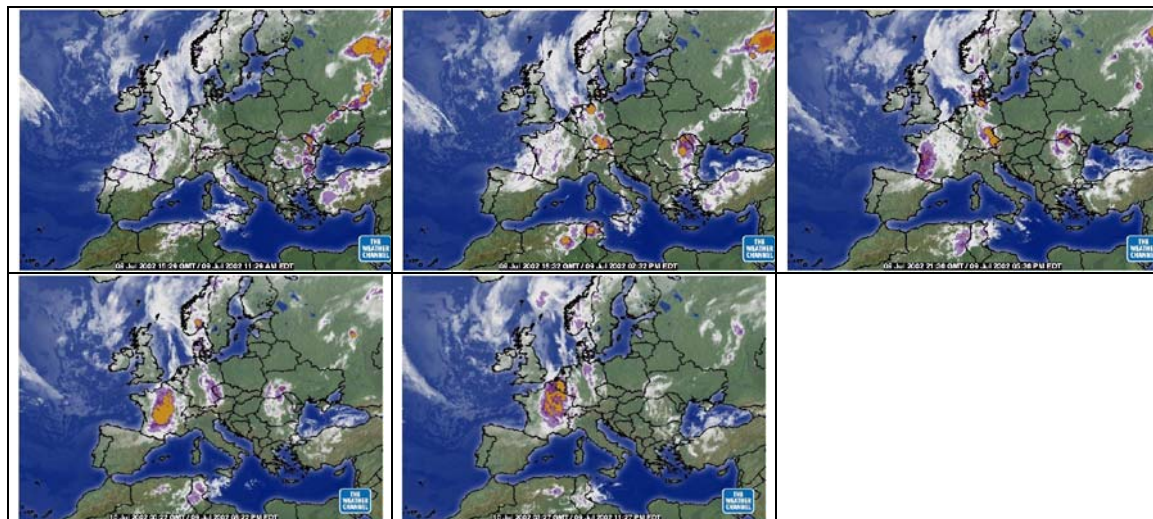


Figura 33: Previsão meteorológica para o dia 10 Julho de 2002 (sequência desde as 0:00h até 15:30h, [www.weather.com](http://www.weather.com))

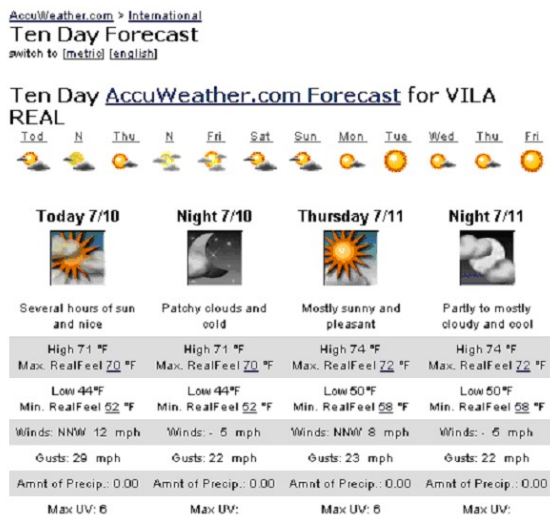
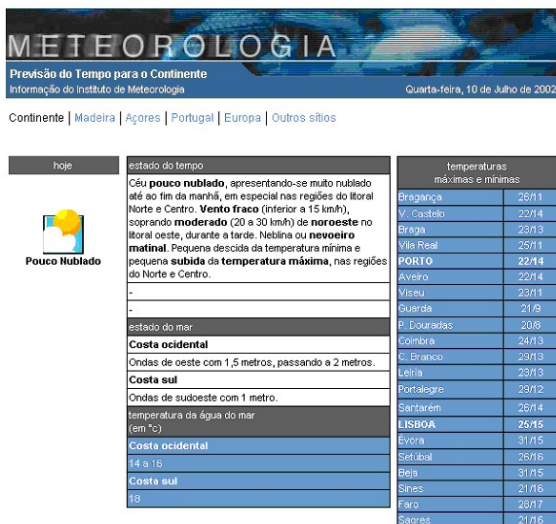


Figura 34: Previsão meteorológica para os dias 10 e 11 Julho de 02 ([www.publico.pt](http://www.publico.pt), [www.accuweather.com](http://www.accuweather.com))

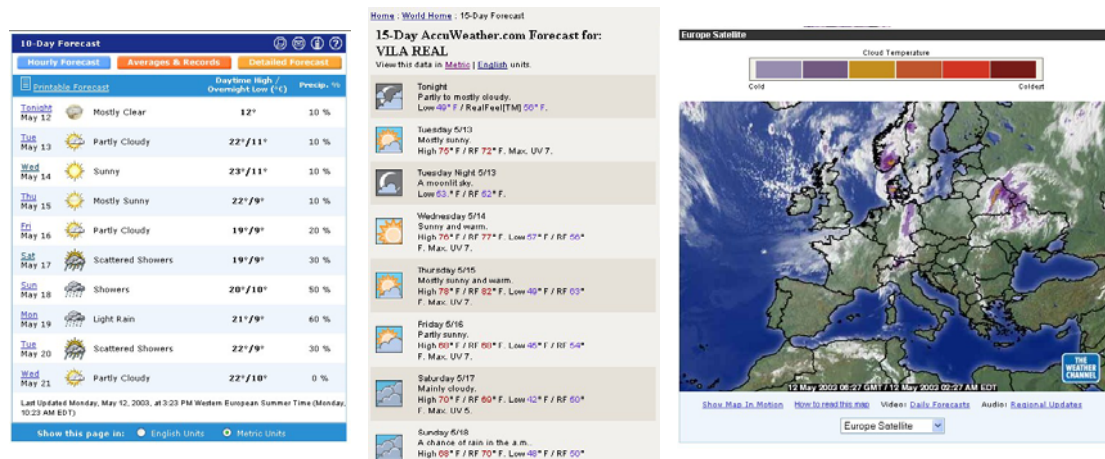


Figura 35: Previsão meteorológica para os dias 14 e 15 de Maio de 2003 ([www.accuweather.com](http://www.accuweather.com), [www.weather.com](http://www.weather.com))

## Análise operacional

Elaborou-se para cada missão aerofotográfica um guião de voo com o objectivo de facilitar e sistematizar as tarefas (Anexo XXIII, Anexo XXIV, Anexo XXV, Anexo XXVI, Anexo XXVII e Anexo XXVIII). Inicialmente, as rotas a percorrer para fazer a cobertura aerofotográfica foram delineadas e transferidas para o GPS através do programa DataSend que acompanha o GPS Magellan 320 e a orientação auxiliada apenas com ele. Pretendíamos realizar uma cobertura aerofotográfica à escala média real 1:10000, apenas com sobreposição longitudinal (cerca de 60%), utilizando uma câmara fotográfica de 35mm equipada com uma objectiva de 50mm. Assim, de acordo com o exposto anteriormente teríamos de voar a uma altura de 500m acima do terreno. No entanto, nem sempre isso aconteceu, porque a experiência do piloto contratado e o avião utilizado não permitiram essa regularidade (Cessna 150 com capacidade apenas para duas pessoas, o que

tornava muito complicada a execução de todas as tarefas de navegação e controlo da câmara fotográfica).

Já a partir de 2001 as condições melhoraram com a utilização doutro avião, Cessna 172 SkyHank II, de quatro lugares e com porta lateral de bagageira que tornava possível a inclusão de mais uma pessoa, ficando a equipa constituída por um piloto, um operador de câmaras e um navegador. Em 2002 a navegação passou a ser efectuada definitivamente através do programa MapSite de acordo com a metodologia já apresentada atrás. Assim, as linhas de voo passaram a ser desenhadas directamente no SIG e transferidas para o MapSite e posteriormente as rotas percorridas foram novamente transferidas para o SIG, para análise posterior. Também em 2002, com a utilização de novas câmaras, o planeamento de voo passou a ser feito para a câmara com objectiva de 80mm, também na escala 1:10000 e por isso a uma altura acima do terreno passou a ser de 800m (Anexo XXVII). Já em 2003, alterou-se o valor da escala pretendida para 1:6500 para se melhorar a resolução no terreno (Anexo XXVIII e Quadro 14).

As condições de captação fotográfica em FAPMF demonstraram ser substancialmente diferentes das consideradas como condições padrão pelos fabricantes das películas fotográficas, apresentadas no Quadro 12, porque as cenas a fotografar apresentaram altas diferenças de reflectância, baixas reflectâncias em geral nas manchas florestais e grande velocidade de deslocação do avião em relação ao solo. Após consulta a fotógrafos profissionais, cujas recomendações se resumem no Quadro 13, realizaram-se entre 2001 e 2002 vários testes de fotografia aérea. Através dos vários testes realizados em 2001 e 2002 conseguiu-se finalmente em 2003 realizar várias missões de fotografia aérea com sucesso. No Quadro 15 resumem-se as diversas combinações e regulações do equipamento nas missões realizadas ao longo deste trabalho.

Dos vários testes executados em 2001 e 2002 referem-se especialmente dois - com um rolo negativo de 200ASA, com prioridade da velocidade e com um rolo positivo de 50ASA com prioridade da abertura (Figura 36), os quais poderão esclarecer melhor a decisão tomada posteriormente, em 2003, que se descreve já a seguir.

No primeiro caso, ao estabelecer-se a prioridade da velocidade, as grandes diferenças de contraste dentro duma só cena provocaram anomalias na velocidade de abertura do diafragma e consequentemente a ocorrência do fenómeno de arrastamento. Naquelas cenas cuja diferença de contraste não provocou grande discrepância de exposição, obtiveram-se imagens de muito boa qualidade a todos os níveis: grão, contraste de imagem e qualidade cromática.

No segundo caso, o fenómeno do arrastamento reduziu-se, o grão da imagem já foi bom, mas a tonalidade entre zonas com vegetação idêntica tornou-se menos constante e com muito pouco contraste entre os vários tipos de ocupação do solo. Neste caso foi provavelmente

escolhida uma abertura inadequada com a intenção de garantir uma iluminação eficiente e usou-se uma película pouco rápida.

Tal como já era esperado, películas mais rápidas (200ASA) permitiram obter melhor qualidade cromática mas com maior grão. No entanto, o grão dessas películas permitiu atingir níveis de resolução satisfatórios para a medição de parâmetros dendrométricos. Além disso, obtiveram-se imagens mais claras e com maior contraste, para igual velocidade e exposição aplicada às películas de 50ASA.

Para verificação da luminosidade não foi tecnicamente possível utilizar fotómetros manuais. Optou-se assim por realizar leituras de exposição através dos fotómetros incorporados nas câmaras fotográficas, tendo em consideração que o processo de leitura da exposição varia para câmaras diferentes. Por exemplo, na câmara digital S1 Pro (um dos modelos usados neste estudo), a regulação do fotómetro no modo automático realiza uma leitura múltipla simultânea através da divisão da imagem em seis zonas, (Figura 38-a), sendo cada uma das zonas medida independentemente. Os parâmetros considerados pelo computador incorporado na máquina fotográfica para determinar a exposição óptima são: a) máxima claridade na imagem; b) diferenças de claridade; c) distância aos objectos da cena. Assim sendo, imagens sucessivas poderão ser significativamente diferentes, se captadas no modo automático. Quando a exposição se ajusta no modo manual, a leitura do fotómetro é feita dentro dum círculo central com 12 mm de diâmetro (Figura 38-b).

A solução que viria a ser adoptada para as missões de 2003, incluiu a escolha de películas com sensibilidade intermédia (100ISO), velocidade bastante rápida (1/500) e abertura do diafragma também manual (F/8.0), garantindo-se no conjunto um valor de exposição (VE) de 15 (Figura 39).

Foi ainda utilizada uma câmara de vídeo no dia 11 de Setembro de 2002, meramente a título de curiosidade. Após a filmagem foi retirada a imagem apresentada na Figura 41 que demonstra o bom potencial da vídeografia aérea. Esta tarefa pode ser executada directamente na câmara de vídeo ou a partir de computador equipado com placa de vídeo adequada. Foi utilizada a teleobjectiva durante a filmagem para aproximar opticamente o terreno, tornando o campo de visão angular bastante limitado. Prevê-se um futuro promissor para a vídeografia porque apresenta várias vantagens: boa qualidade de imagem das novas câmaras de vídeo, excelente autonomia, versatilidade na selecção das imagens pretendidas a posteriori, dispensam o uso de intervalómetros e possibilidade de se integrarem com GPS.

Quadro 15: Combinação e regulação do equipamento nas diversas missões realizadas

Data	Hora	Película	Abertura <sup>[2]</sup>	Velocidade <sup>[3]</sup>	Filtro (Quadro 11)	Comentário
20/7/01	11:00 – 12:00h	Kodak Gold ISO 200	F/8.0	Automática	(1)	Nota 1
21/7/01	12:30 – 13:00h	Agfachrome RSX II 50 Professional	F/5,6	1/500	(1)	Nota 2
8/8/01	11:00 – 12:00h	Kodak Professional Portra 160VC	automático	1/500	(1)	Nota 3
25/8/01 <sup>[1]</sup>	11:00 – 12:00h	Kodak TMAX 100 pro Kodak High Speed Infrared HIE 135-36	automático automático	1/500 1/500	(1)(5) (1)(5)	Nota 4
11/9/01	11:00 – 12:00h	Kodak TMAX 100 pro Kodak High Speed Infrared HIE 135-36 Kodak Gold ISO 200	automático automático automático	1/500 1/500 1/500	(1)(5) (1)(5) (1)	
19/10/01	11:00 – 12:00h	Kodak Ektachrome pro EIR Infrared color film	automático	1/500	(1)(6)	Nota 5
23/10/01	11:00 – 12:00h	Kodak Ektachrome pro EIR Infrared color film	automático	1/500	(1)(6)	
03/07/02	14:10 – 14:30h	Kodak Gold ISO 200	automático	1/500	(1)	Nota 6
11/07/02	10:00 – 10:40h	Kodak Gold ISO 200	automático	1/500	(1)	Nota 7
14/05/03	12:00 -	Fujichrome Provia 100F Professional e Digital	F/8	1/500	(1)	Nota 8
15/05/03	13:00 -	Fujichrome Provia 100F Professional e Digital	F/8	1/500	(1)	
15/05/03	15:00 -	Fujichrome Provia 100F Professional e Digital	F/8	1/500	(1)	

<sup>[1]</sup> Condições atmosféricas desfavoráveis pelo excesso de nebulosidade e escassez de luminosidade

<sup>[2]</sup> Quando se regula a Abertura em automático diz que se dá “prioridade à abertura”

<sup>[3]</sup> Quando se regula a Velocidade em automático diz que se dá “prioridade à velocidade”

Nota 1: Algumas fotografias ficaram tremidas. Outras ficaram excelentes

Nota 2: Mesmo com uma maior abertura que o anterior as fotografias ficaram muito escuras. Alternativas: aumentar a abertura ou substituir a película por uma mais rápida.

Nota 3: Pouca qualidade devido sobretudo às más condições de luminosidade.

Nota 4: A película Kodak High Speed Infrared HIE 135-36 é extremamente sensível à luz. Como as câmaras estão fixas e niveladas no suporte não foi possível fazer a substituição dos rolos da máquina em escuridão total. Todos os rolos se deterioraram excepto o primeiro, que já foi montado de Terra, apresentando uma faixa sobre-exposta coincidente com a fenda do magazine. Além disso, as condições atmosféricas degradaram-se rapidamente e as fotografias obtidas foram também de fraca qualidade. Este tipo de película é bastante interessante mas necessita de condições especiais que ainda não conseguimos reunir.

Nota 5: Foi encomendada a revelação pelo processo AR5 a uma firma dos Estados Unidos da América tendo-se extraviado os rolos. As fotografias só foram entregues passado mais de um ano e com qualidade deficiente. Optou-se por não as apresentar e utilizar neste estudo por esses motivos.

Nota 6: Neste voo iniciou-se a navegação com o MapSite mas acabou a carga da bateria logo após levantarmos voo. A navegação foi então feita apenas com o GPS, tendo havido por isso algumas falhas na navegação.

Nota 7: Foram obtidas algumas fotografias de boa qualidade, mas que corresponderam à área ardida durante o incêndio florestal de Boticas. Foram por isso totalmente perdidas porque não houve hipótese de confirmar medições no terreno.

Nota 8: Neste caso tudo funcionou bem, quer na qualidade das imagens que na navegação aérea.



Figura 36: 200ASA com prioridade na velocidade (cobertura de 2001) e 50ASA com prioridade na abertura (cobertura de 2002 realizada pelo autor)



Figura 37: 200ASA com prioridade na velocidade, com boa qualidade de imagem (cobertura de 2001 realizada pelo autor)

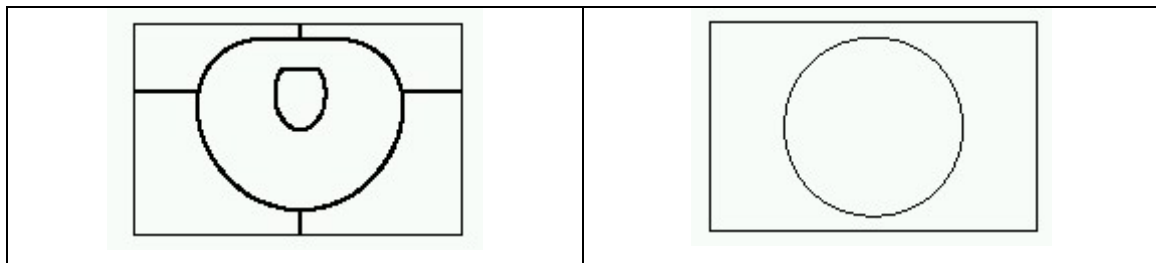


Figura 38: Leitura múltipla simultânea do fotômetro da câmara digital S1 Pro no modo automático ou AE lock e simples no modo manual



Figura 39: Fotografias captadas sobre a mesma zona: formato 70mm com película positiva 100ASA colorido normal e 35mm digital (fotografias captadas pelo autor)

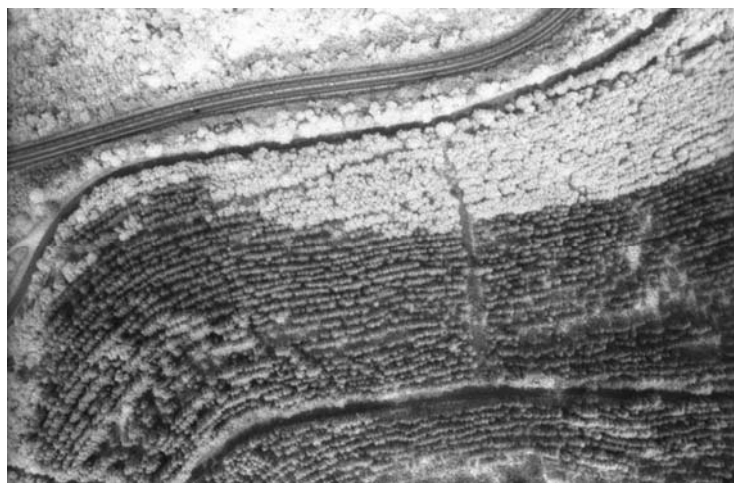


Figura 40: Kodak High Speed Infrared HIE 135-36 (Película 4). Negativo infravermelho preto e branco digitalizado a 600 ppp e convertido para positivo digitalmente (fotografia captada pelo autor)



Figura 41: Imagem obtida a partir de filmagem vídeo (Câmara Sony) (imagens captadas pelo autor)

## Estimativa da deriva das linhas de voo

Desde 2001 foram realizadas várias missões aerofotográficas. Dadas as dificuldades de navegação, sobretudo nas primeiras missões, essa operação foi sendo progressivamente melhorada. De início a navegação foi auxiliada apenas com GPS. Verificou-se, no entanto, que a navegação apoiada apenas no visor de um receptor GPS produziu maus resultados (Figura 42), devido sobretudo às reduzidas dimensões do visor do receptor GPS, que não permite uma boa visualização das linhas de voo.

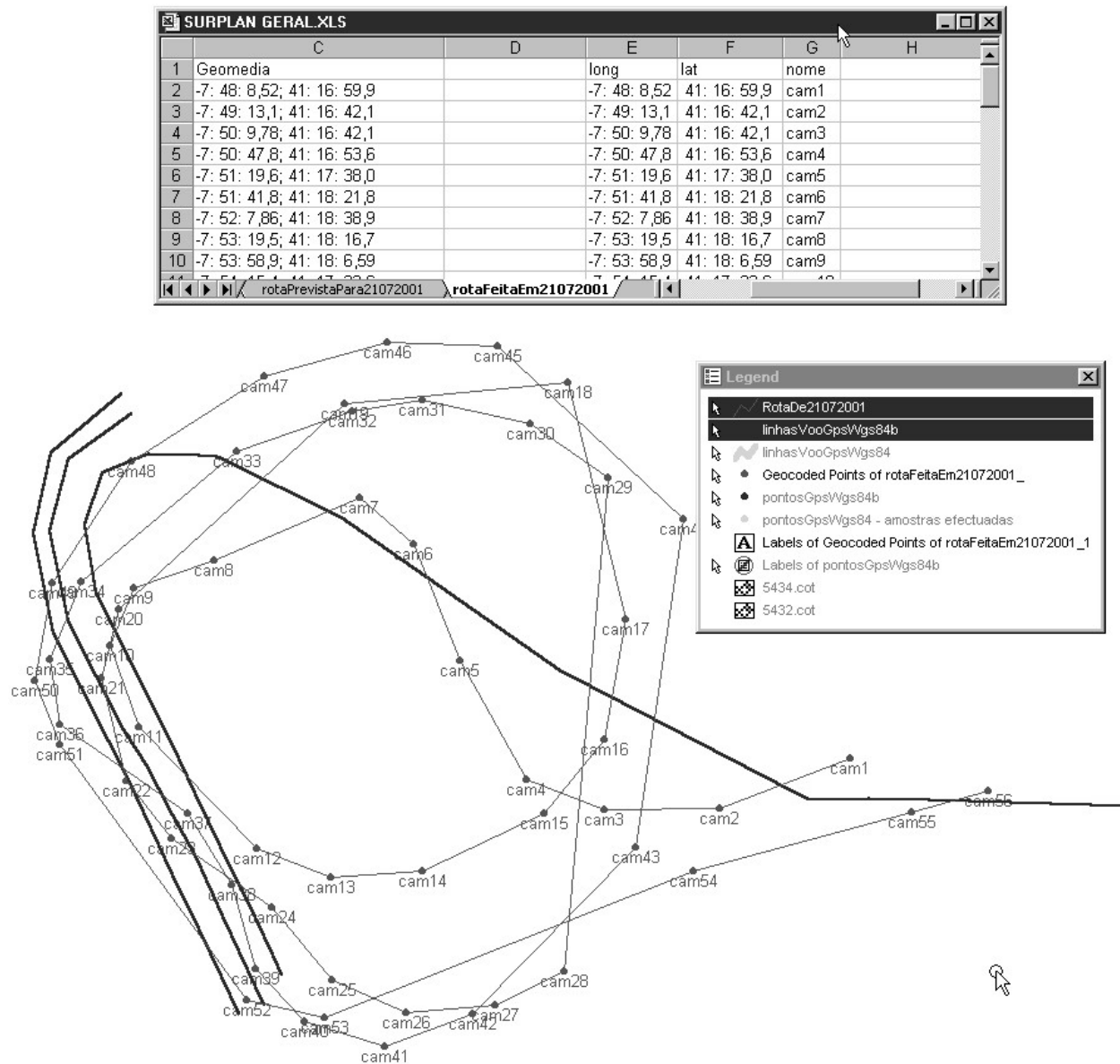


Figura 42: Análise visual dos desvios de rota da missão aerofotográfica de 21 de Julho de 2001 (linhas mais escuras – rota planeada; linhas mais claras – rota efectuada)

Posteriormente, aplicando já a metodologia e equipamento desenvolvidos e utilizados por Castro *et al.* (2004) e também por Martins (2004), foram planeadas e executadas várias linhas de voo

de acordo com a localização das parcelas nas 3 áreas de estudo, no sentido E-W em Vidago-Boticas e em Amarante e no sentido N-S no Marão. Este trabalho terminou com as missões dos dias 14 e 15 de Maio de 2003. Na Figura 43 apresentam-se as linhas de voo planeadas e executadas para a área de estudo de Vidago-Boticas no dia 15.

Uma vez que foi utilizado o mesmo equipamento que Castro *et al.* (2004) utilizaram, foi considerado o mesmo erro instrumental na navegação com GPS, sem correcção diferencial em tempo real, determinado através da comparação dos desvios das posições fornecidas por um receptor GPS fixo, instalado na UTAD, em relação à sua localização conhecida. Verificaram-se os desvios médios  $dX=-0.33m$ ,  $dY=1.68m$ , e  $dZ=0.49m$ , desvios padrões  $sX=1.43m$ ,  $sY=1.18m$  e  $sZ=2.31m$ , e amplitudes de variação de 5.50m, 6.40m e de 12.00m em X, Y e Z, respectivamente. Tal como foi referido por esses autores, as coordenadas de um ponto fixo, fornecidas pelo sistema GPS, têm uma variação admissível para a navegação aérea, uma vez que as modas dos desvios foram  $dX=-2.10m$ ,  $dY=1.40m$  e  $dZ=1.70m$ . Além disso, durante o voo, estava-se menos sujeito às principais fontes do erro que afectam as coordenadas fornecidas pelo sistema GPS, tais como caminhos múltiplos do sinal, originados pela reflexão deste em objectos próximos com posições mais elevadas que a antena, ou variações atmosféricas locais que alteram a velocidade de propagação do sinal.

Para estimar a discrepância entre as rotas planeadas e as rotas realmente percorridas, mediram-se os desvios entre ambas, a intervalos de 200m, relativamente às direcções dos eixos Y (transversal) e Z (vertical), correspondentes à deriva e à variação da altitude do avião, respectivamente (Quadro 16, Quadro 17, Quadro 18).

Quadro 16: Desvios entre a rota planeada e realmente seguida em Vidago-Boticas no dia 15 Maio 2003

Vidago	médias	Fiada1 (EW)	Fiada2 (WE)	Fiada3 (EW)	Fiada4 (WE)	Fiada5 (EW)	Fiada6 (WE)	Fiada7a (EW)	Fiada8 (WE))
média aritmética do desvio em Y (m)	26.5	-53.5	-6.3	28.2	22.9	15.9	16.8	60.3	127.3
Desvio quadrático médio na trajectória de voo (m)	50.4	58.2	40.5	41.6	25.5	27.3	19.4	61.1	129.8
Erro instrumental do receptor GPS relativamente a Y (m)	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86
Desvio global em Y (m)	53.3	61.1	43.4	44.5	28.3	30.2	22.2	64.0	132.7
Altitude de voo prevista (m)	1550.0	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1550
Altitude de voo real média (m)	1574.7	1566.8	1533.5	1537.4	1546.0	1573.0	1553.1	1610.3	1677.3
Cota média do terreno a sobrevoar (m)	500.0	500	500	500	500	500	500	500	500
Cota mínima (m)	448	440	350	440	460	550	400	470	470
Cota máxima (m)	614	670	630	650	600	650	530	630	550
Altura de voo média (m)	1074.7	1066.8	1033.5	1037.4	1046.0	1073.0	1053.1	1110.3	1177.3
Altura de voo máxima (m)	1127.2								
Altura de voo mínima (m)	960.9								
Largura do negativo (mm)	56.0	56	56	56	56	56	56	56	56
Distância focal (mm)	80.0	80	80	80	80	80	80	80	80
Factor de escala do negativo médio corrigido	13433	13335	12919	12967	13075	13412	13163	13879	14716
Factor de escala do negativo máximo	14090								
Factor de escala do negativo mínimo	12012								
Largura média real de faixa coberta por foto (m)	752.3	746.8	723.5	726.2	732.2	751.1	737.1	777.2	824.1
Erro percentual médio em Y (%)	7%	8%	6%	6%	4%	4%	3%	8%	16%
média aritmética do desvio em Z (m)	24.7	16.8	-16.5	-12.6	-4.0	23.0	3.1	60.3	127.3
média aritmética dos desvios absolutos em Z (m)	33.0	16.8	16.5	12.6	4.0	23.0	3.1	60.3	127.3
desvio quadrático médio em Z (m)	36.1	17.9	21.5	19.0	8.7	25.1	5.9	61.1	129.8
Erro instrumental do receptor GPS relativamente a Z (m)	2.80	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
desvio global em Z (m)	35.8	19.6	19.3	15.4	6.8	25.8	5.9	63.1	130.1
altitude de voo prevista (m)	1550.0	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1550
altitude de voo real média (m)	1574.7	1566.8	1533.5	1537.4	1546.0	1573.0	1553.1	1610.3	1677.3
altura de voo média (m)	1074.7	1066.8	1033.5	1037.4	1046.0	1073.0	1053.1	1110.3	1177.3
erro percentual médio em Z (%)	3%	2%	2%	1%	1%	2%	1%	6%	11%
Erro percentual médio conjugado (%)	10%								
Erro percentual de escala devido à diferença de cotas (%)	15%								

Quadro 17: Desvios entre a rota planeada e realmente efectuada em Amarante no dia 14 Maio 2003

Amarante	médias	Fiada14 (NS)	Fiada13 (SN)	Fiada11 (SN)	Fiada9 (SN)	Fiada6 (NS)	Fiada5 (SN)	Fiada4 (NS)	Fiada3 (SN)	Fiada2 (NS)
média aritmética do desvio em Y (m)	4.2	73.0	0.0	-14.4	-31.2	-12.8	25.7	-47.5	13.3	32.1
Desvio quadrático médio na trajectória de voo (m)	32.5	73.2	10.4	21.8	35.8	16.6	28.5	48.8	16.8	40.9
Erro instrumental do receptor GPS relativamente a Y (m)	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86
Desvio global em Y (m)	35.4	76.1	13.3	24.6	38.6	19.5	31.4	51.7	19.7	43.8
Altitude de voo prevista (m)	820.0	820	820	820	820	820	820	820	820	820
Altitude de voo real média (m)	808.4	784.0	832.4	762.4	838.8	788.0	796.3	807.2	831.1	835.1
Cota média do terreno a sobrevoar (m)	300.0	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Cota mínima (m)	233	210	200	170	210	220	270	250	300	270
Cota máxima (m)	321	250	250	350	300	250	310	350	400	430
Altura de voo média (m)	508.4	484.0	532.4	462.4	538.8	488.0	496.3	507.2	531.1	535.1
Altura de voo máxima (m)	575.0									
Altura de voo mínima (m)	487.3									
Largura do negativo (mm)	56.0	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Distância focal (mm)	80.0	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Factor de escala do negativo médio corrigido	6354	6050	6655	5780	6735	6100	6203	6339	6639	6689
Factor de escala do negativo máximo	7188									
Factor de escala do negativo mínimo	6091									
Largura média real de faixa coberta por foto (m)	355.8	338.8	372.7	323.7	377.2	341.6	347.4	355.0	371.8	374.6
Erro percentual médio em Y (%)	10%	22%	4%	8%	10%	6%	9%	15%	5%	12%
média aritmética do desvio em Z (m)	-11.6	-36.0	12.4	-57.6	18.8	-32.0	-23.7	-12.8	11.1	15.1
média aritmética dos desvios absolutos em Z (m)	24.4	36.0	12.4	57.6	18.8	32.0	23.7	12.8	11.1	15.1
desvio quadrático médio em Z (m)	24.9	36.1	12.7	57.6	18.8	32.3	24.0	15.0	11.5	15.8
Erro instrumental do receptor GPS relativamente a Z (m)	2.80	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Desvio global em Z (m)	27.2	38.8	15.2	60.4	21.6	34.8	26.5	15.6	13.9	17.9
altitude de voo prevista (m)	820.0	820	820	820	820	820	820	820	820	820
altitude de voo real média (m)	808.4	784.0	832.4	762.4	838.8	788.0	796.3	807.2	831.1	835.1
altura de voo média (m)	508.4	484.0	532.4	462.4	538.8	488.0	496.3	507.2	531.1	535.1
erro percentual médio em Z (%)	5%	8%	3%	13%	4%	7%	5%	3%	3%	3%
Erro percentual médio conjugado (%)	16%									
Erro percentual de escala devido à diferença de cotas (%)	15%									

Quadro 18: Desvios entre a rota planeada e realmente efectuada no Marão no dia 14 Maio 2003

Marão	médias	Fiada 7 (T00009) (lv=10)	Fiada 3 (T00016) (lv=17)	Fiada 8 (T00019) (lv = 20)	Fiada 8a (T00021) (lv = 22)	Fiada 5 (T00010) (lv=11)
média aritmética do desvio em Y (m)	-10.3	-14.8	-2.7	-26.8	35.7	-43.0
Desvio quadrático médio na trajectória de voo (m)	28.6	18.9	11.1	27.4	37.1	48.3
Erro instrumental do receptor GPS relativamente a Y (m)	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86
Desvio global em Y (m)	31.5	21.8	14.0	30.3	40.0	51.2
Altitude de voo prevista (m)	1520.0	1520	1520	1520	1520	1520
Altitude de voo real média (m)	1553.7	1564.0	1554.8	1523.3	1554.3	1572.2
Cota média do terreno a sobrevoar (m)	1000.0	1000	1000	1000	1000	1000
Cota mínima (m)	910	850	950	900	950	900
Cota máxima (m)	1024	950	1000	1100	970	1100
Altura de voo média (m)	553.7	564.0	554.8	523.3	554.3	572.2
Altura de voo máxima (m)	643.7					
Altura de voo mínima (m)	529.7					
Largura do negativo (mm)	56.0	56	56	56	56	56
Distância focal (mm)	80.0	80	80	80	80	80
Factor de escala do negativo médio corrigido	6921	7050	6935	6541	6929	7152
Factor de escala do negativo máximo	8047					
Factor de escala do negativo mínimo	6622					
Largura média real de faixa coberta por foto (m)	387.6	394.8	388.4	366.3	388.0	400.5
Erro percentual médio em Y (%)	8%	6%	4%	8%	10%	13%
média aritmética do desvio em Z (m)	33.7	44.0	34.8	3.3	34.3	52.2
média aritmética dos desvios absolutos em Z (m)	33.7	44.0	34.8	3.3	34.3	52.2
desvio quadrático médio em Z (m)	35.4	44.0	35.2	11.2	34.4	52.2
Erro instrumental do receptor GPS relativamente a Z (m)	2.80	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
desvio global em Z (m)	36.5	46.8	37.6	6.1	37.1	55.0
altitude de voo prevista (m)	1520.0	1520	1520	1520	1520	1520
altitude de voo real média (m)	1553.7	1564.0	1554.8	1523.3	1554.3	1572.2
altura de voo média (m)	553.7	564.0	554.8	523.3	554.3	572.2
erro percentual médio em Z (%)	7%	8%	7%	1%	7%	10%
Erro percentual médio conjugado (%)	16%					
Erro percentual de escala devido à diferença de cotas (%)	15%					

*Caso de Vidago:* o desvio quadrático médio lateral na trajectória de voo foi de 50.4m a que se deve adicionar o erro instrumental do receptor GPS relativamente à coordenada Y (=2.86m), de que resultou um erro médio lateral na trajectória de 53.3m (7%). Ocorreu um desvio quadrático médio em Z de 36.1m que, dada a variação de cotas do terreno provocou um erro percentual médio de 3%. O efeito conjugado dos erros em Y e em Z provoca um erro sobre a sobreposição lateral e longitudinal de cerca de 10%.

*Caso do Marão:* resultou um erro médio lateral na trajectória de 31.5m (8%). Ocorreu um desvio quadrático médio em Z de 36.5m que, dada a variação de cotas do terreno, provocou um erro percentual médio de 7%. O efeito conjugado dos erros em Y e em Z provocou um erro sobre a sobreposição lateral e longitudinal de cerca de 15%.

*Caso de Amarante:* resultou um erro médio lateral na trajectória de 35.4m (10%). Ocorreu um desvio quadrático médio em Z de 27.2m que, dada a variação de cotas no terreno, provocou um erro percentual médio de 5%. O efeito conjugado dos erros em Y e em Z provocou um erro sobre a sobreposição lateral e longitudinal de cerca de 15%.

Embora lateralmente estes erros não afectem a qualidade do trabalho, porque as fiadas foram consideradas independentes, não deve ser descurado quando se pretendem efectuar coberturas aéreas com sobreposição lateral suficiente, de modo a evitar lacunas de cobertura entre fiadas contíguas. Já relativamente à sobreposição longitudinal, uma vez que se considerou no planeamento uma sobreposição de 60%, poderá em casos extremos ocorrer deficiente sobreposição entre fotografias sucessivas.




Calculou-se também o erro produzido pela variação da cota do terreno ao longo da linha de voo, considerando que a altitude de voo se manteve constante (1575m no caso de Vidago) e verificou-se que o seu efeito foi maior que o erro produzido pela deriva e alteração de altitude de voo, tendo-se encontrado um erro percentual de escala devido à diferença de cotas para Vidago de 15%. Considerando que a distância focal se mantém fixa, para uma dada variação da cota do terreno ao longo da linha de voo, as flutuações no factor de escala serão tanto maiores quanto menor for a altura de voo (Eq. 95). A área de Vidago seria por isso em princípio aquela que proporcionaria menores erros deste tipo, porque se sobrevoou a maior altura de voo média (1075m). Assim, seria também aconselhável aumentar a sobreposição lateral e longitudinal, caso ao longo das linhas de voo existam variações de cota substancial, situação que se poderia verificar através da perfil topográfico desenhado a partir da altimetria digital num CAD.

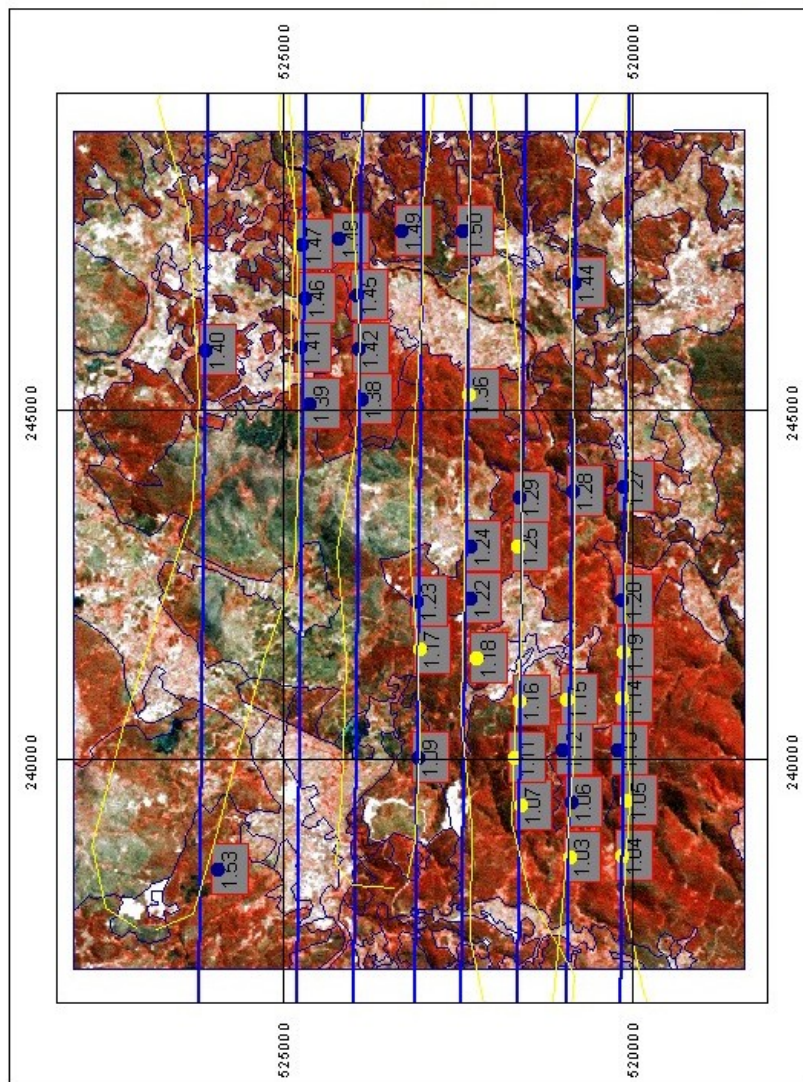
Dos resultados obtidos conclui-se que o sistema de navegação utilizado foi adequado para aquisição de FAPMF destinado a estudos relativos a recursos florestais, a nível local ou regional, e que a utilização desse sistema foi fácil e eficiente. Este sistema foi constituído por um computador portátil, um receptor GPS e um programa informático (por exemplo MapSite™). O sistema de navegação utilizado foi pouco dispendioso, visto que o custo de um computador portátil, de um receptor GPS e de um programa MapSite™ foi apenas 2500 euros, em Janeiro de 2003.

# Vidago-Boticas: Rotas planeada e efectuada em 2003



## Legenda:

- Vectores:**  
ocupação do solo, linhas de voo, localização e identificação das parcelas
- Raster:**  
composição colorida melhorada por fusão digital de imagem (PanSharpening: Landsat ETM+ bandas 457 com banda pancromática)
-  Rota Feita Vidago 15 Maio 2003 W gs84
  -  Rota Prevista Vidago 15 Maio 2003
  -  PARCELAS NÃO QUEIMADAS
  -  PARCELAS QUEIMADAS
  -  Labels of Parcelas
  -  Join of Parcelas and Resultados Global Inventario Florestal
  -  Ocup Solo Vidago
  -  467 his24p15mVidago.cot



Coordenadas rectangulares HGM Datum de Lisboa

Figura 43: Missão aerofotográfica de 15 Maio de 2003 em Vidago – Boticas

## **Organização do arquivo de fotografias de FAPMF**

As FAPMF obtidas foram devidamente catalogadas de acordo com a data de voo, numeração das fiadas e numeração sequencial dentro de cada fiada. Organizaram-se numa base de dados em Access onde se pretendeu incluir toda a informação relevante acerca de cada voo. (exemplo de folha de rosto duma das tabelas no Anexo XXIX).

Cingindo-nos apenas ao voo de 14 e 15 de Maio de 2003, tal como já tinha sido anteriormente referido, o sentido das linhas de voo foi escolhido de forma a otimizar a cobertura das parcelas pré-instaladas no terreno. Assim, no Marão as fiadas foram efectuadas no sentido Norte-Sul enquanto que em Amarante e Vidago se optou pelo sentido Este-Oeste. Foram realizadas em Vidago no dia 15 de Maio de 2003 as seguintes fiadas: 110, 111, 112, 113, 114. Cada fotografia recebeu um número de identificação cuja codificação corresponde ao número da fiada seguido por um número sequencial de 3 dígitos (110001, 110002, ...). Como na área de estudo do Vidago as parcelas ficaram muito mais distribuídas no espaço do que nas outras zonas, o comprimento das fiadas seria demasiado extenso para ser fotografado com um só rolo de médio formato. Na tentativa de otimizar o tempo de voo e de reduzir o número de fotografias, fotografaram-se apenas os locais por cima das parcelas. Essa metodologia fracassou em certa medida porque algumas das parcelas apenas foram registadas numa só fotografia e por isso sem cobertura estereoscópica, condição fundamental para a medição de alturas das árvores, de acordo com a metodologia apresentada na secção 5.2.2. Devemos acrescentar ainda o facto de muitas das parcelas medidas no terreno terem sido consumidas pelo grande incêndio de 2002. Assim, das 37 parcelas inicialmente medidas no terreno em Vidago restaram apenas 10 para medição de alturas das árvores com fotografias de médio formato e igual número de fotografias de pequeno formato digital.

### **3.5.3 Ortorrectificação digital**

#### **Integração da informação cartográfica e geográfica de base em SIG**

A informação vectorial em formato “dgn 3D” cedida pelo IGeoE para este trabalho apresentava as especificações de unidades e resolução de m,cm,100,10. O seu formato dgn foi manipulado através do programa CAD Microstation.

Foi-nos também gentilmente cedida pelo IGP a ortofotografia aérea IVC de 1995 do CNIG, apresentando-se no sistema de coordenadas HGML, com resolução no terreno de 1 m e no formato de registo MrSid (\*.sid).

O processamento da imagem foi feito com os programas “MrSidViewer”, “CorelPhotoPaint v.9.0” e “IRAS/C”.

As imagens foram exportadas em extensão TIF e foi construído um mosaico fotográfico com as várias fotografias contíguas. Para aumentar a velocidade de visualização das imagens no SIG foram criadas “OverViews” de cada imagem. Para melhoramento visual modificaram-se digitalmente o contraste e brilho.

Adquiriram-se ao INGA as provas directas de fotografia aérea pancromática de 2000.

Foi aferida a qualidade geométrica da ortofotografia do CNIG por recolha de PCT no terreno, através de GPS com correcção diferencial, tendo sido corrigidas as imagens através duma transformação polinomial de terceiro grau no programa IRAS/C<sup>30</sup>, usando esses pontos de controlo.

Finalmente, foi integrada no SIG Geomedia v.5.0 toda a informação raster e vectorial produzida e adquirida.

### **Ortorrectificação de FAC do INGA**

As provas directas adquiridas ao INGA foram digitalizadas e ortorrectificadas. A digitalização fez-se no Scanner Epson (Scanner da ESAB descrito na secção 3.2.2), considerando a resolução óptica (RO) de 1016ppp, calculada a partir da Eq. 10 e considerando a escala da fotografia do INGA de 1:40 000, com pixeis de 1m. A ortorrectificação fez-se através do programa Orthoengine v.6.2. Para fazer sobrepor as imagens ortorrectificadas do CNIG com estas do INGA, foram utilizados os mesmos PCT obtidos no terreno para a georreferenciação das imagens do CNIG. Também foram retirados alguns PCT directamente das imagens do CNIG, depois de corrigidas, nos locais onde os PCT recolhidos no terreno eram mais escassos. Foi considerado o mesmo sistema de coordenadas HGML.

O modelo digital do terreno da área correspondente foi criado a partir da altimetria da Carta Militar à escala 1:25000, com equidistância natural das curvas de nível de 10 m.

Atendendo aos valores do ficheiro de calibração da câmara fotográfica e às especificações desejadas, e considerando a geometria duma FAC (Figura 16), foram aplicados os seguintes parâmetros:

---

<sup>30</sup> Neste caso esta transformação foi possível porque as imagens já se encontravam ortorectificadas.

#### Quadro 19: Informação do projecto de ortorrectificação de FAC

Parâmetros:
Distância focal (mm): 153.156.
Auto colimação do ponto principal P (mm) <sup>31</sup> : -0.007; 0.007.
Distorção radial das lentes ( $\mu\text{m}$ ): $k_0=8.37081\text{E-}05$ , $k_1=1.32527\text{E-}05$ , $k_2=-9.96582\text{E-}07$ , $k_3=-2.21119\text{E-}08$ , $k_4=8.38978\text{E-}10$ , $k_5=-5.88375\text{E-}12$ , $k_6=-3.10379\text{E-}16$ , $k_7=7.0335\text{E-}17$ .
Distâncias entre marcas fiduciais (mm): $CC'=106.002$ , $DC'=106.004$ , $CB'=105.998$ , $BB'=106.000$ , $BA'=-106.001$ , $AA'=105.999$ , $AD'=-105.998$ , $DD'=-106.000$ .
Foto-escala média 1:40 000.
Raio da Terra (m): 6378388.000.
Sistema de coordenadas: HGML.
Pixel da imagem ortorrectificada, no terreno: 1m.

Através do programa Orthoengine v.6.2, o processo de ortorrectificação segue várias fases que possuem analogias com os procedimentos característicos dos estereorestituidores analíticos, nomeadamente de orientação interna, externa e absoluta. Através desse programa é modelado digitalmente o terreno, com a criação dum MDT, fundamental para as correcções de imagem necessárias.

A orientação interna é muito semelhante à utilizada num estereorestituidor analítico consistindo em seleccionar e introduzir as marcas fiduciais dos cantos (ou alternativamente dos lados) de cada fotografia introduzida. Como a geometria da fotografia raramente é uma esquadria exacta (ver distâncias entre marcas fiduciais no ficheiro de calibração da câmara) é dada para esta operação uma tolerância de cerca de um pixel (Manual do Orthoengine v.6.2). Na Figura 44 apresenta-se o quadro resumo relativo à introdução e orientação interna duma das fotografias do INGA da zona de Vidago, (fotografia 2241 de acordo com a sequência do INGA). O valor de resíduos de 1,1 pixel está dentro dos limites de tolerância. De referir ainda que a própria digitalização da fotografia poderá também introduzir distorções.

A orientação externa e absoluta são aqui realizadas em simultâneo, definindo-se a posição espacial e a orientação angular da fotografia (transformação das coordenadas do terreno em coordenadas da fotografia). São utilizados para o efeito vários PCT e vários pontos de Grüber ou pontos de ligação (TP – do inglês *Tie Points*).

Os PCT utilizados na ortorrectificação são características permanentes da superfície terrestre com coordenadas perfeitamente conhecidas (a recolher com GPS ou através de ortofotografia existente), bem distribuídos pelo terreno e a variadas altitudes, preferencialmente colocados nas margens das fotografias. Cada fotografia deverá possuir pelo menos 2 PCT podendo ser comuns a fotografias contíguas. A cota de cada PCT pode ser determinada directamente no terreno por GPS ou ser extraída através do MDT.

<sup>31</sup> Isto quer dizer que está 0,007mm para a esquerda e 0,007 mm para cima do centro fiducial P (Figura 16).

Os TP são pontos de ligação entre fotografias contíguas, tendo uma grande analogia com os denominados Pontos de Grüber na estereorestituição analítica (Marques, 1996). Não é necessário conhecer obrigatoriamente as coordenadas no terreno dos TP. Os TP só são necessários se se ortorrectificarem várias fotografias contíguas e se se pretenderem realizar mosaicos fotográficos.

Na Figura 45 apresentam-se duas FAC, antes e após a ortorrectificação. A foto de cima corresponde à região de Vidago-Boticas e a de baixo ao Marão (vale da Campeã). Verificou-se que quanto mais acidentado é o relevo mais deformada fica a ortofotografia relativamente à original o que obviamente se deve ao maior rebatimento das fotografias aéreas verticais nessas situações. Nas fotografias originais (esquerda) estão também representados os PCT utilizados para a ortorrectificação.

Fiducial Marks					
Top Left	X: 482.7	P	Y: 478.3	L	<input type="button" value="Set"/> <input type="button" value="Clear"/>
Top Right	X: 8861.7	P	Y: 467.0	L	<input type="button" value="Set"/> <input type="button" value="Clear"/>
Bottom Right	X: 8857.8	P	Y: 8831.9	L	<input type="button" value="Set"/> <input type="button" value="Clear"/>
Bottom Left	X: 483.3	P	Y: 8843.3	L	<input type="button" value="Set"/> <input type="button" value="Clear"/>
Principal Point	X: 4671.4	P	Y: 4655.1	L	
Calibration Edge	Left <input type="button" value="v"/>				
Errors					
Top Left	0.028 mm		1.1 P		
Top Right	0.028 mm		1.1 P		
Bottom Right	0.028 mm		1.1 P		
Bottom Left	0.028 mm		1.1 P		
<input type="button" value="Accept"/>		<input type="button" value="Cancel"/>		<input type="button" value="Help"/>	

Figura 44: Quadro resumo da orientação interna da fotografia 2242 (INGA2000) de Vidago

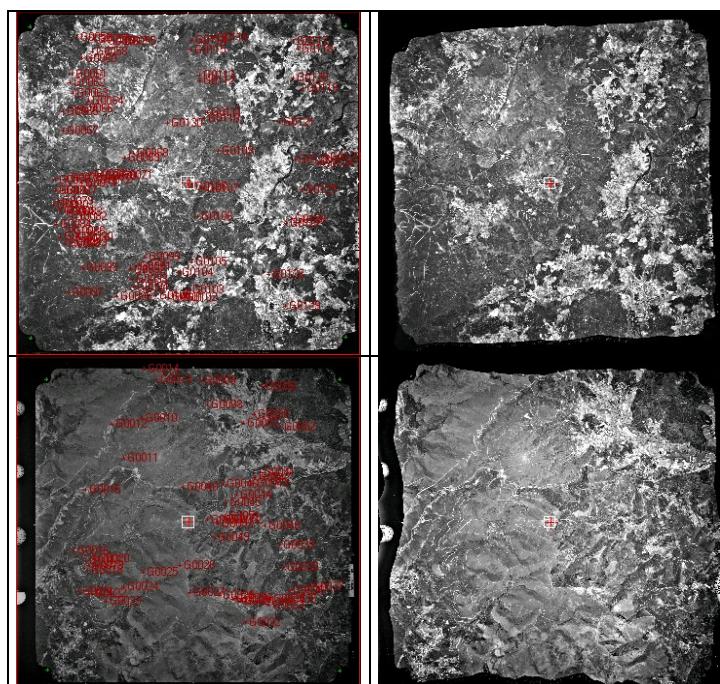


Figura 45: FAC 2242 e 3420 do INGA (2000) antes (à esquerda) e após a ortorrectificação (à direita) com o Orthoengine

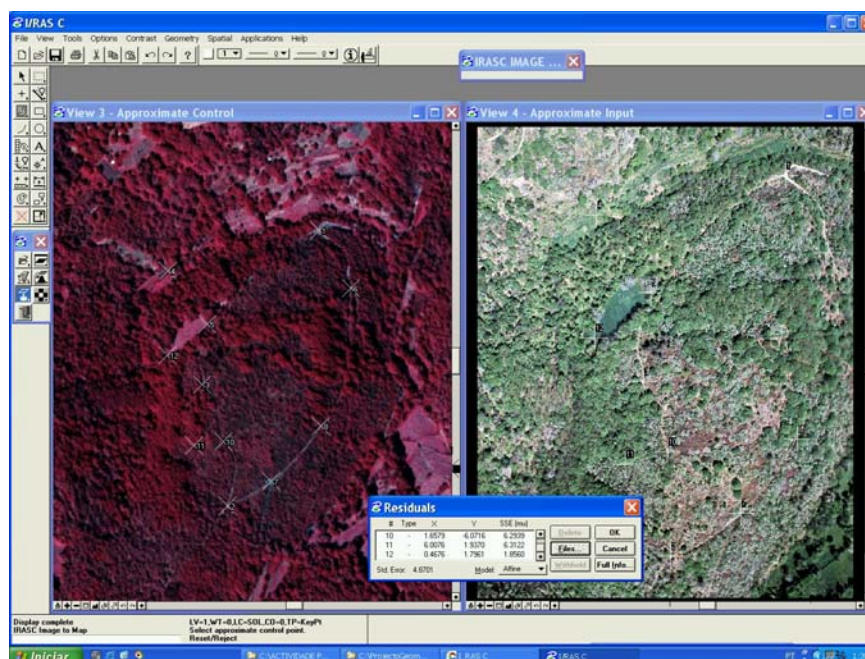


Figura 46: Georreferenciação de imagens no IRAS/C. Imagem do CNIG donde se retiraram PCT (à esquerda). Imagem de FAPMF a ortorrectificar (à direita)

### Ortorrectificação de FAPMF

Para a ortorrectificação das FAPMF a escolha da escala da fotografia e da resolução óptica do digitalizador foi efectuada de modo a se obterem imagens digitais com resoluções no terreno entre 0,10 e 0,15 m, quer com a Rolleiflex quer com a Fuji S1 Pro. Através de uma re-amostragem das imagens originais foi fixada a dimensão do pixel em 0,15 m, para todas as imagens. A

transformação polinomial respeitou o valor original do ND do pixel, pois na aplicação foi considerado o valor do pixel vizinho mais próximo. A utilização de uma mesma resolução no terreno foi fundamental para o posterior tratamento digital destas imagens.

Algumas FAPMF foram georreferenciadas com o programa IRAS/C através de uma transformação afim com numerosos pontos de controlo, obtidos directamente a partir das imagens ortorrectificadas do CNIG (Figura 46). As imagens resultantes foram posteriormente comparadas com imagens ortorrectificadas pelo Orthoengine v.6.2. Verificou-se que em situações fisiográficas pouco irregulares e com pequenas porções de imagem a qualidade geométrica obtida foi aceitável. No entanto, com o Orthoengine v.6.2 a imagem foi globalmente corrigida, mesmo em terrenos acidentados, e com qualidade geométrica excelente.

Para a ortorrectificação das fotografias aéreas captadas pela câmara analógica de médio formato, com o programa Orthoengine v.6.2, digitalizaram-se as películas fotográficas através de um scanner profissional do laboratório de uma firma local (FotoMarius), tendo-se obtido imagens digitais com dimensão dos negativos de  $45 \times 56 \text{ mm}^{32}$  contendo  $2220 \times 2770$  pixels (valores retirados da imagem – Figura 48). Como as fiadas realizadas em Vidago tinham o sentido E-W e no Marão e em Amarante o sentido N-S, e ainda porque as fotografias são rectangulares, foi absolutamente necessário especificar durante a ortorrectificação as dimensões das fotografias ( $45 \times 56 \text{ mm}$  e  $56 \times 45 \text{ mm}$ , para uma e outra situação, respectivamente).

Verificou-se uma dimensão média de cada pixel de  $0.02 \text{ mm}$  ( $56 \text{ mm} / 2770 \text{ pixels}$ ) com uma correspondente distância de cerca de  $13 \text{ cm}$  no terreno, considerando uma escala de  $1:6500$ . Estes valores dependem muito das características granulométricas da película utilizada e ainda da *resolução óptica* (RO) do scanner. Esta, através da aplicação da Eq. 10, estimou-se ser próxima de  $1280 \text{ ppp}$ . Desconhecendo-se os parâmetros de calibração da câmara foram considerados os apresentados no Quadro 20:

Comparando a imagem obtida com a imagem da ortofotografia existente do mesmo local verificou-se que o comprimento médio de cada fotografia em Amarante foi de  $370 \text{ m}$ . Considerando que para  $56 \text{ mm}$  no negativo existe uma correspondente distância no terreno de  $370000 \text{ mm}$  então em  $1 \text{ mm}$  no negativo haverá uma distância correspondente no terreno de  $6607 \text{ mm}$ . Pode-se assim concluir que a escala se manteve conforme o planeado tendo variado muito pouco ( $6500$  planeado contra  $6607$  real).

---

<sup>32</sup> Valores em polegadas:  $1.77'' \times 2.20''$ .

**Quadro 20: Informação do projecto de ortorrectificação de fotografia aérea de médio formato analógico**

**Parâmetros:**

Distância focal (mm): 80.00

Auto colimação do ponto principal P (mm)<sup>33</sup>: 0.000; 0.000

Distorção radial das lentes ( $\mu\text{m}$ ):  $k_0=k_1=k_2=k_3=k_4=k_5=k_6=k_7=0$ .

Distâncias entre marcas fiduciais (mm) no caso de linhas de voo no sentido **N-S**:  $CC'=-21.000$ ,  $DC'=28.000$ ,  $CB'=21.000$ ,  $BB'=28.000$ ,  $BA'=-28.000$ ,  $AA'=21.000$ ,  $AD'=-21.000$ ,  $DD'=-28.000$ .

Distâncias entre marcas fiduciais (mm) no caso de linhas de voo no sentido **E-W**:  $CC'=-28.000$ ,  $DC'=21.000$ ,  $CB'=28.000$ ,  $BB'=21.000$ ,  $BA'=-21.000$ ,  $AA'=28.000$ ,  $AD'=-28.000$ ,  $DD'=-21.000$ .

Foto-escala média 1:6 500.

Raio da Terra (m): 6378388.000.

Sistema de coordenadas: HGML.

Pixel da imagem ortorrectificada, no terreno: 0.15m.

Assim sendo, a resolução no terreno será próxima de:  $0.020\text{mm} \times 6607 = 132\text{mm}$ . Podem-se por isso obter imagens com pixel de 15cm de lado (no terreno), após a ortorrectificação, que se julgam adequadas para as medições dendrométricas pretendidas.

Para a orientação interna consideraram-se como marcas fiduciais os pixels dos cantos da imagem. Isso só foi possível porque se digitalizou a imagem completa, a partir do negativo. Recolheram-se vários PCT para cada fotografia e foi criado um MDT através da altimetria digital do IGeoE. Apresenta-se na Figura 49 uma fotografia de médio formato de Amarante antes e após a sua ortorrectificação.

Conforme já foi referido atrás, a resolução no terreno que é possível obter com a câmara digital Fuji S1 Pro para uma dada escala, neste caso 1:18571, é de 0.143m (Quadro 14). Desconhecendo-se os parâmetros de calibração desta câmara fotográfica, para a sua ortorrectificação no programa OrthoEngine v.6.2, foram considerados os seguintes parâmetros:

**Quadro 21: Informação do projecto de ortorrectificação de fotografia aérea de pequeno formato digital**

**Parâmetros:**

Distância focal (mm): 28.00

Auto colimação do ponto principal P (mm)<sup>34</sup>: 0.000; 0.000

Distorção radial das lentes ( $\mu\text{m}$ ):  $k_0=k_1=k_2=k_3=k_4=k_5=k_6=k_7=0$ .

Distâncias entre marcas fiduciais (mm) no caso de linhas de voo no sentido **N-S**:  $CC'=-7.800$ ,  $DC'=11.650$ ,  $CB'=7.800$ ,  $BB'=11.650$ ,  $BA'=-11.650$ ,  $AA'=7.800$ ,  $AD'=-7.800$ ,  $DD'=-11.650$ .

Distâncias entre marcas fiduciais (mm) no caso de linhas de voo no sentido **E-W**:  $CC'=-11.650$ ,  $DC'=7.800$ ,  $CB'=11.650$ ,  $BB'=7.800$ ,  $BA'=-7.800$ ,  $AA'=11.650$ ,  $AD'=-11.650$ ,  $DD'=-7.800$ .

Foto-escala média 1:18 571.

Raio da Terra (m): 6 378 388.000.

Sistema de coordenadas: HGML.

Pixel da imagem ortorrectificada, no terreno: 0.15m.

<sup>33</sup> Assumiu-se total coincidência do ponto principal com o ponto nadir.

<sup>34</sup> Assumiu-se total coincidência do ponto principal com o ponto nadir.

Relativamente à verticalidade das fotografias obtidas, apresentamos na Figura 47 os valores da orientação externa fornecidos pelo programa. Em ambos os casos ilustrados se obtiveram valores de tip, tilt e deriva admissíveis (inferiores a 3°). Esta tendência manteve-se para as restantes fotografias ortorectificadas, quer de médio quer de pequeno formato, apenas possível graças às condições atmosféricas tranquilas dos dias escolhidos para as missões aerofotográficas, à destreza e treino acumulado do piloto e eficácia do sistema de navegação.

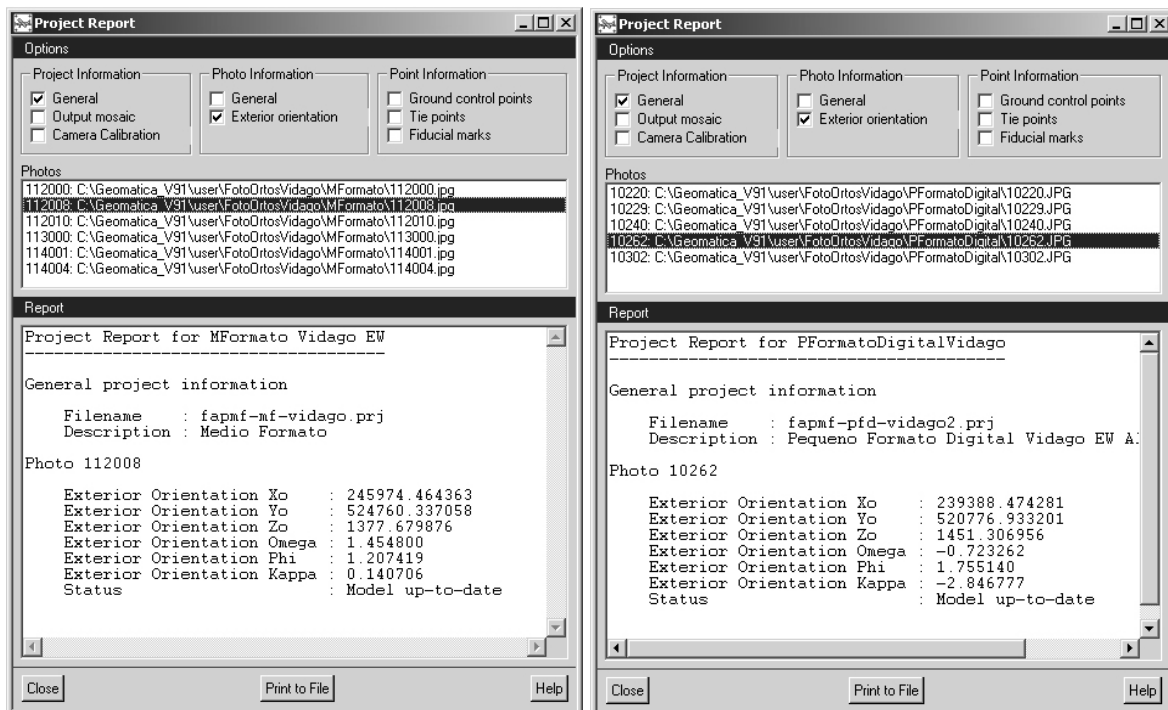


Figura 47: Relatórios de orientação externa para uma fotografia aérea de médio formato analógico (esquerda) e outra de pequeno formato digital (direita)

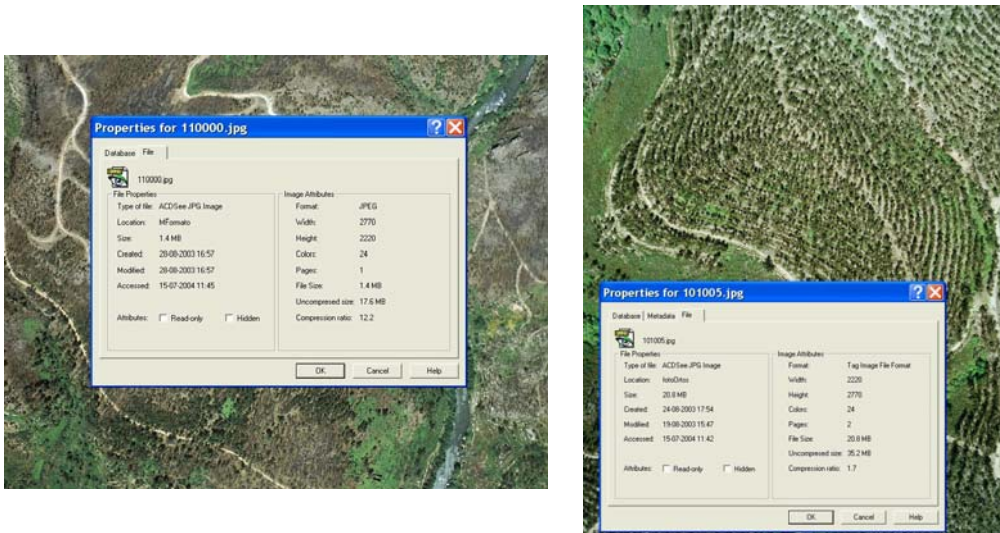


Figura 48: FAPMF não métricas Vidago (esquerda) e de Amarante (direita) (propriedades da imagem)

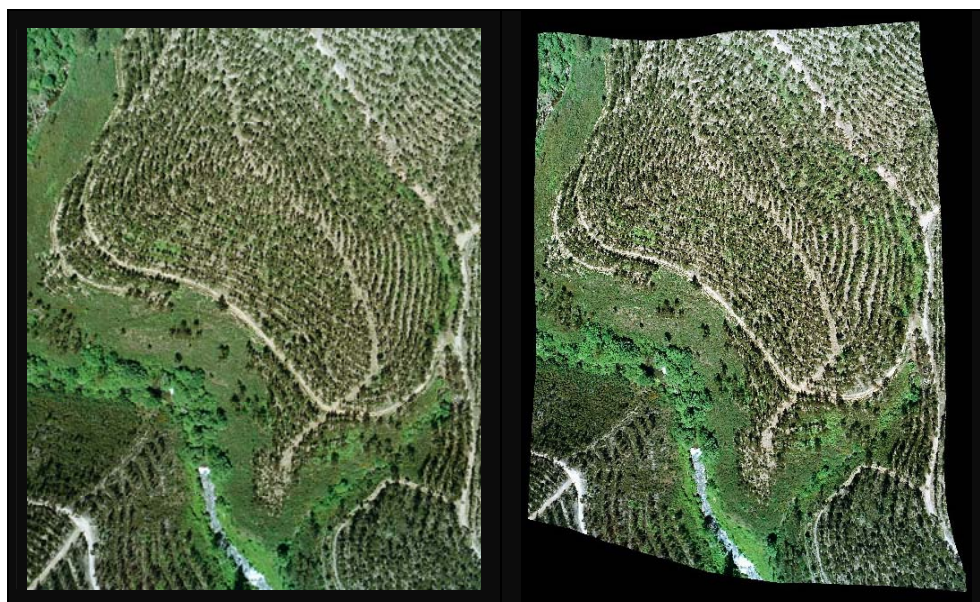


Figura 49: Ortorrectificação da FAPMF não métrica 101005 de Amarante

### 3.5.4 Processamento de Imagens de Satélite Landsat 5 e 7

#### Imagens

Foram adquiridas duas imagens Landsat relativas aos anos 1997 e 2001. Foi extraída a informação do cabeçalho das imagens e recolhida informação adicional junto do fornecedor, que se apresentam no Quadro 22 e no Quadro 23.

Quadro 22: Amplitude espectral ( $\mu\text{m}$ ) das imagens TM e ETM+

Sensor	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5	Banda6	Banda7	Banda8
TM	0.45 - 0.52	0.52 - 0.60	0.63 - 0.69	0.76 - 0.90	1.55 - 1.75	10.4 - 12.5	2.08 - 2.35	N/D
ETM+	0.45 - 0.52	0.53 - 0.61	0.63 - 0.69	0.78 - 0.90	1.55 - 1.75	10.4 - 12.5	2.09 - 2.35	0.52 - 0.90

Fonte: [http 21]

Quadro 23: Características gerais das imagens Landsat disponíveis

Tipo de imagem	data de captação	hora GMT de captação	Hora local de captação <sup>35</sup>	altura do Sol (graus)	pré-processamento
Landsat ETM+ (cena completa)	15-09-2001	11:00:00	10:15:00	46.71187°	Level-1G <sup>36</sup>
Landsat TM (1/4 de cena)	24-06-1997	10:40:00	10:09:00	60.60245°	Level-1G

ponto central (LatLong)	ponto central X; Y (HGML)	Xmin; Ymin Xmax;Ymax (HGML)	linhas × colunas	WRS Path; Row	Entity ID
41°45'32.991"N 8°01'51.320"W	208398.45; 532380.12	98118.45; 426765.12 318678.45; 637995.12	7041 × 7352	204; 31	7203031000123551
-	-	-	-	-	-

### Georreferenciação das imagens

A imagem de 2001 já se apresentava georreferenciada no sistema UTM WGS84. A georreferenciação para o sistema de coordenadas HGML tomou inicialmente como referência o ponto central da imagem, indicada pelo fornecedor, tendo sido determinados os cantos da imagem de acordo com o número de linhas e de colunas. A transformação de coordenadas foi feita inicialmente de forma aproximada, com o programa SIG Geomedia v.5.0. Seguidamente, através da sobreposição de ficheiros vectoriais dgn, ortofotografia e pontos de controlo recolhidos directamente no terreno com GPS e correcção diferencial, foram identificados 76 PCT.

Sendo a resolução espacial da banda pancromática duas vezes superior à das TM, foi duplo o número de linhas e de colunas. Verificou-se que existe uma relação directa entre as coordenadas cartesianas das imagens TM e PAN, através da recolha simultânea de vários pontos de amostragem, podendo determinar-se as coordenadas imagem da imagem PAN a partir de pontos conhecidos da imagem TM e vice-versa (Eq. 36 a Eq. 39). A importância desse facto reside na possibilidade de

<sup>35</sup> Durante o Verão a hora GMT está adiantada 1 hora em relação ao nosso meridiano central. Cada fuso horário apresenta uma amplitude de 15°, estando o nosso imediatamente a seguir para oeste do meridiano de Greenwich. A hora local exacta de captação implicou correcções de longitude. Os cálculos foram efectuados em relação ao ponto central.

<sup>36</sup> O formato “Level-1G” inclui já correcção geométrica (WGS84) ([http 4])

assim se executar a georreferenciação das duas imagens com pontos de controlo pesquisados a partir de uma só das imagens.

$$\text{Eq. 36} \quad X(\text{PAN}) = [X(\text{TM}) \times 2] - 32.74$$

$$\text{Eq. 37} \quad X(\text{TM}) = [32.74 + X(\text{PAN})] \times 0.5$$

$$\text{Eq. 38} \quad Y(\text{PAN}) = [Y(\text{TM}) \times 2] - 2.95$$

$$\text{Eq. 39} \quad Y(\text{TM}) = [2.95 + Y(\text{PAN})] \times 0.5$$

Com os 76 PCT georreferenciaram-se as imagens através duma transformação polinomial no módulo “Geocoding Wizard” do ErMapper (Figura 50). Neste caso desprezaram-se os efeitos de rebatimento do terreno, dada a elevada altitude do sensor.

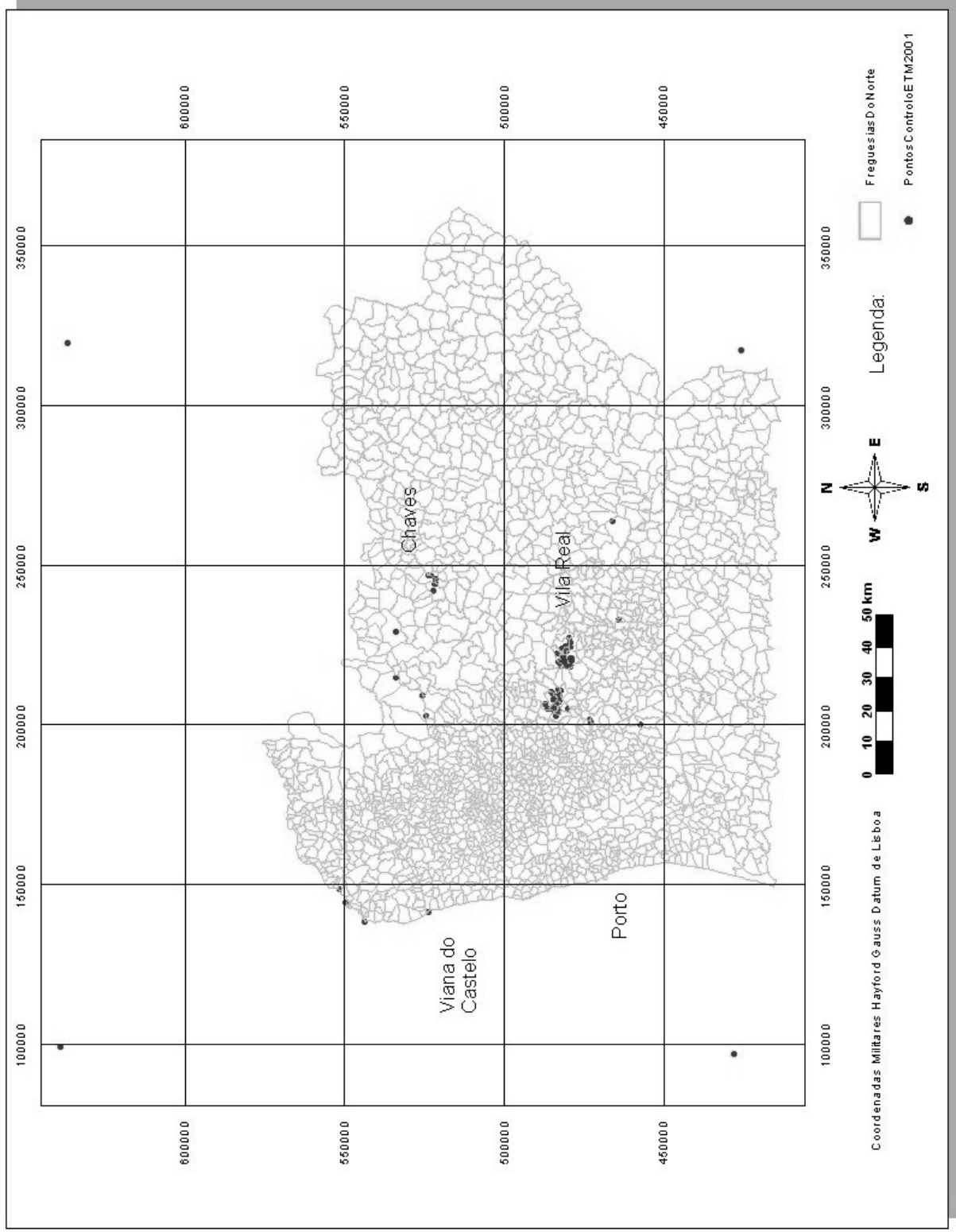


Figura 50: Pontos de controlo para georreferenciação da imagem Landsat ETM+

## Correcção radiométrica e atmosférica

Para as imagens Landsat 5 efectuou-se a correcção atmosférica de acordo com o modelo de subtracção do pixel negro proposto por Chavez (1984), porque não dispúnhamos dos valores necessários para realizar a correcção absoluta completa. Para pesquisar qual o valor do efeito da dispersão atmosférica foi seleccionada a albufeira da barragem do Alto Rabagão.

Para as imagens do Landsat 7 já foi possível aplicar o modelo completo de correcção absoluta (secção 3.3.1) através do módulo *ATMOSC* do programa Idrisi (modelo *Cos\_t*), de acordo com um esquema proposto por Chavez (1996), que possibilita a comparação de imagens multitemporais. Foram considerados os valores indicados no Quadro 24 e no Quadro 25. Este módulo permite utilizar os valores do ganho e da ordenada na origem (ou alternativamente os valores de  $L_{min}$  e  $L_{max}$ , calculados através da Eq. 20). Os valores da dispersão atmosférica foram pesquisados também na albufeira da Barragem do Alto Rabagão.

As imagens resultantes deste módulo do Idrisi indicam reflectâncias proporcionais, variando de 0 a 1. Para a sua conversão em formato 8-bit (0 a 255) devem multiplicar-se por 255 seguidas da sua conversão para o formato byte binário (normalmente por arredondamento). Esta conversão é particularmente importante na determinação dos índices de vegetação e na determinação do LAI através de equações de regressão previamente estabelecidas.

Quadro 24: Factores considerados na correcção atmosférica e radiométrica das imagens Landsat ETM+

banda	$E_{0\lambda}$ ( $mWcm^{-2}sr^{-1}um^{-1}$ )	ND da componente HAZE	Comprimento de onda central ( $\mu m$ )	Percepção colorida
TM1	196.5	46	0.485	azul
TM2	168.7	26	0.570	verde
TM3	145.25	17	0.660	vermelho
TM4	100.11	7	0.840	infraverm. próx.
TM5	22.06	4	1.650	infraverm. médio
TM7	7.6	0	2.220	infraverm. long.
PAN	132.98	6	0.710	pancromático

Fonte: Eastman (2003)

Os valores das *irradiâncias espectrais solares* ( $E_{0\lambda}$ ) apresentados por Eastman (2003a) são ligeiramente diferentes dos indicados pela NASA (Quadro 7), o que dá razão a Nekele e Labs (1984) in Goetz *et al.* (1998) que referiam não haver conhecimento absoluto sobre esses valores. Neste caso teríamos preferido aplicar os valores indicados pela NASA (Quadro 24), mas não foi possível, porque o algoritmo de correcção atmosférica do programa Idrisi Kilimanjaro já tem implícitos os valores indicados no (Quadro 7), sendo no entanto, como se disse já, mínima a diferença.

Quadro 25: Factores específicos das imagens Landsat ETM+ (correção atmosférica e radiométrica)<sup>37</sup>

banda	*ganho	*Ordenada		*Lmin	*Lmax	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	$\theta_v$	ano	Dia	Mês	GMT (hh.h)	Dn haze	DN min	DN max
		Na	Origem											
TM1	0.0776	-0.62	6.730	33.673	46.712	0	2001	15	9	11.25	50	46	255	
TM2	0.0796	-0.64	4.072	32.852			idem				29	26	255	
TM3	0.0619	-0.5	3.553	41.989			idem				19	17	255	
TM4	0.0965	-0.51	1.253	26.940			idem				8	7	255	
TM5	0.0126	-0.1	3.977	203.618			idem				8	4	255	
TM7	0.0044	-0.035	0.800	583.984			idem				5	0	255	
PAN	0.0972	-0.47	1.101	26.725			idem				12	6	255	

Fonte: metadados da imagem; \*Unidades:  $mWcm^{-2}sr^{-1}um^{-1}$ )

## Resultados

As imagens resultantes dos procedimentos aplicados melhoraram o seu aspecto visual, de forma geral. Não se apresentaram aqui as imagens finais porque elas são apresentadas na secção seguinte.

### 3.5.5 Métodos de Fusão de Imagens Digitais

#### Introdução

Nesta secção descrevem-se os métodos de Fusão de Imagens Digitais que aplicámos com o objectivo de produzir imagens para realização de cartografia de uso/ocupação do solo por vectorização com observação directa. Foram aplicados os vários algoritmos apresentados atrás na secção 3.4, nomeadamente o Método HIS, o Método da Análise em Componentes Principais (ACP) e pelo método de Filtrações Passa Alto associado a um processo de adição e/ou multiplicação pixel-por-pixel.

O desenvolvimento destas metodologias não se pode dissociar da aplicação prática a qual foi por isso feita em simultâneo. Seguidamente foram avaliadas as melhores imagens obtidas e realizada a cartografia de uso/ocupação do solo por vectorização, com observação directa relativa a cada uma das áreas de estudo, excepto a de Amarante-Aboim, porque já se dispunha da mesma, previamente cedida pela empresa “Aliança Florestal”, que explora os povoamentos de eucalipto.

<sup>37</sup> Os valores de ganho e ordenada na origem são fornecidos no header da imagem. Os valores Lmin e Lmax foram calculados.

## Fusão de imagens pelo Método HIS (Croma-Intensidade-Saturação)

Este método é muito referido na bibliografia consultada. As bandas seleccionadas deverão possuir a maior informação possível para a aplicação desejada, uma vez que este processo se encontra limitado a três bandas. Pohl e Genderen (1998), incluem-no num grupo designado por método com selecção de bandas fazendo a distinção entre métodos relacionados com a cor, métodos estatísticos e combinações de métodos. Nesse sentido, Chavez *et al.* (1982) aconselham a selecção das 3 bandas que apresentem o melhor factor (OIF - do inglês Optimum Index Factor), matematicamente descrito pela Eq. 40.

$$\text{Eq. 40} \quad OIF = \frac{\sum_{i=1}^3 \sigma_i}{\sum_{j=1}^3 |cc_j|}$$

Em que:  $\sigma_i$  = desvio padrão dos ND por banda

$cc_j$  = coeficiente de correlação entre cada par de bandas

Dos vários exemplos de fusão de imagem consultados, os mais frequentes referem a fusão de imagens multiespectrais com uma imagem pancromática. De acordo com esta metodologia são seleccionadas três bandas multiespectrais e processada a transformação RGB-IHS por intermédio de um algoritmo adequado. A componente I é então substituída por outra imagem, de elevada resolução espacial, normalmente a imagem pancromática, e seguidamente realizada a transformação inversa IHS-RGB.

O resultado da fusão de imagens são combinações lineares das bandas multiespectrais originais com bandas pancromáticas de elevada resolução espacial. (Campbell, 1993 *in* Pohl e Genderen, 1998, Chavez *et al.* 1991) devendo por isso existir forte correlação entre a componente I substituta e a componente I da imagem original (componente a substituir). Caso contrário, as alterações evidentes entre diferentes estratos, tais como entre várias coníferas e folhosas numa imagem IVC, podem ficar esbatidas (Carper *et al.* 1990).

Antes da fusão, as imagens de menor resolução espacial deverão ser previamente expandidas para a mesma resolução da imagem de maior resolução espacial e suavizadas com um filtro passa baixo, para atenuar o efeito de agregação em quadrado das imagens TM (Chavez, 1986).

Chavez e Bowell (1988) aconselham aplicar previamente um filtro passa alto à imagem de maior resolução espacial para realçar a informação espacial de alta frequência e suprimir a

informação espacial de baixa frequência<sup>38</sup>. Após a transformação RGB em HIS e antes da transformação inversa em RGB deve fazer-se a ampliação de contraste linear (*stretch*) das componentes H e S.

### Método da Análise em Componentes Principais (ACP)

A Análise em Componentes Principais (ACP) tem demonstrado utilidade na codificação, compressão, melhoramento, detecção de alterações, e fusão de imagens digitais. Relativamente ao método IHS apresenta a vantagem de não estar limitado a três bandas, permitindo agregar em 3 componentes principais quase toda a informação contida numa larga série de bandas (Quadro 26). Cada componente principal conterá por isso informação espectral única. A primeira componente principal (CP1) contém normalmente a informação que é mais comum a todas as bandas, isto é, a informação espacial, enquanto que a informação espectral fica distribuída pelas outras componentes.

Chavez *et al.* (1991) preconizam a substituição da CP1 por uma nova imagem de maior resolução espacial (neste caso a PAN1) após a sua ampliação de contraste de modo a ficar com a variância e média da CP1. Eastman (2003) refere que são obtidos melhores resultados quando se considera globalmente a imagem e não apenas uma porção dela.

Quadro 26: Sensibilidade espectral dos sensores SPOT-1, Landsat-5 TM e PAN1

Band	Sensibilidade espectral (µm)	Percepção colorida	Resolução (m)
TM1	0,45-0,52	Azul	30
TM2	0,52-0,62	Verde	30
TM3	0,63-0,69	Vermelho	30
TM4	0,76-0,90	Infravermelho próximo	30
TM5	1,55-1,75	Infravermelho médio	30
TM6	10,4-12,5	Infravermelho térmico	60
TM7	2,08-2,35	Infravermelho médio	30
XS1	0,50-0,59	Verde	20
XS2	0,61-0,68	Vermelho	20
XS3	0,79-0,89	Infravermelho próximo	20
PAN-SPOT	0,51-0,73	pancromático	10
PAN1	A verificar	pancromático	1

### Método de filtragem

Cliche *et al.* (1985), aplicaram este método de fusão a imagens SPOT XS. Calcularam três componentes (C1, C2 e C3) com as quais criaram uma composição colorida. Estes mesmos

<sup>38</sup> Esta filtragem só deverá ser feita quando as resoluções espaciais forem muito diferentes. Para a fusão das bandas TM (30m) com a banda pancromática (15m) não é aconselhável esta filtração.

autores, trabalharam com dados simulados de SPOT e não com dados captados pelo satélite. Mostraram que podem ser simuladas imagens coloridas com 10m de resolução por modulação de cada banda XS com a PAN individualmente. Vários métodos de integração de dados foram testados, nenhum dos quais empregou a transformação IHS.

O melhor processo obtido para visualização de uma área de teste foi obtida aplicando as seguintes equações:

Na teoria

$$C1 = A1 + B1 \cdot (PAN \cdot XS1)^{1/2}$$

$$C2 = A2 + B2 \cdot (PAN \cdot XS2)^{1/2}$$

$$C3 = A3 + B3 \cdot (PAN + 3 \cdot XS3)/4$$

Na prática

$$C1 = (PAN \cdot XS1)^{1/2}$$

$$C2 = (PAN \cdot XS2)^{1/2}$$

$$C3 = ((PAN + 3 \cdot XS3)/4).$$

Considerando que:  $A1 = A2 = A3 = 0$  e  $B1 = B2 = B3 = 1$

Em que: C1, C2, C3 são valores RGB output numa escala de 8 bits [0-255 0-255 0-255]. AX e BX são constantes.

Cliche *et al.* (1985) verificaram que as ponderações usadas para os canais PAN e XS3 (IVP), embora arbitrárias, aumentaram a resolução de 20 para 10m, preservando no entanto a maior parte da informação espectral.

A preservação da informação espectral foi explicada pelos autores. Ambos os canais PAN e XS1 são função da reflexão. Assim sendo, o seu produto será função do quadrado da reflexão. A extracção da raiz quadrada deste produto preserva os valores dos ND. O mesmo se passa com o produto da PAN pela XS2. Analisando a correlação entre as várias bandas verificou-se, tal como nas imagens TM, que as bandas dentro do espectro visível possuem fortes correlações entre si e também com a imagem PAN. No caso da C3, e uma vez que a correlação entre o canal infravermelho e o pancromático é baixa, atribui-se uma ponderação que minimiza a importância da PAN e beneficia o infravermelho. A componente C3 deverá possuir uma correlação fraca com as outras componentes, do mesmo modo que a XS3 também tinha fraca correlação com as XS1 e XS2. O mesmo se passa com as bandas TM (Anexo XXXII). A TM4 possui fraca correlação com as bandas do visível.

Neste caso, os autores consideraram  $A1 = A2 = A3 = 0$  e  $B1 = B2 = B3 = 1$ . Estes factores de ponderação não foram por nós aplicados uma vez que se destinam a manipular a informação visual. É o caso de determinadas bandas com ND muito baixos e que visualmente se apresentam muito escuras. Trata-se por isso de uma simples operação de cosmética, que caso se pretenda, poderá ser efectuada por manipulação de contraste, posteriormente. A aplicação de ponderações não implica ganho ou perda de informação.

Também neste método se exige a expansão das imagens para garantir igualdade de resolução espacial, seguida de ampliação de contraste. Ainda de acordo com os mesmos autores, como resultado desta aplicação, as componentes C1, C2 e C3 apresentam relativamente às bandas originais uma melhoria na resolução espacial, sem perda de informação espectral.

### **Aplicação dos Métodos de Fusão de Imagens Digitais**

No Quadro 27 são indicados os aparelhos e programas utilizados para cada uma das fases do processamento digital de imagem. Além dos pontos de controlo no terreno, recolhidos com GPS, também se recolheram pontos de controlo através da ortofotografia IVC do CNIG de 1995. Foi utilizado o programa SIG Geomedia Pro v5 para inserção e comparação visual das imagens, vectorização da ocupação do solo e criação de mapas finais.

Quadro 27: Programas associados a cada fase do processamento digital de imagem

	Idrisi 32 v2	Idrisi Kilimanjaro	OrthoEngine v6.2 da PCI	ErMapper	GPS e Pathfinder Office
Correcção geométrica	Landsat 5			Landsat 7	Landsat 5 e Landsat 7
Correcção radiométrica e atmosférica	Landsat 5	Landsat 7			PAN1
Ortorrectificação de fotografias aéreas			PAN1		
Fusão	Landsat 5 com PAN1	Landsat 7 com PAN15		Landsat 7 com PAN15	

### **Fusão de imagens TM (Landsat 5) com banda pancromática derivada de ortofotografia**

Antes da fusão das imagens digitais, as imagens TM foram ampliadas para a resolução espacial da PAN1 (30 para 1). Após a ampliação, as imagens foram suavizadas com um filtro passa-baixo, aplicado a matrizes 3x3 seguida de ampliação de contraste linear com 1% de saturação (imagens resultantes TM1-15, TM2-15, ..., TM7-15). A imagem pancromática foi realçada com um filtro passa-alto (imagem resultante PANS).

Na Figura 51 apresenta-se uma composição colorida falsa cor com as bandas TM 432 para comparação com os resultados a apresentar da fusão de imagem. Todas as composições coloridas efectuadas foram precedidas de aumento de contraste linear.

As imagens analisadas descrevem-se estatisticamente de acordo com o indicado no Anexo XXX. Foram calculados com base nos valores estatísticos das imagens os OIF para cada combinação de 3 bandas. Conforme se pode ver no Anexo XXXVI a melhor combinação será a

partir da conjugação das bandas TM 345. No entanto também foram testadas outras combinações de factor OIF inferior. Por exemplo, a combinação 432 foi também testada por proporcionar a típica imagem vulgarmente designada de “falsa cor”, mesmo com um OIF situado a meio da tabela.

Foram feitas 4 ACP distintas sobre as imagens PAN1 e TM, com cálculo directo das covariâncias, para determinar a matriz de variâncias e covariâncias (Anexo XXXI), a matriz de correlações (Anexo XXXII), a percentagem de variância de cada componente, valores e vectores próprios (Anexo XXXIII) e por último o peso de cada componente principal determinada (Anexo XXXIV):

- ACP sobre as imagens PAN1 e TM, com extracção de sete componentes, opção variáveis não padronizadas;
- ACP sobre as imagens TM, extracção de três componentes, opção variáveis não padronizadas;
- ACP sobre as imagens PAN1 e TM com extracção de sete componentes, opção variáveis padronizadas;
- ACP sobre as imagens TM com extracção de seis componentes, opção variáveis padronizadas

#### *RGB-IHS-RGB*

Realizaram-se três testes de fusão comparativos:

- combinação RGB de 3 bandas TM não suavizadas e transformação RGB/HIS, com substituição directa da componente intensidade pela imagem pancromática original PAN seguida de transformação inversa IHS/RGB e criação de composições coloridas 8-bit e 24-bit (organigrama RGB-HIS-BRUTO do Anexo XLIV resultante do macro TMxxxBRUTO.IMM). As imagens resultantes apresentam-se na Figura 52.
- combinação RGB de 3 bandas TM suavizadas e transformação RGB/HIS, substituição da componente intensidade pela PANS, seguida de transformação inversa IHS/RGB e criação de composições coloridas 8-bit e 24-bit (organigrama RGB-HIS-FUSAOMARAO1 do Anexo XLV resultante do macro FUSAOMARAO1TM432.IMM). As imagens resultantes apresentam-se na Figura 54.
- combinação RGB das 3 primeiras componentes principais resultantes da ACP das imagens TM padronizadas (com extracção de seis componentes) e transformação RGB/HIS, substituição da componente intensidade pela PANS, seguida de transformação inversa IHS/RGB e criação de composições coloridas 8-bit e 24-bit (organigrama RGB-HIS-CP123 do Anexo XLVI resultante do macro FUSAOMARAO1-STR-PCA-VAR-PADRONIZ.IMM). As imagens resultantes apresentam-se na Figura 53.

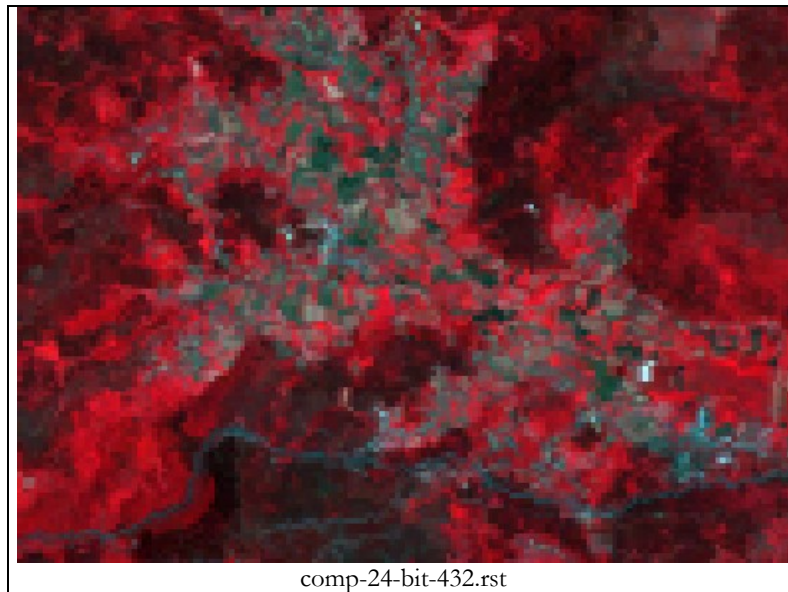


Figura 51: Composição colorida falsa cor 24-bit com as bandas TM 432 (sem fusão)

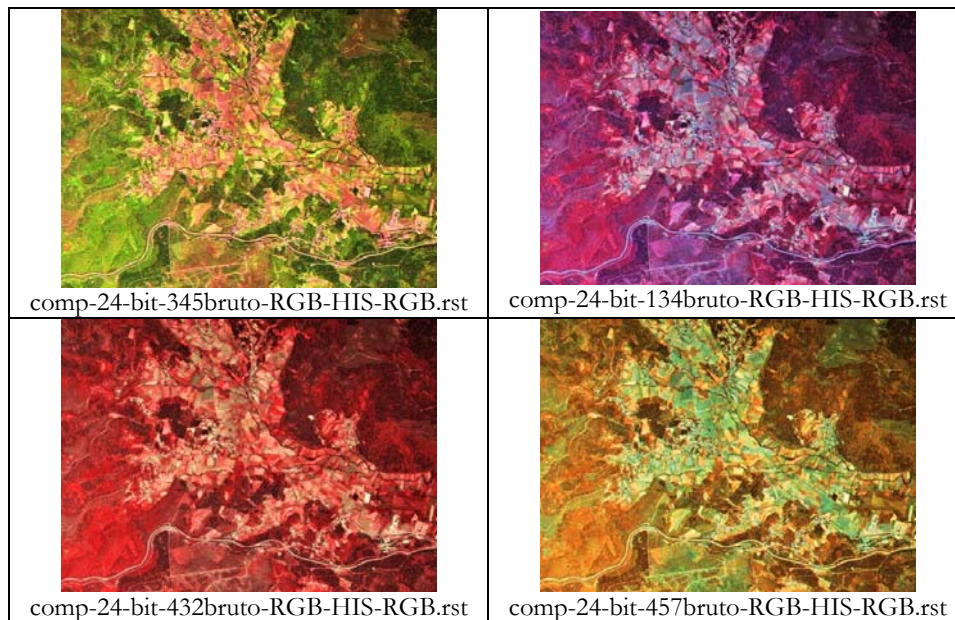


Figura 52: Composições coloridas 24-bit da transformação RGB-HIS-BRUTO



Figura 53: Composição colorida 24-bit da transformação RGB-HIS-CP123

### *ACP com substituição da CP1 pela PANS*

Foi realizada uma ACP a todas as imagens TM (excepto a TM6) previamente expandidas e suavizadas (Anexo XLII).

Foram testadas 4 formas de substituição directa da CP1 pela PANS:

- ampliação de contraste linear da imagem PANS, transformação IHS/RGB, seguidos pela composição colorida com as imagens resultantes (organigrama no Anexo XLVII);
- aumento de contraste linear das imagens PANS, CP2 e CP3 e composições coloridas das imagens resultantes (organigrama no Anexo XLVIII);
- semelhante à anterior mas com ampliação de contraste linear apenas da imagem PANS (organigrama no Anexo XLIX);
- substituição da PANS pela imagem CP1 seguindo-se o processo inverso da ACP, a partir das ponderações obtidas de cada componente da ACP.

As imagens resultantes das 3 primeiras formas de substituição da CP1 pela PANS apresentam-se na Figura 55.

Na forma 4, como cada imagem original é uma combinação linear das várias componentes obtidas, os pesos de cada imagem em cada componente da ACP, apresentados no Anexo XXXV, permitem reverter o processo e recuperar as imagens iniciais. Como a CP1 contém essencialmente a informação espacial, antes do processo inverso de ACP substitui-se esta componente pela PANS, desprezando-se as componentes que expliquem menos variabilidade global, muitas vezes consideradas como ruído (Eastman, 2003).

Através do programa utilizado (Idrisi Kilimanjaro) não foi possível fazer o aumento de contraste da imagem PANS para a variância e média da CP1, conforme se preconizava atrás. Por isso, a ampliação de contraste foi feita forçando os valores mínimo e máximo de acordo com a componente a substituir (Anexo LI).

As composições coloridas 24-bit criadas com as imagens obtidas através deste processo (organigrama no Anexo LIII e Anexo LIV) são visualmente muito semelhantes à imagem pancromática original. As composições coloridas 8-bit criam aberrações na definição de fenómenos distintos. Não se apresentam estas imagens.

As seis novas imagens criadas aplicou-se novamente uma análise de componentes principais padronizada com extracção de 3 componentes (Anexo LII) na tentativa de concentrar na CP1 a maior parte da informação espacial e reter a informação espectral nas outras duas. Antes disso foi realizada uma ampliação de contraste linear das imagens (Anexo L). Com as três componentes extraídas produziram-se duas composições coloridas (Anexo LV). A apreciação visual da imagem é má (Figura 56). Este processo não teve por isso sucesso.

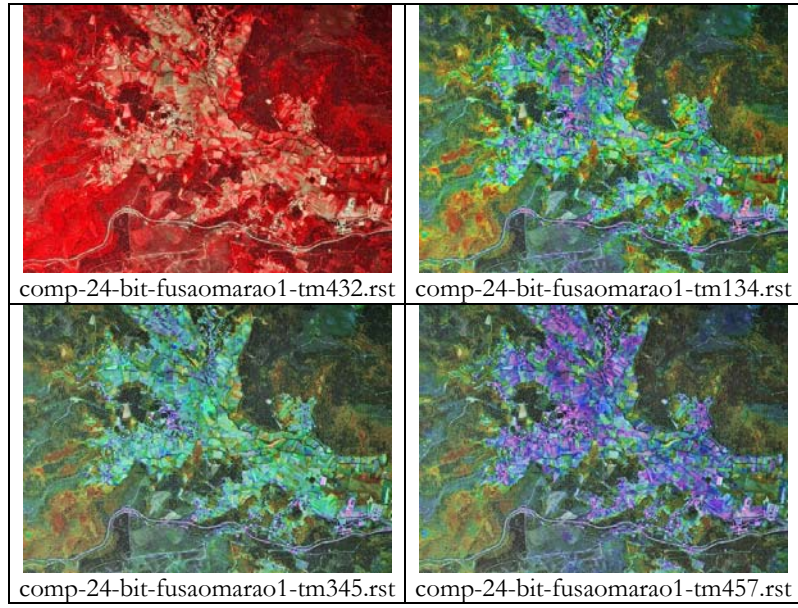


Figura 54: Composições coloridas 24-bit da transformação RGB-HIS-FUSAOMARAO1

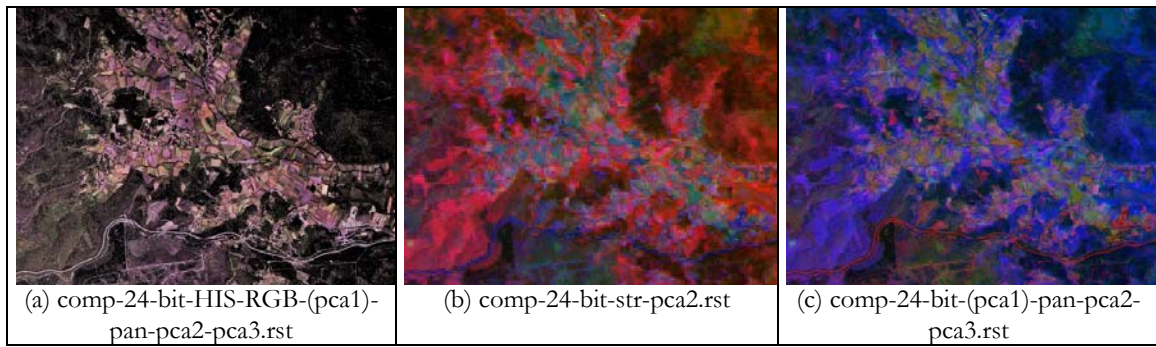


Figura 55: Composições coloridas 24-bit da substituição directa da CP1 pela PANS

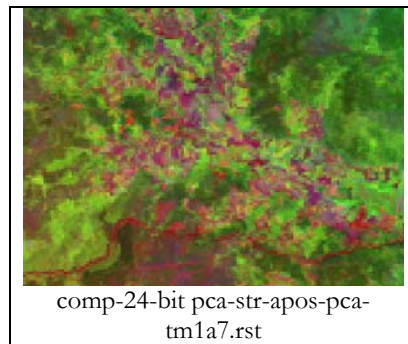


Figura 56: Composição colorida através das três primeiras componentes principais da transformação pca-invPca-pca (comp-8e24-bit-pca-str-apos-pca-tm1a7.imm)

### *ACP de todas as imagens*

Neste caso foram consideradas simultaneamente todas as imagens disponíveis<sup>39</sup> (imagens TM e imagem PANS) que depois de expandidas, suavizadas e com ampliação de contraste linear, lhes foi aplicada uma ACP com extracção de 6 componentes principais.

Os parâmetros estatísticos extraídos desta ACP apresentam-se no Anexo XXXVII, Anexo XXXVIII, Anexo XXXVIII e Anexo XXXIX.

Foram testadas duas modalidades de procedimento:

- ampliação do contraste linear das 3 primeiras componentes da ACP e criação de composições coloridas 8 e 24-bit,
- transformação HIS/RGB, fazendo corresponder a CP1 com a componente I, e as CP2 e CP3 com as outras componentes (H e S), e criação de composições coloridas 8 e 24-bit (com pré-ampliação de contraste linear com 1% de saturação<sup>40</sup> e com pré-ampliação de contraste linear simples)

As imagens resultantes inserem-se na Figura 57.

### *Filtrações passa alto associada a um processo de adição e/ou multiplicação pixel-por-pixel*

Seguindo a metodologia indicada por Cliche *et al.* (1985), foram calculadas as componentes C1, C2 e C3, do seguinte modo:

- filtro passa-alto da imagem pancromática - PANS
- filtro passa-baixo (média 3x3) das bandas TM seleccionadas (2,3 e 4), seguido de ampliação de contraste linear – STM2, STM3 e STM4
- operação escalar

---

<sup>39</sup> A ACP do programa Idrisi pode processar até doze imagens e o número máximo de componentes não poderá exceder o número de imagens introduzidas nesta análise (Eastman, 2003).

<sup>40</sup> A ampliação de contraste linear com saturação força o enquadramento numa série de valores extremos numa mesma classe. É especialmente interessante na preparação de imagens para visualização, porque concentra os valores produzidos em valores menos extremos (e de maior frequência).

Operações escalares<sup>41</sup>:

$$C1 = \text{sqrt}([\text{PANS}] \cdot [\text{STM2}]) = \sqrt{[\text{PANS}] \cdot [\text{STM2}]}$$

$$C2 = \text{sqrt}([\text{PANS}] \cdot [\text{STM3}]) = \sqrt{[\text{PANS}] \cdot [\text{STM3}]}$$

$$C3 = ([\text{PANS}] + 3 \cdot [\text{STM4}]) / 4$$

Ainda de acordo com o mesmo autor, as composições coloridas deverão ser da seguinte forma: RGB = C3C2C1; b=C1, g=C2, r=C3. A imagem obtida por este método apresenta-se na Figura 58. Foi realizada sem sucesso uma tentativa para melhorar o aspecto visual, alterando a ordem de entrada RGB.

### **Fusão de imagens ETM+ (Landsat 7) - bandas TM e pancromática**

As imagens ETM+ do sensor Landsat 7 foram adquiridas posteriormente. A incorporação da banda pancromática de maior resolução espacial com pixel de 15m foi uma excelente inovação tecnológica relativamente ao sensor do Landsat 5, uma vez que permitiu melhorar de forma expedita o aspecto visual das 6 bandas multiespectrais TM com pixel de 30m. Quase imediatamente após o lançamento destas imagens, os fornecedores de imagens de satélite começaram a disponibilizar também comercialmente, além das imagens puras, imagens suavizadas com o canal pancromático.

Seleccionaram-se as bandas ETM 4 5 7 por terem proporcionado o melhor OIF (Anexo XLI) e aplicou-se o algoritmo RGB-IHS-RGB porque foi o que proporcionou melhores resultados com as imagens TM do Landsat 5, conforme se poderá ver a seguir (secção 3.5.6). Assim, seguindo a mesma metodologia, criaram-se duas composições coloridas RGB 24-bit e 8-bit normal com as bandas ETM 457 (sem fusão) previamente tratadas (correções radiométrica, atmosférica e geométrica) (Figura 59) para comparação com o resultado da fusão.

O processo de fusão aplicado (Anexo LXI) resume-se do seguinte modo:

- expansão das imagens seleccionadas (ETM4-30, ETM5-30 e ETM7-30) para a resolução da imagem pancromática (15m),
- suavização com um filtro passa-baixo em matrizes 3×3,
- conversão para formato byte binário,
- ampliação de contraste linear com 1% de saturação (imagens ETM4-15, ETM5-15 e ETM7-15),

---

<sup>41</sup> Sintaxe utilizada no programa Idrisi: sqrt = raiz quadrada; entre parênteses rectos significa que é uma imagem; \* = multiplicação.

- transformação RGB/HIS,
- análise da correlação entre a componente I e a imagem pancromática (PAN15)<sup>42</sup>,
- ampliação de contraste linear das componentes H e S,
- transformação HIS/RGB com substituição prévia da componente I pela imagem pancromática (PAN15)<sup>43</sup> depois da sua conversão para formato byte binário e ampliação de contraste com 1% de saturação<sup>44</sup>,
- composições coloridas 8 e 24-bit precedidas de ampliação de contraste linear<sup>45</sup> (*composite with stretched values*),
- opcionalmente poderá fazer-se a conversão para formato bmp caso se pretenda inserir a imagem resultante em SIG externo<sup>46</sup>.

---

<sup>42</sup> Foi encontrada uma boa correlação entre ambas as imagens ( $r=0,86$ )

<sup>43</sup> Não se aplicou nenhum filtro a esta imagem, dada a pouca diferença de resolução com as imagens a fundir

<sup>44</sup> Ampliação de contraste para melhoria do aspecto visual

<sup>45</sup> Ampliação de contraste para melhoria do aspecto visual

<sup>46</sup> Esta tarefa opcional pode realizar-se em qualquer altura

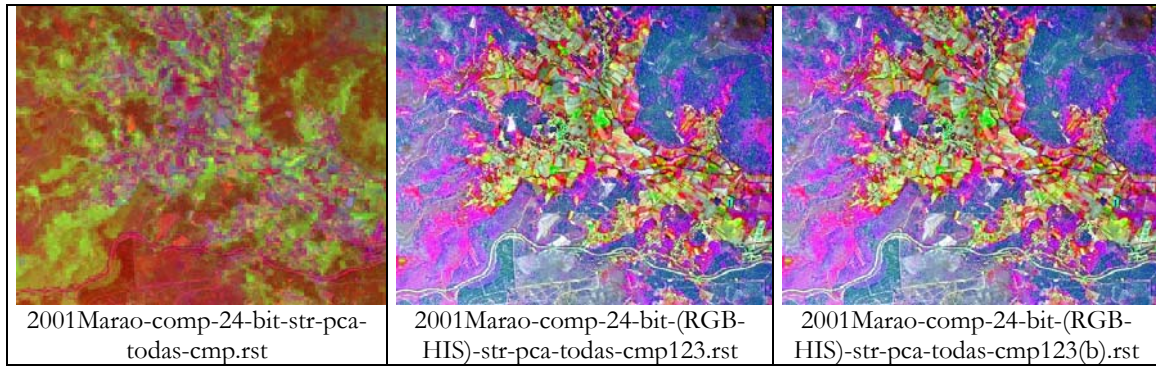


Figura 57: Composições coloridas 24-bit ACP todas as imagens

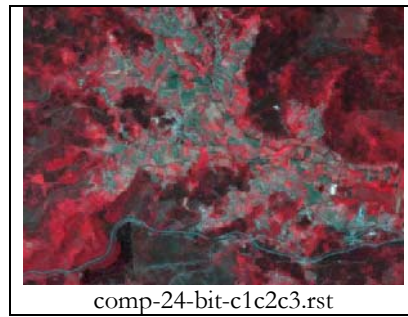


Figura 58: Composição colorida 24-bit (RGB = C3C2C1; B=C1, G=C2, R=C3)

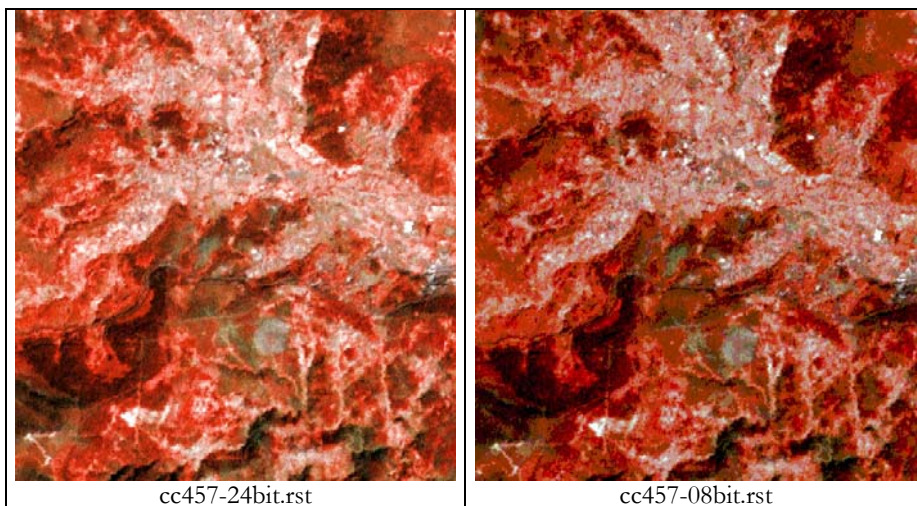


Figura 59: Composições coloridas falsa cor com as bandas ETM 432 (sem fusão)

### **Fusão de imagens ETM+ (Landsat 7) com banda pancromática derivada de ortofotografia**

À semelhança do que tinha sido efectuado no Marão, também se realizou em Vidago a fusão das imagens de satélite com fotografia aérea (neste caso imagens ETM+ do Landsat 7). Foi utilizado o mesmo tipo de fotografia correspondente à cobertura efectuada para o INGA em 2000 em película pancromática preto e branco. Dado que esta área de estudo cobre uma superfície terrestre bastante maior que a do Marão, houve necessidade de criar um mosaico fotográfico após ortorrectificação de 6 fotografias contíguas no programa Orthoengine v6.2 (Figura 72). Foram extraídas duas imagens (PAN01VID e PAN05VID) com resoluções espaciais de 1 e 5m respectivamente.

O processo de fusão aplicado em Vidago resume-se do seguinte modo:

- expansão das imagens seleccionadas (ETM4-30, ETM5-30 e ETM7-30) para a resolução da imagem pancromática (1 e 5m), (imagens ETM4-01, ETM5-01 e ETM7-01 e ETM4-05, ETM5-05 e ETM7-05),
- suavização com um filtro passa-baixo em matrizes 3×3,
- conversão para formato byte binário,
- ampliação de contraste linear com 1% de saturação (imagens ETM4-01VID, ETM5-01VID e ETM7-01VID e imagens ETM4-05VID, ETM5-05VID e ETM7-05VID),
- transformação RGB/HIS,
- análise da correlação entre a componente I e a imagem pancromática (PAN01 e PAN05)<sup>47</sup>,
- ampliação de contraste linear das componentes H e S,
- transformação HIS/RGB com substituição prévia da componente I pela imagem pancromática (PAN01 e PAN05) depois da sua conversão para formato byte binário e ampliação de contraste com 1% de saturação,
- composições coloridas 24-bit precedidas de ampliação de contraste linear.

Na área de estudo de Amarante-Aboim apenas se efectuou a fusão das imagens TM do Landsat 7 com a PAN15 porque, contrariamente ao que aconteceu nas outras áreas de estudo, o INGA se recusou a fornecer as provas directas, mesmo tendo sido referido que esta encomenda se destinava apenas a trabalho de doutoramento.

---

<sup>47</sup> Foi encontrado um coeficiente de correlação entre ambas as imagens de  $r = 0.566210$

A carta de ocupação do solo foi-nos gentilmente cedida pela empresa “Aliança Florestal” em formato Shape e importada directamente para o nosso SIG Geomedia v5.0. O IGP cedeu-nos também as ortofotografias IVC de 1995, as quais foram extremamente importantes para recolha de PCT necessários para a georreferenciação da imagem de satélite.

### 3.5.6 Discussão e resultados de Fusão de Imagens Digitais

Para aferir a qualidade visual das imagens obtidas por fusão do Marão e de Amarante, delimitaram-se os vários tipos de ocupação de solo por fotointerpretação com fotografia IVC e fotografia PPB no SIG Geomedia Pro v5 (Figura 60, Figura 70). Sobrepos-se essa cartografia às várias imagens obtidas (composições coloridas sem fusão e resultados da fusão com as imagens pancromáticas de várias resoluções espaciais).

Para melhor observação do efeito obtido através deste exercício, as imagens obtidas foram agrupadas de forma sequencial para cada área de estudo:

#### **Marão:**

Figura 60: Carta de ocupação do solo da área de estudo, realizada por fotointerpretação sobre fotografia aérea PPB de 2000 e ortofotografia IVC de 1995, onde se pode observar o tipo de ocupação do solo desta região;

Figura 61: Composição colorida ETM457 de 2001 sem fusão;

Figura 62: Mapa Marão – parcelas amostradas sobre ortofotografia PPB de 2000;

Figura 63: Composição colorida resultante da fusão RGB-HIS das TM432 com PAN1;

Figura 64: Composição colorida 24-bit resultante da fusão RGB-HIS das TM457 com PAN15;

Figura 65: Composição colorida 8-bit resultante da fusão RGB-HIS das TM457 com PAN15

#### **Vidago:**

Figura 70: Carta de uso e ocupação do solo (Vidago)

Figura 72: Mosaico fotográfico (Vidago)

Figura 73: Fusão RGB-HIS das TM 457 e PAN15 para Vidago-Boticas

Figura 74: Fusão RGB-HIS das TM457 com PAN05 (Vidago)

Verificou-se que na generalidade dos casos as composições coloridas RGB de 24-bit são visualmente melhores que as de 8-bit, rejeitando-se por isso estas. No que respeita à fusão de imagens TM (pixel com 30m) e ortofotografia digital pancromática (pixel com 1m) o algoritmo que se mostrou mais eficiente foi o que envolveu a combinação RGB de 3 bandas TM suavizadas e transformação RGB/IHS, substituição da componente intensidade pela PANS, seguida de transformação inversa IHS/RGB e criação de composições coloridas 24-bit. Foi por isso também aplicado na fusão de imagens ETM+.

O processo de selecção de bandas através do cálculo do OIF, para constituição de composições coloridas RGB no processo RGB-IHS-RGB, mostrou-se eficiente na fusão de ambos os tipos de imagem, uma vez que as melhores composições coloridas corresponderam às combinações de bandas com elevado OIF (Anexo XXXVI e Anexo XLI).

Para uma observação em pormenor foram seleccionadas duas áreas restritas com vários tipos de ocupação florestal no Marão e em Vidago.

Marão:

Figura 66: Pormenor da imagem pancromática PAN1 numa área florestal seleccionada

Figura 67: Pormenor da Fusão RGB-HIS das TM432 com PAN1

Figura 68: Pormenor da Fusão RGB-HIS das ETM457 com PAN15

Figura 69: Pormenor da composição colorida normal com as bandas ETM457 (sem fusão)

Vidago:

Figura 75: Ortofotografia do INGA (pormenor em Vidago)

Figura 76: Ortofotografia do CNIG (pormenor em Vidago)

Figura 77: Fusão RGB-HIS das TM457 com PAN01 (Pormenor em Vidago)

Figura 78: Fusão RGB-HIS das TM457 com PAN05 (Pormenor em Vidago)

Figura 79: Fusão ETM 457 com PAN15 (pormenor em Vidago)

A partir destas imagens verificou-se que as imagens Landsat com resolução espacial de 30m podem ser fundidas com imagens pancromáticas com resolução espacial até 1m.

A expansão de 2 vezes (30 para 15m) foi excelente se considerada numa perspectiva global. As imagens obtidas ficaram visualmente melhores e sem acréscimo de custos, permitindo a identificação correcta das manchas florestais mais importantes. Essa possibilidade permitirá futuramente realizar um primeiro mapeamento através destas imagens e realizar mais racionalmente a cobertura ou a aquisição de imagens de maior resolução espacial com possibilidade de economizar recursos financeiros e humanos.

Relativamente à expansão de 6 e 30 vezes (30 para 5m e 30 para 1m) verificou-se que a discrepância de 1 para 30 entre as resoluções espaciais poderá ser algo exagerada porque implicou uma suavização da imagem de satélite para atenuar o efeito de pixelização com uma consequente suavização excessiva da imagem. As imagens obtidas com resolução espacial de 5m são cerca de 24 vezes mais compactas que as de maior resolução espacial (151 contra 6MB em formato COT-Intergraph), com benefícios quanto à velocidade de processamento e visualização. Para a realização de cartas de uso e ocupação do solo para estudos florestais, a resolução espacial de 5m aparentemente poderá ser suficiente. Já para a realização de medições dendrométricas ou para a realização de cadastro geométrico rigoroso esta resolução não será suficiente.

De um modo geral, para se melhorarem as capacidades gráficas de visualização, as imagens foram segmentadas e comprimidas após o seu processamento. Neste caso foram comprimidas através da criação de “Overviews” com o programa Overview Utility da Intergraph, consistindo basicamente na criação de imagens de resolução espacial intermédia, dependente da escala de visualização<sup>48</sup>. As vantagens deste procedimento são demais evidentes em imagens muito grandes.

A fusão das bandas TM com a banda PAN do Landsat, com resoluções espaciais de 30 e 15m respectivamente, melhora significativamente o aspecto visual das imagens originais. No entanto, o poder discriminante da imagem com 1m é muito superior quer ao da imagem de 15m quer ao da própria imagem original pancromática, e sem qualquer perda de definição. No entanto, denota-se alguma confusão entre pastagens permanentes e povoamentos mistos de folhosas com grande densidade, dado que a imagem original pancromática se apresentava bastante baça e a reflexão registada para estes dois estratos na imagem Landsat era algo semelhante, o que não será de estranhar, sobretudo nas bandas do infravermelho.

Através das imagens fundidas foi possível efectuar a separação perfeita entre as resinosas e as folhosas. Mesmo entre resinosas foi também possível detectar diferenças, nomeadamente entre *Pinus sylvestris* e *Pinus nigra* e ainda mais facilmente entre estas espécies e *Pinus pinaster*. Também o mato rasteiro foi bem detectado nas imagens. No entanto, quando este é roçado, as diferenças são muito mais evidentes nas imagens com 1m de resolução espacial, por apresentarem uma textura mais fina. Pelas mesmas razões, as pastagens permanentes são também melhor identificadas através destas imagens. As áreas agrícolas distinguem-se bem em qualquer das imagens, mesmo que sem fusão.

As composições coloridas obtidas com qualquer um dos métodos poderão apresentar uma gama de cores diferente da obtida na composição colorida normal ou na de falsa cor. Esse facto requererá por isso algum treino prévio de interpretação das imagens.

Pelos motivos apresentados atrás, não foram testadas em Amarante as metodologias de fusão de imagem para obtenção de cartografia temática. Mas uma vez que a fusão da imagem ETM também envolveu esta área, apresentamos na Figura 80 o resultado da mesma, assim como a imagem com a ortofotografia de 1995 em película IVC, com a sobreposição das parcelas inventariadas no terreno (Figura 81).

---

<sup>48</sup> Existem vários programas de PDI que permitem comprimir imagens e acelerar a velocidade de visualização em SIG, tais como por exemplo, Lizardtech MrSID Encoder (extensão SID), ErMapper (extensão ECW), JPG2000 da PCI, etc.. O formato JPEG normal também comprime imagens mas não guarda a georeferenciação.

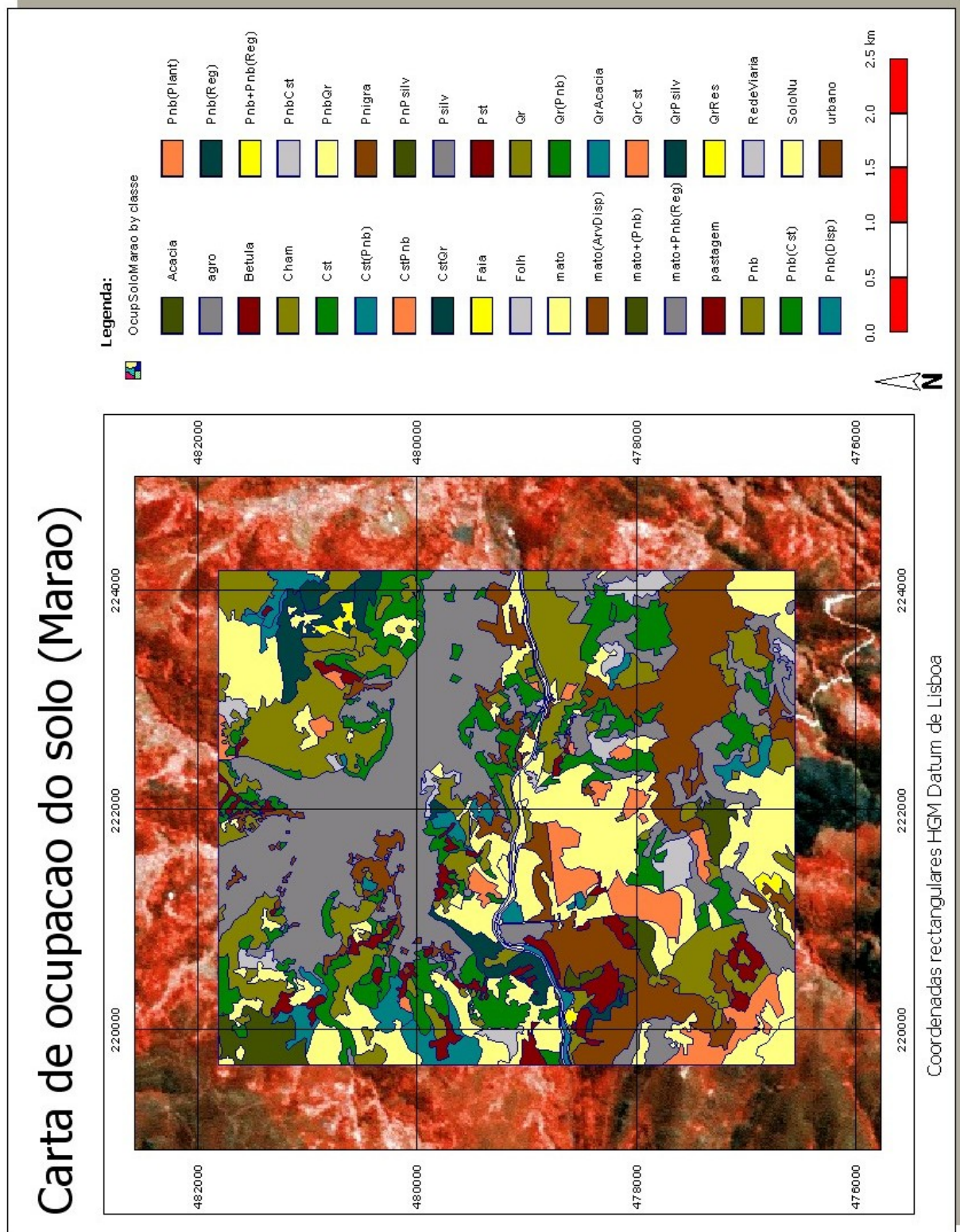


Figura 60: Carta de ocupação do solo da área de estudo, realizada por fotointerpretação sobre fotografia aérea PPB de 2000 e ortofotografia IVC de 1995 e verificação de campo (Marão)

# Composicao colorida ETM 457 (sem fusao)

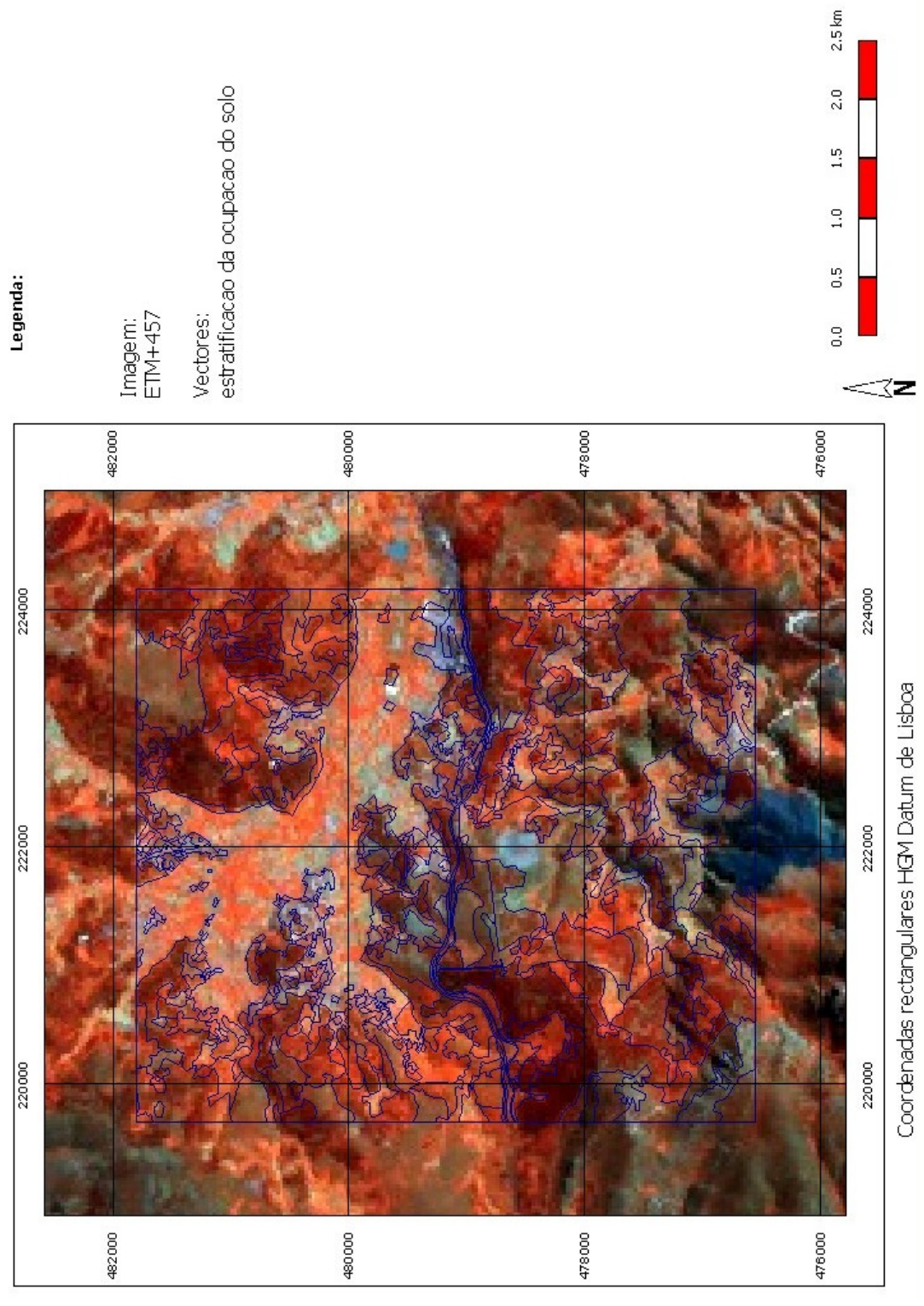


Figura 61: Composição colorida ETM457 de 2001 sem fusão (Março). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de ciano representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60

# Marao: ocupacao do solo e parcelas de amostragem

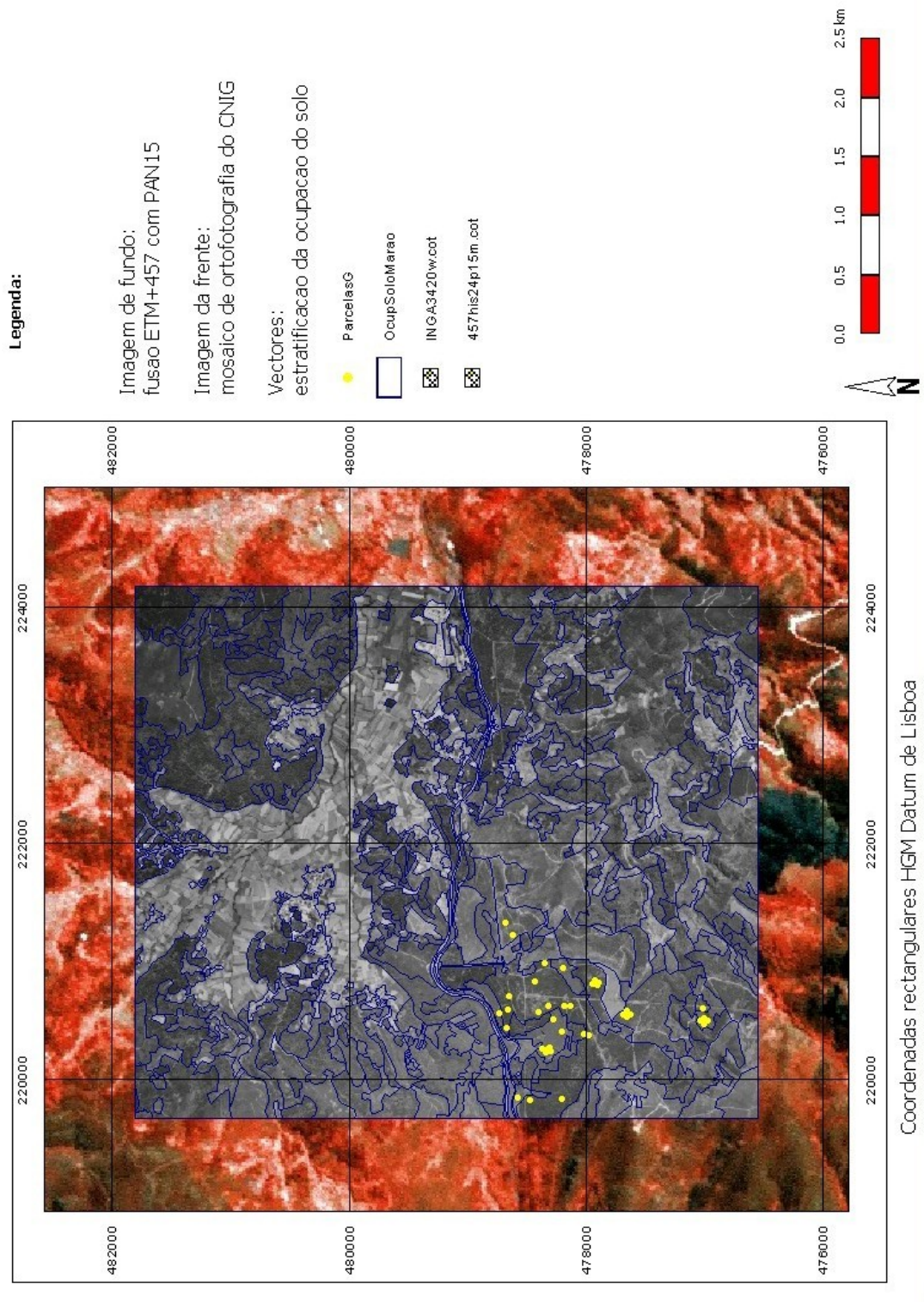


Figura 62: Mapa Marão – parcelas amostradas sobre ortofotografia PPB de 2000

# Imagem da Fusao RGB-HIS da TM432 com PAN1

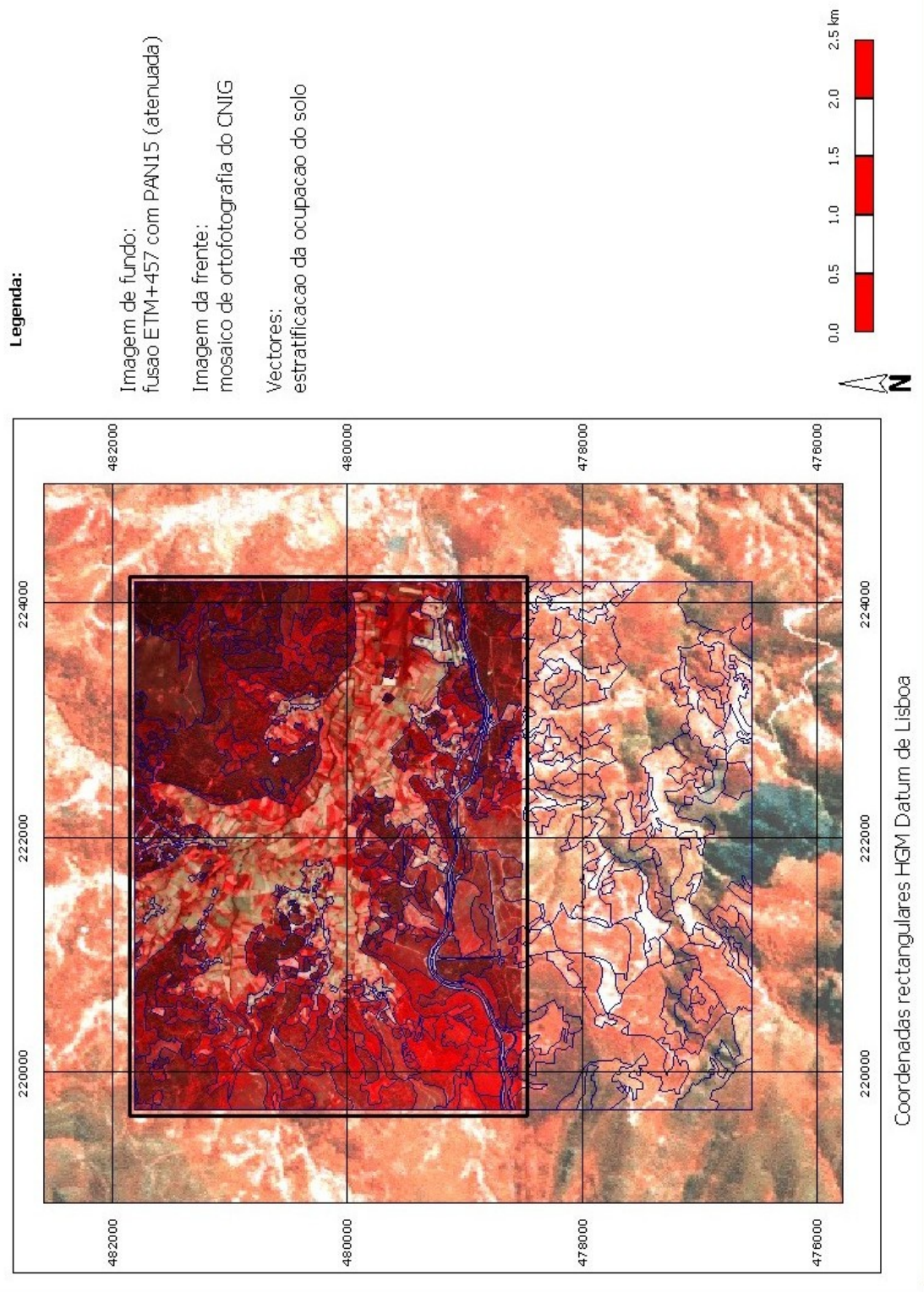


Figura 63: Composição colorida resultante da fusão RGB-HIS das TM432 com PAN1 (Março). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de ciano representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60.

# Imagem da Fusão RGB-HIS da TM457 com PAN15

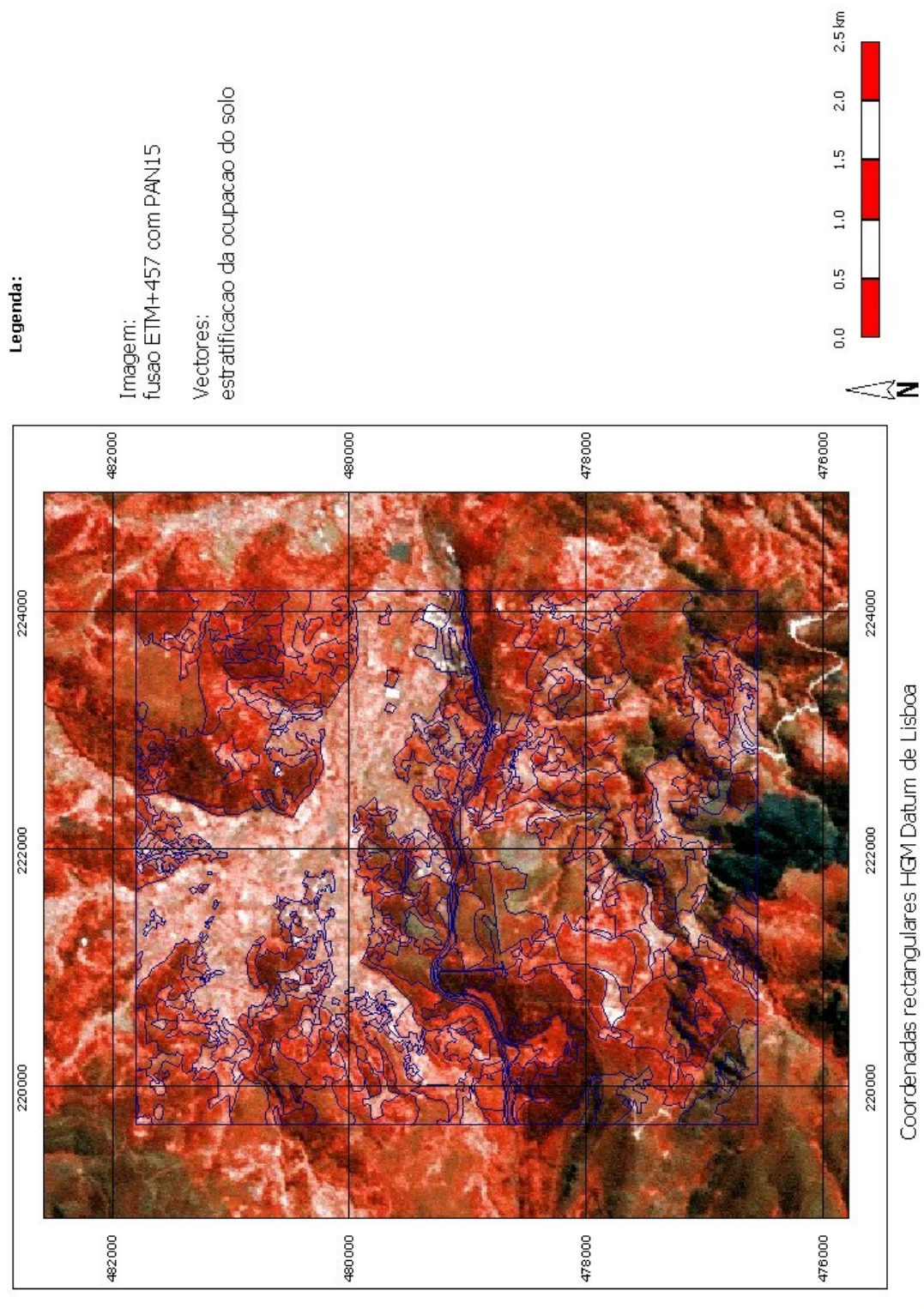


Figura 64: Composição colorida 24-bit resultante da fusão RGB-HIS das TM457 com PAN15 (Março) . As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60

# Imagem a 8-bit da Fusão RGB-HIS da TM457 com PAN15

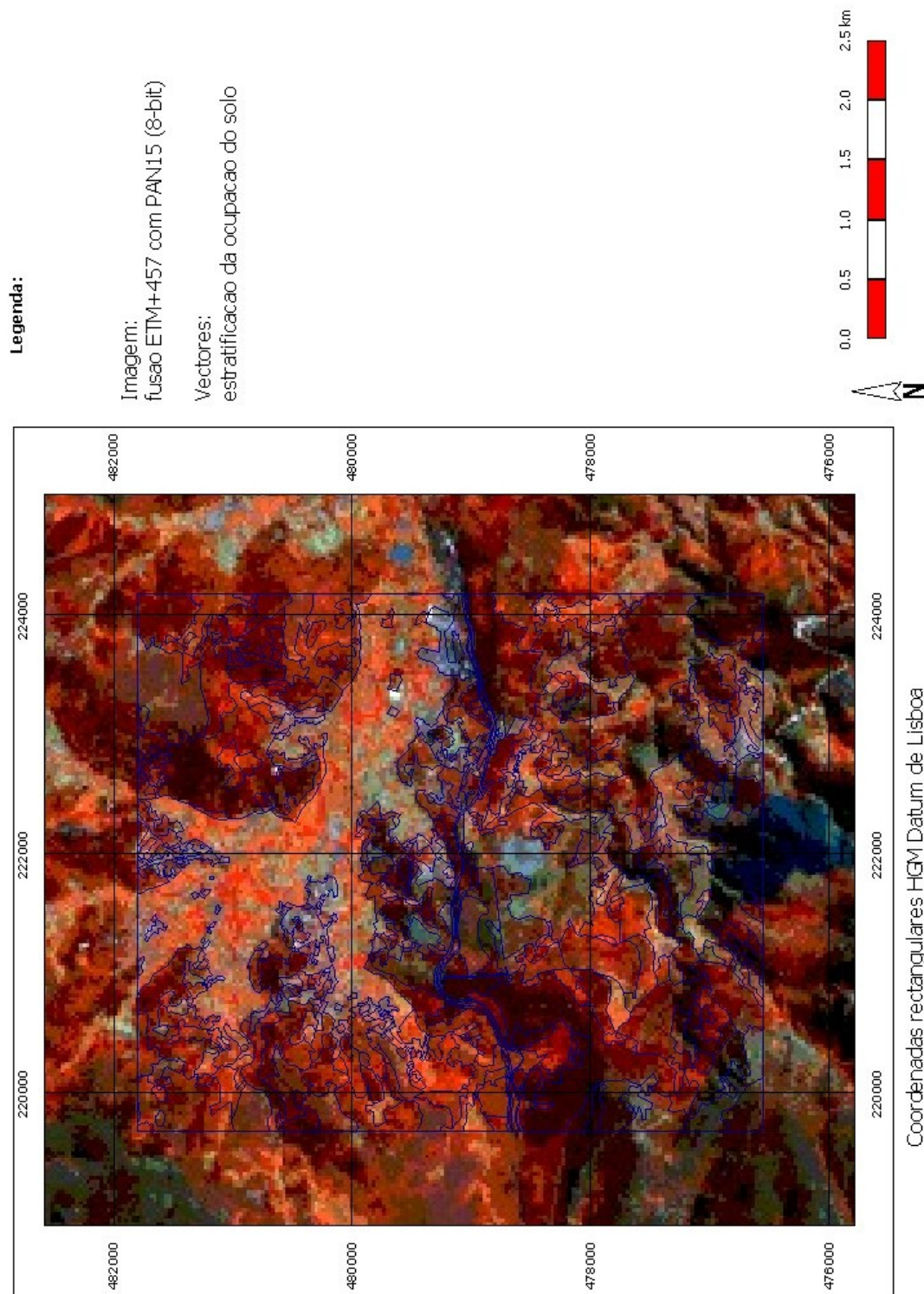


Figura 65: Composição colorida 8-bit resultante da fusão RGB-HIS das TM457 com PAN15 (Março). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de ciano representam solo nudo ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60

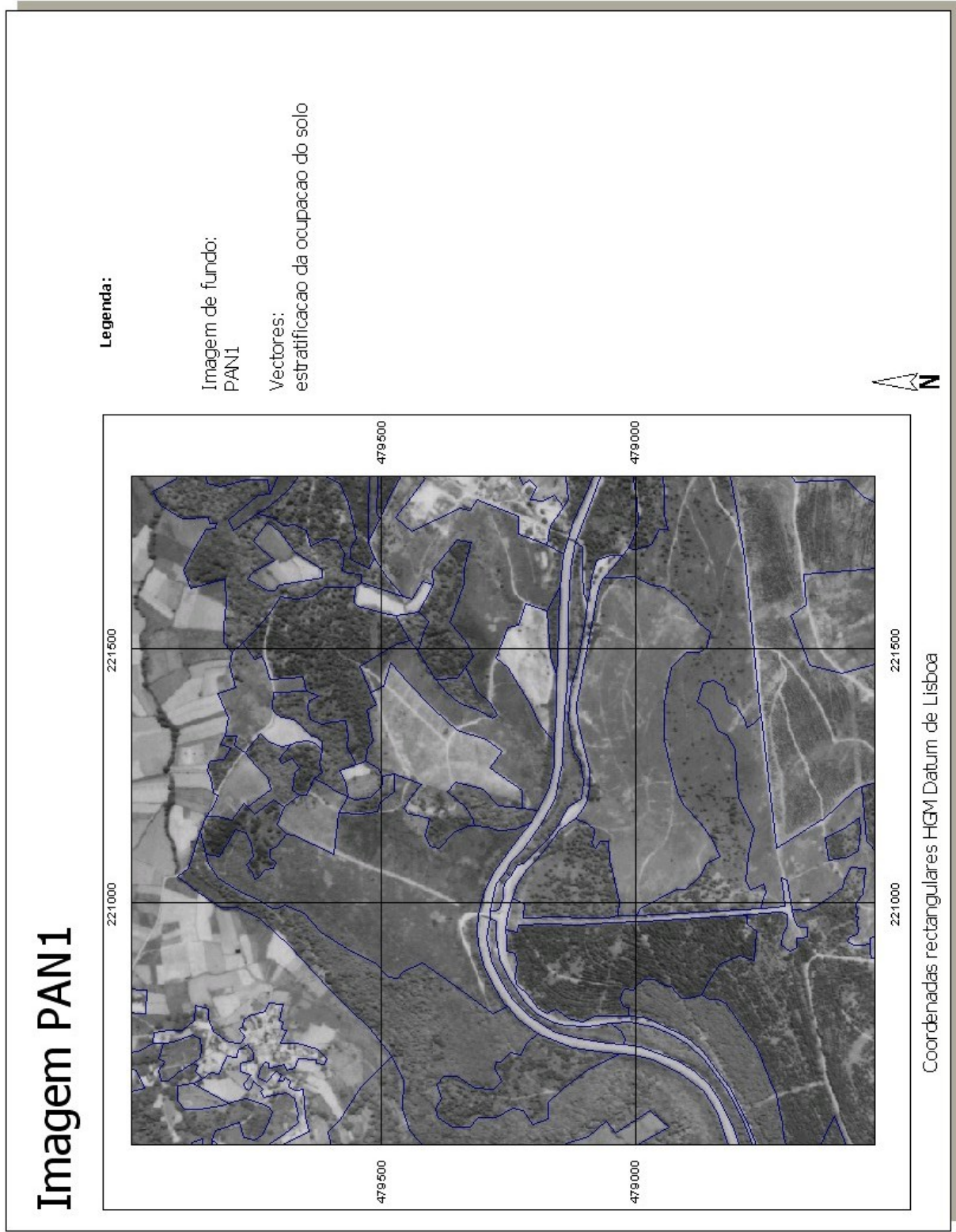


Figura 66: Pormenor da imagem pancromática PAN1 numa área florestal seleccionada (Marão)

# Imagem da Fusão RGB-HIS das TM432 com PAN1

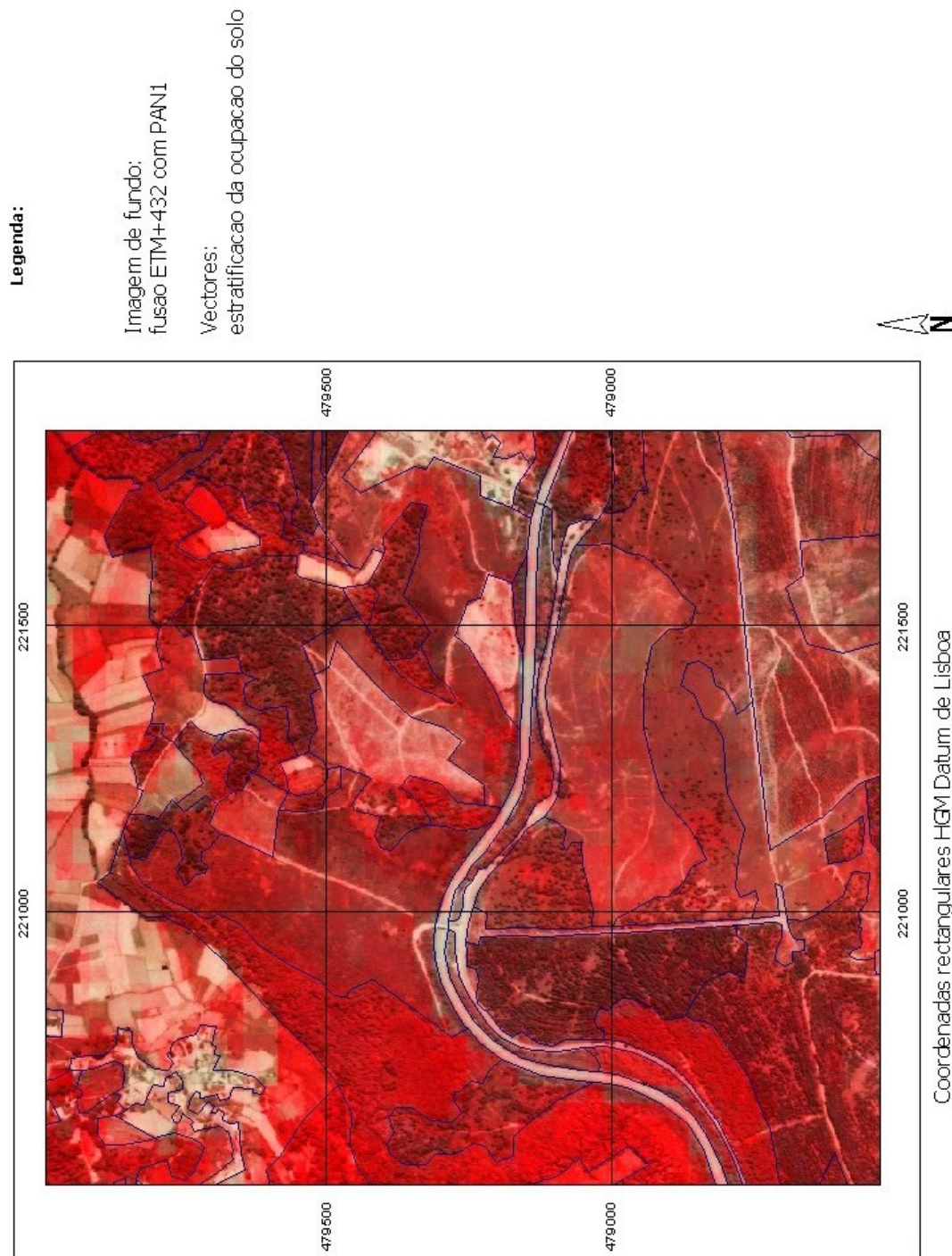


Figura 67: Pormenor da Fusão RGB-HIS das TM432 com PAN1 (Marão). As tonalidades de vermelho/magenta escuro representam vegetação; as tonalidades de vermelho/magenta mais claro representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60

## Fusão RGB-HIS das ETM457 com PAN15 (ampliada)

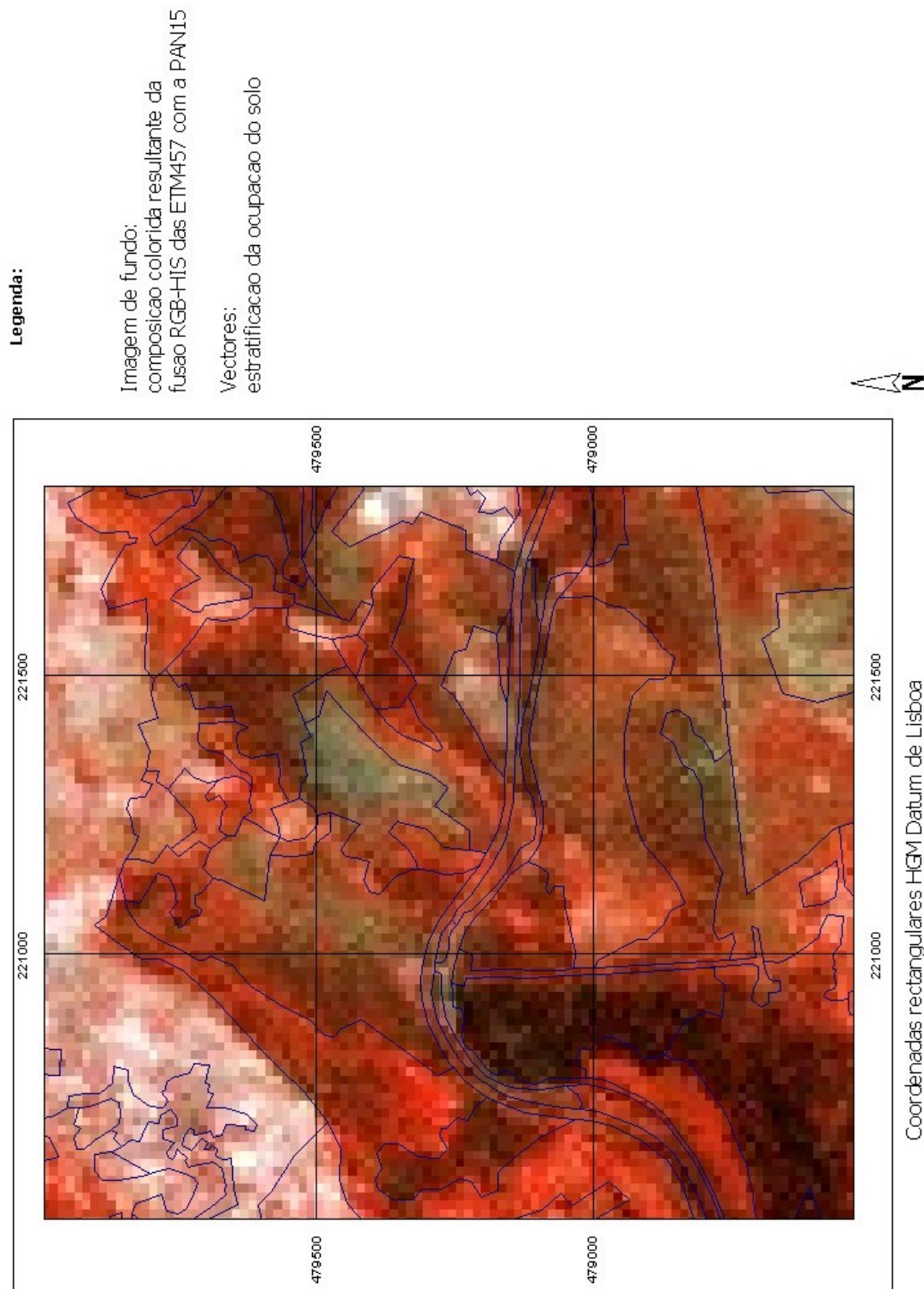


Figura 68: Pormenor da Fusão RGB-HIS das ETM457 com PAN15 (Março). As tonalidades de vermelho/magenta escuro representam vegetação; as tonalidades de branco e amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; as tonalidades castanho claro representam mato rasteiro; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60

# Composicao colorida ETM457 (sem fusao) ampliada

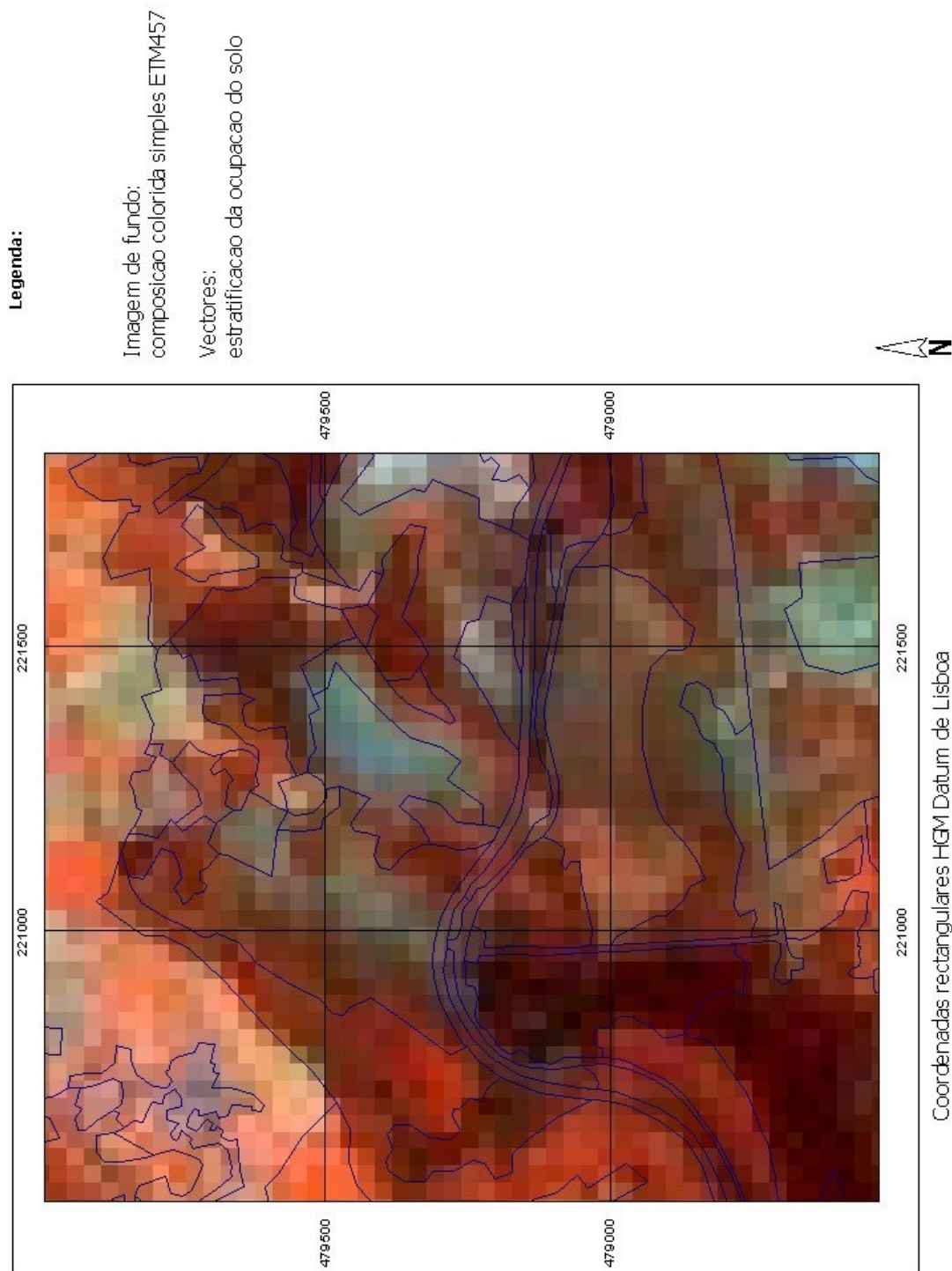


Figura 69: Pormenor da composição colorida normal com as bandas ETM457 (sem fusão) (Março). As tonalidades de vermelho/magenta escuro representam vegetação; as tonalidades de laranja representam solo nú ou zonas rochosas; as tonalidades ciano claro representam mato rasteiro, uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 60

# Carta de uso e ocupação do solo em Vidago



## Legenda:

Imagem de fundo:  
fusao ETM+457 com PAN15 (atenuada)

Imagem da frente:  
carta de ocupação do solo

(Cartografia realizada por interpretação  
de imagens de DR de 2000 e 2001).  
Ja contempla a area ardida em 2002.

PARCELAS SOBREVIVENTES



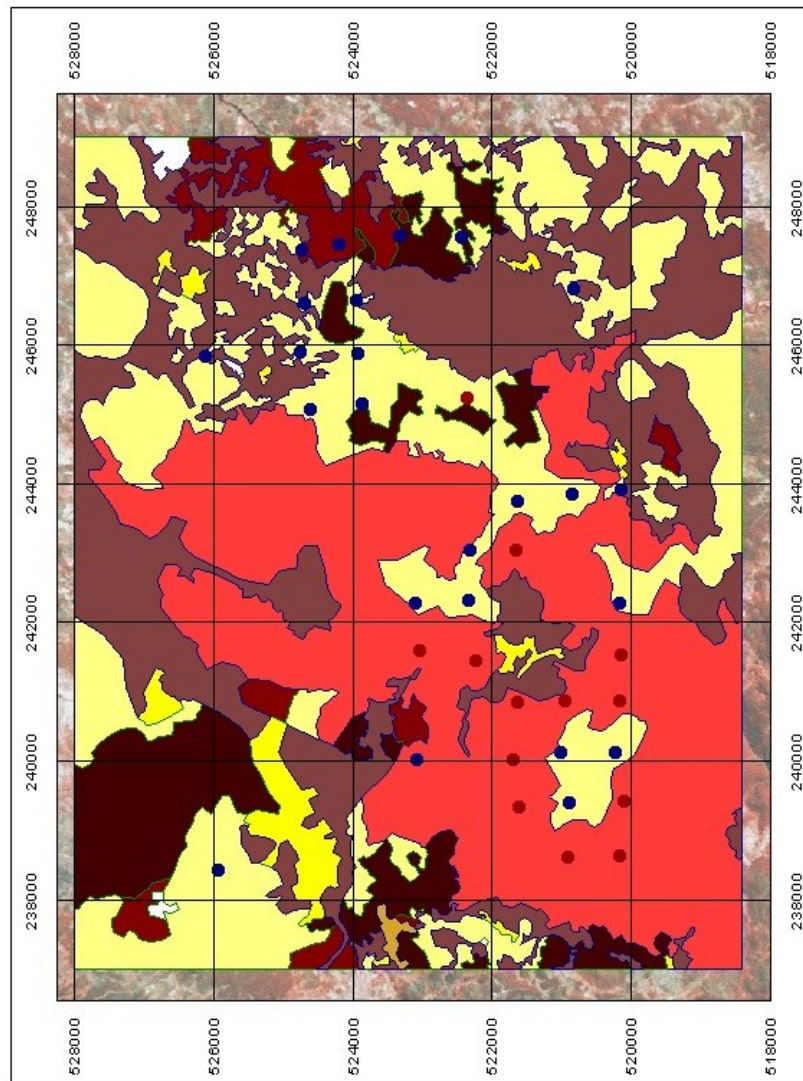
PARCELAS QUEIMADAS



OcupSoloVidago por classe



- Agro
- AreaArdida
- Folh
- Mato
- Mato+(Pnb)
- Pnb
- SoloNu
- Urbano



Coordenadas rectangulares HGM Datum de Lisboa

Figura 70: Carta de uso e ocupação do solo (Vidago)



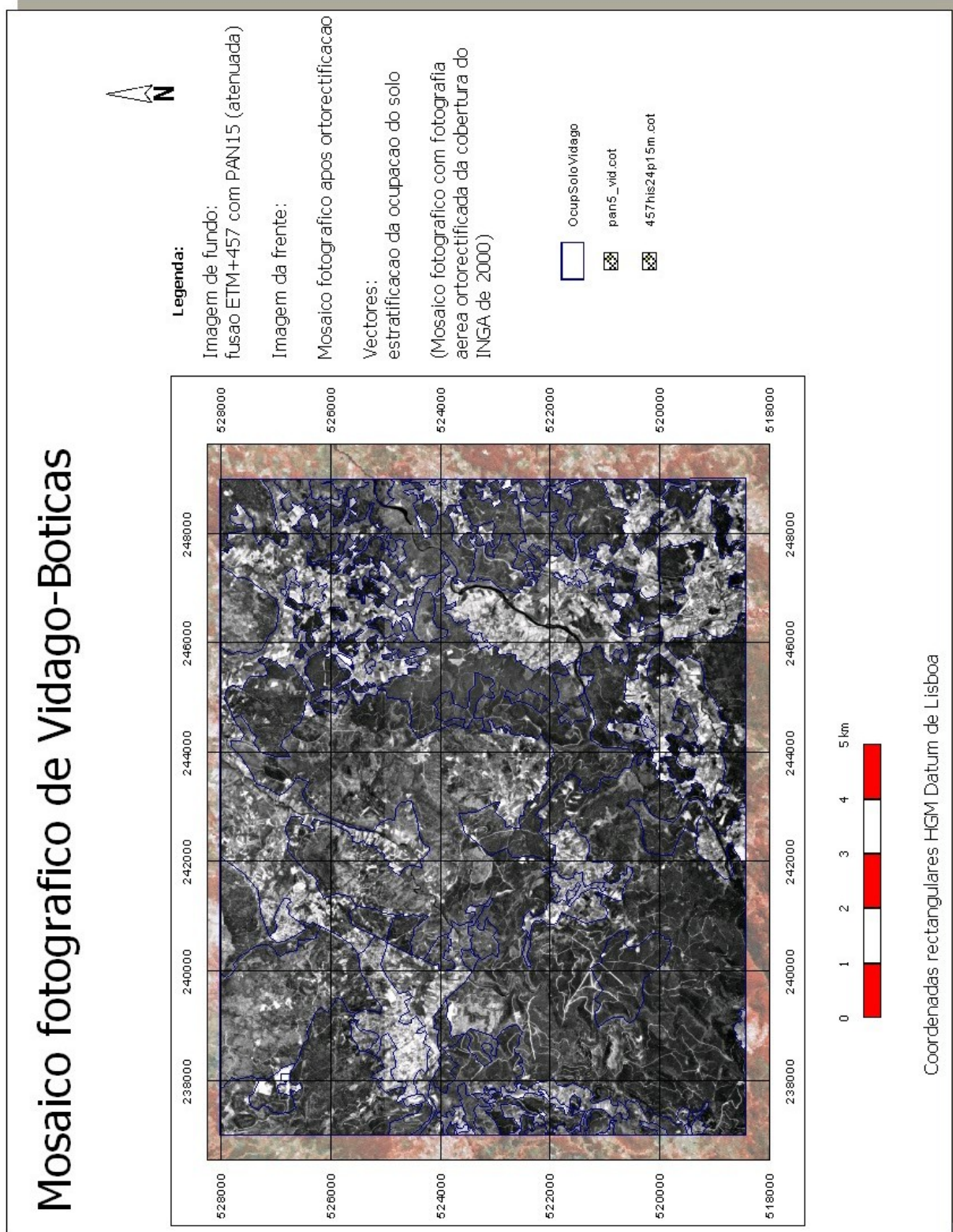


Figura 72: Mosaico fotografico (Vidago)

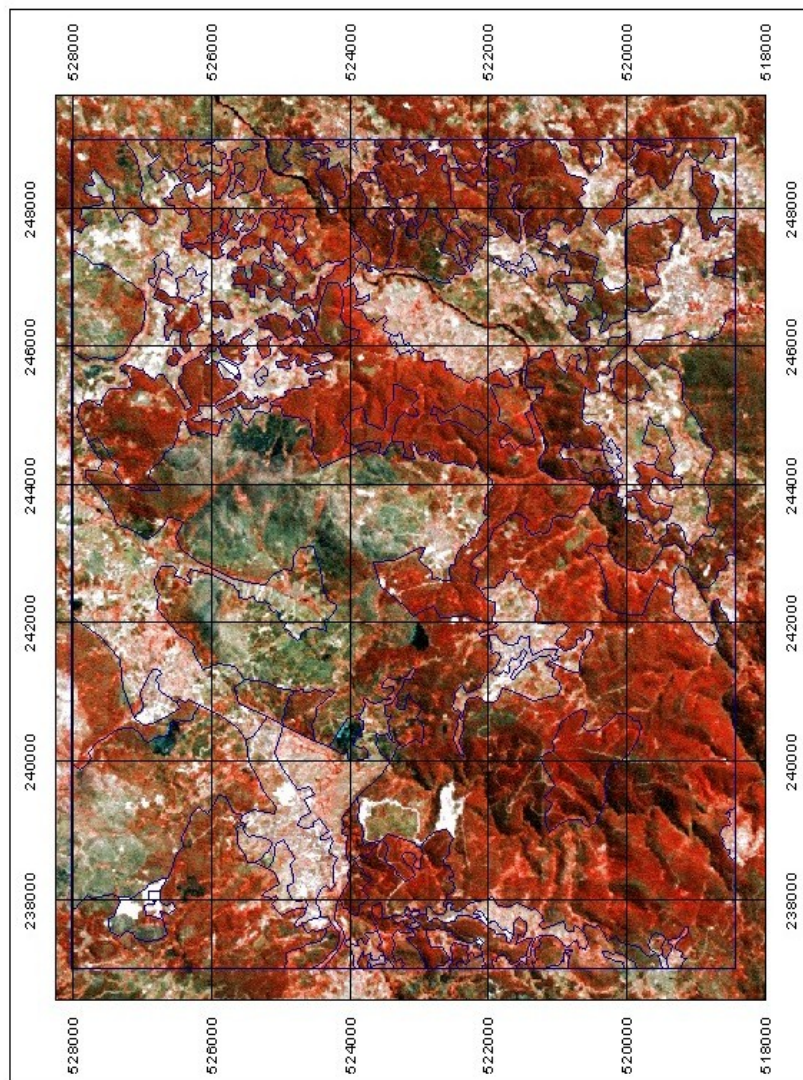
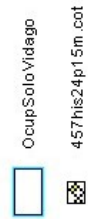
# Fusão RGB-HIS das TM 457 e PAN15 para Vidago-Boticas



## Legenda:

Imagem:  
fusao ETM+457 com PAN15

Vectores:  
estratificacao da ocupacao do solo



Coordenadas rectangulares HGM Datum de Lisboa

Figura 73: Fusão RGB-HIS das TM 457 e PAN15 para Vidago-Boticas. As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 70

# Fusão RGB-HIS das ETM 457 e PAN05 para Vidago-Boticas






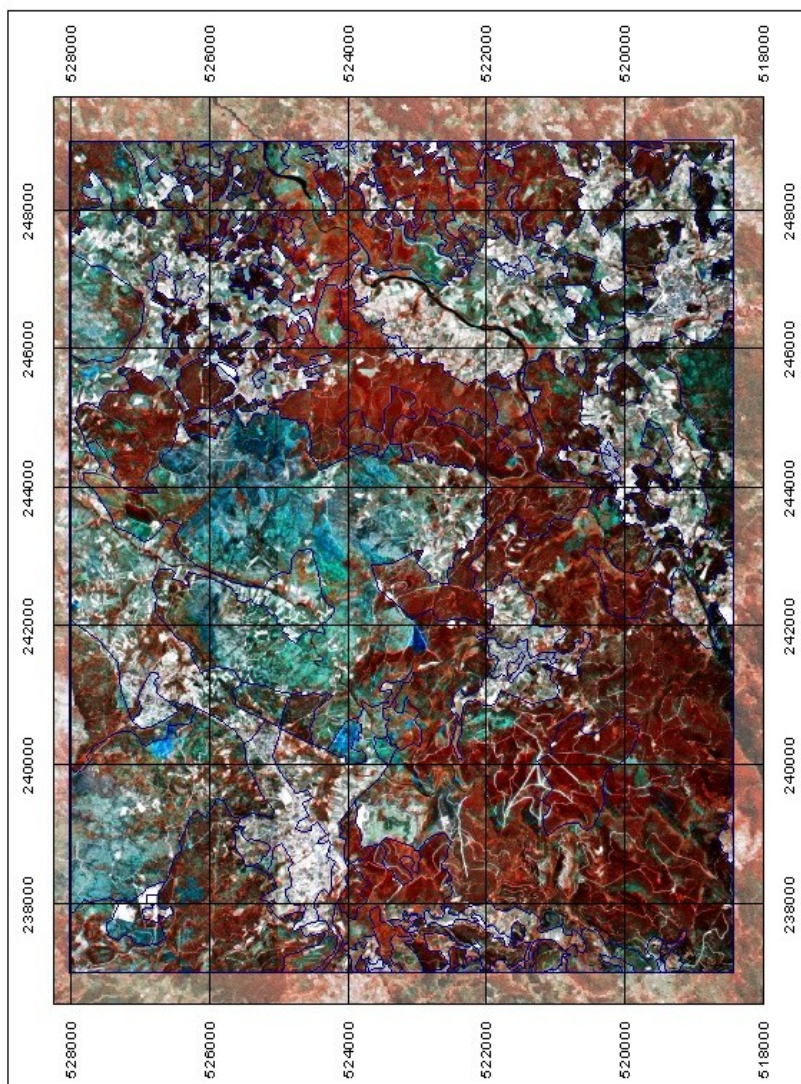
## Legenda:

Imagem de fundo:  
fusao ETM 457 com PAN15 (atenuada)

Imagem da frente:  
fusao ETM 457 com PAN05

Vectores:  
estratificacao da ocupacao do solo

-  Ocup Solo Vidago
-  HIS-5M-VIDAGO
-  457his24p15m.cot



Coordenadas rectangulares HGM Datum de Lisboa

Figura 74: Fusão RGB-HIS das TM457 com PAN05 (Vidago). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 70

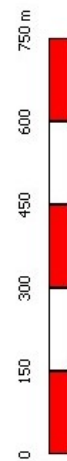
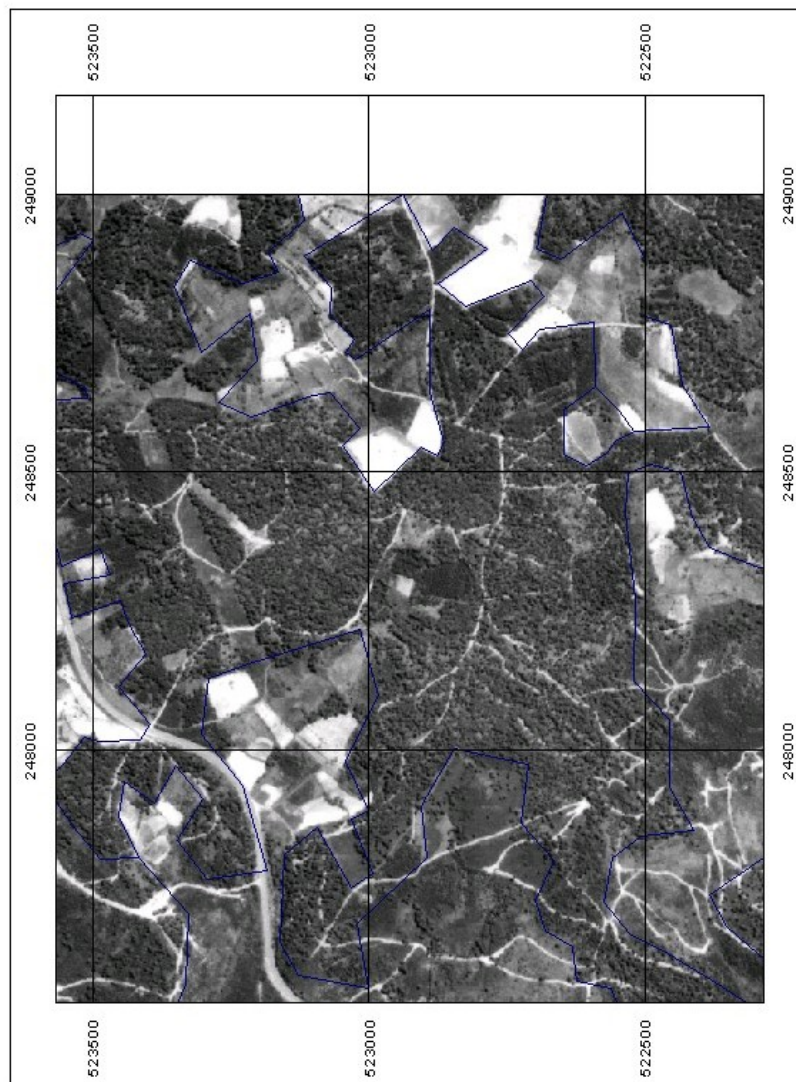
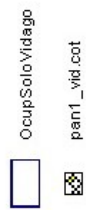
# Orotofotografia do INGA (pormenor em Vidago)



## Legenda:

Imagem:  
ortofotografia do INGA de 2000  
pelicula PPB

Vectores:  
estratificacao da ocupacao do solo



Coordenadas rectangulares HGM Datum de Lisboa

Figura 75: Orotofotografia do INGA (pormenor em Vidago)

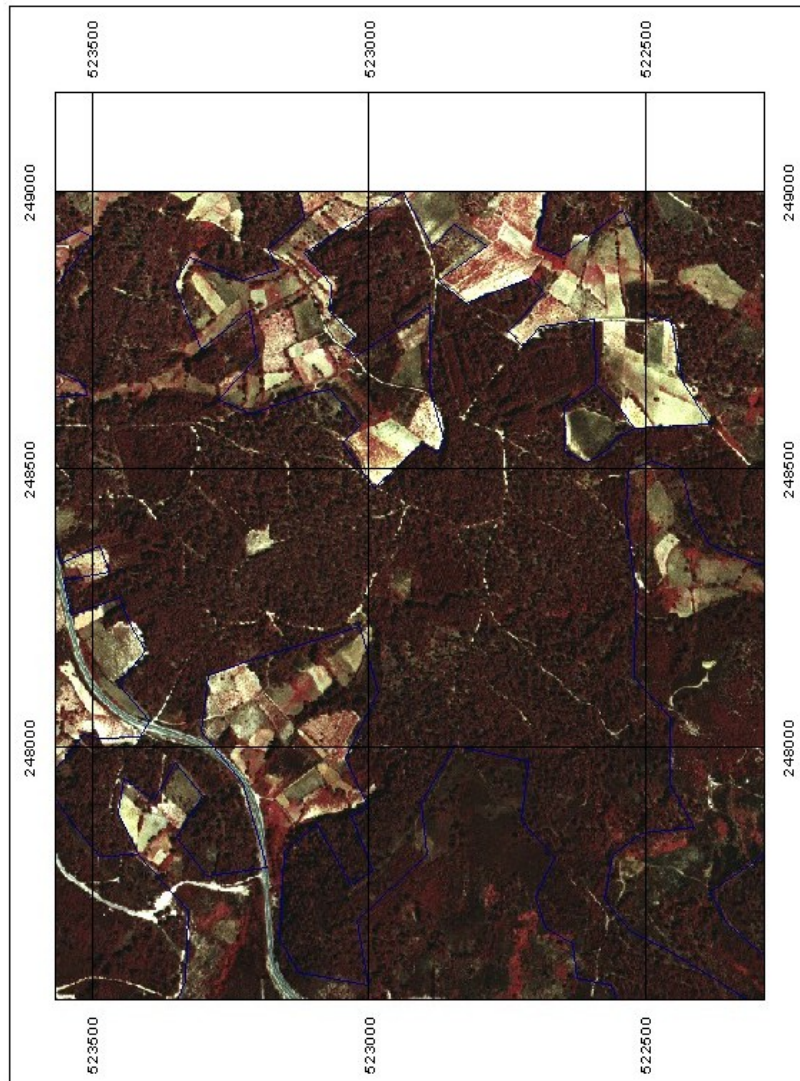
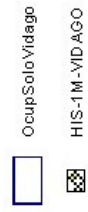
# Ortofotografia do CNIG (pormenor em Vidago)



## Legenda:

Imagem:  
ortofotografia do CNIG de 1995  
pelicula IVC

Vectores:  
estratificacao da ocupacao do solo



Coordenadas rectangulares HGM Datum de Lisboa

Figura 76: Ortofotografia do CNIG (pormenor em Vidago)

# Fusao ETM 457 com PAN01 (pormenor em Vidago)

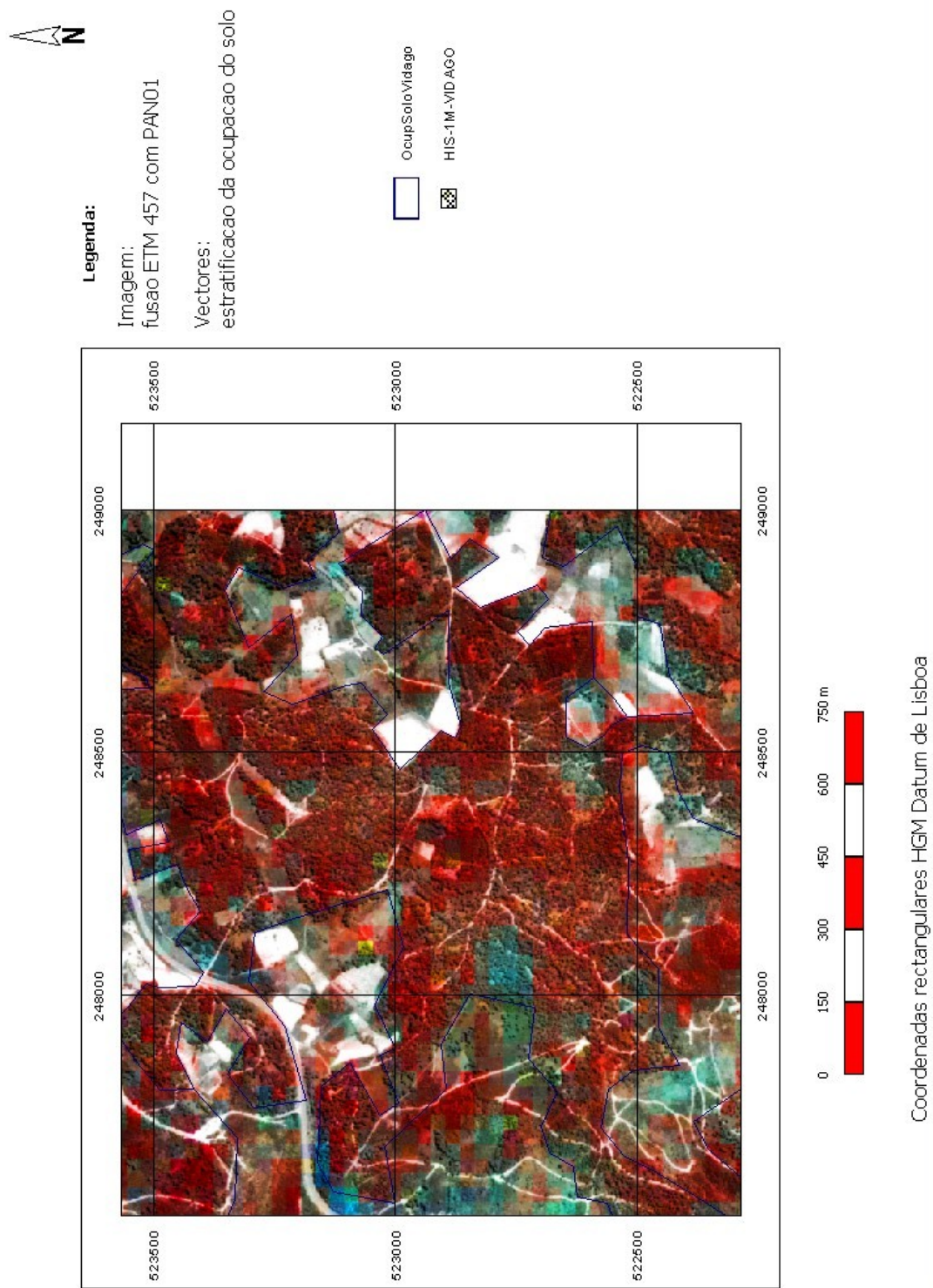


Figura 77: Fusão RGB-HIS das TM457 com PAN01 (Pormenor em Vidago). As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação, nestes, as texturas mais grosseiras representam povoações de mato e as mais finas mato rasteiro; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas; uma legenda pormenorizada é apresentada na Figura 70



# Fusao ETM 457 com PAN05 (pormenor em Vidago)

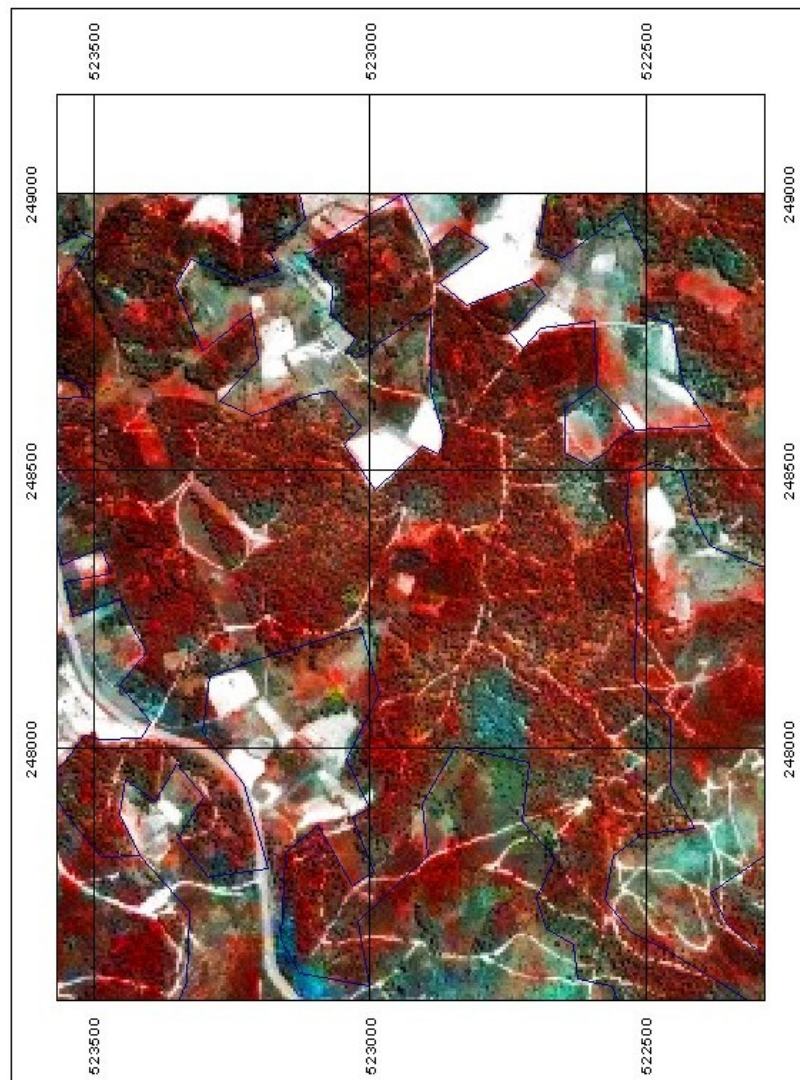


## Legenda:

Imagem:  
fusao ETM 457 com PAN05

Vectores:  
estratificacao da ocupacao do solo

-  Ocup Solo Vidago
-  HIS-5M-VIDAGO



Coordenadas rectangulares HGM Datum de Lisboa

Figura 78: Fusão RGB-HIS das TM457 com PAN05 (Pormenor em Vidago)

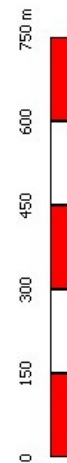
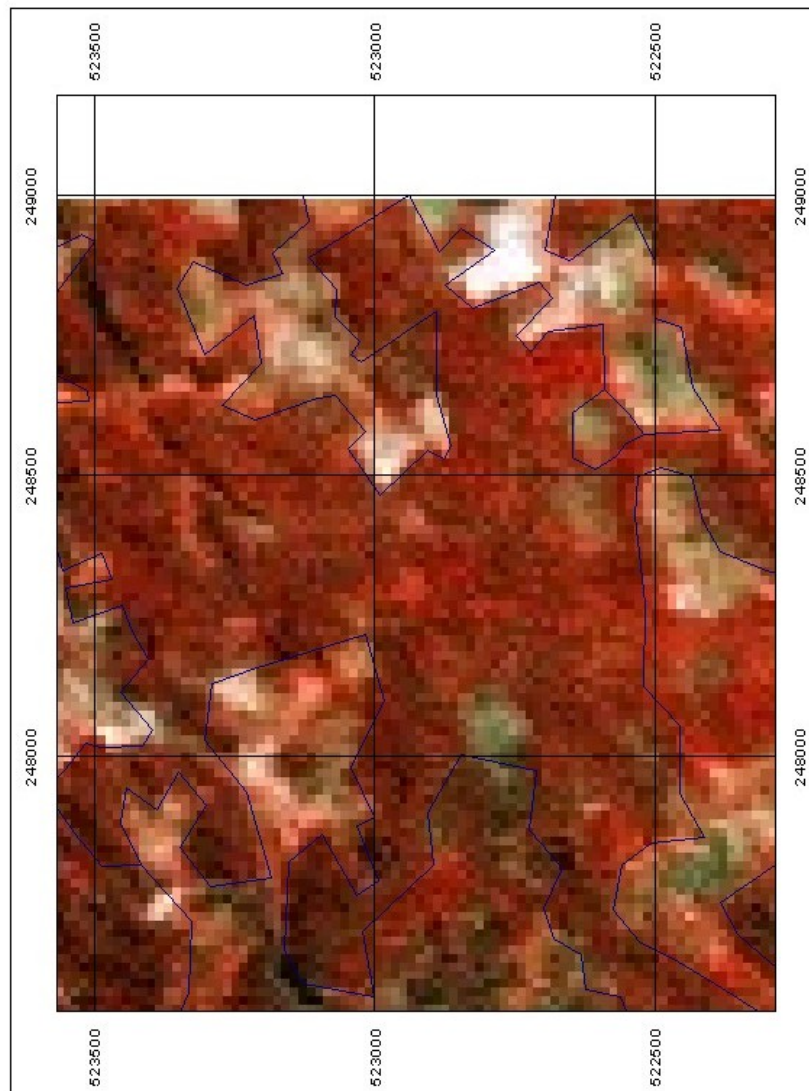
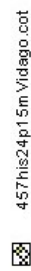
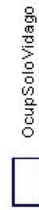
# Fusao ETM 457 com PAN15 (pormenor em Vidago)



## Legenda:

Imagem:  
fusao ETM 457 com PAN15

Vectores:  
estratificacao da ocupacao do solo



Coordenadas rectangulares HGM Datum de Lisboa

Figura 79: Fusão ETM 457 com PAN15 (pormenor em Vidago). Neste caso a textura deixa de ser evidente, assumindo a tonalidade maior importância na discriminação de uso/ocupação de solo.

# Fusao ETM 457 com PAN15 - Amarante

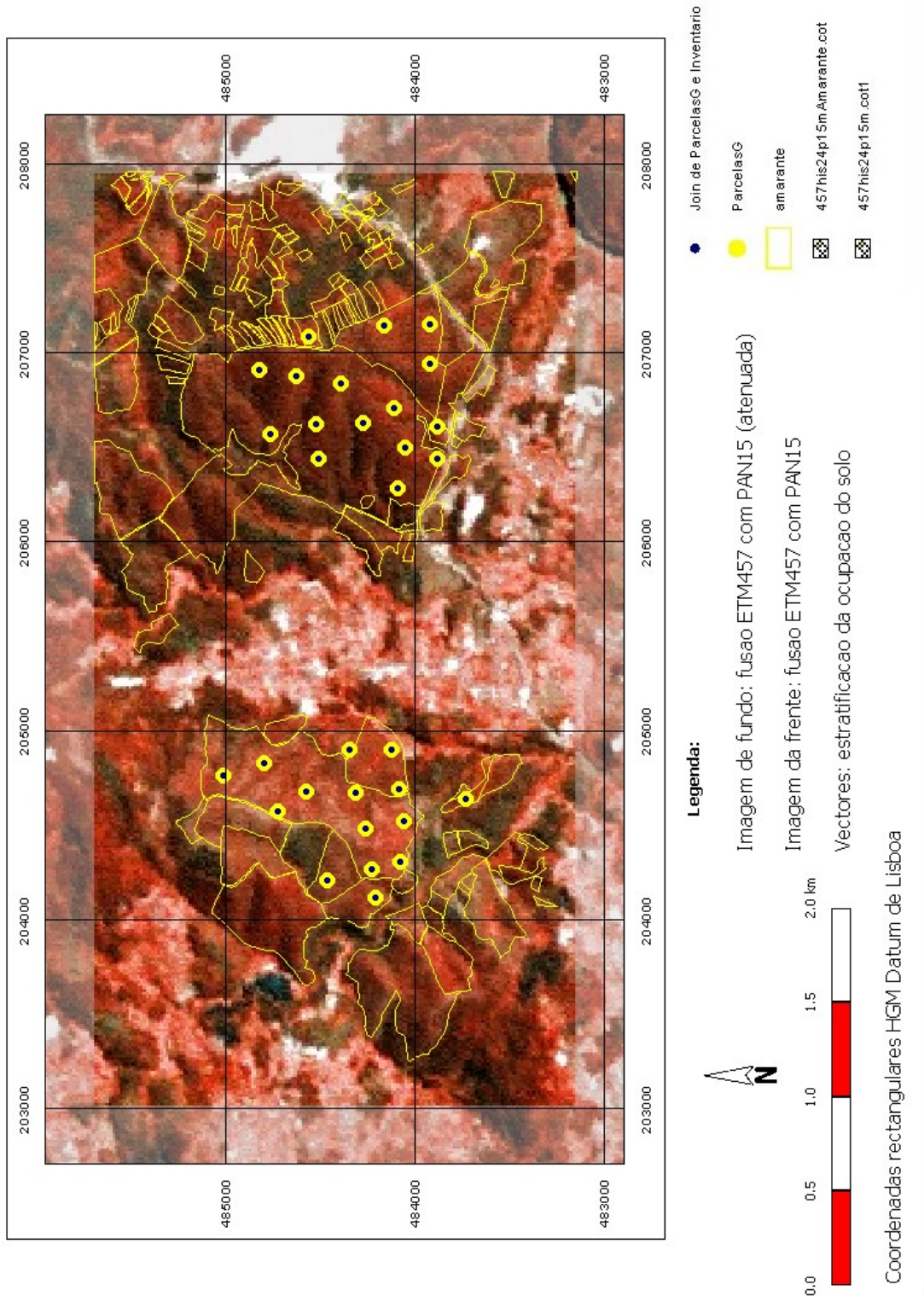


Figura 80: Sobreposição das manchas de eucalipto e das parcelas de amostragem sobre imagem resultante da Fusão RGB-HIS das TM 457 e PAN15 para Amarante. As tonalidades de vermelho/magenta representam vegetação; as tonalidades de branco/amarelo esbatido representam solo nú ou zonas rochosas.

# Ortofotografia de 1995 IVC - Amarante

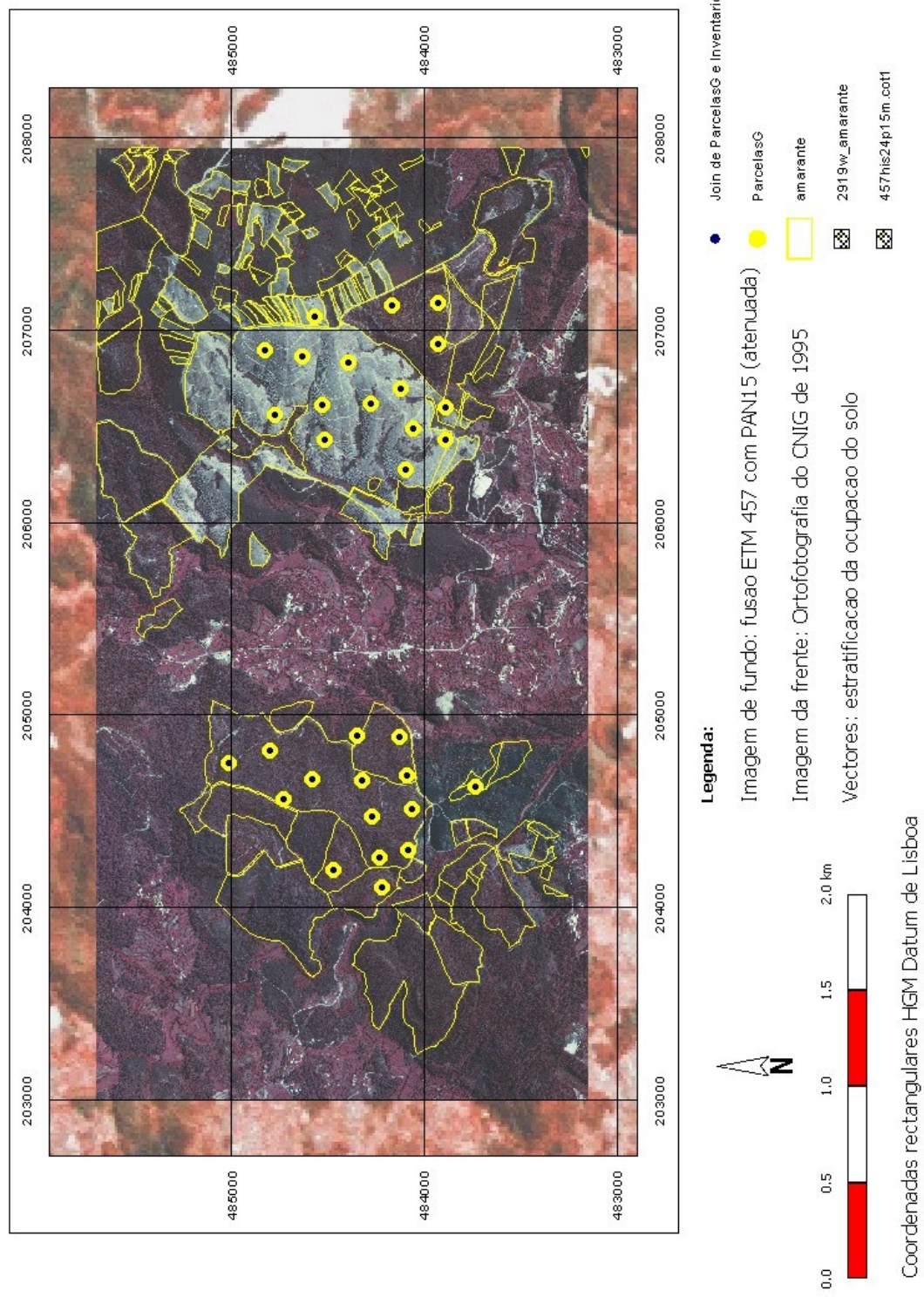


Figura 81: Ortofotografia do CNIG (Amarante) com as parcelas inventariadas no terreno

# Vidago-Boticas: freguesias e parcelas de amostragem

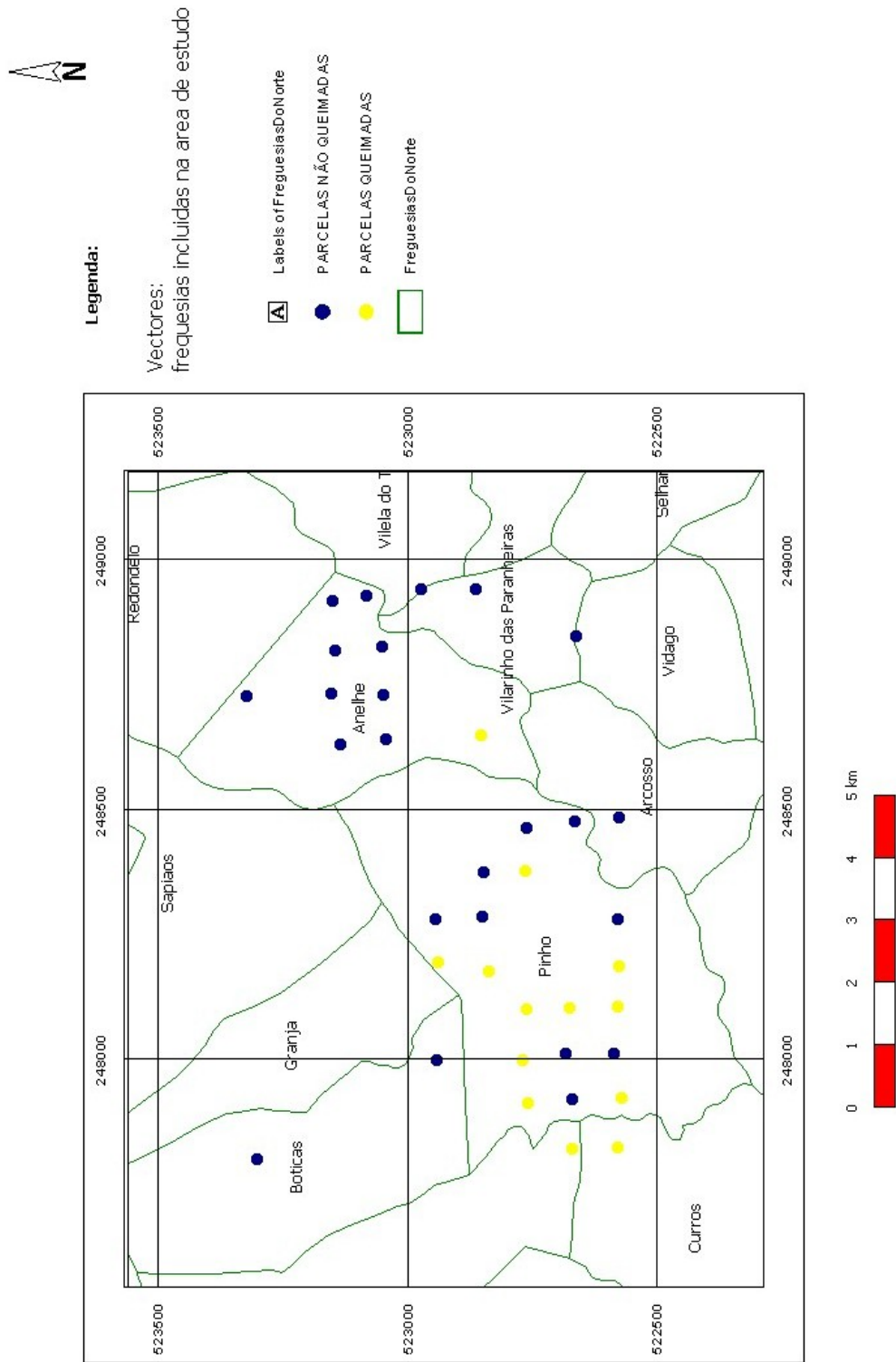


Figura 82: Área de estudo de Vidago – Boticas, freguesias incluídas e parcelas de amostragem

# Amarante - freguesias e parcelas de amostragem

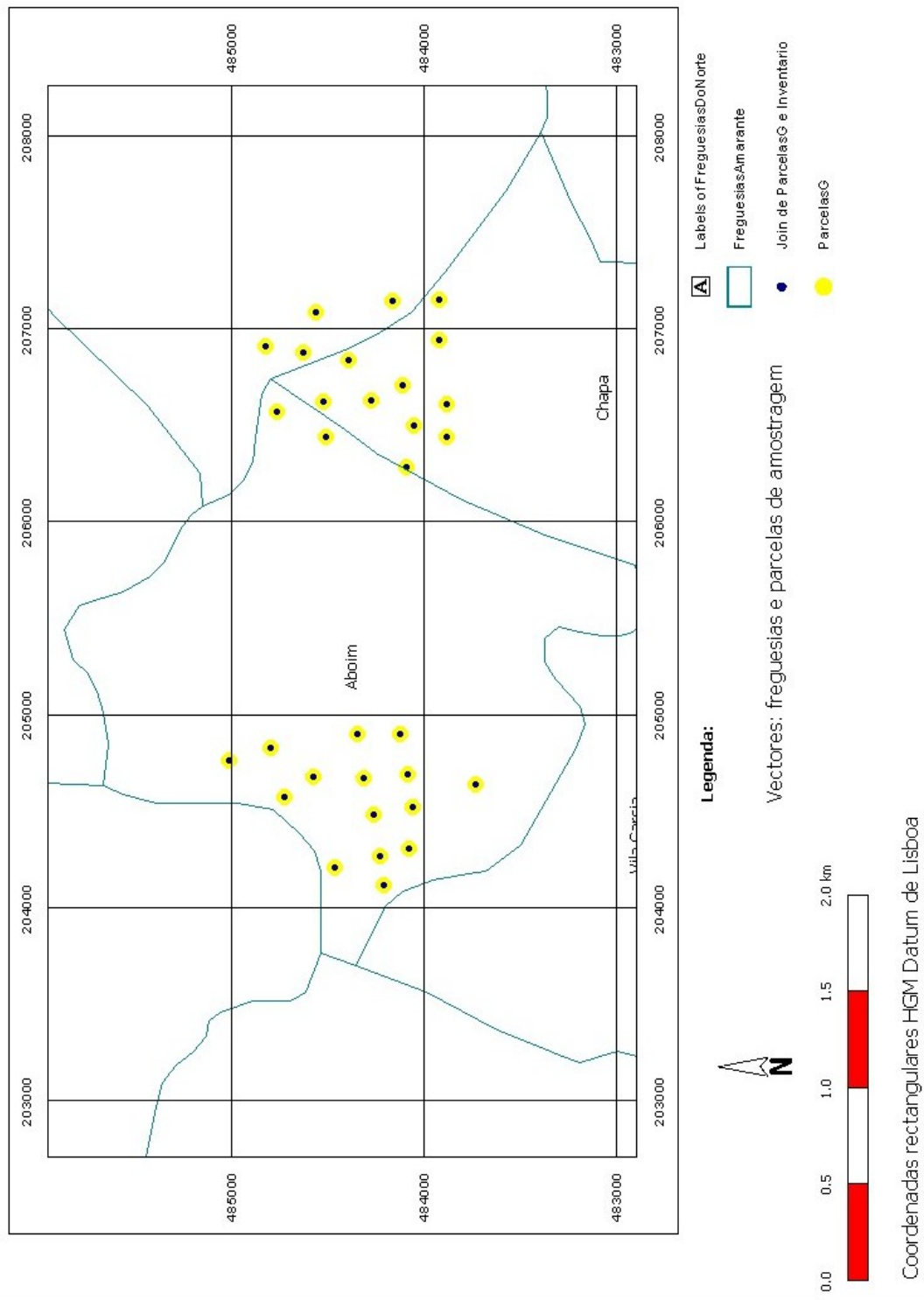


Figura 83: Área de estudo de Amarante, freguesias incluídas e parcelas de amostragem

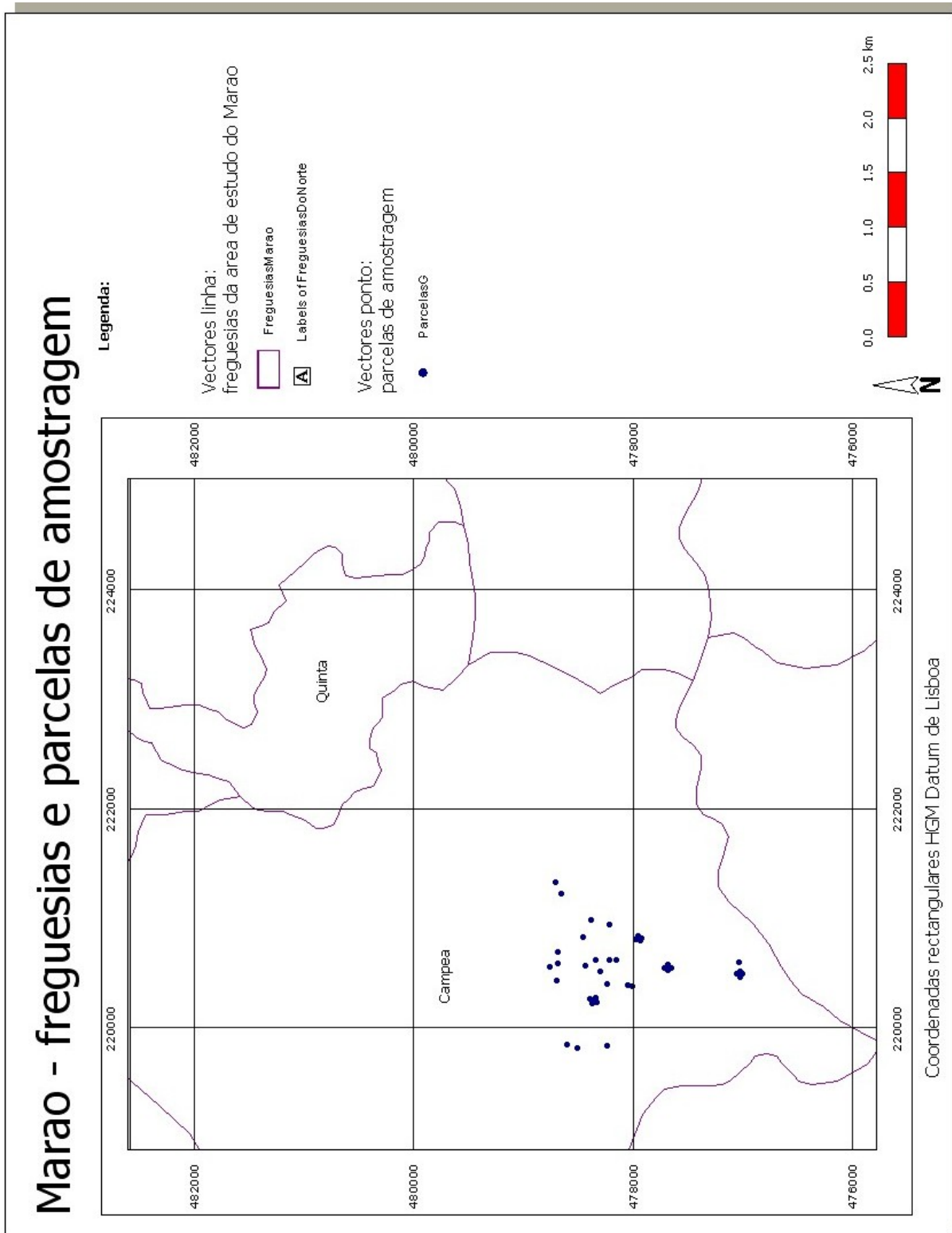


Figura 84: Área de estudo do Marão, freguesias incluídas e parcelas de amostragem

### 3.5.7 Estimativa da Precisão das Classificações

#### Introdução

Explicou-se atrás o processo de selecção e fusão digital de imagens. Realizou-se no Geomedia v5.0 a interpretação visual das imagens obtidas, tendo sido criada a carta de uso e ocupação do solo das áreas de estudo do Marão e de Vidago de acordo com uma determinada legenda.

Especialmente na área de estudo do Marão, onde foram efectuados vários testes de fusão digital de imagens, houve a necessidade de realizar um mapa de uso e de ocupação do solo muito discriminado e completo. Esse mapa foi por isso obtido através da interpretação de dados de DR e complementado com várias visitas de campo, para obtenção de cabal confirmação (Figura 60).

Seguidamente, dado que não foi possível, através de DR, discriminar de tal forma um mapa de uso e ocupação do solo, realizou-se a aglutinação de estratos com maior afinidade, criando-se grupos mais homogéneos tais como “resinosas diversas” para todas as resinosas, excepto Pinheiro bravo , e “folhosas diversas” para todas as folhosas, excepto o carvalho e o castanheiro, e ainda todas as situações relacionadas com ocupação com mato com maior ou menor intrusão de árvores, ou com distinta densidade num só grupo, designado por *mato*. Deixou-se no entanto um grupo formado por *mato com Pinheiro bravo disperso* uma vez que retrata fielmente o actual estado de abandono das áreas de Pinheiro bravo existentes em Portugal.

Para a verificação da capacidade de discriminação dos diversos estratos, por interpretação de imagens de DR no Marão, foi considerada a seguinte legenda final: Agricultura; Castanheiro; Folhosas; Mato; Mato com Pinheiro bravo disperso; Pastagem; Pinheiro bravo ; Pinheiro bravo disperso; Carvalho; Rede viária; Resinosas diversas; Solo Nu; Urbano.

Dada a menor heterogeneidade do uso e ocupação do solo em Vidago, foi desde logo considerada a seguinte legenda: Agricultura; Área ardida; Mato; Mato com Pinheiro bravo disperso; Pinheiro bravo ; Urbano.

Relativamente à área de estudo de Amarante, em virtude da carta de ocupação de solo nos ter sido fornecida pela empresa gestora da área florestada, não foi realizada a carta de uso e ocupação do solo por interpretação de imagens de DR. Esta área de estudo serviu essencialmente para outros estudos, mais concretamente a FAPMF associada ao inventário florestal.

#### Verificação de foto-interpretação

Considerando que o menor estrato interpretado no Marão possuía uma dimensão de 1ha, foi essa a dimensão considerada como parcela. Uma vez que a imagem total possui 2362.5ha,

haverá um número total de 2363 parcelas possíveis de serem amostradas, e foram considerados 13 estratos diferentes.

Em Vidago foram apenas considerados 8 estratos, cuja menor dimensão possui cerca de 5ha. Como a dimensão total da imagem é de 11520ha então existem 2304 parcelas possíveis.

Foi considerada uma intensidade de amostragem de  $n = 125$  parcelas para Vidago e  $n = 138$  para o Marão, determinadas através da Eq. 24, considerando  $k=6$  e  $k=13$  respectivamente,  $z=1.96$  para 95%,  $p=0.85$ ,  $q=0.15$ ,  $SE=10\%$ ,  $B=8.35$ ,  $N(\text{Vidago})=2304$  e  $N(\text{Marão})=2363$ . Para a distribuição das parcelas no terreno foi escolhido o esquema *aleatório estratificado* dadas as diferenças de representatividade entre classes.

A distribuição das parcelas fez-se com o programa Idrisi Kilimanjaro, com criação de ficheiros vectoriais sem topologia, intersectados espacialmente no Geomedia v5.0 com os mapas a verificar (ficheiro de interpretação), e simultaneamente realizou-se a verificação de campo desses mesmos pontos.

A verificação da interpretação foi efectuada através da série de equações apresentadas na Secção 3.4.3. Foram encontrados para Vidago os valores de  $F_m$  entre [93.2% e 94.0%] e os valores de KIA entre [87.1% e 96%] (Quadro 28). Para o Marão, foram obtidos os seguintes valores:  $F_m$  entre [90.9% e 91.5%] e KIA entre [86.2% e 93.6%] (Quadro 29). Os resultados obtidos pela classificação foram excelentes (Quadro 9), o que demonstra a viabilidade da utilização de imagens resultantes do método de fusão (secções 3.4 e 3.5.4).

Quadro 28: Verificação da fotointerpretação de Vidago

	agro	Área Ardida	Mato	Mato + (Pnb)	Pnb	Urbano	xii	xi+	Eoi	pi+	pi+p+i
agro	38						38	38	0.0%	0.30	0.09
Área Ardida		45					45	45	0.0%	0.36	0.14
Mato		2	8	1	1		8	12	33.3%	0.10	0.01
Mato+(Pnb)				4	2		4	6	33.3%	0.05	0.00
Pnb				2	17		17	19	10.5%	0.15	0.02
Urbano						5	5	5	0.0%	0.04	0.00
xii	38	45	8	4	17	5	117			Pe	0.26
x+i	38	47	8	7	20	5	N	125		Pii	0.94
Eci	0.0%	4.3%	0.0%	42.9%	15.0%	0.0%	Fg	93.6%		KIA	91.3%
pi+	0.30	0.38	0.06	0.06	0.16	0.04	IC	0.004		IC	0.043

Quadro 29: Verificação da fotointerpretação no Marão

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	xii	xi+	Eoi	pi+	pi+p+i
agro (1)	30													30	30	0.0%	0.19	0.0356
Cst (2)		13	1						1					13	15	13.3%	0.09	0.0089
Folh (3)		1	7											7	8	12.5%	0.05	0.0025
Mato (4)				29	2			2						29	33	12.1%	0.21	0.0405
Mato+(Pnb)(5)				1	5									5	6	16.7%	0.04	0.0017
Pastagem (6)						3								3	3	0.0%	0.02	0.0004
Pnb (7)							23				1			23	24	4.2%	0.15	0.0247
Pnb(Disp) (8)				1			2	11						11	14	21.4%	0.09	0.0072
Qr (9)		1							4					4	5	20.0%	0.03	0.0010
RedeViaria(10)										2				2	2	0.0%	0.01	0.0002
Res (11)							1				8			8	9	11.1%	0.06	0.0032
SoloNu (12)												7		7	7	0.0%	0.04	0.0019
urbano (13)													3	3	3	0.0%	0.02	0.0004
xii	30	13	7	29	5	3	23	11	4	2	8	7	3	145			Pe	0.13
x+i	30	15	8	31	7	3	26	13	5	2	9	7	3	N	159		Pii	0.91
Eci	0%	13%	13%	6%	29%	0%	12%	15%	20%	0%	11%	0%	0%	Fg	91.2%		KIA	89.9%
pi+	0.19	0.09	0.05	0.19	0.04	0.02	0.16	0.08	0.03	0.01	0.06	0.04	0.02	IC	0.003		IC	0.037

### 3.5.8 Conclusões

Nesta secção foram aplicados vários métodos de tratamento de dados de DR (FAC, FAPMF, imagens digitais obtidas por satélite - Landsat 5 e 7 neste caso).

Relativamente às FAC, utilizou-se ortofotografia IVC (cobertura de 1995) e fotografia aérea PPB (cobertura de 2000).

Com a primeira, verificou-se a sua eficiência na distinção dos vários tipos de cobertura do solo. Esta fotografia apresentava imagens de boa qualidade, quer em termos de granulometria quer em termos cromáticos, estando no entanto já desactualizada (aquisição em 1995). Não obstante, foi de primordial importância na captação de PCT e na fotointerpretação de locais cuja ocupação do solo não se alterou.

Relativamente às provas directas de FAC PPB, referentes à cobertura realizada pelo INGA em 2000, verificou-se que este tipo de película era muito interessante para cartografia do uso do solo porque apresentava melhor comportamento em zonas de sombra. No entanto, a qualidade desta fotografia do INGA era muito má, o que prejudicou bastante este trabalho. Efectivamente denotava-se que se apresentava extremamente baça, o que poderia ter sido causado por deficiências técnicas durante a aquisição, provavelmente pela não utilização dum filtro adequado para eliminação dos efeitos da dispersão atmosférica. Verificámos também que não deve ter havido um controlo de qualidade muito rigoroso, dado que as deficiências apontadas se verificaram quer no Marão quer em Vidago, cuja captação foi efectuada em dias distintos. Efectivamente, também dispúnhamos da cobertura PPB de 1985, de responsabilidade da Força

Aérea Portuguesa, e a qualidade das suas imagens era muito superior. As FAC PPB de 2000 foram ortorrectificadas com sucesso com o programa Orthoengine v6.2, através da utilização de PCT retirados directamente a partir da ortofotografia do CNIG e por GPS. O MDT criado com o mesmo programa, usando a altimetria digital do IGeoE, mostrou-se também adequado. A utilização deste tipo de ferramenta para ortorrectificação de FAC demonstrou ser extremamente importante em trabalhos deste género porque permitiu integrar informação de DR a qual sem ortorrectificação não seria possível de utilizar.

Embora o programa Orthoengine v.6.2 fosse essencialmente dedicado à ortorrectificação de FAC, foi também utilizado sobre FAPMF directamente adquirida por nós neste estudo. Esse facto possibilitou a sua integração directa em SIG (e em CAD) e a medição de diversos parâmetros dendrométricos, cuja verificação no terreno provou ter sido eficiente. Este facto abriu perspectivas da aplicação em *Inventário Florestal*, impossíveis de se obter a partir das imagens de DR comercialmente disponíveis em Portugal, com baixas resolução temporal e espacial.

Relativamente ao processo de aquisição de FAPMF verificou-se que as imagens obtidas através da câmara digital foram de boa qualidade, mas as de médio formato foram ainda de qualidade superior, sobretudo em relação à resolução espacial e capacidade de detalhe, assim como à escala obtida à mesma altitude de voo. No entanto, a qualidade cromática no formato digital apresentou talvez maior estabilidade em distintas situações. Evidenciaram-se nas imagens os diferentes tipos de ocupação de solo, nomeadamente diferentes tipos de ocupação florestal. De realçar ainda que a matriz CCD da câmara utilizada era uma das melhores do mercado no início deste trabalho, mas actualmente já existem matrizes tecnicamente muito superiores. As melhorias no formato digital são enormes e rápidas o que nos permite concluir que num futuro próximo este formato irá substituir o analógico. Obviamente que, com a melhoria da qualidade das imagens, o volume de informação também aumenta. Por isso, as melhorias tecnológicas também se tem feito sentir nas velocidades de transferência de imagem entre a máquina e nos dispositivos de registo. O cartão de memória Ultra Compact Flash, utilizado neste estudo, demonstrou ser adequado, contrariamente aos outros cartões Compact Flash que possuíam taxas de transferência demasiado baixas.

O intervalómetro utilizado, desenvolvido por Martins (2004), também já aplicado por Castro *et al.* (2004), garantiu a sincronização de todas as câmaras e a realização dos disparos a uma cadência constante preestabelecida. Os cálculos efectuados para planeamento de voo também se mostraram correctos, porque efectivamente se obtiveram sobreposições adequadas entre fotografias contíguas.

Relativamente ao processo de fusão de imagens de satélite, com fotografia aérea ortorrectificada, verificou-se que pôde ser feita com sucesso, permitindo tirar partido da resolução

espectral dumas e da resolução espacial doutras. A fusão das bandas multiespectrais TM do Landsat 7 com a sua banda pancromática pôde também ser feita com vantagem, permitindo obter uma imagem de melhor qualidade que as originais separadas. No entanto, dado o mosaico extremamente retalhado da nossa paisagem rural e natural, a aplicação desta metodologia sobre as mais recentes imagens de maior resolução espacial entretanto disponíveis (Ikonos e QuickBird), poderia abrir perspectivas técnicas e económicas interessantes no Inventário Florestal e Agrícola Nacional. Aliás, a metodologia aqui apresentada pode aplicar-se a qualquer imagem digital de DR vulgarmente utilizada em cartografia de uso do solo.

Meramente a título de curiosidade, apresenta-se na Figura 85 uma perspectiva tridimensional duma das imagens resultantes da fusão das imagens Landsat 5, sobreposta com o modelo digital do terreno utilizado para a ortorrectificação da imagem pancromática do INGA.



Figura 85: Imagem do Marão-Campeã “comp-24-bit-134bruto-RGB-HIS-RGB.rst” modelada com o terreno numa perspectiva tridimensional (inclinado 45° relativamente ao N)



## 4 INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL

### 4.1 Introdução

Neste capítulo foram especialmente analisadas metodologias de dendrometria e inventário florestal clássico, que envolveram o estabelecimento de várias parcelas de amostragem no terreno segundo um esquema de amostragem adequado, e a medição de diversos parâmetros físicos dendrométricos. Foi estudado o Pinheiro bravo na área de estudo de Vidago-Boticas, o Eucalipto na área de estudo de Amarante-Aboim e as restantes espécies (Bétula e Pinheiro negro) na área de estudo do Marão-Campeã. Como um dos objectivos deste trabalho foi a utilização da detecção remota no inventário florestal, houve especial cuidado em recolher parâmetros dendrométricos no terreno que pudessem ser mais tarde utilizados para comparar e validar a informação recolhida por detecção remota e/ou por outro método alternativo. Assim, o objectivo deste capítulo não foi apenas a caracterização global de cada uma das manchas florestais homogéneas (volume por hectare, densidade, diâmetro médio, idade, etc.), previamente delimitadas por interpretação visual de imagens de detecção remota obtidas na secção 3.5.5., mas também o estabelecimento de equações e tabelas hipsométricas, equações e tabelas de volume de simples e de dupla entrada.

Estão bastante divulgadas e conhecidas as técnicas de dendrometria e inventário florestal utilizadas neste tipo de inventário (Marques *et al.*, 2001, Avery e Burkhart, 1994, e Loetsch *et al.*, 1974).

Um outro objectivo considerado neste capítulo foi a avaliação da utilização de receptores GPS, sem correcção diferencial, para levantamento da posição de parcelas e a sua re-visita posterior com o mesmo procedimento. Esta abordagem foi explicada na secção 2.2.4 sendo apenas referida a sua utilização neste Capítulo.

Deve ainda referir-se que a realização dos levantamentos de campo para o inventário florestal convencional estava prevista apenas para 2001, mas como a captação de fotografias aéreas com qualidade para a realização de medições dendrométricas só se concluiu em 2003, os levantamentos de campo continuaram até 2003, de forma a obterem-se informações fidedignas para aferir a tecnologia de inventário através de FAPMF. Não foram efectuadas medições dendrométricas nos povoamentos mistos, reservando-os exclusivamente para a análise da capacidade discriminante entre espécies da FAPMF.

### 4.1.1 Justificação da escolha das espécies

O Pinheiro bravo foi uma das principais espécies estudadas, cujo crescimento já tem vindo a ser estudado no Vale do Tâmega desde a década de 80 por Marques (1987) (estimativa da qualidade das estações) e mais recentemente por Aranha (1991) (modelos matemáticos de crescimento). Este último autor viria a instalar em 1993 e posteriormente em 1996, várias parcelas de amostragem segundo um esquema de amostragem sistemática (Aranha, 1998). Lopes (1999) inventariou novamente essas mesmas parcelas. Em todos os inventários realizados desde 1987 foram recolhidos vários parâmetros dendrométricos. A partir de 1996 também passaram a ser simultaneamente registados os valores de LAI com um ceptómetro. Para dar continuidade aos levantamentos já anteriormente realizados na área de estudo de Vidago-Boticas e possibilitar a utilização dos dados anteriores no estabelecimento de regressões, planeou-se uma metodologia de trabalho semelhante à proposta e seguida por Aranha (1998). No entanto, verificou-se que uma grande parte dessas parcelas ardeu, e outras foram simplesmente abatidas. Das 35 parcelas sobreviventes, que viriam a ser medidas em 2001, apenas restaram 18 após o enorme incêndio ocorrido em 2002, e que devastou mais de 3000 ha de pinhal nessa zona (Figura 86 e Figura 71). A análise do mosaico acima permitiu observar que o aceiro conseguiu travar o incêndio na parte superior mas não na inferior. Observou-se ainda que nesta zona existia uma grande densidade de caminhos facto que também deve ter ajudado no combate ao incêndio florestal. Esta imagem mostrou uma das aplicações da FAPMF em acções de mapeamento e actualização da cobertura do solo. Posteriormente, recorrendo a ficheiros GPS pode-se georreferenciar a imagem e actualizar o SIG.

Relativamente ao estudo sobre o eucalipto, seleccionou-se uma extensa área em Amarante – Aboim, explorada pela empresa “Aliança Florestal”, por ser constituída por vários povoamentos regulares de primeira rotação devidamente ordenados (Figura 87 e Figura 81), estando relativamente próximo de Vila Real (cerca de 50km) e com bons acessos.

As restantes espécies a estudar (bétula e pinheiro negral) localizavam-se no Marão (Figura 88 e Figura 62), tendo sido escolhida também esta zona para a realização de testes da metodologia de aquisição de FAPMF. De facto, esta zona reunia várias vantagens, sobretudo pela sua proximidade a Vila Real (cerca de 15km), e também pelas características dos povoamentos, geridos pelos Serviços Florestais, e ainda por causa das difíceis condições fisiográficas de zona de montanha. Em caso de sucesso nestas situações, o procedimento seria certamente reproduzível noutras zonas menos acidentadas.

No mosaico fotográfico acima denota-se uma perfeita distinção entre os vários estratos florestais (folhosas e coníferas) bem como as zonas de matos. Também o tipo de pavimento das vias de comunicação se pode identificar perfeitamente. As asfaltadas são a EN15 e o IP4 e as de terra batida são os estradões da rede viária desta mancha. O mosaico em baixo apresenta-se em escala menor, integrando uma fiada inteira e ainda uma parte da fiada adjacente. Mais uma vez se pode inferir do poder deste tipo de imagens para produzir cartas locais de ocupação do solo ou actualizar um SIG. Em qualquer dos casos, os mapas assim produzidos foram utilizados para marcar e localizar parcelas de estudo.



Figura 86: Mosaico fotográfico com fotografias aéreas de pequeno formato digital não ortorrectificadas captadas pelo autor em 2003 em Vidago-Boticas, ilustrando do lado esquerdo a forma como o incêndio de 2002 lavrou pela floresta.. Fotos do autor.



Figura 87: Mosaico fotográfico com fotografias aéreas de médio formato, não ortorrectificadas, captadas em 2003 em Amarante-Aboim. Fotos do autor.

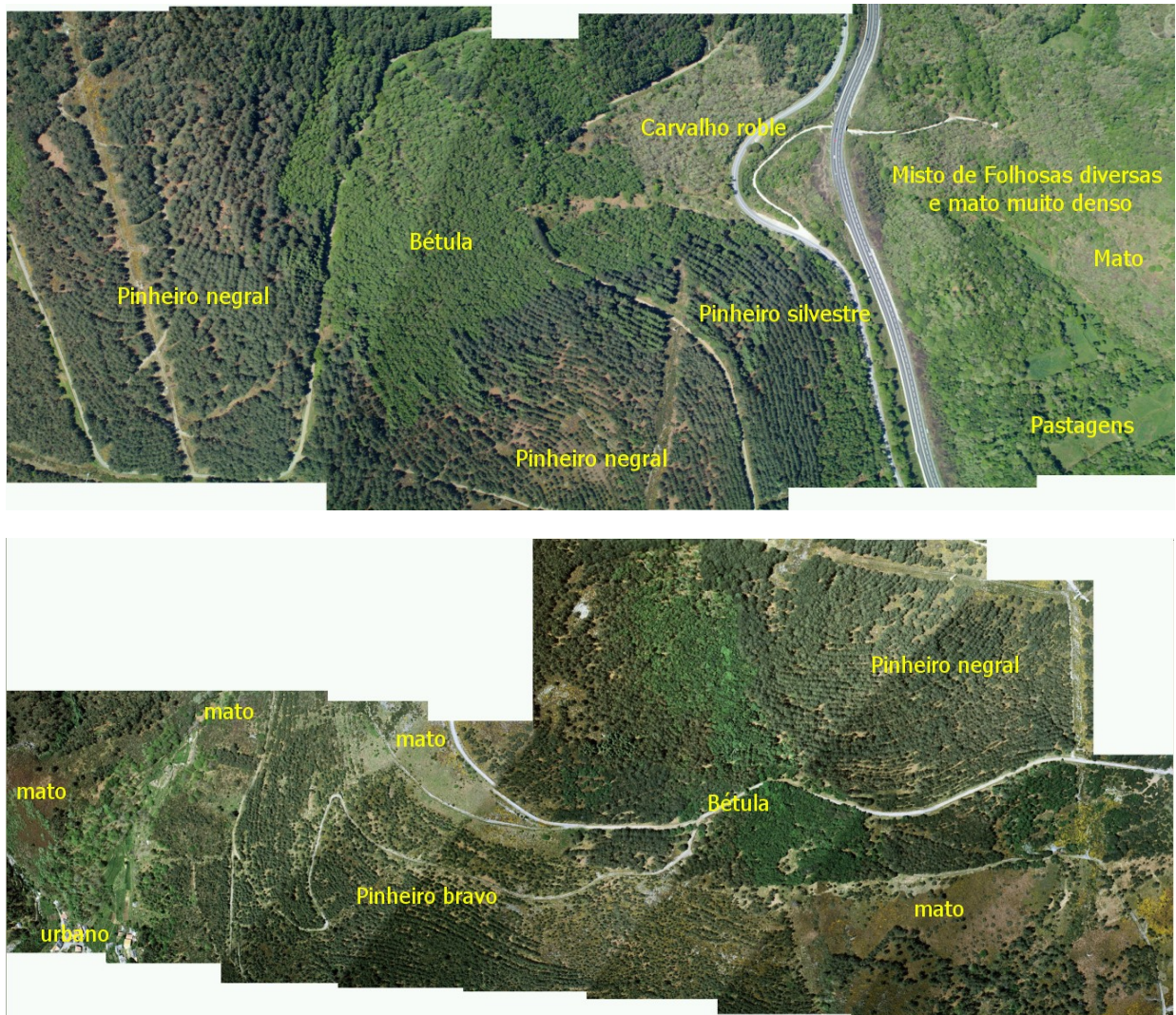


Figura 88: Mosaicos fotográficos com fotografias aéreas de pequeno formato digital não ortorretificadas captadas em 2003 no Marão-Campeã. Fotos do autor

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Equações de regressão – hipsométricas e de volume

As conhecidas relações entre os vários parâmetros dendrométricos gerais como o diâmetro à altura do peito (**d**), a altura total (**ht**), a forma, e o volume (**v**), entre outros, permitem o estabelecimento de equações de regressão de aplicação local (curvas hipsométricas, tabelas de volume de simples ou de múltipla entrada). No caso das tabelas de volume, a sua utilização pressupõe simplicidade sendo por isso desejável que se atinja o máximo de precisão e de exactidão com o menor número de variáveis envolvidas na regressão. As tabelas mais frequentes são de simples e dupla entrada (Avery e Burkhart, 1994), obtidas por regressão entre a variável dependente, **d**, e independente **ht** (curvas hipsométricas), ou entre a variável dependente **v** e independentes **d** e **ht** (equações de volume).

O estabelecimento duma curva hipsométrica considera normalmente um grande número de árvores e por isso proporciona estatísticas sobre as variáveis dendrométricas com grande estabilidade (Costa, 1992). Poderá por essas razões haver vantagem em determinar a altura dominante (**hd**) através da curva hipsométrica, uma vez que a altura dominante representa a altura média das 100 árvores mais grossas por hectare (Assmann, 1970, Alves, 1988, Pardé e Bouchon, 1988, Tomé, 1988).

Uma outra vantagem do estabelecimento de curvas hipsométricas reside na possibilidade de se reverter a relação e obter-se novamente **d** a partir de **ht**, abrindo a perspectiva de criação de tabelas de volume aéreas.

De acordo com Marques *et al.* (2001), para obter equações hipsométricas ou volumétricas de árvores individuais há que:

- considerar uma amostragem dum elevado número de árvores (mais que 30) bem distribuídas por todas as classes de diâmetro existentes,
- fazer a medição dos parâmetros de preferência mediante a cubicagem rigorosa de árvores abatidas, embora também possa ser efectuada com árvores em pé,
- considerar um número razoável de modelos de regressão, analisar o seu ajustamento com os dados obtidos e seleccionar o modelo com melhor ajustamento.

Foi realizada por Patrício (1996), uma compilação bastante completa de equações hipsométricas, que se apresentam no Anexo IV. Relativamente aos outros modelos de regressão - equações de volume de simples e dupla entrada, indicam-se no Anexo V e no Anexo VI vários modelos (Fonseca, 1997, Alegria, 1994, Loetsch, 1974, Avery e Burkhart, 1994). Alguns dos

modelos apresentados já foram testados com sucesso em Trás-os-Montes e Alto Douro (Patrício, 1996, Calado, 1997, Fonseca, 1997).

Os dados dendrométricos foram ordenados por classes de  $d$  e distribuídos por dois grupos de dados, um para ajustamento dos modelos de regressão (com igual representatividade entre as várias classes) e outro grupo para validação cruzada com os restantes dados não seleccionados para o ajustamento. Foram considerados 3 tipos de regressão (não linear, linear com e sem ordenada na origem).

Uma vez que foi necessário comparar modelos lineares com e sem ordenada na origem e modelos não lineares, considerou-se a comparação de vários coeficientes - Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), Coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), Quadrado Médio dos Resíduos (QMR), Erro padrão ou erro residual ( $S_{yx}$ ), a análise da Qualidade de Ajustamento, a avaliação da Capacidade Preditiva, a avaliação da Colinearidade entre Variáveis de Predição e a determinação da Capacidade Preditiva e do desempenho dos Modelos através de Validação Cruzada, apresentados em anexo (A.3).

Para cada espécie e local foi escolhida para validação uma equação de regressão de cada tipo, considerando uma ordenação por ordem crescente ou decrescente de acordo com os valores admissíveis de cada um dos coeficientes e a atribuição duma ordem (número inteiro de 1 para o melhor, a  $n$  para o pior). O valor numérico que resultou da soma das ordens atribuídas a cada modelo permitiu a seriação dos modelos, correspondendo o melhor modelo ao menor somatório das ordens. Na fase de validação seguiu-se um procedimento semelhante mas considerando outros coeficientes, que se indicam: Média dos resíduos de predição ( $M_{rp}$ ), Média do valor absoluto dos resíduos de predição ( $M_{arp}$ ), Variância dos resíduos de predição ( $V_{rp}$ ), Quadrado total do erro (QTE) e Eficiência do modelo ( $R^2_{rp}$ ).

Finalmente, após cada ajustamento realizou-se um teste de normalidade dos resíduos através dum teste de Kolmogorov-Smirnov (KS). Através da população de resíduos foi produzido o valor estatístico KS que quantifica a discrepância entre a distribuição dos resíduos com a distribuição normal ou Gaussiana<sup>49</sup>. A normalidade dos resíduos foi também avaliada por um teste de Chi Quadrado e pela análise das medidas de valor central média, mediana e moda dos resíduos e ainda os valores dos quartis dos resíduos acumulados.

---

<sup>49</sup> Grandes valores de KS indicam grandes discrepâncias. O teste de Kolmogorov-Smirnov produz também um valor P associado. Estes valores estatísticos só produzem valores fidedignos para populações superiores a 30. Nesses casos, os valores baixos de KS associados a valores elevados de P indicam a normalidade da população (Motulsky, 2003).

## 4.2.2 Levantamentos de Campo

A localização das parcelas de amostragem foi auxiliada com receptores GPS de navegação, o que implicou o planeamento prévio do inventário florestal num SIG, a conversão de coordenadas dos centros das parcelas de amostragem para o sistema WGS84, a transferência dos pontos para o GPS, e, finalmente, a orientação no terreno. A precisão da localização foi avaliada através da comparação com a localização obtida por levantamento com GPS com correcção diferencial, cujo exercício foi no entanto já explanado atrás na secção 2.2.4. Considerou-se o estabelecimento de parcelas com 500 m<sup>2</sup> (circulares nas novas e quadradas nas antigas – re-amostragem) a ajustar ao terreno em função do declive.

Para a área de estudo de Vidago-Boticas planeou-se a re-amostragem das parcelas já anteriormente medidas por Aranha (1998) e Lopes (1999), as quais, de acordo com Aranha (1998), foram inicialmente distribuídas por um esquema de amostragem sistemática, como já referimos, e conforme se ilustra na Figura 82. Na mesma figura e ainda na Figura 71 constatou-se que grande parte das parcelas inicialmente amostradas foram destruídas pelo fogo.

Para a área de estudo de Amarante – Aboim foi também estabelecido um esquema de amostragem sistemática sobre as manchas de eucalipto identificadas através da ortofotografia, garantindo-se uma distribuição homogénea das parcelas pela área global (Figura 83).

Para a área de estudo do Marão, dado existirem várias espécies a inventariar, a selecção das parcelas obedeceu a uma estratificação prévia das manchas de cada espécie, seguida duma distribuição casual das parcelas em cada estrato (Figura 84).

No terreno, em cada parcela, após a medição dos diâmetros do tronco à altura do peito ( $d$ ) com uma suta de braços, determinou-se o diâmetro médio ( $\bar{d}$ ) e o diâmetro médio quadrático ( $d_g$ ). Escolheu-se a “Árvore Média” da parcela, definida como a árvore bem conformada cujo diâmetro à altura do peito ( $d$ ) mais se aproximava de  $d_g$ . Foi ainda feita a distribuição das árvores por classe de  $d$ , e escolheu-se uma árvore por cada 5 árvores dentro da mesma classe, “Árvore Draudt”, de acordo com o pressuposto do “Método de Draudt” referido por Marques *et al.* (2001). Finalmente, seleccionaram-se as “Árvores Dominantes” à razão de uma por cada 100m<sup>2</sup> de terreno amostrado. Para cada uma destas árvores seleccionadas, identificadas como árvores de referência ou árvores amostra, foram efectuadas medições com um relascópio de Bitterlich, da altura total ( $h_t$ ), da altura à base da copa ( $h_{bcopa}$ ), e da altura ao nível do  $d/2$  ( $h_{d/2}$ ) e o cálculo do volume sobre casca ( $v_i$ ) (Eq. 81 – Anexo II) e da área basal ( $g_i$ ) (Eq. 70 – Anexo II). Com um relascópio de Bitterlich, um observador distancia-se duma dada árvore a medir, de forma a enquadrar o seu diâmetro à altura do peito numa banda específica a escolher do aparelho. Por isso, os valores obtidos nas leituras são valores múltiplos de  $d$ , designados por Unidades hipsométricas ( $U_h$ ). Consoante a banda

seleccionada, o valor da  $U_h$  será encontrado através da aplicação das equações Eq. 77, Eq. 78, Eq. 79 e Eq. 80 (ver Anexo II). Para cada árvore dominante calculou-se também o diâmetro de copa médio (DCm) através de duas medições perpendiculares. A idade do Pinheiro bravo em Vidago-Boticas já tinha sido anteriormente determinada por Aranha (1998). A idade do eucalipto foi obtida por informação da empresa “Aliança Florestal”. A idade dos povoamentos florestais do Marão foi determinada através duma biópsia com uma verruma de Pressler (Figura 89) e contagem de anéis de crescimento, complementada com inquéritos a técnicos da ex-DGF e por consulta de arquivos (Rego, 2001).



Figura 89: Cepo de bétula cortada pela DGF na zona do Marão-Campeã (à esquerda) sendo visíveis os anéis de crescimento (este cepo encontra-se marcado em relevo com carimbo oficial da DGF o que comprova que foi cortada por “Auto de Marca”); Biópsia de Pinheiro bravo em Vidago-Boticas com verruma de Pressler (executada pelo Sr. Carlos Lopes) para determinação da idade da árvore por contagem de anéis de crescimento (à direita). Fotografias do autor.

Para cada amostra determinaram-se os seguintes parâmetros reportados ao hectare: número de árvores (N), área basal (G), volume médio pelo processo de Draudt ( $V_{Dr}$ ), volume médio pelo processo da árvore média ( $V_m$ ) e volume médio através do volume médio das árvores médias ( $V_{mg}$ ), diâmetro médio de copa (DCm), densidade de copas ( $D_{sdCopa}$ ) e altura dominante (hd). Por facilidade de consulta apresenta-se o formulário para o cálculo destes parâmetros das árvores e do povoamento, de forma compacta, no Anexo II.

Para cada amostra, relativamente às árvores amostra “**Média**”, “**Dominantes**” e “**Draudt**”, determinaram-se respectivamente os seguintes parâmetros médios: altura total (htm, hd e htdr), altura de copa (hcm, hcd, hcdr), área basal ( $g_m$ ,  $g_d$ ,  $g_{dr}$ ), volume ( $v_{gm}$ ,  $v_d$ ,  $v_{dr}$ ). Nos cálculos foram tomadas os valores individuais de alturas totais ( $h_{t,m}$ ,  $h_{t,d}$ ,  $h_{t,dr}$ ), alturas de copa ( $h_{c,m}$ ,  $h_{c,d}$ ,  $h_{c,dr}$ ) e áreas basais ( $g_m$ ,  $g_d$ ,  $g_{dr}$ ) das árvores amostra.

Para cada amostra foi ainda determinado o diâmetro de copa médio das árvores dominantes (DCd).

Foram utilizados nos levantamentos de campo os seguintes instrumentos: suta de braços, relascópio de Bitterlich, fita métrica, clinómetro, bússola, relógio, hipsómetro de Blume-Leiss,

verruma de Pressler, receptor GPS de navegação Magellan 320 e receptor GPS Trimble Pro XR, viatura todo o terreno, tinta vistosa e fitas plásticas de marcação.

### 4.2.3 Processamento dos Dados

O processamento dos dados obtidos nos Levantamentos de Campo para o Inventário Florestal Convencional consistiu na introdução dos dados na base de dados expressamente construída para esse efeito (secção 2.2.2) e na análise estatística dos dados.

Relativamente à base de dados, esta foi desenhada para que os cálculos e actualizações se realizassem automaticamente à medida que se introduzisse mais informação. Desse modo, parte dos cálculos foram feitos directamente a partir do formulário de introdução de dados enquanto que outros foram feitos posteriormente através de consultas apropriadas. Sempre que possível, aplicou-se a primeira opção por tornar mais ligeira a aplicação informática.

Relativamente à análise estatística, filtrou-se a informação por espécie e local através de consultas apropriadas e os dados apresentaram-se na forma tabular em formato compatível com as ferramentas de análise estatística (Microsoft Excel, SYSTAT e GraphPrism v.4.0).

O tratamento estatístico consistiu em **análises de correlação e comparação de médias e ajustamento e validação de equações de regressão** (lineares ou não).

A **caracterização dos dados e a análise de correlação** foi feita por espécie e local. Programas utilizados: Microsoft Excel e GraphPad Prism v.4.0. Foi avaliada a significância da correlação para 99% de probabilidade. Pretendeu-se por um lado, confirmar as correlações esperadas entre as variáveis diâmetro à altura do peito (**d**) e altura total (**ht**), necessárias para o estabelecimento de curvas hipsométricas e tabelas de volume de simples e dupla entrada, e por outro lado verificar a aplicabilidade de métodos alternativos de determinação do volume em pé do povoamento, os quais utilizam as variáveis diâmetro de copa (**DC**) e número de árvores por hectare (**N**). A análise de correlação não dispensa o estabelecimento de regressão linear mas permite verificar a associação de pares de variáveis. A análise de regressão entre duas variáveis só fará sentido se estas estiverem significativamente correlacionadas (D'Hainaut, 1997, Dagnelie, 1973). Por isso, construiu-se uma matriz de correlações entre as variáveis obtidas por Inventário Florestal Convencional e verificou-se a significância das correlações para 99% de probabilidade.

As **comparações de médias** serviram para verificar a significância das diferenças entre os valores dos volumes médios por hectare encontrados pelos 3 processos de cálculo considerados (**VDr**, **Vm** e **Vmg**) (ver Anexo X). Foi aplicado um teste **t** de Student heterocedástico (os conceitos teóricos deste teste apresentam-se em anexo – ver Secção A.3). Não havendo diferenças significativas entre as várias formas de estimação dos volumes médios para todas as espécies,

dever-se-á adoptar a estimativa com menor variância ou alternativamente a média das três estimativas ponderadas com os inversos daquelas variâncias.

O **Ajustamento e Validação dos Modelos de regressão** foi feito para o estabelecimento de equações hipsométricas e de volume (Os Critérios de Sieriação e Validação dos Modelos de regressão apresentam-se em anexo – secção A.3).

O ajustamento de equações de regressão com o objectivo de criar tabelas de volume obriga a que os dados provenham equitativamente de todas as classes de diâmetro consideradas (Marques e Lopes, 2000). A distribuição dos dados pelas várias classes de **d** para ajustamento dos modelos de regressão relativos a tabelas de volume e a curvas hipsométricas, para cada espécie apresentam-se no Quadro 30.

Quadro 30: Distribuição das árvores por classe de d (cm) para ajustamento das regressões de volume e hipsométricas

Espécie	classe de d (cm) e frequência por classe de d													Total
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	
Pbravo	0	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0	0	0	77
Eucalipto	14	14	14	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	70
Pnigra	0	7	7	7	7	7	7	7	7	7	0	0	0	63
Bétula	0	15	15	15	15	0	0	0	0	0	0	0	0	60

No Quadro 31 apresentam-se os restantes valores, que serviram para validar as equações de regressão.

Quadro 31: Distribuição das árvores por classe de d (cm) para validação das regressões de volume e hipsométricas

Espécie	classe de d (cm) e frequência por classe de d													Total
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	
Pbravo	2	19	51	29	33	30	5	0	2	0	0	0	0	171
Eucalipto	148	329	214	59	0	2	0	0	0	0	0	0	0	752
Pnigra	0	1	19	19	26	22	13	15	4	0	0	0	1	120
Bétula	2	11	27	12	10	2	0	0	0	0	0	0	0	64

Finalmente, refere-se que os levantamentos de campo realizados para ambos os inventários (Inventário Florestal Convencional e Inventário Florestal Alternativo), embora independentes, foram realizados em simultâneo, excepto para alguns parâmetros que tiveram de obedecer a restrições de levantamento de campo (por ex.: caso das fotografias hemisféricas).

## Bétula (Marão)

### Caracterização dos dados, análise de correlação e comparação de médias

Face aos resultados obtidos para esta espécie verificou-se que ela apresenta um comportamento diferente das outras. Quer as análises de correlação quer as posteriores análises de regressão linear e não linear entre os diversos parâmetros medidos, demonstraram não haver associações estatísticas evidentes. Esse facto impossibilitou a utilização de tecnologias de inventário alternativo para basear inferências sobre parâmetros dendrométricos.

Apresenta-se no Quadro 32 uma caracterização sumária das parcelas de amostragem representativas dos povoamentos de Bétula no Marão.

Quadro 32: Caracterização das variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para a Bétula no Marão (n = 14)

	t	nj	N	$\bar{d}$	$d_g$	G	$V_m$	DCm	hd	hcd
Média	40	63	1256	15.90	16.60	25.67	130.89	4.61	15.96	9.66
Máximo	40	95	1900	22.17	22.48	41.56	268.87	6.36	20.49	13.56
Mínimo	40	30	600	12.90	13.42	19.79	61.79	3.07	11.20	4.80
Desvio Padrão	0.00	21.19	423.84	2.65	2.61	6.06	51.46	1.13	2.76	2.26
CV (%)	0%	34%	34%	17%	16%	24%	39%	24%	17%	23%



Figura 90: Danos causados pela neve em povoamentos de Bétula no Marão observados através de FAPMF. Fotografia do autor.

Foi produzida uma matriz de correlações entre as variáveis (a idade neste caso é uma constante e por isso não foi considerada), conforme se apresenta no Quadro 33, constatando-se que as correlações significativas entre a globalidade das variáveis foram encontradas

principalmente em relação ao número de árvores por hectare (N). Dada a ausência de correlação significativa entre  $\bar{d}$  e htm ou hd e tampouco entre o Vm e as restantes variáveis, excepto G, pode comprometer-se o estabelecimento de curvas hipsométricas e eventualmente também de tabelas de volume de dupla entrada. A reduzida correlação entre hd e htm (0.50) também desfavorece a capacidade de obtenção de tabelas de volume aéreas, porque através de FAPMF são normalmente medidas as alturas das árvores dominantes. A utilização da hd em vez da htm provocaria forçosamente uma sobrestima do volume. Os povoamentos florestais desta espécie “parecem” não ser conduzidos, devendo ser alvo de mortalidade ou cortes. O número de árvores por hectare poderá não ser excessivo, mas as árvores estão distribuídas muito irregularmente em termos espaciais. Só assim se compreende que as mais grossas não sejam as mais altas: por terem menor competição, alargam o  $d$  e a copa, não necessitando de crescer em altura. Ainda a acrescentar, várias árvores apresentavam danos evidentes causados pela neve (Figura 90) que poderão ter falseado os valores medidos, principalmente a altura das árvores dominantes, e ter permitido que o aumento de espaço disponível tenha possibilitado o aumento de diâmetro de copa de algumas árvores que não as mais grossas. Contudo, há a salientar que apenas se dispunha de um conjunto de 14 amostras, cujos dados recolhidos pecaram por escassez de diversidade etária, dado que se tratava de povoamentos com idades semelhantes. Como os povoamentos de bétula relativamente homogêneos são raros, não houve hipótese de alargar a amostragem.

Nesta fotografia evidencia-se a capacidade da FAPMF na avaliação de prejuízos causados por intempéries, que poderá ser alargada a outras actividades (por ex.: agricultura), com grande importância para as companhias seguradoras.

Como algumas das correlações obtidas fogem da tendência que se esperaria, nomeadamente entre G e  $\bar{d}$  e Vm e  $\bar{d}$ , um aumento da densidade de amostragem poderia esclarecer melhor estes resultados.

Compararam-se as médias VDr, Vm e Vmg através dum teste  $t$  de Student (probabilidade de 99%; n =14) não se tendo verificado diferenças significativas entre elas:  $t_{[VDr, Vm]}=0.8382$ , gl=13, P= 0.4171;  $t_{[VDr, Vmg]}=0.9647$ , gl=13, P= 0.3523;  $t_{[Vm, Vmg]}=0.5961$ , gl=13, P= 0.5613.

### **Equações de volume**

Os resultados dos modelos mais usuais de ajustamento do volume com o diâmetro (ou com o diâmetro e a altura) são apresentados no Quadro 34 relativamente à Bétula.

Após a atribuição de valores de classificação em função da grandeza dos parâmetros estatísticos seleccionados para comparar os modelos, criou-se o quadro seguinte, onde se apresenta a pontuação alcançada por cada modelo, correspondendo a pontuação mais baixa ao melhor modelo.

Com o objectivo de seleccionar os melhores modelos, foi seleccionado o melhor de cada um dos modelos de regressão (Linear com e sem ordenada na origem, Não Linear e melhor modelo de simples entrada) (Quadro 36).

Usando os modelos seleccionados fez-se a predição de volumes e compararam-se os valores preditos com os valores de amostragem. Os resultados dessas comparações constituem medidas da qualidade predictiva dos modelos, que se apresentam no Quadro 37.

A cada modelo foi-lhe atribuída uma pontuação da mesma forma indicada que para o ajustamento resultando o Quadro 38.

Quadro 33: Correlações entre variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para a Bétula (Marão) (n =14)

	N	$\bar{d}$	G	Vm	htm	hd	DCm
N	1.000						
$\bar{d}$	-0.723 ** P= 0.0035	1.000					
G	0.701 ** P= 0.005	-0.061	1.000				
Vm	0.574* P=0.0320	-0.035	0.898 *** P<0.0001	1.000			
htm	-0.092	0.280	0.285	0.610* P=0.0205	1.000		
hd	-0.065	0.200	0.048	0.116	0.449	1.000	
DCm	-0.781 *** P= 0.001	0.531	-0.539	-0.478	-0.147	-0.354	1.000

Quadro 34: Estatísticas associadas aos modelos de ajustamento do volume com o d (1 a 4) e com o d e ht (5 a 9) (Bétula) (n =60)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR (m <sup>3</sup> )	MAR (m <sup>3</sup> )
1	não linear	0.9450	0.9421	0.0387	0.0015	0.0266
1.a	logaritmizada	0.8925	0.8907	0.1207	0.0146	0.0268
2	linear com ordenada na origem	0.7967	0.7932	0.0412	0.0017	0.0306
3	linear com ordenada na origem	0.8282	0.8221	0.0387	0.0015	0.0269
4	linear sem ordenada na origem	0.9446	0.9417	0.0387	0.0015	0.0267
5	linear com ordenada na origem	0.8397	0.8340	0.0374	0.0014	0.0253
6	linear sem ordenada na origem	0.9453	0.9434	0.0374	0.0014	0.0259
7	não linear	0.9536	0.9503	0.0361	0.0013	0.0235
7.a	logaritmizada	0.9126	0.9095	0.1095	0.0120	4.5989
8	não linear	0.9536	0.9503	0.0361	0.0013	0.0238
10	não linear	0.9463	0.9435	0.0374	0.0014	0.0250

Quadro 35: Seriação de modelos para validação (Bétula) (n =60)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR	MAR	Total
5	Linear com ordenada na origem	3	3	1	1	1	9
1.a	logaritmizada	2	2	5	5	2	16
3	linear com ordenada na origem	4	4	2	2	3	15
2	linear com ordenada na origem	5	5	3	3	4	20
7	logaritmizada	1	1	4	4	5	15
6	linear sem ordenada na origem	1	1	1	1	1	5
4	linear sem ordenada na origem	2	2	2	2	2	10
7	não linear	2	2	2	2	1	9
8	não linear	1	1	1	1	2	6
10	não linear	3	3	3	3	3	15
1	não linear	4	4	4	4	4	20

Quadro 36: Equações finais de volume após ajustamento (Bétula) (unidades = m<sup>3</sup>)

Modelo	Equação de volume
5 (Linear com ordenada na origem)	$v = 0.0161 + 0.2548.d^2h$
6 (Linear sem ordenada na origem)	$v = 0.2781.d^2h$
7 (Não Linear)	$v = 1.0224.(d^{1.989}).(h^{0.5138})$
4 (Linear sem ordenada na origem)	$v = -0.1356.d + 4.6903.d^2$

Quadro 37: Estatísticas dos modelos de volume na fase de validação (Bétula) (n =64) (unidades = m<sup>3</sup>)

Modelo	Tipo	Mrp	Marp	Vrp	QTE	R <sup>2</sup> rp
7	não linear	0.00060	0.01387	0.00050	0.00050	0.97993
6	linear sem ordenada na origem	0.00379	0.01518	0.00052	0.00053	0.97832
5	linear com ordenada na origem	0.00001	0.01439	0.00049	0.00049	0.94196
4	linear sem ordenada na origem	-0.00029	0.02356	0.00100	0.00100	0.94629

Quadro 38: Ordenação dos modelos de volume na fase de validação (Bétula) (n =64)

Modelo	Tipo	Mrp	Marp	Vrp	QTE	R <sup>2</sup> rp	Total
7	não linear	3	1	2	2	1	9
5	linear com ordenada na origem	1	2	1	1	4	9
6	linear sem ordenada na origem	4	3	3	3	2	15
4	linear sem ordenada na origem	2	4	4	4	3	17

Os modelos 5 e 7 apresentaram na validação iguais valores estatísticos. Elegeu-se o modelo 7 para a elaboração da tabela de dupla entrada porque no ajustamento apresentou menor erro residual. O modelo 4 foi o escolhido para a elaboração da tabela de simples entrada porque tendo sido o melhor do seu grupo no ajustamento, garantiu também valores aceitáveis na validação, embora com pior desempenho que os outros modelos de dupla entrada.

Após a eleição dos modelos para realizar as tabelas de volume de simples e dupla entrada, ajustaram-se novamente as regressões com a totalidade dos dados. Para a Bétula, no ajustamento da regressão entre  $v$  e  $d$  foram consideradas 60 árvores distribuídas equitativamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) e na validação foram consideradas 64 árvores (Quadro 31). Após o

ajustamento e validação que conduziu à eleição do Modelo 4, linear sem ordenada na origem de simples entrada de Dissescu Meyer, fez-se novo ajustamento dos dados considerando todas as árvores, excepto 2, devido a anomalias, portanto 112 árvores, com as quais se obtiveram os seguintes parâmetros de regressão:  $v = -0.069 \cdot d + 4.393 \cdot d^2$ ; Volume médio real duma árvore  $i$  ( $v_{imr}$ ) =  $0.1158 \text{m}^3$ ; Volume médio estimado duma árvore  $i$  ( $v_{ime}$ ) =  $0.1161 \text{m}^3$ ;  $R^2 = 0.98^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.022 \text{m}^3$ ;  $MAR = 0.02 \text{m}^3$ ;  $n = 112$ ;  $KS = 0.077$  com  $P > 0.10$  n.s. ( $\alpha = 0.05$ ).

Na Figura 91 apresenta-se o gráfico da regressão entre  $v$  e  $d$  (Modelo 4).

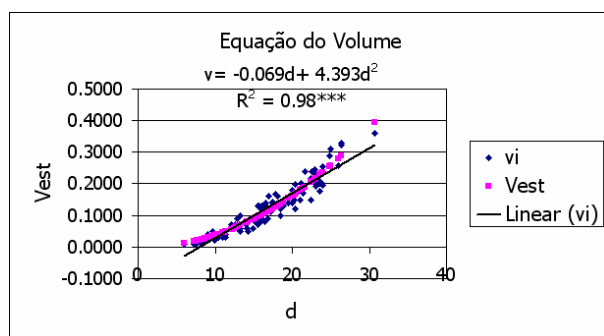


Figura 91: Curva de regressão estimada do Modelo 4 (Bétula) (unidades =  $\text{m}^3$ )

Procedeu-se à análise de normalidade dos resíduos da regressão. Na Figura 92 apresenta-se o histograma dos resíduos da regressão padronizados sobre uma distribuição normal característica (esquerda) e o gráfico “Normal P-P Plot” dos resíduos padronizados (direita).

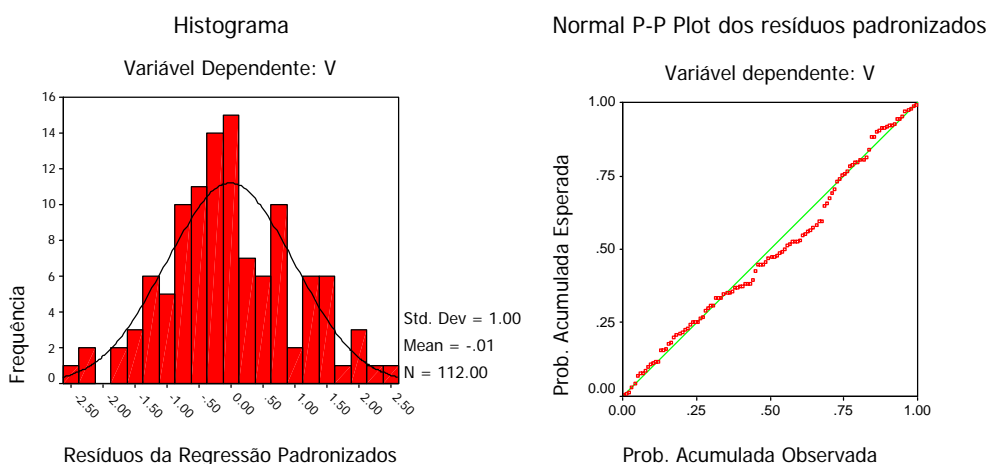


Figura 92: Gráfico do histograma (esquerda) e gráfico Normal P-P Plot dos resíduos padronizados (direita)

A análise dos gráficos da figura anterior indica uma distribuição dos resíduos muito próxima da normalidade, comprovada pelo teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov ( $\alpha = 0.05$ ):  $KS = 0.0782$  com  $P > 0.10$  n.s., confirmada ainda através dum teste  $t$  de Student ( $t = 0.1328$ ,  $df = 111$ ,  $P = 0.8946$  n.s. para  $\alpha = 0.05$ ) e ainda pela verificação da coincidência entre os valores

calculados para os quatro quartis e os valores encontrados, que se verificou. Os resíduos da regressão apresentaram também homogeneidade em torno da sua média (nula) sendo por isso homocedásticos. Igual procedimento foi realizado para as restantes regressões finais, tendo-se também verificado normalidade e homocedasticidade dos resíduos.

### Tabela de volume de simples entrada

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Betula celtiberica*

**Área de estudo:** Marão

**Parcelas amostradas:** 14 parcelas de 500 m<sup>2</sup>

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Volume (v) sobre casca em m<sup>3</sup>

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (d) em m com aproximação ao mm

**Método de avaliação indirecta do volume:** Pressler-Bitterlich.

No ajustamento da regressão entre v e d foram consideradas 60 árvores distribuídas equitativamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30).

Na validação da regressão entre v e d foram consideradas 64 árvores (Quadro 31) tendo-se elegido o Modelo 4, linear sem ordenada na origem de Dissescu Meyer, para o estabelecimento duma Tabela de volume de simples entrada para a Bétula no Marão-Campeã.

No ajustamento final foram consideradas 112 árvores, tendo-se obtido os seguintes **parâmetros de regressão:**  $v = -0.069 \cdot d + 4.393 \cdot d^2$ ;  $v_{imr} = 0.1158m^3$ ;  $v_{ime} = 0.1161m^3$ ;  $R^2 = 0.98^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.022m^3$ ;  $MAR = 0.02m^3$ ;  $n = 112$ ;  $KS = 0.077$  com  $P > 0.10$  n.s. ( $\alpha = 0.05$ ).

Com esta equação de regressão construiu-se para a Bétula no Marão-Campeã a Tabela de volume de simples entrada a seguir indicada:

Quadro 39: Tabela de volume de simples entrada (Bétula)

classe de d (cm)	5	10	15	20	25	30
volume (m <sup>3</sup> )	0.0049	0.0333	0.0852	0.1605	0.2592	0.3814

### Tabela de volume de dupla entrada

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Betula celtiberica*

**Área de estudo:** Marão-Campeã

**Parcelas amostradas:** 14 parcelas de 500 m<sup>2</sup>

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Volume (v) sobre casca em m<sup>3</sup>

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (d) em m com aproximação ao mm e altura total (ht) em m com precisão ao cm.

**Método de avaliação indirecta do volume:** Pressler-Bitterlich

Após o ajustamento e validação que conduziu à eleição do Modelo 7, não linear de dupla entrada de Santos Hall-Schumacher, fez-se novo ajustamento com as mesmas 112 árvores utilizadas para a tabela de volume de simples entrada, com as quais se obtiveram os seguintes **parâmetros de regressão:**  $v = 0.587 \cdot d^{1.887} \cdot h^{0.674}$ ; vimr = 0.1180m<sup>3</sup>; vime = 0.1182m<sup>3</sup>; R<sup>2</sup>=0.99\*\*\*; Syx = 0.021m<sup>3</sup>; MAR=0.012m<sup>3</sup>; n =112; KS =0.0711 com P>0.10n.s. para alpha = 0.05.

Com esta equação de volume construiu-se para a Bétula no Marão-Campeã a seguinte tabela de volume de dupla entrada:

Quadro 40: Tabela de volume (m<sup>3</sup>) de dupla entrada (d e ht) (Bétula)

		classe de ht (m)								
classe de d (cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
5	0.0061	0.0069	0.0076							
10		0.0255	0.0283	0.0309	0.0335	0.0359	0.0383	0.0406		
15				0.0665	0.0720	0.0773	0.0824	0.0874	0.0922	
20						0.1329	0.1418	0.1503	0.1587	
		classe de ht (m)								
classe de d (cm)	14	15	16	17	18	19	20	21		
15	0.0969	0.1015	0.1060							
20	0.1668	0.1747	0.1825	0.1901	0.1976					
25				0.2896	0.3010	0.3122	0.3232	0.3340		

### Equações hipsométricas

Ajustando os modelos de regressão hipsométrica aos dados da Bétula no Marão-Campeã obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 41.

Aplicando os mesmos critérios de seriação dos modelos já utilizados nas equações de volume de simples e dupla entrada para esta espécie, a seriação dos modelos hipsométricos é dada no Quadro 42.

Do processo de selecção resultaram os modelos que se apresentam no Quadro 43.

Usando os modelos seleccionados fez-se a predição de alturas e compararam-se os valores preditos com os valores de amostragem. Os resultados dessas comparações constituem medidas da qualidade predictiva dos modelos, que se apresentam no Quadro 44.

Em face dos resultados acima aceitou-se o modelo 4 e ajustou-se novamente a regressão com a totalidade dos dados.

Quadro 41: Estatísticas associadas aos modelos de regressão hipsométrica (Bétula) (n =60)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	Syx	QMR (m)	MAR (m)
1	linear com ordenada na origem	0.3445	0.3215	2.5093	6.2966	1.8904
2	não linear	0.9655	0.9630	2.4946	6.2228	1.8646
3	linear com ordenada na origem	0.3483	0.3370	2.4804	6.1524	1.8943
4	não linear	0.9656	0.9632	2.4894	6.1969	1.8737
5	não linear	0.9648	0.9629	2.4995	6.2477	1.9291
6	não linear	0.9655	0.9630	2.4944	6.2218	1.8515
7	não linear	0.9654	0.9629	2.4983	6.2415	1.9214
8	não linear	0.9652	0.9633	2.4854	6.1771	1.8987
9	linear com ordenada na origem	0.3508	0.3396	2.4756	6.1285	1.8579
10	não linear	0.9655	0.9636	2.4744	6.1228	1.8729
11	linear com ordenada na origem	0.3514	0.3286	2.4961	6.2303	1.8644
12	linear com ordenada na origem	0.3526	0.3299	2.4937	6.2183	1.8670

Quadro 42: Seriação dos modelos (Bétula) (n =60)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR	MAR	Total
9	linear com ordenada na origem	3	1	1	1	1	7
11	linear com ordenada na origem	2	4	4	4	2	16
3	linear com ordenada na origem	4	2	2	2	5	15
1	linear com ordenada na origem	5	5	5	5	4	24
12	linear com ordenada na origem	1	3	3	3	3	13
4	não linear	1	3	3	3	4	14
6	não linear	2	4	4	4	1	15
2	não linear	3	5	5	5	2	20
7	não linear	5	6	6	6	6	29
5	não linear	7	7	7	7	7	35
10	não linear	4	1	1	1	3	10
8	não linear	6	2	2	2	5	17

Quadro 43: Melhores equações finais hipsométricas após ajustamento (Bétula) (unidades = m)

Modelo	Equação
4	$h = 10^{3.2847+380.6936 \cdot \log d - 189.8702 \cdot \log^2 d}$
9	$h = 7.1782 + 32.0457 \cdot d$

Quadro 44: Estatísticas dos modelos hipsométricos na fase de validação (Bétula) (n =64)

Modelo	Tipo	Mrp	Marp	Vrp	QTE	R <sup>2</sup> rp
4	não linear	-0.07827	2.17463	7.52844	7.53457	0.95957
9	linear com ordenada na origem	0.00000	2.22309	7.82205	7.82205	0.36269

### Curva hipsométrica

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Betula celtiberica*

**Área de estudo:** Marão

**Parcelas amostradas:** 14 parcelas de 500 m<sup>2</sup>.

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Altura total (ht) em m

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (**d**) em m com aproximação ao mm e o seu logaritmo.

**Aparelho utilizado na avaliação indirecta da altura:** relascópio de Bitterlich

Foram consideradas 60 árvores distribuídas homogeneamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) no ajustamento da equação hipsométrica com base no modelo não linear de Korsun (1935), seguida de validação com os restantes dados.

O ajustamento desta equação com a totalidade dos dados permitiu obter os seguintes **parâmetros**

**de regressão:**  $h = 10^{(1.467+135.647 \cdot \log d - 67.587 \cdot \log^2 d)}$ ; altura total da árvore real (ht) = 12.54 m; Altura total da árvore por estimativa (hest) = 12.42 m; R<sup>2</sup> = 0.996\*\*\*; Syx = 0.07 m; MAR = 1.53 m; n = 111; KS = 0.065 com P > 0.10 n.s. para alpha = 0.05.

Com esta equação hipsométrica construíram-se para a Bétula no Marão-Campeã a Tabela e Curva hipsométrica a seguir indicadas:

Quadro 45: Tabela hipsométrica (Bétula)

classe d (cm)	10	15	20	25
h (m)	9.9	11.9	13.7	15.2

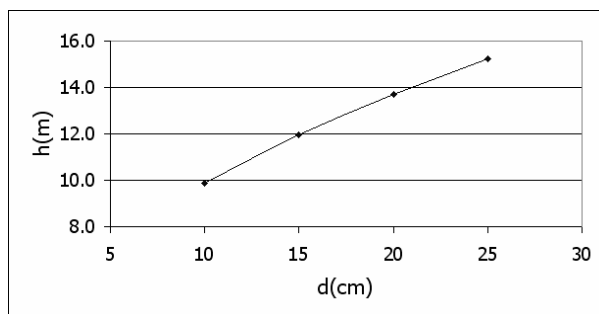


Figura 93: Curva hipsométrica (Bétula)

## **Pinheiro negral (Marão)**

### **Caracterização dos dados, análise de correlação e comparação de médias**

Relativamente ao Pinheiro negral no Marão, apenas dispusemos de um conjunto de 13 amostras que é claramente um pequeno universo. Apresenta-se no Quadro 46 uma caracterização sumária das parcelas de amostragem representativas dos povoamentos de Pinheiro negral no Marão.

Quadro 46: Caracterização das variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para Pinheiro negral no Marão (n = 13)

	t	nj	N	$\bar{d}$	$d_g$	G	V <sub>m</sub>	DCm	hd	hcd
Média	40	42	835	24.64	25.89	44.14	287.52	5.54	17.09	9.66
Máximo	50	57	1140	30.93	33.64	69.84	581.31	7.16	22.04	12.64
Mínimo	25	25	500	16.42	17.11	19.32	62.82	4.12	9.29	6.85
Desvio Padrão	5.94	9.38	187.64	5.01	5.44	16.29	151.92	0.70	4.21	1.92
CV (%)	15%	22%	22%	20%	21%	37%	53%	13%	25%	20%

Pela análise do quadro anterior verificámos que os povoamentos de Pinheiro negral possuíam pouca variabilidade na idade e no diâmetro de copa dominante e ligeiramente superior nas restantes variáveis, excepto o volume/ha que apresentava efectivamente uma grande variabilidade. Foi produzida uma matriz de correlações (Quadro 47) verificando-se que existem correlações significativas, mas com um nível de significância de apenas 95%, para a maior parte das variáveis. Considerando a razoável correlação encontrada entre, hd e  $\bar{d}$  (0.684\*), hd e V<sub>m</sub> (0.769\*\*) e a boa correlação entre hd e htm (0.803\*\*), numa perspectiva optimista de que aumentando a amostragem esta tendência se mantém ou até melhora (aumento da significância da correlação), poderemos esperar que existam boas perspectivas de estabelecimento de equações hipsométricas, equações de volume e de tabelas de volume aéreas. É de realçar a boa correlação calculada entre hd e htm (0.803\*\*), que é um factor muito importante na estimativa das alturas através de medições a partir de FAPMF.

Compararam-se as médias V<sub>Dr</sub>, V<sub>m</sub> e V<sub>mg</sub> através dum teste *t* de Student (probabilidade de 99%; n =14) não se tendo verificado diferenças significativas entre elas:  $t_{[V_{Dr}, V_m]}=1.484$  , gl=12, P= 0.1635;  $t_{[V_{Dr}, V_{mg}]}=0.4690$  , gl=12, P= 0.6475;  $t_{[V_m, V_{mg}]}=0.7477$  , gl=12, P= 0.4690.

Quadro 47: Correlações entre variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Pinheiro negral (Marão) (n =13)

	t	N	$\bar{d}$	G	V <sub>m</sub>	htm	hd	DCm
t	1.000							
N	-0.186	1.000						
$\bar{d}$	0.524	-0.383	1.000					
G	0.444	0.163	0.840 ** P= 0.0012	1.000				
V <sub>m</sub>	0.530	0.260	0.740 ** P= 0.0092	0.953 *** P<0.0001	1.000			
htm	0.600 n.s. P= 0.051	0.129	0.609 * P= 0.0467	0.687 * P= 0.0195	0.796 ** P= 0.0034	1.000		
hd	0.516	-0.071	0.684 * P= 0.0204	0.664 * P= 0.0259	0.769 ** P= 0.0057	0.803 ** P= 0.0029	1.000	
DCm	0.121	-0.422	0.524 n.s. P= 0.0983	0.247	0.244	0.537	0.663 * P= 0.0265	1.000

## Equações de volume

Tal como foi feito para a Bétula, os resultados dos modelos mais usuais de regressão de volume com o diâmetro (ou com o diâmetro e a altura) são apresentados no Quadro 48 relativamente ao Pinheiro negral.

Quadro 48: Estatísticas associadas aos modelos de ajustamento do volume com o d (1 a 4) e com o d e ht (5 a 10) (Pinheiro nigra) (n =63)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR (m <sup>3</sup> )	MAR (m <sup>3</sup> )
1	não linear	0.9564	0.9542	0.1884	0.0355	0.1158
2	linear com ordenada na origem	0.8570	0.8547	0.2293	0.0526	0.1610
3	linear com ordenada na origem	0.9042	0.9010	0.1892	0.0358	0.1126
4	linear sem ordenada na origem	0.9567	0.9545	0.1879	0.0353	0.1136
5	Linear com ordenada na origem	0.8337	0.8310	0.2472	0.0611	0.1351
6	linear sem ordenada na origem	0.9188	0.9161	0.2550	0.0650	0.1234
7	não linear	0.9664	0.9642	0.1667	0.0278	0.0967
8	não linear	0.9593	0.9565	0.1836	0.0337	0.1011
9	não linear	0.9213	0.9174	0.2530	0.0640	0.1400

Após a atribuição de valores de classificação em função da grandeza dos parâmetros estatísticos seleccionados para comparar os modelos, criou-se o quadro seguinte, onde se apresenta a pontuação alcançada por cada modelo, correspondendo a pontuação mais baixa ao melhor modelo.

Quadro 49: Seriação dos modelos para validação (Pinheiro nigra) (n =63)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR	MAR	Total
3	linear com ordenada na origem	1	1	1	1	1	5
2	linear com ordenada na origem	2	2	2	2	3	11
5	Linear com ordenada na origem	3	3	3	3	2	14
4	linear sem ordenada na origem	1	1	1	1	1	5
6	linear sem ordenada na origem	2	2	2	2	2	10
7	não linear	1	1	1	1	1	5
8	não linear	2	2	2	2	2	10
1	não linear	3	3	3	3	3	15
9	não linear	4	4	4	4	4	20

Com o objectivo de seleccionar os melhores modelos, foi seleccionado o melhor de cada um dos modelos de regressão (Linear com e sem ordenada na origem, Não Linear e melhor modelo de simples entrada) (Quadro 50).

Usando os modelos seleccionados fez-se a predição de volumes e compararam-se os valores preditos com os valores de amostragem. Os resultados dessas comparações constituem medidas da qualidade predictiva dos modelos, que se apresentam no Quadro 51.

A cada modelo foi-lhe atribuída uma pontuação da mesma forma indicada que para o ajustamento resultando o Quadro 52.

Esleceu-se o Modelo 7 para a tabela de volume de dupla entrada porque no ajustamento apresentou menor erro residual, e o Modelo 4 para a tabela de volume de simples entrada.

Quadro 50: Equações finais de volume após ajustamento (Pinheiro nigra) (unidades = m<sup>3</sup>)

Modelo	Equação de volume
3	$v = 0.0417 - 1.0576 \cdot d + 8.7838 \cdot d^2$
4	$v = -0.7694 \cdot d + 8.3507 \cdot d^2$
7	$v = 2.667 \cdot d^{2.226} \cdot h^{0.36}$ (Simplex)

Quadro 51: Estatísticas dos modelos de volume na fase de validação (Pinheiro nigra) (n =120)

Modelo	Tipo	Mrp (m <sup>3</sup> )	Marp (m <sup>3</sup> )	Vrp	QTE (m <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup> rp
7	não linear	0.01026	0.05590	0.01271	0.01282	0.96974
4	linear sem ordenada na origem	0.00477	0.09860	0.02224	0.02226	0.94659
3	linear com ordenada na origem	0.00000	0.09403	0.02125	0.02125	0.89236

Quadro 52: Ordenação dos modelos de volume na fase de validação (Pinheiro nigra) (n =120)

Modelo	Tipo	Mrp	Marp	Vrp	QTE	R <sup>2</sup> rp	Total
7	não linear	3	1	1	1	1	7
3	linear com ordenada na origem	1	2	2	2	3	10
4	linear sem ordenada na origem	2	3	3	3	2	13

### Tabela de volume de simples entrada

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Pinus nigra*

**Área de estudo:** Marão

**Parcelas amostradas:** 13 parcelas de 500 m<sup>2</sup>

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Volume (v) sobre casca em m<sup>3</sup>

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (d) em m com aproximação ao mm

**Método de avaliação indirecta do volume:** Pressler-Bitterlich

No ajustamento da regressão entre v e d foram consideradas 63 árvores distribuídas equitativamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) e na validação foram consideradas 120 árvores (Quadro 31). Após o ajustamento e validação que conduziu à eleição do Modelo 4, linear sem ordenada na origem de simples entrada de Dissescu Meyer, fez-se novo ajustamento dos dados considerando todas as árvores, portanto 183 árvores, com as quais se obtiveram os seguintes

**parâmetros de regressão:**  $v = -0.917 \cdot d + 8.676 \cdot d^2$ ;  $v_{imr} = 0.4908m^3$ ;  $v_{me} = 0.4888m^3$ ;  $R^2 = 0.97^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.110m^3$ ;  $MAR = 0.083m^3$ ;  $n = 183$ ;  $KS = 0.077$  com  $P > 0.10$  n.s. ( $\alpha = 0.05$ ).

Com esta equação de regressão construiu-se para o Pinheiro negral no Marão-Campeã a Tabela de volume de simples entrada a seguir indicada:

Quadro 53: Tabela de volume de simples entrada (Pinheiro negral)

classe de d (cm)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
volume (m <sup>3</sup> )	0.0000	0.0577	0.1636	0.3130	0.5057	0.7419	1.0214	1.3442	1.7105

### Tabela de volume de dupla entrada

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Pinus nigra*

**Área de estudo:** Marão-Campeã

**Parcelas amostradas:** 13 parcelas de 500 m<sup>2</sup>

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Volume (v) sobre casca em m<sup>3</sup>

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (d) em m com aproximação ao mm e altura total (ht) em m com precisão ao cm.

**Método de avaliação indirecta do volume:** Pressler-Bitterlich

Após o ajustamento e validação que conduziu à eleição do Modelo 7, não linear de dupla entrada de Santos Hall-Schumacher, fez-se novo ajustamento com as mesmas 183 árvores utilizadas para a tabela de volume de simples entrada, com as quais se obtiveram os seguintes **parâmetros de regressão:**  $v = 0.321 \cdot d^{1.973} \cdot h^{1.015}$ ;  $v_{imr} = 0.4944m^3$ ;  $v_{me} = 0.4950m^3$ ;  $R^2 = 0.993^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.056m^3$ ;  $MAR = 0.036m^3$ ;  $n = 183$ ;  $KS = 0.090$  com  $P > 0.10$  n.s. para  $\alpha = 0.05$ .

Com esta equação de volume construiu-se para o Pinheiro negral no Marão-Campeã a tabela de volume de dupla entrada a seguir indicada:

Quadro 54: Tabela de volume de dupla entrada (d e ht) (Pinheiro nigra) (unidades = m<sup>3</sup>)

		classe de ht (m)								
classe de d (cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
10	0.0175	0.0211	0.0246	0.0282	0.0318					
15		0.0469	0.0548	0.0627	0.0707	0.0787	0.0867	0.0947	0.1027	
20				0.1107	0.1247	0.1388	0.1529	0.1670	0.1812	
25					0.1937	0.2156	0.2375	0.2594	0.2814	
30							0.3403	0.3717	0.4032	
35									0.5465	
		classe de ht (m)								
classe de d (cm)	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
20	0.1953	0.2095								
25	0.3034	0.3254	0.3474	0.3694	0.3915					
30	0.4347	0.4662	0.4978	0.5294	0.5610	0.5927				
35	0.5892	0.6320	0.6747	0.7176	0.7604	0.8033	0.8462			
40		0.8224	0.8781	0.9338	0.9896	1.0455	1.1013	1.1572		
45			1.1078	1.1781	1.2485	1.3189	1.3894	1.4600	1.5306	
50				1.4504	1.5370	1.6237	1.7105	1.7973	1.8842	

### Equações hipsométricas

Ajustando os modelos de regressão hipsométrica aos dados do Pinheiro negral no Marão-Campeã obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 55.

Aplicando os mesmos critérios de seriação dos modelos já utilizados nas equações de volume de simples e dupla entrada para esta espécie, a seriação dos modelos hipsométricos é dada no Quadro 56.

Do processo de selecção resultaram os modelos que se apresentam no Quadro 57:

Usando os modelos seleccionados fez-se a predição de alturas e compararam-se os valores preditos com os valores de amostragem. Os resultados dessas comparações constituem medidas da qualidade predictiva dos modelos, que se apresentam no Quadro 58.

Em face dos resultados acima aceitou-se o modelo 8 e ajustou-se novamente a regressão com a totalidade dos dados.

Quadro 55: Estatísticas associadas aos modelos de regressão hipsométrica para o Pinheiro nigra (n =63)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJ	Syx	QMR (m)	MAR (m)
1	linear com ordenada na origem	0.5502	0.5352	3.8727	14.9980	2.7291
2	não linear	0.9479	0.9444	3.8368	14.7209	2.7498
3	linear com ordenada na origem	0.5612	0.5540	3.7935	14.3905	2.7273
4	não linear	0.9481	0.9446	3.8315	14.6803	2.7863
5	não linear	0.9473	0.9446	3.8300	14.6689	2.7222
6	não linear	-	-	-	-	-
7	não linear	0.9480	0.9445	3.8343	14.7016	2.7553
8	não linear	0.9480	0.9454	3.8021	14.4556	2.7418
9	linear com ordenada na origem	0.5448	0.5373	3.8638	14.9290	2.8564
10	não linear	0.9477	0.9451	3.8141	14.5470	2.7860
11	linear com ordenada na origem	0.5562	0.5415	3.8464	14.7949	2.7493
12	linear com ordenada na origem	0.5657	0.5512	3.8052	14.4798	2.7340

Quadro 56: Seriação dos modelos (Pinheiro nigra) (n =63)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR	MAR	Total
3	linear com ordenada na origem	2	1	1	1	1	71
12	linear com ordenada na origem	1	2	2	2	3	74
11	linear com ordenada na origem	3	3	3	3	4	82
1	linear com ordenada na origem	4	5	5	5	2	88
9	linear com ordenada na origem	5	4	4	4	5	90
8	não linear	2	1	1	1	2	72
4	não linear	1	4	4	4	6	83
10	não linear	5	2	2	2	5	84
5	não linear	6	3	3	3	1	85
7	não linear	3	5	5	5	4	88
2	não linear	4	6	6	6	3	92
6	não linear	7	7	7	7	7	105

Quadro 57: Melhores equações finais hipsométricas após ajustamento (Pinheiro nigra)

Modelo	Equação
8	$h=d/(0.0108 +0.026 \cdot d)$
3	$h=26.8472+20.0973 \cdot \log d$

Quadro 58: Estatísticas dos modelos hipsométricos na fase de validação (Pinheiro nigra) (n =120)

Modelo	Tipo	Mrp	Marp	Vrp	QTE	R <sup>2</sup> rp
8	não linear	0.01309	3.10157	22.02485	22.02502	0.91455
3	linear com ordenada na origem	-0.00007	3.11471	22.08310	22.08310	0.21390

### Curva hipsométrica

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Pinus nigra*

**Área de estudo:** Marão

**Parcelas amostradas:** 13 parcelas de 500 m<sup>2</sup>.

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Altura total (ht) em m

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (**d**) em m com aproximação ao mm e o seu logaritmo.

**Aparelho utilizado na avaliação indirecta da altura:** relascópio de Bitterlich

Foram consideradas 63 árvores distribuídas homogeneamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) no ajustamento da equação hipsométrica com base no modelo não linear de Prodan (1965), seguida de validação com os restantes dados.

O ajustamento desta equação com a totalidade dos dados permitiu obter os seguintes **parâmetros de regressão**:  $h=d/(0.010+0.028 \cdot d)$ ;  $ht=14.733m$ ;  $hest=15.337m$ ;  $R^2=0.95^{***}$ ;  $S_{yx} = 2.921m$ ;  $MAR=2.798m$ ;  $n=183$ ;  $KS = 0.058$  com  $P > 0.10$  n.s. para  $\alpha = 0.05$ .

Com esta equação hipsométrica construíram-se para a Bétula no Marão-Campeã a Tabela e Curva hipsométrica a seguir indicadas:

Quadro 59: Tabela hipsométrica (Pinheiro nigra)

classe d (cm)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
h (m)	7.81	10.56	12.82	14.71	16.30	17.68	18.87	19.91	20.83

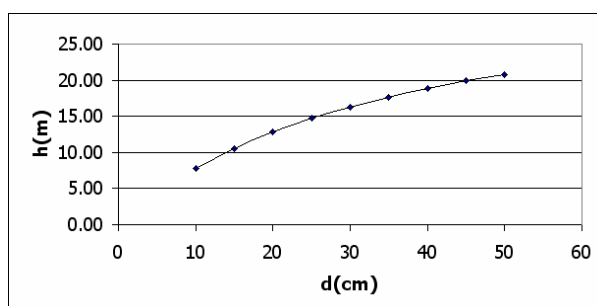


Figura 94: Curva hipsométrica (Pinheiro nigra)

## **Eucalipto (Amarante-Aboim)**

### **Caracterização dos dados, análise de correlação e comparação de médias**

Foram estabelecidas em Amarante-Aboim 31 parcelas de amostragem em 2001, re-amostradas em 2002, sobre povoamentos regulares de eucalipto de primeira rotação. De 2ª rotação existia apenas uma mancha que não foi inventariada. O estudo de povoamentos dessas características (de 2ª e 3ª rotação) ficará por isso reservado para trabalhos posteriores.

A distribuição sistemática das parcelas no terreno garantiu a sua distribuição homogênea.

A amostragem de 2001 destas 31 parcelas permitiu verificar que 14 parcelas coincidiram sobre povoamentos com idades entre 5-6 anos, portanto povoamentos de eucalipto relativamente jovens, 1 parcela com 7 anos e 12 com idade de 8 anos, e finalmente 4 com 11 anos de idade. Estas últimas foram submetidas a corte em 2004, portanto com 14 anos de idade. Dada a longa revolução de 14 anos a que são submetidas, verificou-se que os povoamentos de eucalipto se encontravam, no início deste estudo, a menos de metade do período de revolução.

Os povoamentos de Eucalipto estudados em Amarante-Aboim foram instalados e têm sido geridos com técnicas silvícolas adequadas, sendo as árvores bem conformadas em geral, não apresentando vestígios de pragas ou doenças. Os povoamentos estão desprovidos de vegetação arbustiva sob coberto e estão servidos com bons acessos. Como o número de árvores plantadas por hectare (densidade) destes povoamentos foi fixado logo de início no acto da plantação (cerca de 1150 árvores por hectare), as densidades de copa medidas apresentaram valores muito baixos. Esse facto pode ter prejudicado algumas das medições efectuadas nomeadamente as referentes à medição de valores de PAR ou índices de vegetação. As baixas densidades de copa associadas aos grangeios culturais frequentes, típicos dum correcto ordenamento florestal, proporcionaram uma baixa densidade de mato sob coberto. Assim, o solo apresentava um peso muito forte na reflexão global dos povoamentos, principalmente dos mais jovens.

Dado serem povoamentos bastante homogéneos, ainda que existam diversas classes de idade, a variabilidade existente (Quadro 60) é pequena excepto nas variáveis  $\bar{d}$ ,  $d_g$ , G,  $V_m$  e hd.

O número de árvores/ha foi estipulado desde início na plantação e como se tratam de povoamentos essencialmente de primeira rotação esta variável apresenta reduzida variabilidade.

O diâmetro de copa não se altera muito o que não causa admiração porque dado o compasso ser regular e o fecho do copado dá-se relativamente cedo. O crescimento é então sobretudo em altura e depois em diâmetro de fuste. A altura de copa apresenta-se normalmente constante ao longo de todas as classes de idade excepto no termo de explorabilidade a qual apresenta curiosamente uma altura menor em relação à sua altura total.

Quadro 60: Caracterização das variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Eucalipto em Amarante-Aboim (n = 62)

	t	n <sub>j</sub>	N	$\bar{d}$	$d_g$	G	$V_m$	DCm	hd	hcd
Média	8	58	1168	10.84	11.32	12.38	81.12	2.86	15.85	7.96
Máximo	12	102	2040	17.67	18.17	24.39	260.91	4.14	24.94	11.31
Mínimo	5	35	700	5.78	5.89	3.17	5.81	1.93	7.14	4.48
Desvio Padrão	2.07	11.79	235.71	3.15	3.32	6.34	59.11	0.57	4.44	1.70
CV (%)	26%	20%	20%	29%	29%	51%	73%	20%	28%	21%

Os estratos mais jovens apresentavam hd de cerca de 11m e  $d_g$  de 8cm, enquanto que os estratos mais velhos apresentavam valores de 19m e 13.5cm para os mesmos parâmetros dendrométricos. Os parâmetros dendrométricos são indicados resumidamente nos dois quadros seguintes:

O estrato jovem apresentava as seguintes características:

Quadro 61: Caracterização biofísica do estrato mais jovem do Eucalipto em Amarante-Aboim

	t	n <sub>j</sub>	N	$\bar{d}$	$d_g$	G	V <sub>m</sub>	DCm	hd	hcd
Média	6	57	1146	7.75	8.04	5.88	23.71	2.51	11.24	6.93
Máximo	6	102	2040	9.38	9.86	12.22	67.87	3.10	15.44	8.80
Mínimo	5	48	960	5.78	5.89	3.17	5.81	1.93	7.14	4.48
Desvio Padrão	0.51	11.40	227.93	1.00	1.03	1.84	13.35	0.33	2.08	1.41
CV (%)	8%	20%	20%	13%	13%	31%	56%	13%	19%	20%

O estrato adulto apresentava as seguintes características:

Quadro 62: Caracterização biofísica do estrato mais velho do do Eucalipto em Amarante-Aboim

	t	n <sub>j</sub>	N	$\bar{d}$	$d_g$	G	V <sub>m</sub>	DCm	hd	hcd
Média	9	59	1184	12.92	13.54	16.77	119.91	3.09	18.96	8.60
Máximo	12	101	2020	17.67	18.17	24.39	260.91	4.14	24.94	11.31
Mínimo	7	35	700	6.28	6.77	5.82	22.68	1.93	12.36	5.25
Desvio Padrão	1.50	12.14	242.71	2.26	2.32	4.09	44.36	0.58	2.41	1.55
CV (%)	17%	21%	20%	17%	17%	24%	37%	19%	13%	18%

Quadro 63: Correlações entre variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Eucalipto (Amarante) (n =16)

	t	N	$\bar{d}$	G	V <sub>m</sub>	htm	hd	DCm
t	1.000							
N	0.333	1.000						
$\bar{d}$	0.895 *** P<0.0001	0.087	1.000					
G	0.930 *** P<0.0001	0.371	0.946 *** P<0.0001	1.000				
V <sub>m</sub>	0.911 *** P<0.0001	0.361	0.935 *** P<0.0001	0.985 *** P<0.0001	1.000			
Htm	0.841 *** P<0.0001	0.318	0.921 *** P<0.0001	0.926 *** P<0.0001	0.942 *** P<0.0001	1.000		
Hd	0.829 *** P<0.0001	0.184	0.827 *** P<0.0001	0.805 *** P<0.0001	0.794 *** P<0.0001	0.852 *** P= 0.0002	1.000	
DCm	0.554 * P= 0.0258	-0.135	0.647 ** P= 0.0065	0.531 * P= 0.0339	0.541 * P= 0.0300	0.475	0.340	1.000

Pela análise de correlação efectuada, conforme se observa no Quadro 63, foram encontradas correlações elevadas e com grande significância abrindo-se por isso boas perspectivas ao estabelecimento de equações hipsométricas, de equações de volume e de tabelas de volume aéreas. Realça-se a importância da boa gestão silvícola e do melhoramento genético que tem vindo

a ser efectuado pelas empresas de celulose, e aqui evidenciado, que proporcionam assim homogeneidade dos fustes e regularidade geral das árvores desta espécie.

Assim, se conclui que um esforço actual na melhoria genética das espécies florestais produtivas, da condução dos povoamentos, etc., traduzir-se-á mais tarde num maior potencial de aplicação das técnicas de FAPMF e SIG/CAD. Pretendemos, num futuro próximo, alargar a aplicação desta tecnologia a povoamentos que abranjam as várias classes etárias de eucalipto, na expectativa de se obterem resultados tão bons ou melhores que os obtidos durante este trabalho para o eucalipto em Amarante-Aboim.

Compararam-se as médias  $V_{Dr}$ ,  $V_m$  e  $V_{mg}$  através dum teste  $t$  de Student (probabilidade de 99%;  $n = 62$ ) não se tendo verificado diferenças significativas entre elas:  $t_{[V_{Dr}, V_m]}=1.302$ ,  $gl=61$ ,  $P=0.1979$ ;  $t_{[V_{Dr}, V_{mg}]}=1.004$ ,  $gl=61$ ,  $P=0.3192$ ;  $t_{[V_m, V_{mg}]}=0.1074$ ,  $gl=61$ ,  $P=0.9148$ .

### **Equações de volume**

Tal como foi feito para a Bétula e Pinheiro negral, os resultados dos modelos mais usuais de regressão de volume com o diâmetro (ou com o diâmetro e a altura) são apresentados no Quadro 64 relativamente ao Eucalipto.

Após a atribuição de valores de classificação em função da grandeza dos parâmetros estatísticos seleccionados para comparar os modelos, criou-se o quadro seguinte, onde se apresenta a pontuação alcançada por cada modelo, correspondendo a pontuação mais baixa ao melhor modelo.

Com o objectivo de seleccionar os melhores modelos, foi seleccionado o melhor de cada um dos modelos de regressão (Linear com e sem ordenada na origem, Não Linear e melhor modelo de simples entrada) (Quadro 66).

Usando os modelos seleccionados fez-se a predição de volumes e compararam-se os valores preditos com os valores de amostragem. Os resultados dessas comparações constituem medidas da qualidade predictiva dos modelos, que se apresentam no Quadro 67.

A cada modelo foi-lhe atribuída uma pontuação da mesma forma indicada que para o ajustamento resultando o Quadro 68.

Elegeu-se o Modelo 5 para a tabela de volume de dupla entrada porque no ajustamento apresentou menor erro residual, e o Modelo 1 para a tabela de volume de simples entrada.

Quadro 64: Estatísticas associadas aos modelos de ajustamento do volume com o d (1 a 4) e com o d e ht (5 a 10) (Eucalipto) (n =70)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR (m <sup>3</sup> )	MAR (m <sup>3</sup> )
1	não linear	0.9587	0.9569	0.0436	0.0019	0.0236
2	linear com ordenada na origem	0.8560	0.8539	0.0539	0.0029	0.0364
3	linear com ordenada na origem	0.9060	0.9032	0.0436	0.0019	0.0238
4	linear sem ordenada na origem	0.9580	0.9561	0.0436	0.0019	0.0242
5	Linear com ordenada na origem	0.9601	0.9596	0.0283	0.0008	0.0165
6	linear sem ordenada na origem	0.9823	0.9818	0.0283	0.0008	0.0166
7	não linear	0.9897	0.9893	0.0548	0.0030	1.5423
8	não linear	0.9796	0.9784	0.0316	0.0010	0.0181
10	não linear	0.9823	0.9816	0.0283	0.0008	0.0188

Quadro 65: Seriação de modelos para validação (Eucalipto) (n =70)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR	MAR	Total
5	Linear com ordenada na origem	2	2	2	2	1	81
3	linear com ordenada na origem	4	4	4	4	3	93
2	linear com ordenada na origem	5	5	5	5	5	100
6	linear sem ordenada na origem	1	1	1	1	2	77
4	linear sem ordenada na origem	3	3	3	3	4	89
10	não linear	2	2	1	1	2	80
8	não linear	3	3	2	2	1	84
7	não linear	1	1	4	4	4	85
1	não linear	4	4	3	3	3	91

Quadro 66: Equações finais de volume após ajustamento (Eucalipto) (unidades = m<sup>3</sup>)

Modelo	Equação de volume
5 (Linear com ordenada na origem)	$v = 0.0013 + 0.3194.d^2h$
6 (Linear com ordenada na origem)	$v = 0.3208.d^2h$
10 (Não linear)	$v = d^2h / (3.2447 - 0.5776.d)$
1 (não linear simples entrada)	$v = 12.8873.d^{2.4554}$

Quadro 67: Estatísticas dos modelos de volume na fase de validação (Eucalipto) (n =752)

Modelo	Tipo	Mrp (m <sup>3</sup> )	Marp (m <sup>3</sup> )	Vrp	QTE (m <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup> rp
10	não linear	-0.01221	0.01387	0.00014	0.00029	0.98739
6	linear sem ordenada na origem	0.00189	0.00727	0.00015	0.00015	0.98691
5	linear com ordenada na origem	0.00000	0.00730	0.00014	0.00014	0.97443
1	não linear (simples entrada)	0.00105	0.01330	0.00041	0.00041	0.96414

Quadro 68: Ordenação dos modelos de volume na fase de validação (Eucalipto) (n =752)

Modelo	Tipo	Mrp	Marp	Vrp	QTE	R <sup>2</sup> rp	Total
5	linear com ordenada na origem	1	2	1	1	3	8
6	linear sem ordenada na origem	2	1	3	2	2	10
10	não linear	3	3	2	3	1	12
1	não linear (simples entrada)	2	3	4	4	4	17

### Tabela de volume de simples entrada

**Distrito:** Porto

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Eucalyptus globulus*

**Área de estudo:** Amarante – Aboim

**Parcelas amostradas:** 70 parcelas de 500 m<sup>2</sup>

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Volume (v) sobre casca em m<sup>3</sup>

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (d) em m com aproximação ao mm

**Método de avaliação indirecta do volume:** Pressler-Bitterlich

No ajustamento da regressão entre v e d foram consideradas 70 árvores distribuídas equitativamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) e na validação foram consideradas 752 árvores (Quadro 31). Após o ajustamento e validação que conduziu à eleição do Modelo 1, não linear de simples entrada de Berkhout, fez-se novo ajustamento dos dados considerando todas as árvores, portanto 812 árvores, com as quais se obtiveram os seguintes **parâmetros de regressão:**  $v=12.608 \cdot d^{2.431}$ ;  $v_{imr} = 0.0768m^3$ ;  $v_{ime} = 0.0777m^3$ ;  $R^2=0.96^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.022m^3$ ;  $MAR=0.013m^3$ ;  $n = 812$ ;  $KS = 0.085$  com  $P > 0.10$  n.s. ( $\alpha = 0.05$ ).

Com esta equação de regressão construiu-se para o Eucalipto em Amarante-Aboim a Tabela de volume de simples entrada a seguir indicada:

Quadro 69: Tabela de volume de simples entrada (Eucalipto)

classe de d (cm)	5	10	15	20	25
volume (m <sup>3</sup> )	0.0087	0.0467	0.1252	0.2520	0.4335

### Tabela de volume de dupla entrada

**Distrito:** Porto

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Eucalyptus globulus*

**Área de estudo:** Amarante – Aboim

**Parcelas amostradas:** 62 parcelas de 500 m<sup>2</sup>

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Volume (v) sobre casca em m<sup>3</sup>

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (d) em m com aproximação ao mm e altura total (ht) em m com precisão ao cm

**Método de avaliação indirecta do volume:** Pressler-Bitterlich

No ajustamento da regressão entre  $v$  e  $d$  foram consideradas 70 árvores distribuídas equitativamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) e na validação foram consideradas 752 árvores (Quadro 31). Após o ajustamento e validação que conduziu à eleição do Modelo 5, linear com ordenada na origem de dupla entrada de Spurr (1952), fez-se novo ajustamento dos dados considerando todas as árvores, portanto 812 árvores, com as quais se obtiveram os seguintes **parâmetros de regressão**:  $v = 0.003 + 0.311 \cdot d^2 \cdot h$ ;  $v_{imr} = 0.0750 \text{m}^3$ ;  $v_{ime} = 0.0750 \text{m}^3$ ;  $R^2 = 0.99^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.014 \text{m}^3$ ;  $MAR = 0.007 \text{m}^3$ ;  $n = 812$ ;  $KS = 0.092$  com  $P > 0.10$  n.s. ( $\alpha = 0.05$ ).

Com esta equação de volume construiu-se para o Eucalipto em Amarante – Aboim a tabela de volume de dupla entrada a seguir indicada:

Quadro 70: Tabela de volume de dupla entrada (d e ht) (Eucalipto) (unidades =  $\text{m}^3$ )

		classe de ht (m)									
classe de d (cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
5	0.0069	0.0086	0.0106	0.0130							
10		0.0142	0.0182	0.0229	0.0282	0.0341	0.0406				
15				0.0329	0.0408	0.0497	0.0594	0.0702	0.0818		
20						0.0652	0.0783	0.0926	0.1081		
25									0.1150	0.1344	
		classe de ht (m)									
classe de d (cm)	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
15	0.0944	0.1080	0.1224	0.1378	0.1541						
20	0.1249	0.1430	0.1622	0.1828	0.2045	0.2275	0.2518	0.2773			
25	0.1554	0.1779	0.2020	0.2277	0.2549	0.2837	0.3140	0.3459	0.3793		

### Equações hipsométricas

Ajustando os modelos de regressão hipsométrica aos dados do Eucalipto em Amarante-Aboim obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 71.

Aplicando os mesmos critérios de seriação dos modelos já utilizados nas equações de volume de simples e dupla entrada para esta espécie, a seriação dos modelos hipsométricos é dada no Quadro 72.

Do processo de selecção resultaram os modelos que se apresentam no Quadro 73:

Usando os modelos seleccionados fez-se a predição de alturas e compararam-se os valores preditos com os valores de amostragem. Os resultados dessas comparações constituem medidas da qualidade predictiva dos modelos, que se apresentam no Quadro 74.

Em face dos resultados acima aceitou-se o modelo 8 e ajustou-se novamente a regressão com a totalidade dos dados.

Quadro 71: Estatísticas associadas aos modelos de regressão hipsométrica (Eucalipto) (n =70)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJ	Syx	QMR (m)	MAR (m)
1	linear com ordenada na origem	0.7601	0.7529	2.4155	5.8348	1.8820
2	não linear	0.9789	0.9776	2.4656	6.0792	1.9329
3	linear com ordenada na origem	0.7439	0.7401	2.4772	6.1367	1.9533
4	não linear	0.9785	0.9772	2.4906	6.2030	1.9614
5	não linear	0.9776	0.9766	2.5225	6.3628	1.9831
6	não linear	-	-	-	-	-
7	não linear	-	-	-	-	-
8	não linear	0.9788	0.9779	2.4522	6.0133	1.9420
9	linear com ordenada na origem	0.7325	0.7286	2.5317	6.4096	2.0118
10	não linear	0.9785	0.9775	2.4723	6.1122	1.9614
11	linear com ordenada na origem	0.7515	0.7441	2.4581	6.0424	1.9267
12	linear com ordenada na origem	0.7428	0.7351	2.5011	6.2557	1.9719

Quadro 72: Selecção de modelos para validação (Eucalipto) (n =70)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR	MAR	Total
1	linear com ordenada na origem	1	1	1	1	1	76
11	linear com ordenada na origem	2	2	2	2	2	82
3	linear com ordenada na origem	3	3	3	3	3	88
12	linear com ordenada na origem	4	4	4	4	4	94
9	linear com ordenada na origem	5	5	5	5	5	100
8	não linear	2	1	1	1	2	79
2	não linear	1	2	2	2	1	79
10	não linear	4	3	3	3	3	90
4	não linear	3	4	4	4	4	92
5	não linear	5	5	5	5	5	100
6	não linear	-	-	-	-	-	0
7	não linear	-	-	-	-	-	0

Quadro 73: Melhores equações finais hipsométricas após ajustamento (Eucalipto)

Modelo	Equação
1	$h=30.9297-2.6886 \cdot \text{invd}+0.0848 \cdot \text{invd}^2$
8	$h=d/(0.0051+0.026 \cdot d)$

Quadro 74: Estatísticas dos modelos hipsométricos na fase de validação (Eucalipto) (n =752)

Modelo	Tipo	Mrp	Marp	Vrp	QTE	R <sup>2</sup> rp
1	linear com ordenada na origem	-0.00004	2.25548	9.33630	9.33630	0.62329
8	não linear	-0.04015	2.30260	9.62781	9.62942	0.95567

### Curva hipsométrica

**Distrito:** Porto

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Eucalyptus globulus*

**Área de estudo:** Amarante - Aboim

**Parcelas amostradas:** 62 parcelas de 500 m<sup>2</sup>.

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Altura total (ht) em m

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (d) em m com aproximação ao mm e o seu logaritmo.

**Aparelho utilizado na avaliação indirecta da altura:** relascópio de Bitterlich

Foram consideradas 70 árvores distribuídas homogeneamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) no ajustamento da equação hipsométrica com base no modelo não linear de Prodan (1965), seguida de validação com os restantes dados.

O ajustamento desta equação com a totalidade dos dados permitiu obter os **seguintes parâmetros de regressão:**  $ht=14.82\pm 0.1578m$ ;  $hest=14.52\pm 0.1451m$ ;  $n=725$ ;  $R^2 = 0.923^{***}$ ;  $S_{yx}=1.654m$ ;  $MAR=1.369m$ ;  $t=1.358$ ;  $gl=724$ ;  $P=0.1745n.s.$ ;  $KS = 0.0955$  com  $P > 0.10$  n.s. para  $\alpha = 0.05$ .

Com esta equação hipsométrica construíram-se para o Eucalipto em Amarante - Aboim a Tabela e Curva hipsométrica a seguir indicadas:

Quadro 75: Tabela hipsométrica (Eucalipto)

classe d (cm)	10	15	20	25	30	35	40
h (m)	12.99	16.67	19.42	21.55	23.26	24.65	25.81

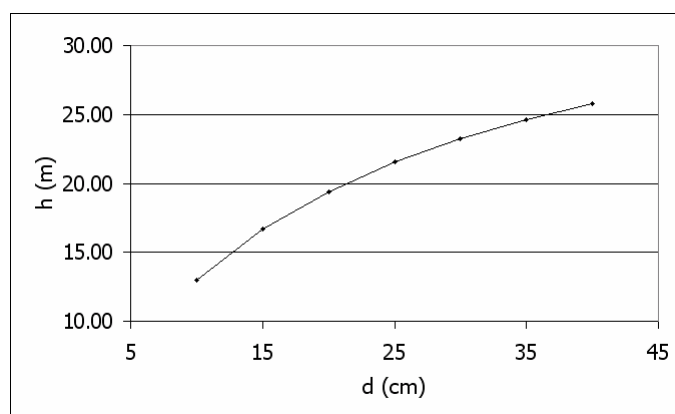


Figura 95: Curva hipsométrica (Eucalipto)

## **Pinheiro bravo (Vidago-Boticas)**

### **Caracterização dos dados, análise de correlação e comparação de médias**

O Pinheiro bravo foi estudado em Vidago-Boticas. O estabelecimento de 35 parcelas de amostragem em 2001 e a repetição de observações em 2002 das 18 parcelas em 2002 que sobreviveram ao fogo permitiu verificar que o povoamento possuía 2 tipos de estratos (classes de

idade): um estrato adulto com mais de 30 anos de idade, e outro jovem de regeneração e plantação sobretudo entre idades de 16 e 24 anos.

Apresenta-se no Quadro 76 uma caracterização sumária das parcelas de amostragem representativas dos povoamentos de Pinheiro bravo em Vidago-Boticas. Caracterizam-se no Quadro 77 os estratos mais jovens e no Quadro 78 os estratos mais velhos.

Quadro 76: Caracterização das variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Pinheiro bravo em Vidago-Boticas

	t	n <sub>j</sub>	N	$\bar{d}$	$d_g$	G	V <sub>m</sub>	DCm	hd	hcd
Média	39	35	699	23.11	23.95	29.22	216.18	4.86	15.78	7.31
Máximo	62	75	1500	39.89	40.13	66.59	507.72	7.80	25.65	11.36
Mínimo	18	12	240	12.34	12.62	4.00	14.48	2.48	6.47	3.98
Desvio Padrão	11.83	17.82	356.33	7.38	7.52	13.22	127.44	1.56	4.30	2.06
CV (%)	30%	51%	51%	32%	31%	45%	59%	32%	27%	28%

Quadro 77: Caracterização biofísica do estrato mais jovem do Pinheiro bravo em Vidago-Boticas

	t	n <sub>j</sub>	N	$\bar{d}$	$d_g$	G	V <sub>m</sub>	DCm	hd	hcd
Média	21	38	769	13.25	13.59	11.37	45.86	3.03	9.21	5.65
Máximo	23	72	1440	14.70	15.02	19.79	97.62	3.96	13.14	7.77
Mínimo	18	16	320	12.34	12.62	4.00	14.48	2.48	6.47	3.98
Desvio Padrão	1.73	19.55	391.04	0.68	0.70	5.98	26.55	0.46	2.16	1.93
CV (%)	8%	51%	51%	5%	5%	53%	58%	15%	23%	34%

Quadro 78: Caracterização biofísica do estrato mais velho do Pinheiro bravo em Vidago-Boticas

	t	n <sub>j</sub>	N	$\bar{d}$	$d_g$	G	V <sub>m</sub>	DCm	hd	hcd
Média	44	34	681	25.57	26.54	33.68	258.76	5.32	17.42	7.57
Máximo	62	75	1500	39.89	40.13	66.59	507.72	7.80	25.65	11.36
Mínimo	31	12	240	17.16	17.89	13.09	68.90	3.16	10.14	4.26
Desvio Padrão	8.06	17.54	350.83	6.10	6.04	10.45	104.56	1.39	2.89	2.00
CV (%)	18%	52%	52%	24%	23%	31%	40%	26%	17%	26%

Pela análise dos quadros anteriores verificámos que estes povoamentos apresentam grande variabilidade.

Constatou-se que o Pinheiro bravo nesta região se encontrava extremamente mal gerido, com densidades de árvores exageradas, sobretudo nas classes mais jovens, mas também nas mais velhas, sem acessos a veículos motorizados nalguns locais, e com muita vegetação arbustiva sob coberto. Aliás, isso ficou demonstrado pelo incêndio que ocorreu em 2002, e que destruiu mais de 60% da área florestada nesta zona. A haver reflorestação com a mesma espécie e proveniência de plantas, os valores encontrados neste estudo poderão ser aplicados para a sua gestão. No entanto, como não se dispunha de povoamentos com menos de 16 anos, não se realizaram inferências estatísticas sobre essas classes de dados.

Pela análise de correlação efectuada, conforme se observa no Quadro 79, foram encontradas correlações significativas elevadas para a generalidade das variáveis consideradas, abrindo-se por isso boas perspectivas de estabelecimento de equações hipsométricas, equações de volume e de tabelas de volume aéreas. O Pinheiro bravo apresenta uma grande capacidade de regeneração natural e por isso encontrámos dentro da área de estudo povoamentos muito heterogéneos, nalguns casos em estações de fraca qualidade e sem ordenamento e noutras estações de melhor qualidade mas quase sempre também sem ordenamento. Caso o pinheiro bravo também fosse gerido correctamente, tal como são os povoamentos de Eucalipto, julgamos que se poderiam ter obtido ainda melhores correlações.

Quadro 79: Correlações entre variáveis dendrométricas - Inventário Florestal Convencional para o Pinheiro bravo (Vidago) (n =15)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	htm	hd	DCm
t	1.000							
N	0.204	1.000						
$\bar{d}$	0.641 * P= 0.0100	-0.297	1.000					
G	0.736 ** P= 0.0018	0.449	0.679 ** P= 0.0054	1.000				
Vm	0.676 ** P= 0.0057	0.255	0.763 *** P= 0.0009	0.939 *** P<0.0001	1.000			
Htm	0.603 * P= 0.0173	-0.034	0.850 *** P<0.0001	0.787 *** P= 0.0005	0.915 *** P<0.0001	1.000		
Hd	0.651 ** P= 0.0086	-0.037	0.866 *** P<0.0001	0.803 *** P<0.0001	0.905 *** P<0.0001	0.968 *** P<0.0001	1.000	
DCm	0.526 * P= 0.0439	-0.149	0.808 *** P<0.0001	0.668 ** P= 0.0065	0.670 ** P= 0.0063	0.696 ** P= 0.0039	0.684 ** P= 0.0049	1.000

Em Vidago-Boticas não foi medido o valor VDr. Compararam-se as médias Vm e Vmg obtidas para o Pinheiro bravo nesta zona através dum teste *t* de Student (probabilidade de 99%; n = 38) não se tendo verificado diferenças significativas entre elas:  $t_{V_m, V_{mg}}=0.5245$ ,  $gl=37$ ,  $P= 0.6031$ .

### Equações de volume

Tal como foi feito para as outras espécies e locais, os resultados dos modelos mais usuais de regressão de volume com o diâmetro (ou com o diâmetro e a altura) são apresentados no Quadro 80 relativamente ao Pinheiro bravo.

Após a atribuição de valores de classificação em função da grandeza dos parâmetros estatísticos seleccionados para comparar os modelos, criou-se o quadro seguinte, onde se apresenta a pontuação alcançada por cada modelo, correspondendo a pontuação mais baixa ao melhor modelo.

Com o objectivo de seleccionar os melhores modelos, foi seleccionado o melhor de cada um dos modelos de regressão (Linear com e sem ordenada na origem, Não Linear e melhor modelo de simples entrada) (Quadro 82).

Usando os modelos seleccionados fez-se a predição de volumes e compararam-se os valores preditos com os valores de amostragem. Os resultados dessas comparações constituem medidas da qualidade predictiva dos modelos, que se apresentam no Quadro 83.

A cada modelo foi-lhe atribuída uma pontuação da mesma forma indicada que para o ajustamento resultando o Quadro 84.

Elegeu-se o o Modelo 10 para a tabela de volume de dupla entrada porque no ajustamento apresentou menor erro residual, e o Modelo 4 para a tabela de volume de simples entrada.

Quadro 80: Estatísticas associadas aos modelos de ajustamento do volume com o d (1 a 4) e com o d e ht (5 a 10) (Pinheiro bravo ) (n =77)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR (m <sup>3</sup> )	MAR (m <sup>3</sup> )
1	não linear	0.9411	0.9387	0.1338	0.0179	0.0722
2	linear com ordenada na origem	0.8405	0.8384	0.1446	0.0209	0.0995
3	linear com ordenada na origem	0.8670	0.8634	0.1330	0.0177	0.0702
4	linear sem ordenada na origem	0.9422	0.9399	0.1323	0.0175	0.0678
5	Linear com ordenada na origem	0.9623	0.9618	0.0700	0.0049	0.0364
6	linear sem ordenada na origem	0.9837	0.9833	0.0700	0.0049	0.0358
7	não linear	0.9838	0.9829	0.0707	0.0050	0.0363
7	logaritmizada	0.9557	0.9545	0.1175	0.0138	2.7131
8	não linear	0.9801	0.9790	0.0781	0.0061	0.0400
10	não linear	0.9837	0.9831	0.0700	0.0049	0.0362

Quadro 81: Seriação de modelos para validação (Pinheiro bravo ) (n =77)

Volume	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR	MAR	Total
5	linear com ordenada na origem	1	1	1	1	1	5
7	logaritmizada	2	2	2	2	4	12
3	linear com ordenada na origem	3	3	3	3	2	14
2	linear com ordenada na origem	4	4	4	4	3	19
6	linear sem ordenada na origem	1	1	1	1	1	5
4	linear sem ordenada na origem	2	2	2	2	2	10
10	não linear	2	1	1	1	1	6
7	não linear	1	2	2	2	2	9
8	não linear	3	3	3	3	3	15
1	não linear	4	4	4	4	4	20

Quadro 82: Equações finais de volume após ajustamento (Pinheiro bravo ) (unidades = m<sup>3</sup>)

Modelo	Equação
5	$v = -0.0047 + 0.3578 \cdot d^2 h$
6	$v = 0.3554 \cdot d^2 h$
10	$v = d^2 h / (2.9497 - 0.3814 \cdot d)$
4	$v = b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2$

Quadro 83: Estatísticas dos modelos de volume na fase de validação (Pinheiro bravo) (n =171)

Modelo	Tipo	Mrp (m <sup>3</sup> )	Marp (m <sup>3</sup> )	Vrp	QTE (m <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup> rp
5	Linear com ordenada na origem	0.0000	0.0176	0.0009	0.0009	0.9862
6	linear sem ordenada na origem	0.0002	0.0175	0.0009	0.0009	0.9929
10	não linear	0.0014	0.0174	0.0009	0.0009	0.9929
4	linear sem ordenada na origem	0.0014	0.0576	0.0150	0.0150	0.8830

Quadro 84: Ordenação dos modelos de volume na fase de validação (Pinheiro bravo) (n =171)

Modelo	Tipo	Mrp	Marp	Vrp	QTE	R <sup>2</sup> rp	Total
10	não linear	4	1	1	3	1	10
6	linear sem ordenada na origem	2	2	2	2	2	10
5	Linear com ordenada na origem	1	3	3	1	3	11
4	linear sem ordenada na origem	3	4	4	4	4	19

### Tabela de volume de simples entrada

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 1995, 1996, 1997, 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Pinus pinaster* Ait.

**Área de estudo:** entre Vidago e Boticas

**Parcelas amostradas:** 45 parcelas de 500 m<sup>2</sup> e ainda as parcelas amostradas por Aranha e Lopes na década de 90

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Volume (v) sobre casca em m<sup>3</sup>

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (d) em m com aproximação ao mm

**Método de avaliação indirecta do volume:** Pressler-Bitterlich

No ajustamento da regressão entre v e d foram consideradas 77 árvores distribuídas equitativamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) e na validação foram consideradas 171 árvores (Quadro 31). Após o ajustamento e validação que conduziu à eleição do Modelo 4, linear sem ordenada na origem de simples entrada de Dissescu Meyer, fez-se novo ajustamento dos dados considerando todas as árvores, portanto 248 árvores, com as quais se obtiveram os seguintes **parâmetros de regressão:**  $v = -0.865 d + 9.115 d^2$ ;  $vimr = 0.3214m^3$ ;  $vime = 0.3151m^3$ ;  $R^2 = 0.98^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.060m^3$ ;  $MAR = 0.036m^3$ ;  $n = 248$ ;  $KS = 0.156$  com  $P > 0.10$  n.s. ( $\alpha = 0.05$ ).

Com esta equação de volume construiu-se para o Pinheiro bravo em Vidago-Boticas a tabela de volume de simples entrada a seguir indicada:

Quadro 85: Tabela de volume de simples entrada (Pinheiro bravo)

classe de d (cm)	10	15	20	25	30	35	40
volume (m <sup>3</sup> )	0.0047	0.0753	0.1916	0.3534	0.5609	0.8138	1.1124

## Tabela de volume de dupla entrada

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 1995, 1996, 1997, 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Pinus pinaster* Ait.

**Área de estudo:** entre Vidago e Boticas

**Parcelas amostradas:** 45 parcelas de 500 m<sup>2</sup> e ainda as parcelas amostradas por Aranha e Lopes na década de 90

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Volume (v) sobre casca em m<sup>3</sup>

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (d) em m com aproximação ao mm

**Método de avaliação indirecta do volume:** Pressler-Bitterlich

No ajustamento da regressão entre v e d foram consideradas 77 árvores distribuídas equitativamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) e na validação foram consideradas 171 árvores (Quadro 31). Após o ajustamento e validação que conduziu à eleição do Modelo 10, não linear de dupla entrada de Takata, fez-se novo ajustamento dos dados considerando todas as árvores, portanto 248 árvores, com as quais se obtiveram os seguintes **parâmetros de regressão:**  $v = d^2 \cdot h / (2.721 - 0.017 \cdot d)$ ; vimr = 0.3014m<sup>3</sup>; vime = 0.2996m<sup>3</sup>; R<sup>2</sup>=0.99\*\*\*; Syx =0.028m<sup>3</sup>; MAR=0.018m<sup>3</sup>; n =248; KS =0.132 com P > 0.10 n.s. (alpha = 0.05).

Foi construída a Tabela de volume de dupla entrada para o Pinheiro bravo em Vidago-Boticas a seguir indicada:

Quadro 86: Tabela de volume de dupla entrada (d e ht) (Pinheiro bravo) (unidades = m<sup>3</sup>)

		classe de ht (m)							
classe de d (cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	0.0046	0.0055	0.0064	0.0074					
10		0.0221	0.0257	0.0294	0.0331	0.0368			
15				0.0662	0.0745	0.0828	0.0910	0.0993	0.1076
20						0.1472	0.1619	0.1766	0.1913
25							0.2531	0.2761	0.2991
		classe de ht (m)							
classe de d (cm)	14	15	16	17	18	19	20	21	22
15	0.1159								
20	0.2061	0.2208	0.2355						
25	0.3221	0.3451	0.3681	0.3911	0.4141				
30	0.4639	0.4971	0.5302	0.5633	0.5965	0.6296	0.6628		
35			0.7219	0.7670	0.8121	0.8573	0.9024	0.9475	0.9926
40				1.0021	1.0611	1.1200	1.1790	1.2379	1.2969

## Equações hipsométricas

Ajustando os modelos de regressão hipsométrica aos dados do Pinheiro bravo em Vidago-Boticas obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 87.

Aplicando os mesmos critérios de seriação dos modelos já utilizados nas equações de volume de simples e dupla entrada para esta espécie, a seriação dos modelos hipsométricos é dada no Quadro 89.

Do processo de selecção resultaram os modelos que se apresentam no Quadro 89.

Usando os modelos seleccionados fez-se a predição de alturas e compararam-se os valores preditos com os valores de amostragem. Os resultados dessas comparações constituem medidas da qualidade predictiva dos modelos, que se apresentam no Quadro 90.

Em face dos resultados acima aceitou-se o modelo 2 e ajustou-se novamente a regressão com a totalidade dos dados.

Quadro 87: Estatísticas associadas aos modelos de regressão hipsométrica para o (Pinheiro bravo) (n =77)

Modelo	Tipo	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJ	Syx	QMR (m)	MAR (m)
1	linear com ordenada na origem	0.6918	0.6835	2.5722	6.6160	1.9099
2	não linear	0.9713	0.9697	2.5296	6.3990	1.8777
3	linear com ordenada na origem	0.6839	0.6797	2.5875	6.6950	1.9247
4	não linear	0.9677	0.9659	2.6848	7.2080	2.0272
5	não linear	-	-	-	-	-
6	não linear	-	-	-	-	-
7	não linear	0.9704	0.9688	2.5683	6.5960	1.8845
8	não linear	0.9693	0.9681	2.5986	6.7527	1.9556
9	linear com ordenada na origem	0.6393	0.6345	2.7640	7.6398	2.1436
10	não linear	0.9676	0.9663	2.6689	7.1231	2.0286
11	linear com ordenada na origem	0.7052	0.6972	2.5158	6.3294	1.8623
12	linear com ordenada na origem	0.6769	0.6682	2.6335	6.9354	82.4227

Quadro 88: Selecção de modelos hipsométricos para validação (Pinheiro bravo) (n =77)

Modelo	Tipo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> aj	Syx	QMR	MAR	Total
11	linear com ordenada na origem	1	1	1	1	1	1	6
1	linear com ordenada na origem	2	2	2	2	2	2	12
3	linear com ordenada na origem	3	3	3	3	3	3	18
12	linear com ordenada na origem	4	4	4	4	4	5	25
9	linear com ordenada na origem	5	5	5	5	5	4	29
2	não linear	1	1	1	1	1	1	6
7	não linear	2	2	2	2	2	2	12
8	não linear	3	3	3	3	3	3	18
10	não linear	5	5	4	4	4	4	26
4	não linear	4	4	5	5	5	5	28
5	não linear	7	6	6	6	6	6	37

Quadro 89: Equações finais de volume após ajustamento (Pinheiro bravo) (unidades = m<sup>3</sup>)

Modelo	Equação
2	$h = e^{(5.7+3.422 \cdot \log d - 3.635 \cdot d)}$
11	$h = -2.0444 + 102.9527 \cdot d - 133.5427 \cdot d^2$

Quadro 90: Estatísticas dos modelos hipsométricos na fase de validação (Pinheiro bravo) (n = 171)

Modelo	Tipo	Mrp	Marp	Vrp	QTE	R <sup>2</sup> rp
2	não linear	0.0161	2.5016	13.7209	13.7212	0.9192
11	linear com ordenada na origem	-0.0001	2.5011	13.6700	13.6700	0.4650

### Curva hipsométrica

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 1995, 1996, 1997, 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Pinus pinaster* Ait.

**Área de estudo:** entre Vidago e Boticas

**Parcelas amostradas:** 45 parcelas de 500 m<sup>2</sup> e ainda as parcelas amostradas por Aranha e Lopes na década de 90

**Tipo de amostragem:** Sistemática

**Variável dependente:** Altura total (ht) em m

**Variáveis independentes:** Diâmetro à altura do peito (**d**) em m com aproximação ao mm e o seu logaritmo.

**Aparelho utilizado na avaliação indirecta da altura:** relascópio de Bitterlich

Foram consideradas 77 árvores distribuídas homogeneamente pelas várias classes de diâmetro (Quadro 30) no ajustamento da equação hipsométrica com base no modelo não linear de Freese (1964), seguida de validação com os restantes dados.

O ajustamento desta equação com a totalidade dos dados permitiu obter os seguintes **parâmetros**

**de regressão:**  $h = e^{(3.841+1.775 \cdot \ln d - 0.431 \cdot d)}$ ; ht=12.532m; hest=12.793m; R<sup>2</sup>=0.96\*\*\*; Syx =2.191m; MAR=2.097m; n =252; KS = 0.0955 com P > 0.10 n.s. para alpha = 0.05.

Com esta equação hipsométrica construíram-se para o Pinheiro bravo em Boticas-Vidago a Tabela e Curva hipsométrica a seguir indicadas:

Quadro 91: Tabela hipsométrica (Pinheiro bravo)

classe d (cm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
h (m)	4.53	7.56	10.11	12.36	14.36	16.18	17.83	19.34	20.73	22.00	23.18

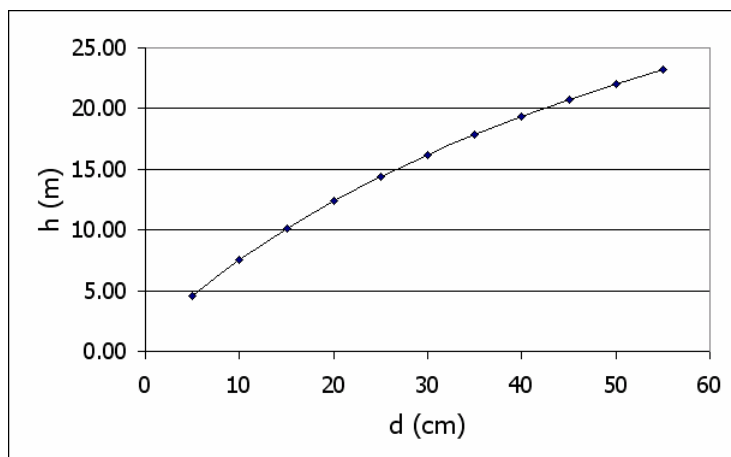


Figura 96: Curva hipsométrica (Pinheiro bravo )

Embora se tenham efectuado 16 parcelas em Pinheiro bravo no perímetro florestal de Marão e Meia Via, apenas utilizámos nesta fase as 38 parcelas inventariadas em Vidago-Boticas. Conforme já foi referido atrás, as parcelas neste local já tinham sido anteriormente inventariadas (Aranha, 1998, Lopes, 1999) tendo sido apenas calculado  $V_m$  e  $V_{mg}$ . No presente inventário além desses volumes também calculámos o  $V_{Dr}$ . No entanto, dado o grande volume de informação que dispúnhamos para Vidago-Boticas optámos por não incluir as parcelas de Marão e Meia Via.

## Resumo dos modelos de regressão

Resumimos no Quadro 92 os resultados do processo de selecção e validação dos melhores modelos de regressão que podem servir de base para tabelas de volume de simples e dupla entrada e para tabelas hipsométricas das várias espécies estudadas e locais.

Quadro 92: Resultados do processo de selecção e validação de modelos de regressão (resumo)

Espécie / local (1)	Melhores modelos ajustados a parte dos dados (ordem dos modelos: ❶ volume dupla entrada, ❷ volume simples entrada, ❸ hipsométrico)			Melhores modelos ajustados a todos os dados disponíveis	
	nº do Modelo (2)	R <sup>2</sup> p (3)	R <sup>2</sup> rp (4)	R <sup>2</sup> t (5)	Modelo estimado (6)
Bétula (Marão - Campeã)	7	0.9536	0.9799	0.99***	$v = 0.587 \cdot d^{1.887} \cdot h^{0.674}$
	1	0.9450	0.9463	0.98***	$v = -0.069 \cdot d + 4.393 \cdot d^2$
	4	0.9656	0.9596	0.99***	$h = 10^{(1.467 + 135.647 \cdot \log d - 67.587 \cdot \log^2 d)}$
Pinheiro negral (Marão - Campeã)	7	0.9664	0.9697	0.99***	$v = 0.321 \cdot d^{1.973} \cdot h^{1.015}$
	4	0.9567	0.9465	0.97***	$v = -0.917 \cdot d + 8.676 \cdot d^2$
		0.9480	0.9145	0.95***	$h = d / (0.010 + 0.028 \cdot d)$
Eucalipto (Amarante - Aboim)	5	0.9601	0.9744	0.99***	$v = 0.003 + 0.311 \cdot d^2 \cdot h$
	1	0.9587	0.9641	0.96***	$v = 12.608 \cdot d^{2.431}$
	8	0.9788	0.9556	0.98***	$h = d / (0.0051 + 0.026 \cdot d)$
Pinheiro bravo (Vidago - Boticas)	10	0.9837	0.9929	0.99***	$v = d^2 \cdot h / (2.721 - 0.017 \cdot d)$
	4	0.9422	0.8830	0.98***	$v = -0.865 \cdot d + 9.115 \cdot d^2$
	2	0.9713	0.9192	0.96***	$h = e^{(3.841 + 1.775 \cdot \log d - 0.431 \cdot d)}$

Na última coluna do Quadro 92 estão identificados os melhores modelos que serviram de base à construção de tabelas de volume e hipsométricas para as espécies e locais investigados, ajustados com a totalidade dos dados. Estas equações poderão ainda ser melhoradas no futuro com a inclusão de maior volume de dados obtidos nos mesmos locais e espécies.

## 5 INVENTÁRIO FLORESTAL ALTERNATIVO

### 5.1 Introdução

Tal como se referiu atrás no Capítulo 1, ainda que as metodologias aplicadas neste capítulo não sejam novas, a sua aplicação requereu a conjugação de diversas técnicas, métodos e procedimentos e conduziu a uma inovação, concretamente, a determinação da altura das árvores recorrendo a um programa de CAD (desenho assistido por computador) como alternativa ao uso de programas específicos para essa função e à tradicional barra de paralaxe.

Actualmente, com os meios disponíveis, abrem-se novas perspectivas de acção. Neste capítulo são abordados principalmente os seguintes temas:

- a Medição de Parâmetros Dendrométricos através de Fotografia Aérea, que carece de planeamento e execução de missões de fotografia aérea porque as fotografias aéreas disponíveis comercialmente não servem para esse efeito;
- a Produtividade Primária e a sua relação com o Índice de Área Foliar, matéria que já está bem estudada para as culturas cerealíferas, mas ainda pouco estudada para espécies florestais.

Cada um dos temas é tratado em separado, realizando-se previamente uma revisão bibliográfica introdutória seguida da descrição das metodologias, aplicação prática e discussão.

### 5.2 Medição de Parâmetros Dendrométricos através de Fotografia Aérea Estereoscópica

A partir das fotografias aéreas com sobreposição estereoscópica é possível realizar a medição de características físicas de povoamentos florestais (por ex.: a altura total, diâmetro de copa, densidade de copas, etc.) que por sua vez se poderão relacionar com outras características do povoamento (por ex.: volume de madeira por hectare) (Avery e Burkhart, 1994, Doruska, 1998, Zeide, 1999). Foi também referido por Gering *et al.* (1989) que para uma medição com rigor aceitável se necessita de ter fotografias aéreas com sobreposição estereoscópica e com escalas superiores a 1:10 000. Marques (1980) e mais recentemente Aranha (1998) demonstraram ser possível estimar o volume de madeira em pé, por hectare de *Pinus pinaster*, em Carrazeda de Ansiães e Vale do Tâmega respectivamente, através da medição da densidade de copas em fotografias aéreas convencionais com escala média 1:15 000. Como as fotografias comercialmente disponíveis apresentam escalas muito inferiores (1:40 000) e estão bastante desactualizadas

(coberturas de 1995 e 2000), elas são inviáveis para estas medições. É no entanto possível obter-se fotografia aérea de pequeno e médio formato com características adequadas para as referidas medições (Warner *et al.* 1996, Franklin, 2001, Castro *et al.*, 2004, Martins, 2004).

### 5.2.1 Altura de objectos

A determinação da altura de objectos a partir de pares fotográficos estereoscópicos implica a medição da altura de voo relativa ao objecto a medir, da paralaxe estereoscópica absoluta e da paralaxe diferencial. As paralaxes são normalmente medidas com uma barra de paralaxe e um estereoscópio de espelhos, utilizando o princípio da marca flutuante também aplicado aos estereorestituidores.

De acordo com Warner *et al.* (1996), a precisão da estimativa da altura de objectos é função da distância do observador (altura de voo - H) e da distância entre pontos de observação (base fotográfica - B - e que corresponde à distância no terreno entre os pontos principais de duas fotografias conjugadas) de acordo com a razão B/H. Quanto maior o valor dessa razão maior a precisão das medições. Por análise da Figura 97 verificou-se que se pode fazer variar esta razão alterando a altura de voo e/ou a distância focal da objectiva. Assim, neste caso particular em que as medições de altura são requeridas, devem escolher-se objectivas com maior CVA, de menor distância focal, proporcionando, propositadamente, imagens com maior rebatimento (as objectivas foram também analisadas atrás). Repare-se ainda que  $H/B = f/b$  (distância focal / base fotográfica à escala da fotografia).

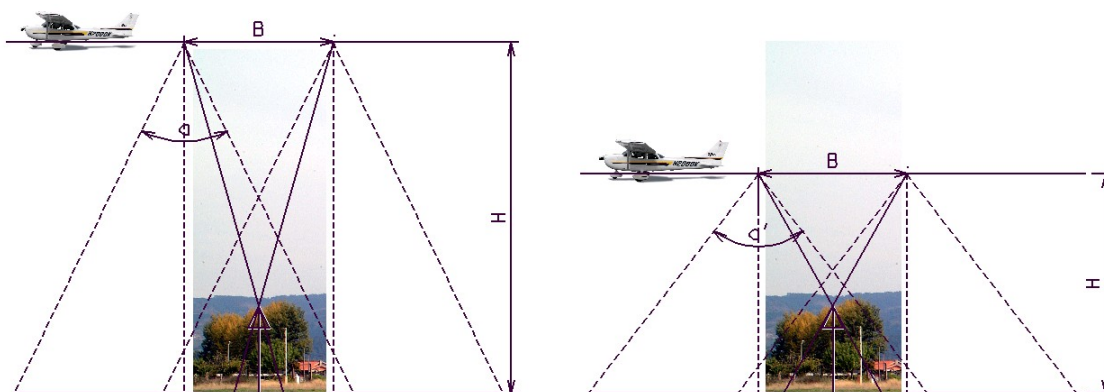


Figura 97: Manipulações de B e H para determinação de alturas de objectos através de estereomodelos

De acordo com Marques *et al.* (2001), um modelo estereoscópico é obtido a partir dum par de fotografias aéreas verticais com sobreposição longitudinal (normalmente 60%) no sentido da linha de voo, separadas por uma certa distância, que depende das dimensões das fotografias, do tipo do estereoscópio, da *base estereoscópica* e do relevo do terreno. Através das marcas fiduciais

ou dos cantos das fotografias (no caso de câmaras não métricas) são encontrados os pontos centrais ou principais de cada fotografia (PP1 e PP2). A fotografia da esquerda contém por isso o PP1 e o ponto principal conjugado da fotografia direita (PPC2) e reciprocamente a direita contém o PP2 e o PPC1 (Figura 98).

O segmento de recta que une PP1 e PPC2 designa-se por linha de voo e a distância que separa esses dois pontos designa-se por *base estereoscópica* (b - em unidades da fotografia e B - em unidades de terreno). A distância fotográfica entre PP1 e PPC2 será semelhante a PP2 e PPC1 em caso de terrenos planos. Em terrenos irregulares b é calculado pela média aritmética dessas duas distâncias.

Tal como refere Warner *et al.* (1996), no caso de fotografias com inclinação exagerada<sup>50</sup>, em vez dos pontos centrais das fotografias devem considerar-se os pontos nadir.

Para a medição da altura dum objecto considera-se a paralaxe absoluta como sendo o valor encontrado para b e como paralaxe diferencial a diferença na paralaxe estereoscópica absoluta entre o topo e a base do objecto, medida paralelamente à linha de voo (Figura 98 e Figura 99), e calculada através da Eq. 41.

Eq. 41 
$$b = H \cdot \frac{dP}{P + dP}$$

- em que:
- h = altura do objecto medido (m)
  - H = altura de voo sobre esse local (m)
  - dP = paralaxe diferencial (mm)
  - P = paralaxe estereoscópica absoluta na base do objecto a medir (mm) (b)

Os aspectos geométricos relativos às fotografias aéreas e à estereoscopia estão bem esclarecidos nos manuais dos aparelhos (Wild e Topcon) ou nas obras de Lillesand e Kiefer (1987), Avery e Berlin (1992), Warner *et al.* (1996).

---

<sup>50</sup> Considera-se exagerada a inclinação quando esta é superior a 5°, sendo então a fotografia designada por “oblíqua”. Quando a inclinação é inferior a 5° a fotografia é considerada “vertical”.

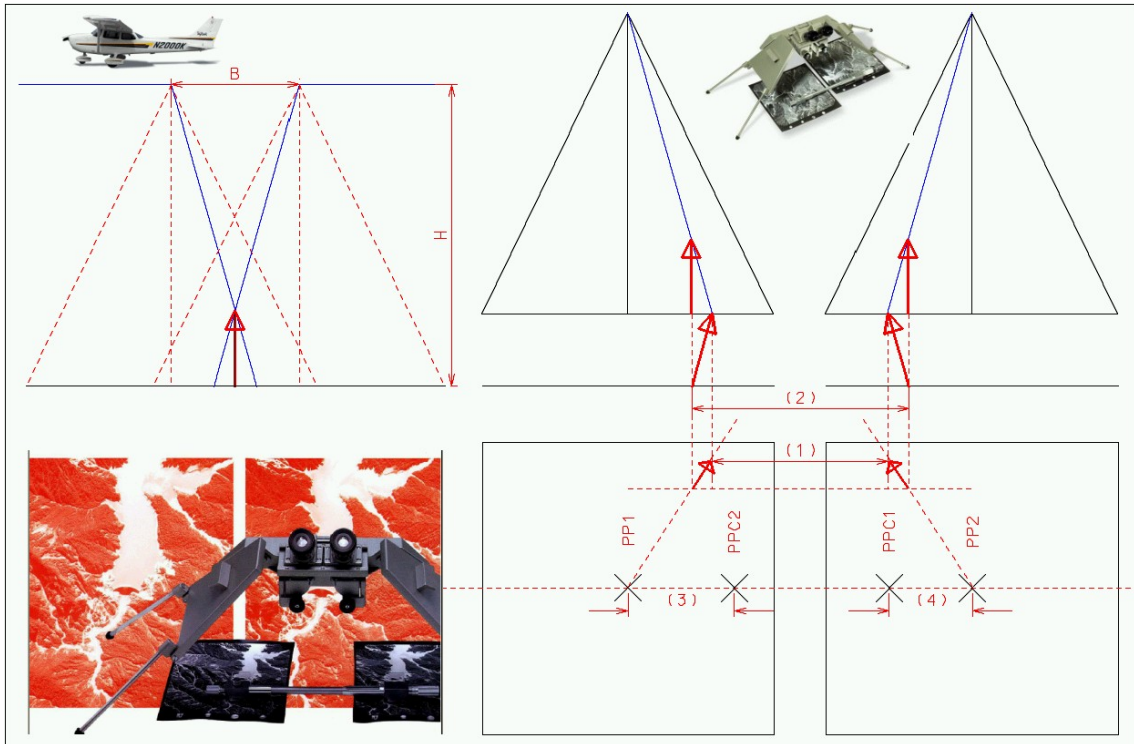


Figura 98: A estereoscopia e a medição de alturas de objectos com a barra de paralaxe

### 5.2.2 Medição de alturas através da paralaxe diferencial

Neste estudo procedeu-se à estimativa da altura de árvores através da medição da sua paralaxe diferencial com estereoscópio de espelhos e barra de paralaxe (método PRX), tal como foi referido atrás na secção anterior. Procedeu-se ainda, alternativamente, a outra metodologia de determinação da altura de objectos através de fotografia aérea com sobreposição estereoscópica, que aplica os mesmos princípios da barra de paralaxe, consistindo na utilização da FAPMF digitalizada e o seu processamento através do CAD Microstation e extensão I/Ras C.

Desde que sejam visíveis a linha de solo situado à cota da base do objecto a medir e o topo desse objecto (neste caso cada árvore), é possível determinar-se  $P$  e  $dP$ . Na Figura 100 e na Figura 99 exemplifica-se a medição da altura dum poste de alta tensão pelos dois processos descritos, CAD e barra de paralaxe respectivamente. Com um hipsómetro de Blume Leiss foi medido esse poste no terreno ( $h = 18,0$  m) para aferição dos resultados. Aplicando a Eq. 41 aos valores de  $P$  e  $dP$  e para uma altura de voo de 620 m verificou-se que as alturas do poste medidas através do CAD e da barra de paralaxe foram de 18,3m e 17,5m, respectivamente. A percentagem de variação em relação ao valor real foi de 2% e -3% respectivamente. Igual exercício foi feito nesse local com mais 9 árvores, de forma independente, apresentando-se no Quadro 93 os resultados de ambas as medições assim como a análise das diferenças. Com a barra de paralaxe obtiveram-se percentagens de variação máxima, mínima e média respectivamente de 9%, 3% e 6%. Através da análise com o CAD

obtiveram-se os valores de 9% , 1% e 4% respectivamente. Em face dos resultados obtidos nesta fase preliminar de testes, esta metodologia apresentou-se como exequível. Esta metodologia de medição de árvores foi por isso aplicada a todas as áreas de estudo.

As alturas de voo relativas à base de cada objecto foram determinadas através da sobreposição num CAD 3D (Microstation) das representações vectoriais correspondentes à rota efectuada (exportada do MapSite), da altimetria digital (adquirida ao IGeoE) e dos pontos relativos às parcelas, obtidos por GPS com correcção diferencial.

De realçar ainda que a sobreposição da altimetria digital facilitou a pesquisa dum local para a visada da base do objecto a medir. Repare-se que num povoamento florestal nem sempre é possível observar o solo através da fotografia aérea por estar encoberto pelas copas. Este facto constitui um factor limitante desta metodologia mas que pode ser ultrapassado, na maioria dos casos, por um fotointérprete experiente.

Quadro 93: Pré-aferição da precisão da metodologia de medição de alturas por paralaxe diferencial com a barra de paralaxe e com um CAD (Microstation)

h (m) (real)	H (m)	dP (PRX) (mm)	b (PRX) (mm)	h (PRX) (m)	diferença (m)	variação (%)	dP (CAD)	b (CAD)	h (CAD) (m)	diferença (m)	variação (%)
12.5	660	1.25	67	12.1	-0.4	-3%	17.6	948.4	12.0	-0.5	-4%
12.5	660	1.21	67	11.7	-0.8	-6%	20.0	948.4	13.6	1.1	9%
12.5	660	1.23	67	11.9	-0.6	-5%	17.0	948.4	11.6	-0.9	-7%
12.5	660	1.25	67	12.1	-0.4	-3%	18.2	948.4	12.4	-0.1	-1%
13.0	660	1.27	67	12.3	-0.7	-6%	20.1	975.6	13.3	0.3	2%
7.5	660	0.70	67	6.8	-0.7	-9%	11.5	975.6	7.7	0.2	3%
22.5	660	2.23	67	21.3	-1.2	-6%	37.0	975.6	24.1	1.6	7%
27.5	620	2.81	67	25.0	-2.5	-9%	41.5	975.6	25.3	-2.2	-8%
18.0	620	1.95	67	17.5	-0.5	-3%	29.7	975.6	18.3	0.3	2%
33.0	620	3.53	67	31.0	-2.0	-6%	55.8	975.6	33.5	0.5	2%

h – altura do objecto medido no campo (m); H – altura de voo (m); dP – diferença de paralaxe; b – base fotográfica medida na fotografia ; h – altura do objecto - (PRX) medida com barra de paralaxe (mm) e (CAD) medida com desenho assistido por computador (adimensional).

Como a metodologia de captação de FAPMF se foi desenvolvendo ao longo deste trabalho a implantação das parcelas foi anterior à data da captação das fotografias aéreas. A solução ideal seria captar previamente as fotografias e localizar as parcelas sobre essas fotografias. Dada a resolução espacial das imagens FAPMF, foi possível individualizar cada árvore amostra dentro duma dada parcela, mas nos povoamentos muito regulares essa tarefa revelou-se mais difícil. Para minimizar esta limitação, em cada parcela identificada na fotografia, foram encontradas as 10 árvores mais altas, medindo-se as suas alturas com a barra de paralaxe e determinando-se a sua média aritmética. Atendendo à alta correlação esperada entre o  $d$  e altura total  $ht$  (para o eucalipto foi encontrado um coeficiente de correlação de 0.91\*\*\*), justificava-se pressupor que o inverso também fosse verdade, i.e., que as árvores mais altas seleccionadas através da FAPMF

correspondem às árvores com maiores valores de  $d$ , o que se veio a verificar após o estabelecimento de tabelas de volume aéreas (secção 5.5.2).



Figura 99: Exemplo de medição de altura de um objecto com uma barra de paralaxe

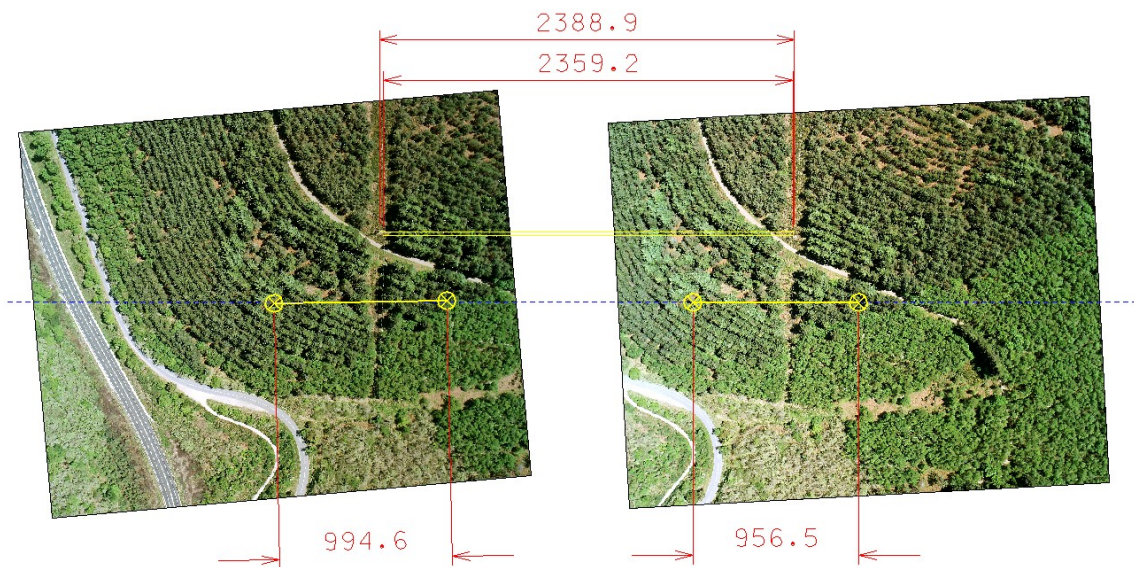


Figura 100: Aplicação de CAD para a determinação das paralaxes absoluta e diferencial (valores adimensionais uma vez que as unidades são relativas – fotografia da direita; fotografia da esquerda)

Considerando todas as medições disponíveis de alturas ( $h_d$ ,  $h_{CAD}$  e  $h_{PRX}$ ) referentes a todas as parcelas do Marão, e assumindo que os valores obtidos não dependem da espécie, verificou-se a igualdade dos valores através dum teste  $t$  de Student heterocedástico (probabilidade de 99%), tendo-se verificado não existirem diferenças significativas entre os 3 processos de

medição de alturas:  $t_{[hd, hCAD]}=0.08937$ ,  $gl=9$ ,  $P= 0.9307$ ;  $t_{[hd, hPRX]}=4.318$ ,  $gl=9$ ,  $P= 0.0019^{**}$ ;  $t_{[hPRX, hCAD]}=2.996$ ,  $gl=9$ ,  $P= 0.0151^*$ .

Os resultados anteriormente apresentados permitem concluir que a medição directa da altura dominante pelo processo CAD foi mais segura do que a mesma medição através do processo PRX. O processo CAD necessitou da digitalização prévia dos negativos das fotografias (no caso de serem adquiridas por uma câmara analógica, o que é dispensável no caso das fotografias digitais) e do programa CAD Microstation, cujo custo é de cerca de 1500Euros. Este processo demonstrou ser de maior facilidade de aplicação e requerer menor nível de especialização por parte do utilizador para a medição das alturas, desde que sejam bem visíveis quer a flecha quer o nível da base do tronco das árvores. Aliás, este requisito é também fundamental para a medição com a barra de paralaxe. Finalmente, o processo PRX necessita da impressão das fotografias em papel fotográfico e duma barra de paralaxe com custos relativamente superiores aos do programa CAD (aproximadamente de 2500euros).

### **Resultados e discussão**

Após a comparação prévia da precisão das metodologias de medição de alturas por paralaxe diferencial com a barra de paralaxe e com um CAD (Microstation) com base em 10 medições conjuntas (secção 5.2.1), realizou-se uma comparação dos resultados dessas duas metodologias sobre todas as parcelas do Marão com os dados obtidos no campo (Quadro 94). Verificou-se uma maior precisão das medições pelo processo CAD do que pelo processo PRX e por isso realizou-se a medição das alturas das árvores das outras áreas de estudo apenas com este processo (Quadro 95).

Verificou-se a igualdade entre as medições de alturas efectuadas no campo (hd) e através de FAPMF (hCAD), para cada espécie e local, através dum teste  $t$  de Student: Bétula no Marão-Campeã -  $t_{[hd,hCAD]}=0.8842$ ,  $gl=15$ ,  $P=0.1924n.s.$ ; Pinheiro negral no Marão-Campeã -  $t_{[hd,hCAD]}=0.2925$ ,  $gl=15$ ,  $P=0.3865n.s.$ ; Eucalipto em Amarante-Aboim -  $t_{[hd,hCAD]}=0.03737$ ,  $gl=15$ ,  $P=0.4852n.s.$ ; Pinheiro bravo em Vidago-Boticas -  $t_{[hd,hCAD]}=0.2360$ ,  $gl=15$ ,  $P=0.4075n.s.$ .

Os valores das alturas, determinados pelos dois métodos de medição, não se podem considerar diferentes estatisticamente. Através da determinação do erro quadrático médio verificou-se que no caso da bétula o erro foi ligeiramente maior, o que pode explicar-se pela conformação mais arredondada da copa e portanto mais subjectiva a definição do topo de cada copa. Caso tivessem sido utilizadas objectivas com menor distância focal os resultados seriam provavelmente mais precisos, porque essas objectivas melhoram a percepção do relevo por aumentar o rebatimento das imagens e maior razão B/H (Figura 97). No entanto, nessas condições teria de se voar a menor altura para compensar a diminuição de escala provocada pela alteração da

objectiva, e seria maior a velocidade relativa do avião em relação ao solo e por isso seria necessário efectuar ajustes na velocidade e na abertura da objectiva da máquina fotográfica para garantir boa qualidade de imagens. Uma alternativa para minimizar estes problemas seria a utilização de um helicóptero, com custos muito maiores (o aluguer do helicóptero é cerca de 750Euros/hora, e o aluguer dum avião é cerca de 200Euros/hora).

Quadro 94: Medições de alturas através da diferença de paralaxe no Marão (FAPMF de 14 Maio de 2003) (nCAD=11; nPRX=11)

Alt (m)	H (m)	b (mm)	hd (m)	hCad Media (m)	hPRX Media (m)	% var hCad	% var hPRX	hCad DesvioP (m)	hPRX DesvioP (m)	SE PRX	SE CAD
1565	580	70.5	19.24	16.91	16.87	-12%	-12%	0.26	0.74	0.22	0.08
1565	595	70.5	11.20	9.55	9.85	-15%	-12%	0.56	0.64	0.19	0.17
1565	570	70.5	20.49	19.07	18.98	-7%	-7%	0.38	0.77	0.23	0.11
1565	580	70.5	17.61	16.45	17.31	-7%	-2%	0.31	0.13	0.04	0.09
1565	580	70.5	19.24	17.52	17.83	-9%	-7%	0.46	1.07	0.32	0.14
1595	555	81	18.02	18.20	16.18	1%	-10%	0.34	1.05	0.32	0.10
1595	545	81	14.82	13.31	14.73	-10%	-1%	0.32	1.30	0.39	0.10
1595	565	81	16.42	15.68	15.83	-5%	-4%	0.29	0.67	0.20	0.09
1595	555	81	17.16	16.83	16.10	-2%	-6%	0.32	2.21	0.67	0.10
1595	545	81	13.72	13.03	13.07	-5%	-5%	0.17	1.41	0.43	0.05
1531	601	66	8.41	8.14	7.45	-3%	-11%	1.57	0.14	0.04	0.47
1531	596	66	10.86	10.47	9.96	-4%	-8%	0.34	0.83	0.25	0.10
1531	606	66	12.89	12.76	11.88	-1%	-8%	0.41	1.37	0.41	0.12
1531	601	66	11.45	10.59	9.64	-8%	-16%	2.00	0.23	0.07	0.60
1531	606	66	9.95	11.34	8.76	14%	-12%	0.39	0.81	0.24	0.12
1590	610	73.5	15.69	15.04	14.54	-4%	-7%	0.38	0.39	0.12	0.11
1590	630	73.5	13.72	13.25	13.27	-3%	-3%	0.30	0.19	0.06	0.09
1590	620	73.5	13.49	13.08	12.68	-3%	-6%	0.33	0.15	0.05	0.10
1590	620	73.5	18.39	17.45	16.35	-5%	-11%	0.24	0.58	0.17	0.07
1590	610	73.5	18.14	17.34	17.50	-4%	-4%	0.33	1.55	0.47	0.10
1580	670	66.75	13.62	13.07	12.79	-4%	-6%	0.37	0.21	0.06	0.11
1580	660	66.75	16.11	16.05	15.40	0%	-4%	0.47	1.22	0.37	0.14
1580	570	78.5	9.29	9.58	10.72	3%	15%	1.19	0.41	0.12	0.36
1585	565	75	14.21	14.12	13.69	-1%	-4%	0.26	1.73	0.52	0.08
1584	554	73	11.27	10.63	10.95	-6%	-3%	0.51	0.04	0.01	0.15
1515	475	66	20.80	18.75	19.17	-10%	-8%	0.24	0.09	0.03	0.07
1584	534	73	21.01	20.83	21.07	-1%	0%	0.35	0.16	0.05	0.11
1550	550	78.5	11.61	11.73	11.96	1%	3%	0.40	0.26	0.08	0.12
1550	580	70.5	17.94	17.26	17.70	-4%	-1%	0.42	0.11	0.03	0.13
1545	475	86.5	20.90	20.30	19.12	-3%	-9%	0.23	0.29	0.09	0.07
1539	559	72.5	22.03	21.61	20.09	-2%	-9%	0.44	1.98	0.60	0.13
1580	550	81	16.67	16.40	15.70	-2%	-6%	0.29	0.94	0.28	0.09
1539	589	75	14.21	13.29	14.56	-6%	2%	0.61	2.22	0.67	0.18
1575	615	66.75	15.48	14.45	15.41	-7%	0%	0.31	0.51	0.15	0.09
1586	496	81	19.31	18.58	17.94	-4%	-7%	0.33	0.96	0.29	0.10
1557	567	78.5	14.81	14.46	15.90	-2%	7%	0.22	0.81	0.24	0.07
1574	544	75	12.83	12.56	12.65	-2%	-1%	0.23	1.02	0.31	0.07

Quadro 95: Alturas médias das árvores dominantes por parcela medidas através dos processos de campo (hd) e por desenho assistido por computador (hCAD) e respectivos valores estatísticos associados para todas as parcelas (nCAD=11)

Parc.	Ano	Chave1	Especie	hd (m)	hCAD Media (m)	% var hCad	hCAD DesvioP (m)	SE hCAD
1.06	2001	1062001	Pbravo	11.25	10.75	-4%	2.47	0.74
1.13	2002	1132002	PBravo	13.14	12.71	-3%	1.00	0.30
1.20	2002	1202002	PBravo	19.74	19.16	-3%	1.29	0.39
1.23	2002	1232002	PBravo	25.65	26.67	4%	0.93	0.28
1.27	2001	1272001	PBravo	20.86	20.68	-1%	1.61	0.49
1.28	2002	1282002	PBravo	9.99	9.76	-2%	1.87	0.56
1.38	2002	1382002	PBravo	16.04	16.39	2%	0.62	0.19
1.39	2002	1392002	PBravo	13.28	13.43	1%	0.81	0.24
1.41	2002	1412002	PBravo	21.32	20.81	-2%	1.16	0.35
1.42	2002	1422002	PBravo	17.88	16.58	-7%	0.99	0.30
1.45	2001	1452001	PBravo	17.91	16.75	-6%	1.27	0.38
1.46	2002	1462002	PBravo	16.54	17.14	4%	0.73	0.22
1.47	2002	1472002	PBravo	19.34	19.12	-1%	0.74	0.22
1.48	2002	1482002	PBravo	16.95	15.58	-8%	1.15	0.35
1.50	2002	1502002	PBravo	13.63	13.85	2%	0.96	0.29
2.03	2002	2032002	EucGlob	12.67	14.21	12%	0.48	0.14
2.04	2002	2042002	EucGlob	15.44	16.36	6%	0.34	0.10
2.05	2002	2052002	EucGlob	18.64	17.57	-6%	0.66	0.20
2.06	2002	2062002	EucGlob	14.93	15.32	3%	0.26	0.08
2.08	2002	2082002	EucGlob	11.22	11.18	0%	0.25	0.08
2.09	2002	2092002	EucGlob	13.19	12.90	-2%	0.35	0.11
2.10	2002	2102002	EucGlob	12.73	12.06	-5%	0.50	0.15
2.11	2002	2112002	EucGlob	12.36	11.86	-4%	0.53	0.16
2.13	2002	2132002	EucGlob	11.09	11.33	2%	0.19	0.06
2.15	2002	2152002	EucGlob	7.14	7.10	-1%	0.28	0.08
2.16	2002	2162002	EucGlob	18.81	18.54	-1%	0.31	0.09
2.17	2002	2172002	EucGlob	18.15	19.92	10%	0.30	0.09
2.21	2002	2212002	EucGlob	18.98	18.15	-4%	0.30	0.09
2.24	2002	2242002	EucGlob	19.51	19.15	-2%	0.27	0.08
2.26	2002	2262002	EucGlob	19.38	18.79	-3%	0.16	0.05
2.27	2002	2272002	EucGlob	17.25	17.84	3%	0.27	0.08
3.01	2001	3012001	Betula	19.24	16.91	-12%	0.27	0.08
3.02	2001	3022001	Betula	11.20	9.55	-15%	0.57	0.17
3.03	2001	3032001	Betula	20.49	19.07	-7%	0.38	0.11
3.04	2001	3042001	Betula	17.62	16.46	-7%	0.32	0.10
3.05	2001	3052001	Betula	19.24	17.53	-9%	0.47	0.14
3.06	2001	3062001	Betula	18.02	18.21	1%	0.34	0.10

Parc.	Ano	Chave1	Especie	hd (m)	hCAD Media (m)	% var hCad	hCAD DesvioP (m)	SE hCAD
3.07	2001	3072001	Betula	14.83	13.31	-10%	0.33	0.10
3.08	2001	3082001	Betula	16.43	15.69	-5%	0.30	0.09
3.09	2001	3092001	Betula	17.16	16.84	-2%	0.32	0.10
3.10	2001	3102001	Betula	13.73	13.03	-5%	0.18	0.05
3.16	2001	3162001	PBravo	15.70	15.05	-4%	0.39	0.12
3.17	2001	3172001	PBravo	13.73	13.25	-3%	0.31	0.09
3.18	2001	3182001	PBravo	13.49	13.08	-3%	0.34	0.10
3.19	2001	3192001	PBravo	18.40	17.45	-5%	0.25	0.08
3.20	2001	3202001	PBravo	18.15	17.35	-4%	0.33	0.10
3.26	2003	3262003	Betula	13.63	13.08	-4%	0.38	0.11
3.27	2003	3272003	PNigra	16.11	16.06	0%	0.48	0.14
3.28	2003	3282003	PNigra	9.29	9.58	3%	1.19	0.36
3.29	2003	3292003	Betula	14.21	14.13	-1%	0.27	0.08
3.30	2003	3302003	PNigra	11.27	10.64	-6%	0.51	0.15
3.31	2003	3312003	PNigra	20.81	18.75	-10%	0.24	0.07
3.32	2003	3322003	PNigra	21.01	20.84	-1%	0.35	0.11
3.38	2003	3382003	PNigra	11.62	11.74	1%	0.40	0.12
3.39	2003	3392003	PNigra	17.95	17.27	-4%	0.43	0.13
3.41	2003	3412003	PNigra	20.90	20.30	-3%	0.24	0.07
3.42	2003	3422003	PNigra	22.04	21.61	-2%	0.45	0.14
3.50	2003	3502003	PNigra	15.49	14.45	-7%	0.32	0.10
3.51	2003	3512003	PNigra	19.31	18.58	-4%	0.33	0.10
3.53	2003	3532003	Betula	14.82	14.46	-2%	0.22	0.07
3.54	2003	3542003	Betula	12.83	12.56	-2%	0.23	0.07

### 5.2.3 Distâncias entre objectos, contagem de árvores e densidades de ocupação

A determinação de distâncias entre objectos pode realizar-se através de fotografia aérea desde que se conheça com rigor a sua escala no local das medições. Como a escala duma fotografia aérea vertical varia com o rebatimento do relevo, em zonas acidentadas é necessário verificar a escala para cada local (Marques *et al.*, 2001). Marques (1980) e Aranha (1998) utilizaram círculos impressos sobre transparentes para medir densidades de copas de *Pinus pinaster* por fotografia aérea convencional com escala média 1:15 000. No entanto a partir de ortofotografia estas medições podem ser feitas de forma muito mais eficiente e com menor subjectividade. Estas medições de distâncias sobre ortofotografia digital, são directas e muito precisas, se auxiliadas com um Sistema

de Informação Geográfica (SIG) ou um programa de Desenho Assistido por Computador (CAD). Indicam-se como variáveis dendrométricas do povoamento florestal que se poderão medir através de ortofotografia digital o diâmetro de copa das árvores dominantes, a densidade por unidade de superfície e a densidade de copas (percentagem de ocupação). Olthof *et al.* (1997) referem também a possibilidade de se estimar o índice de área foliar (LAI- do Inglês Leaf Area Index) através da medição da textura de imagens captadas com uma câmara digital Kodak DCS420 CIR com elevada correlação ( $r=0.69$ ), cujos valores foram simultaneamente calibrados com a determinação da LAI no terreno com um sensor “Licor-2000 Plant Canopy Analyzer”.

Como cada um dos temas discutidos nesta secção obedeceu a uma metodologia independente mas com uma base comum - a Medição de Parâmetros Dendrométricos através de Fotografia Aérea, optou-se por apresentar os seus resultados imediatamente após a descrição das metodologias implícitas.

Uma vez que as fotografias aéreas não possuem escala homogénea, optou-se por ortorrectificar as fotografias aéreas de pequeno e médio formato adquiridas durante este estudo. Como as FAPMF ortorrectificadas foram posteriormente utilizadas para diversas medições, por exemplo a medição de distâncias, densidade de copas, contagem de árvores por unidade de superfície, etc., optou-se por realizar a ortorrectificação das FAPMF descrita numa secção independente (secção 3.5.3).

As ortofotografias foram inseridas no SIG Geomedia v.5.0 e sobre elas traçaram-se os limites das parcelas de amostragem. Usando ferramentas apropriadas de SIG/CAD mediram-se as distâncias pretendidas e realizaram-se também as contagens necessárias. Os diâmetros de copa foram estimados através de duas medições perpendiculares, a primeira no sentido N-S, e determinada a sua média, enquanto que a contagem do número de árvores foi feita à vista (Figura 101).

A estimativa da densidade de copas (%) através de FAPMF ortorrectificada (DsdC\_F) foi efectuada por processamento digital de imagem, utilizando-se uma metodologia semelhante à utilizada no processamento das fotografias hemisféricas para a determinação da abertura de copa (5.4.3). Como os programas de processamento digital de imagem apenas podem processar imagens quadradas ou rectangulares, não foi possível considerar apenas o círculo correspondente à parcela de amostragem, tal como se ilustra na Figura 101, tendo também sido considerada a zona envolvente. Assim, foi considerada como área representativa da parcela, uma porção da FAPMF ortorrectificada com 50×50m, nela centrada. Cada imagem assim produzida foi catalogada de acordo com as suas características (médio formato ou pequeno formato digital, fiada, local e numeração sequencial) e que foram introduzidas na base de dados. Para a medição da densidade de copa foi aplicado o algoritmo de classificação automática CLUSTER do programa Idrisi

Kilimanjaro, que realizou uma “análise dos agregados” existentes nas imagens, neste caso em composições coloridas RGB, através da análise dos picos do seu histograma de frequência (Figura 102). Este algoritmo pode ser aplicado nos modos Fine e Broad que, tal como estas designações indicam, aplicam uma aglutinação fina (ligações de topo e em diagonal) ou grosseira (apenas ligações de topo) dos pixels da imagem (Eastman, 2003). Quer um quer outro produzem bons resultados globais mas verificou-se que a sua escolha dependia do tipo de povoamento. Quando o contraste visual entre a sombra ou o mato e a copa da árvore é bastante evidente, o modo grosseiro é eficiente e produz menor número de aglomerados e por isso menor trabalho de interpretação posterior. Nos casos de copas de folhosas bastante densas o processo fino produz por vezes melhores distinções.

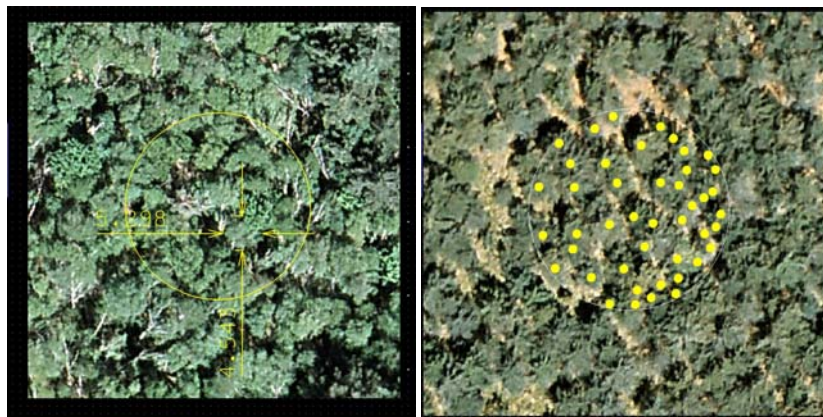


Figura 101: Medição de distâncias (à esquerda) e contagem de árvores (à direita) sobre FAPMF ortorrectificada

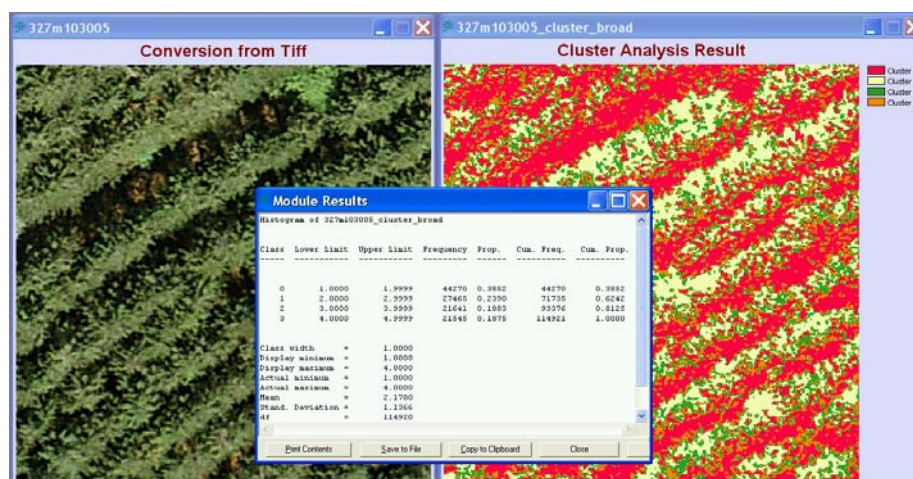


Figura 102: Resultados do módulo CLUSTER variante “broad” para avaliação da densidade de copa dum povoamento de Pinus negral no Marão-Campeã sobre fotografia aérea de médio formato digitalizada e ortorrectificada. (cluster vermelho: copas – 38.5% -; amarelo: sombra – 23.9% -; verde: pontos brilhantes dentro da sombra – 18.8% -; laranja: pontos escuros dentro das copas – 18.8% -)

Como se pode aferir da legenda da Figura 102, a densidade de copas desta parcela é de 57.3%. Comparando este valor com a medição de campo efectuada através de fotografias

hemisféricas, verifica-se que a diferença é de 4% (61.3% nas fotografias hemisféricas). Analisando todas as parcelas relativas a esta espécie, verifica-se que a diferença é não significativa ( $p=0.422$ ), o que prova a utilidade desta técnica de processamento e classificação de ETM+ para determinar a densidade de copas dos povoamentos florestais.

### **Resultados e discussão**

Esta tarefa só foi possível de realizar depois de devidamente ortorrectificadas e georreferenciadas as fotografias aéreas de pequeno e médio formato (FAPMF) adquiridas, porque as parcelas se inseriram em encostas e a sua área teve de ser corrigida em função do declive. Por outro lado, como as manchas florestais seleccionadas eram relativamente homogéneas, em certos casos, seria praticamente impossível garantir a localização correcta de cada parcela apenas visualmente.

Após a inserção num CAD (ou num SIG) dum círculo com uma área igual à observada no terreno, a contagem de árvores tornou-se uma tarefa bastante fácil, porque as copas das árvores se conseguiram individualizar bem. Optou-se por não apresentar os valores num quadro porque eles praticamente coincidiram. O erro quadrático médio foi muito próximo de zero. Optou-se igualmente por não realizar a comparação de médias porque eram efectivamente iguais.

Relativamente à medição de distâncias, mais concretamente os diâmetros de copa, foram comparados os valores médios obtidos no campo e através de FAPMF. Para cada espécie foi aplicado um teste *t* de Student de dados emparelhados. O mesmo tipo de inferência também foi aplicado à medição da densidade de copa. Os resultados obtidos mostram que não há diferenças significativas entre os valores obtidos através dos dois métodos, como se apresenta nos quadros seguintes (Quadro 96 a Quadro 99).

Pela comparação de ambas as medições (DC e DC\_F) verificou-se que, estatisticamente, não se podem considerar diferentes, e apresentaram valores muito pequenos de erro quadrático médio. Pode por isso considerar-se eficiente a medição dos diâmetros de copa através da FAPMF.

Relativamente à densidade de copa realizou-se uma análise de correlação entre esta e as restantes variáveis biofísicas do povoamento (por espécies) para averiguar se seria possível estabelecer associações estatísticas e, conseqüentemente, estimar equações de regressão que permitissem gerar tabelas de volume aéreas. (Quadro 100, Quadro 101, Quadro 102, Quadro 103).

Os povoamentos instalados no perímetro florestal de Marão e Meia Via foram plantados ao longo da curva de nível a compassos regulares e não tiveram praticamente qualquer intervenção desde a sua instalação. A densidade de copas, que traduz o grau de ocupação do solo, ou seja o grau de fecho do copado, deveria, nestes casos, ser baixa de início, e, à medida que ocorresse o “fecho do copado”, estabilizar rapidamente com um valor alto. No caso da Bétula, uma vez que

não houve intervenção cultural, a diminuição do número inicial de árvores resultou de auto-desbaste e/ou mortalidade devida a quebra dos troncos por causas naturais (Secção 4.2.3 - Figura 90). Assim, seria de esperar que nestas condições a correlação entre a densidade de copas e outros parâmetros biofísicos fosse baixa, como se confirmou tanto para a Bétula (Quadro 100) como para o Pinheiro negral (Quadro 101). Neste caso concreto, a DsdC\_F não deverá ser utilizada directamente, ou em associação com outras variáveis, no estabelecimento de tabelas de volume aéreas, ainda que se tenha observado correlação significativa entre DsdC\_F e Vm para a Bétula no Marão-Campeã (Quadro 100).

O diâmetro de copa do Pinheiro negral no Marão-Campeã correlaciona-se positivamente com a densidade de copa. No entanto como são duas variáveis que se conseguem medir através de FAPMF e como não estão correlacionadas com as restantes variáveis, as perspectivas de estabelecimento de inferências estatísticas de valores biofísicos de povoamentos florestais de Pinheiro negral no Marão-Campeã não estão asseguradas. (Quadro 101).

Por outro lado, os povoamentos de pinheiro bravo de Vidago-Boticas são maioritariamente de regeneração natural. Nestes casos, num povoamento jovem com um elevado número de árvores, e num adulto com um número de árvores substancialmente menor, também se poderia esperar encontrar semelhante densidade de copas (em percentagem). Esse facto pode eventualmente explicar a também baixa correlação entre a densidade de copas e outros parâmetros biofísicos neste local e espécie (Quadro 103). Por isso, não poderão ser feitas inferências directas sobre o volume através da densidade de copa nesta espécie com este tipo de ordenamento. Realça-se no entanto que a área basal se correlacionou de forma significativa, ainda que apenas moderadamente, com a densidade de copa. Uma vez que quer o número de árvores quer a área basal por unidade de superfície são medidas de densidade, talvez a conjugação da densidade de copas com o número de árvores por ha e ainda com outros factores como o diâmetro de copa médio, possa ser um método a explorar na inferência directa doutros parâmetros biofísicos. Este pressuposto poderá ser válido para qualquer das espécies.

Relativamente ao Eucalipto em Amarante-Aboim, os resultados obtidos foram um pouco melhores que com as outras espécies (Quadro 102), sendo a correlação entre a densidade de copa e o volume liminarmente significativa. Provavelmente, com uma maior dimensão da amostra, poder-se-á encontrar uma correlação maior e mais significativa. As correlações estatisticamente significativas entre DsdC\_F e  $t$ ,  $\bar{d}$ , G, Vm, DCm e DC\_F abrem boas perspectivas ao estabelecimento de inferências estatísticas sobre valores biofísicos de povoamentos florestais de Eucalipto através dessas variáveis. Nesta espécie, ainda que nos primeiros anos a seguir à plantação também possa verificar-se uma muito baixa densidade de copas, tal como foi referido atrás para o caso dos povoamentos florestais instalados no perímetro florestal de Marão e Meia Via, a

competição entre os eucaliptos desde que ocorre o fecho do copado até ao final da revolução não é suficiente para provocar auto-desbaste.

Os resultados obtidos revelaram-se mais promissores nos povoamentos de eucalipto. Uma justificação para este facto pode residir no tipo de condução cultural destes povoamentos e com o elevado valor genético das plantas instaladas, as quais apresentam comportamento semelhante, proporcionando povoamentos homogêneos, com poucas árvores dominadas.

Quadro 96: Diâmetros de copa (medições de campo e através de FAPMF) para a Bétula no Marão-Campeã (n =14)

Parcela	Ano	Chave1	DC (m)	DC_F (m)	DsdC_F
3.01	2001	3012001	3.36	3.98	0.793
3.02	2001	3022001	5.67	4.98	0.8005
3.03	2001	3032001	4.51	5.02	0.7961
3.04	2001	3042001	5.73	5.62	0.8033
3.05	2001	3052001	5.68	5.40	0.7974
3.06	2001	3062001	3.07	3.34	0.8404
3.07	2001	3072001	3.65	3.87	0.8343
3.08	2001	3082001	3.37	3.82	0.8319
3.09	2001	3092001	3.65	3.56	0.8344
3.10	2001	3102001	3.65	3.91	0.8328
3.26	2003	3262003	5.01	4.70	0.6042
3.29	2003	3292003	4.98	4.50	0.6007
3.53	2003	3532003	5.81	5.60	0.7529
3.54	2003	3542003	6.36	6.23	0.7724

H0: DC ≠ DC\_F; (t= 0.02045; gl=13; P= 0.9840n.s.; 99%) ⇒ Rejeição de H0; EQM=0.38m

Quadro 97: Diâmetros de copa (medições de campo e através de FAPMF) para o Pinheiro negral no Marão-Campeã (n =13)

Parcela	Ano	Chave1	DC (m)	DC_F (m)	DsdC_F
3.27	2003	3272003	5.49	5.14	0.5735
3.28	2003	3282003	4.12	3.96	0.4873
3.30	2003	3302003	5.02	5.04	0.5997
3.31	2003	3312003	7.16	7.04	0.7578
3.32	2003	3322003	5.45	5.22	0.6776
3.38	2003	3382003	5.37	5.38	0.641
3.39	2003	3392003	5.32	5.10	0.7534
3.41	2003	3412003	5.11	5.64	0.526
3.42	2003	3422003	5.97	5.86	0.6285
3.49	2003	3492003	5.66	5.69	0.5243
3.50	2003	3502003	5.34	5.36	0.6795
3.51	2003	3512003	5.89	5.59	0.7593
3.52	2003	3522003	6.18	6.20	0.6921

H0: DC ≠ DC\_F; (t=1.074; gl=12; P= 0.3040; 99%) ⇒ Rejeição de H0; EQM=0.22m

Quadro 98: Diâmetros de copa (medições de campo e através de FAPMF) para o Eucalipto em Amarante-Aboim (n =19)

Parcela	Ano	Chave1	DC (m)	DC_F (m)	DsdC_F
2.03	2002	2032002	2.71	2.54	0.2539
2.04	2002	2042002	2.09	2.22	0.3638
2.05	2002	2052002	1.93	1.88	0.4061
2.06	2002	2062002	2.30	2.37	0.5211
2.07	2002	2072002	2.14	2.09	0.4898
2.08	2002	2082002	2.45	2.57	0.4051
2.09	2002	2092002	2.75	2.95	0.6198
2.10	2002	2102002	3.10	3.15	0.5606
2.11	2002	2112002	2.05	2.02	0.498
2.12	2002	2122002	2.59	2.66	0.5508
2.13	2002	2132002	2.32	2.50	0.5828
2.15	2002	2152002	2.46	2.34	0.5286
2.16	2002	2162002	3.07	3.26	0.5472
2.17	2002	2172002	3.54	3.54	0.5446
2.21	2002	2212002	2.71	2.96	0.6099
2.24	2002	2242002	2.58	2.72	0.6022
2.26	2002	2262002	3.25	3.28	0.6678
2.27	2002	2272002	3.17	3.04	0.7325
2.30	2002	2302002	3.27	3.34	0.7441

H0: DC ≠ DC\_F; (t=1.818; gl=18; P= 0.0857; 99%) ⇒ Rejeição de H0; EQM=0.13m

Quadro 99: Diâmetros de copa (medições de campo e através de FAPMF) para o Pinheiro bravo em Vidago-Boticas (n =22)

Parcela	Ano	Chave1	DC (m)	DC_F (m)	DsdC_F
1.06	2001	1062001	3.03	3.22	0.7658
1.13	2002	1132002	2.48	2.46	0.7406
1.20	2002	1202002	6.75	6.54	0.7595
1.23	2002	1232002	6.43	6.72	0.7511
1.27	2001	1272001	6.20	6.43	0.7926
1.28	2002	1282002	2.90	2.83	0.6689
1.38	2002	1382002	3.25	3.50	0.7384
1.39	2002	1392002	4.80	4.68	0.7511
1.41	2002	1412002	5.95	5.56	0.6272
1.42	2002	1422002	7.80	7.54	0.6104
1.45	2001	1452001	4.35	4.46	0.6875
1.46	2002	1462002	4.85	5.18	0.7735
1.47	2002	1472002	6.50	6.10	0.6475
1.48	2002	1482002	4.50	4.52	0.7503
1.50	2002	1502002	6.20	6.04	0.6766
3.16	2001	3162001	3.16	3.44	0.5081
3.17	2001	3172001	3.71	3.64	0.5332
3.18	2001	3182001	3.50	4.02	0.5236
3.19	2001	3192001	3.32	3.68	0.5319
3.20	2001	3202001	3.48	3.72	0.6166
3.55	2003	3552003	3.96	3.74	0.8125
3.56	2003	3562003	3.45	3.42	0.8146

H0: DC ≠ DC\_F; (t=0.7231; gl=21; P= 0.4776; 99%) ⇒ Rejeição de H0; EQM=0.25m

Quadro 100: Correlações entre densidade de copa com restantes variáveis dendrométricas de campo e obtidas através de FAPMF para a Bétula no Marão-Campeã (n =14)

	N	$\bar{d}$	G	Vm	htm	hd	DCm	N_F	hCAD	DC_F
DsdC_F	0.20	0.15	0.38	0.54* P= 0.04	0.47n.s. P=0.09	0.33	-0.39	0.09	0.27	-0.27

Quadro 101: Correlações entre densidade de copa com restantes variáveis dendrométricas de campo e obtidas através de FAPMF para Pinheiro negral no Marão-Campeã (n =11)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	htm	hd	DCm	N_F	hCAD	DC_F
DsdC_F	-0.11	-0.27	0.10	-0.14	-0.07	0.30	0.45	0.70* P=0.016	-0.12	0.39	0.58n.s. 0.06

Quadro 102: Correlações entre densidade de copa com restantes variáveis dendrométricas de campo e obtidas através de FAPMF para Eucalipto em Amarante-Aboim (n =16)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	htm	hd	DCm	N_F	hCAD	DC_F
DsdC_F	0.57* P= 0.02	0.13	0.51* P= 0.04	0.52* 0.04	0.48* P=0.05	0.36	0.30	0.50* P=0.04	0.20	0.23	0.56* P= 0.03

Quadro 103: Correlações entre densidade de copa com restantes variáveis dendrométricas medidas no campo e obtidas através de FAPMF para Pinheiro bravo em Vidago-Boticas (n =20)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	htm	hd	DCm	N_F	hCAD	DC_F
DsdC_F	0.05	-0.10	-0.27	-0.45* P= 0.04	-0.27	-0.01	0.12	0.23	-0.10	0.18	0.23

## 5.3 Produtividade Primária e Índice de Área Foliar

### 5.3.1 Introdução

O Índice de Área Foliar (LAI- do Inglês Leaf Area Index) é de forma simplista a razão entre a área total de folhas de uma comunidade de vegetação e a área de solo ocupada por essa comunidade (Eq. 42) (Larcher, 1977).

$$\text{Eq. 42} \quad \text{LAI} = \frac{\text{Área total de folhas}}{\text{Área coberta de terreno}}$$

O LAI apresenta uma estreita relação com a evapotranspiração e fotossíntese e, localmente, pode ser associado com a produtividade primária (produção de matéria seca) (Larcher, 1977, Monteith, 1977, Nemani *et al.*, 1993) através do produto dos 3 termos indicados na Eq. 43.

$$\text{Eq. 43} \quad P = ef \cdot S$$

em que:

$P$  = produtividade primária (unidade de massa)

$e$  = eficiência de conversão (valores tabelados)

$f$  = fracção da PAR incidente interceptada pela copa

$S$  = PAR incidente (Figura 103)

PAR = Radiação Fotossinteticamente Activa ( $\text{W.m}^2.\text{sr}^{-1}$ ) (*Photosynthetically Active Radiation*)

Como a medição directa do LAI por métodos destrutivos é muito difícil, foram desenvolvidos métodos indirectos para a estimar, a maioria dos quais baseados na relação entre a estrutura da copa e a radiação nela incidente. Alguns autores (Nemani *et al.*, 1993) demonstraram que quando o LAI aumenta, a absorção absoluta da radiação fotossinteticamente activa (PAR) aumenta. A radiação solar incidente nas copas que não é absorvida é reflectida e/ou transmitida através da copa, absorvida, reflectida e/ou transmitida pela superfície do solo (Figura 103 e Eq. 44).

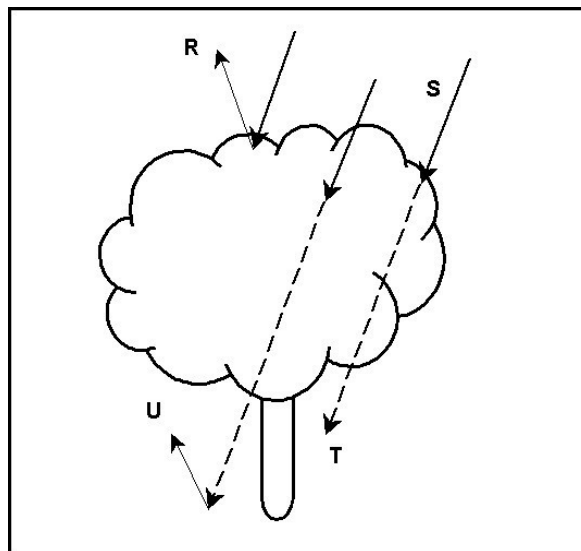


Figura 103: Fluxo de radiação (Fonte: Decagon Devices Inc., 1989)

$S$  = PAR incidente (leitura por cima da copa ou numa zona aberta com o ceptómetro voltado para cima)

$R$  = PAR reflectida pela copa (leitura por cima da copa com ceptómetro invertido)

$T$  = transmitância da copa (leitura debaixo da copa com o ceptómetro voltado para cima cuidadosamente nivelado)

$U$  = PAR reflectida pelo solo (leitura debaixo da copa com o ceptómetro invertido)

Eq. 44

$$f = 1 - t - r - r_s$$

em que:  $t$  = fracção da luz incidente que é transmitida pela copa

$r$  = fracção da luz incidente reflectida para o sensor por cima da copa

$r_s$  = reflectância da superfície do solo

Desprezando os dois últimos termos da Eq. 44, a fracção da radiação absorvida simplifica-se para:

$$\text{Eq. 45} \quad f = 1 - t$$

O erro resultante desta aproximação é normalmente pequeno quando  $t$ ,  $r$ , e  $r_s$  são medidos na região da PAR, porque a maior parte da PAR é absorvida, e sobretudo quando o sensor utilizado for sensível apenas nessa região<sup>51</sup>. Pode por isso calcular-se  $t$ ,  $r$  e  $r_s$  de acordo com as 3 equações seguintes, que estabelecem a associação dos dados de DR com as propriedades estruturais e fisiológicas da floresta.

$$\text{Eq. 46} \quad t \text{ (ou } \tau) = T/S$$

$$\text{Eq. 47} \quad r = R/S$$

$$\text{Eq. 48} \quad r_s = U/T \quad (\text{A legenda apresenta-se na Figura 103})$$

Outros autores referem também a possibilidade de estimar o LAI através da medição da permeabilidade ou abertura de copa (%), que é uma forma de medição da PAR em termos relativos, visto que se encontram bem correlacionados (Coops *et al.*, 2002, Lin e Chiang, 2002, Sylvia *et al.*, 2000, Martens *et al.*, 1993, Gill *et al.*, 2000, Gill *et al.*, 1999, Nilson *et al.*, 1999, Nemani *et al.*, 1993). Adams e Arkin (1977) obtiveram resultados similares da LAI realizando leituras sob coberto quer de PAR quer da abertura de copa com um ceptómetro. De modo geral, a medição da abertura de copa com um ceptómetro é mais rápida que a medição PAR, uma vez que não necessita de encontrar a razão entre as medições debaixo e por cima da copa, mas a Decagon Devices Inc. (1989) aconselha a utilização das medições de PAR.

Para a estimativa da abertura ou transparência da copa, o ceptómetro mede simplesmente a percentagem da sonda que se encontra exposta directamente à luz, sob coberto da copa (Nilson, 1999). A abertura de copa também pode ser medida através de fotografias hemisféricas (Norman e Campbell, 1989, Rich, 1989, 1990, Ustin, 1994, Fournier *et al.*, 1997, Odum, 1997, Brunner, 1998, Sylvia *et al.*, 2000, Ferment, *et al.*, 2001, Lin e Chiang, 2002, Soudani *et al.*, 2002, entre outros).

O LAI varia muito com o tipo de vegetação. Em povoamentos florestais, o LAI está muito correlacionado com a geometria e forma da copa, desde um máximo em posições intermédias

---

<sup>51</sup> No caso das medições de luz serem feitas com sensores sensíveis também no infravermelho próximo este pressuposto não se verifica.

dentro da copa, decrescendo para cima e para baixo (Kozlowski *et al.*, 1991). Em florestas de coníferas em climas temperados os valores de LAI podem atingir valores entre 11 e 12 (Hungerford *et al.*, 1989, Lucas, 1995); valores de 9 em povoamentos muito velhos de *Pseudotsuga menziesii* (Thomas e Winner, 2000); entre 3 e 6 para povoamentos de *Pinus sp.* (Smith *et al.*, 1991; Curran *et al.*, 1992), entre 3 e 9 para florestas de folhosas em climas temperados; e entre 1,5 e 1,9 em povoamentos de eucalipto no Sudeste da Austrália (Kozlowski *et al.*, 1991). Foram calculados valores diferentes em povoamentos de *Pinus pinaster*, em Portugal, entre 1,5 e 4,0 de acordo com a idade e densidade do povoamento (Aranha, 1998).

A PAR que penetra através dum copado pode apresentar uma enorme variação, podendo variar desde o valor máximo que corresponde à leitura em pleno sol, até valores quase nulos numa deslocação no terreno de menos de um metro (Ross e Sulev, 2000). Uma medição segura da PAR com um ceptómetro, implica a determinação da média de várias leituras bem distribuídas debaixo da copa.

As equações apresentadas na bibliografia para determinação do LAI através da PAR e da abertura de copa são matematicamente complexas pelo que se recorreu à sua inversão para simplificar o cálculo (Nilson, 1999). No entanto, os métodos de inversão partem do pressuposto de que os elementos da copa estão casualmente dispersos no espaço, o que nem sempre se verifica, sobretudo quando ainda não se fechou o copado, ou em coníferas, ou em copados que nunca fecham, tais como vegetação do deserto, ou em copados com folhas heliotrópicas ou com dispersão regular, que também violam este pressuposto (Lang *et al.*, 1985, Lang e Xian, 1986). Estes autores também verificaram que a determinação do LAI está sujeita a erros, tanto maiores quanto mais elevados os valores de LAI e/ou quanto mais alta a altura de copa.

Finalmente, também é possível estimar o LAI através de índices de vegetação, porque uma maior absorção da PAR implica sobretudo a retenção da radiação do vermelho (VERM) e simultaneamente uma maior reflexão do Infravermelho Próximo (IVP). Por isso, Baret, *et al.* (1995), assim como outros autores, sugeriram o uso de índices de vegetação (razões simples ou compostas entre IVP e VERM) no cálculo de LAI. Os índices de vegetação poderão ser obtidos quer com dados recolhidos no terreno por radiómetros apropriados sensíveis nessas regiões do espectro electromagnético (Pontailier *et al.*, 2003) ou através de imagens de detecção remota igualmente sensíveis nessas regiões.

Embora a análise da reflexão da luz através de imagens de Detecção Remota e a análise da PAR retida pela copa dentro do povoamento com ceptómetro ou fotografias hemisféricas constituam duas metodologias distintas para analisar o mesmo fenómeno, podendo produzir-se estimativas do LAI por ambos os processos, no entanto, ambas as estimativas apenas se poderão comparar quando ocorrer fecho do copado porque, enquanto o ceptómetro apenas contabiliza o

LAI a partir da diferença de luz sobre e sob copado das árvores, a DR também contabiliza a componente do mato rasteiro (que poderá ou não existir).

O aspecto da imagem que contém o registo das copas vistas de cima depende da escala das imagens e da estrutura do povoamento. Por exemplo, um denso manto de copas em povoamentos sobrelotados regulares apresenta maior ou menor percepção visual da textura de acordo com a escala das imagens. À medida que esta diminui esbate-se a textura, assumindo maior importância a informação da reflexão. No entanto só poderão realizar-se inferências quantitativas sobre as características físicas do povoamento (por ex.: o volume por hectare) se houver diferença significativa na reflexão de povoamentos jovens e adultos (considerando ambos sobrelotados). No caso oposto, de árvores isoladas ou de povoamentos sub-lotados, o solo ou a vegetação rasteira tornam-se visíveis, contaminando a reflexão registada nos sensores de DR, prejudicando a análise quantitativa da reflexão do povoamento através de imagens de pequena escala, apresentando-se estas imagens com textura mais irregular. Mas, por outro lado, esta situação facilita a medição de alturas de árvores e diâmetros de copa sobre imagens de DR de grande escala.

### 5.3.2 Estimativa do LAI através de medições da PAR

A PAR absoluta medida com o ceptómetro dentro do copado é uma combinação de radiação transmitida através da copa e radiação dispersa por folhas dentro da copa. Um modelo completo de transmissão e dispersão é dado por Norman e Jarvis (1975), mas dada a sua complexidade e impossibilidade de inversão, a empresa Decagon Devices, Inc. (2000), fabricante do ceptómetro por nós utilizado, usou o modelo de Norman-Jarvis apenas para testar e ajustar dois modelos de inversão e de utilização mais simples.

O primeiro modelo é um modelo simples de dispersão sugerido por Goudriaan (1988) (Eq. 49) que nos dá a fracção da PAR transmitida sob coberto,  $\tau$ , (razão da PAR medida sob coberto e PAR acima do coberto):

$$\text{Eq. 49} \quad \tau = f_b \cdot e^{(-\sqrt{a}KL)} + (1 - f_b) \cdot e^{(0,87\sqrt{a})}$$

Em que:  $f_b$  = radiação directa da PAR incidente  
 $a$  = absorvância foliar na banda PAR (e que se assume ser igual a 0,9 nm em amostragem LAI)  
 $k$  = coeficiente de extinção para o copado (Eq. 54)

Para determinar a radiação directa ( $f_b$ )<sup>52</sup>, que corresponde à fracção da radiação total solar que incide directamente na vegetação, necessitamos de determinar previamente a radiação difusa ( $f_d$ ) (radiação que é reflectida pelas nuvens, folhas, solo, etc. ).

Eq. 50 
$$f_b = 1 - f_d$$

A determinação da radiação difusa ( $f_d$ ) é também feita com o mesmo aparelho (ceptómetro) apenas com um só sensor<sup>53</sup>.

Eq. 51 
$$f_d = \frac{\text{leitura PAR completamente à sombra sob coberto}}{\text{leitura PAR ao sol}}$$

Um segundo modelo, apresentado por John Norman (comunicação pessoal *in* Decagon Devices Inc., 1989), sugere uma equação diferente para prever as PAR dispersa e PAR transmitida:

Eq. 52 
$$\tau = e^{\left[ \left(1 - \frac{1}{2K}\right) / \left( \left(1 - \frac{1}{2K}\right)^{\times f_b} - 1 \right) \right]}$$

Ambas as equações preveem a PAR do copado num intervalo muito restrito do modelo completo de Norman-Jarvis. Segundo a bibliografia consultada a Eq. 49 é ligeiramente mais precisa que a Eq. 52, mas esta é mais fácil de inverter e determinar LAI (Eq. 53).

Assim, foi considerado o seguinte modelo invertido Norman-Jarvis (Decagon Devices Inc., 1989) (Eq. 53) e que foi o utilizado por nós neste estudo.

Eq. 53 
$$LAI = \frac{\left[ \left(1 - \frac{1}{2K}\right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0,47 f_b)}$$

Em que:  $k =$  factor de extinção da luz  
 $f_b =$  fracção da PAR incidente  
 $\tau =$  PAR transmitida (razão da média da PAR debaixo da copa com a média da PAR por cima da copa)

<sup>52</sup> “Fraction of Beam” – termo em inglês para designar a fracção da radiação total solar que incide directamente na vegetação

<sup>53</sup> No aparelho utilizado é seleccionado apenas o sensor da ponta premindo a tecla F7

$A = 0,283 + 0,785 \times a - 0,159 \times a^2$ , sendo  $a$  a absorvância foliar na banda PAR e que se assume igual a 0,9 em amostragem LAI

Apresentou-se anteriormente que o factor de extinção da luz ( $k$ ) depende do coeficiente de esfericidade da copa. Assumindo-se a copa como sendo esférica, o valor de  $k$  pode calcular-se através da Eq. 55. Caso contrário, deve ser calculado através da Eq. 54, necessitando-se de encontrar previamente o coeficiente de esfericidade pela Eq. 71 ou pela Eq. 72. Assim, foram produzidos 3 valores distintos de LAI designados por LAI1, LAI2 e LAI3, todos aplicando a Eq. 53 mas com as 3 variantes de determinação do  $k$ .

### 5.3.3 Estimativa do LAI através de medições da abertura de copa

São referidos na literatura dois processos principais de medição da abertura de copa: pela aplicação da “Lei de Beer-Lambert” (Jarvis and Leverenz, 1983; Marshall and Waring, 1986), ou pela aplicação dum modelo invertido unidireccional (Norman e Campbell, 1989).

Ambos os procedimentos assumem que os elementos da copa se encontram distribuídos normalmente e que a extinção exponencial da luz através da copa se explica pelo coeficiente de extinção da luz,  $k$ . Para uma copa aproximadamente esférica  $k$  assume-se igual a 0.5 (Jarvis e Leverenz, 1983), e igual a 1 para qualquer copa quando o ângulo zenital do Sol<sup>54</sup> ( $\theta$ ) for próximo de 57° (Figura 104).

Pretendendo-se determinar o verdadeiro valor do coeficiente de extinção da luz ( $k$ ) a equação mais importante é a de Campbell (1986) (Eq. 54) que assume um ângulo elipsoidal de distribuição dos elementos da copa. Quando o ângulo de distribuição é esférico ( $x = 1$ ),  $k$  simplifica-se de acordo com a Eq. 55.

Eq. 54 
$$k = \frac{\sqrt{(x^2 + (\tanh \theta)^2)}}{x + 1,774(x + 1,182)^{-0,733}}$$

Em que:  $x =$  coeficiente de esfericidade da copa

Eq. 55 
$$k = \frac{1}{2 \cos \theta}$$

---

<sup>54</sup> O ângulo zenital do Sol é o ângulo entre a normal do terreno e os raios solares (Eq. 86)

O coeficiente de esfericidade da copa é razão entre o comprimento de dois eixos, horizontal (diâmetro de copa - DC) e vertical (altura de copa - HC), ou alternativamente, a razão entre a área da copa projectada num plano horizontal e num plano vertical<sup>55</sup>. No ceptómetro (Decagon Devices Inc., 1989) o coeficiente de esfericidade da copa é considerado unitário para efeitos de cálculo do LAI.

No manual desse ceptómetro apresenta-se graficamente a variação dos coeficientes de extinção da luz como função do ângulo zenital do Sol, para vários valores da esfericidade da copa ( $x$ ), típicos de várias copas (Figura 104). Por análise dessa figura conclui-se que:

$k = 1$ , para todas as canópias, quando  $\theta \approx 57^\circ$ ,

$k = 1$ , para qualquer  $\theta$ , quando as folhas são horizontais (valor de  $x$  elevado),

à medida que  $x$  baixa,  $k < 1$  quando  $\theta < 57^\circ$ , e,  $k > 1$  quando  $\theta > 57^\circ$ .

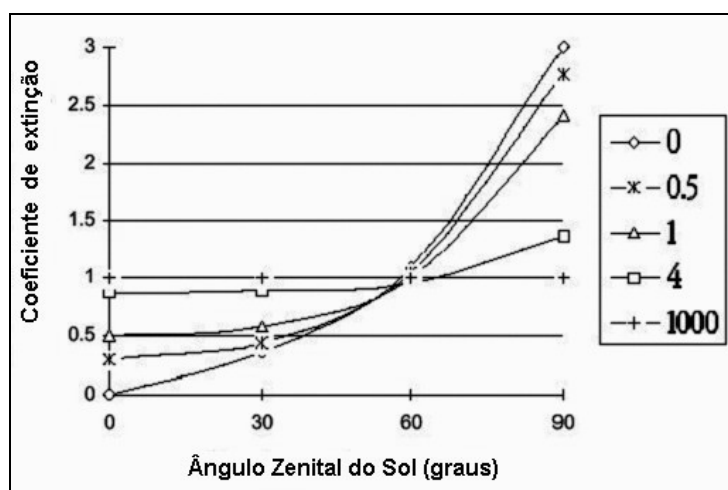


Figura 104: Coeficientes de extinção da luz como função do ângulo zenital do Sol para vários valores de  $x$  (típicos de várias copas)

Ambos os modelos (modelo Beer-Lambert e modelo invertido unidireccional) assumem que a probabilidade de um raio de luz penetrar através da copa, sem intercepção, é dada pelo coeficiente de transmissão da luz para a copa,  $\tau$ . Este valor pode ser determinado pela razão entre a luz que atravessa a copa ( $S$ ) e a luz incidente na copa ( $I$ ) medida com um ceptómetro ou com fotografias hemisféricas (Bonhomme, *et al.*, 1974, Bonhomme, 1976, Walter and Himmler, 1996), e a determinação indirecta do LAI pode ser feita através da seguinte equação:

<sup>55</sup> A área da copa projectada num plano horizontal =  $DC^2 * \pi/4$ ; e a área da copa projectada num plano vertical =  $DC * HC/2$

Eq. 56 
$$\tau = e^{-kLAI}$$

Em que:  $\tau$  = coeficiente de transmissão da luz para a copa  
 $LAI$  = índice de área foliar da copa  
 $k$  = coeficiente de extinção para a copa, que depende da distribuição angular dos elementos da copa, e do ângulo zenital do Sol ( $\theta$ ), sendo normalmente considerada igual a 0.5

Resolvida a Eq. 56 em ordem a LAI obtém-se:

Eq. 57 
$$LAI = -\ln(\tau)/k$$

Como o coeficiente de extinção para a copa depende do ângulo zenital do Sol ( $\theta$ ), para a determinação da abertura de copa com um ceptómetro necessitamos de realizar várias leituras por dia, com distintas inclinações dos raios solares, sendo calculada a abertura de copa com base na média aritmética das várias medições diárias efectuadas. Além disso é requerida luz directa, falhando as medições completamente em dias encobertos. Utilizando fotografias hemisféricas, a estimativa da abertura de copa como função do ângulo do zénite com o sol é facilitada porque, em cada fotografia, se podem simular sequências de vários ângulos, mesmo em dias encobertos (luz difusa). No entanto, estas fotografias têm de ser captadas e processadas com equipamento e programas específicos (Secção A.2 em Anexos).

Quando a hora da captação dos dados coincide com um ângulo zenital do Sol de cerca de 57°,  $k = 1$  para qualquer copa (Figura 104), simplificando-se a Eq. 57 do seguinte modo (Bonhomme *et al.*, 1974):

Eq. 58 
$$LAI = -\ln(\tau_{57})$$

Durante este período (cerca das 16:00h (hora solar) para a latitude do Norte de Portugal, entre Maio e Agosto<sup>56</sup>), basta uma só leitura com o ceptómetro ou uma só fotografia hemisférica para a determinação da abertura de copa desse local, ainda com a vantagem de não haver a necessidade de se utilizar equipamento específico para a captação fotográfica e seu processamento. Nestas situações as fotografias hemisféricas são captadas sem luz solar directa, portanto apenas com luz

---

<sup>56</sup> Anexo LXII: Pesquisa da hora com ângulo zenital do Sol próximo de 57° (intervalos de meia-hora) para a latitude do Marão.

difusa, apresentando-se o céu com tonalidade e textura uniformes, e com menor risco de reflexão especular dos componentes da copa (Ustin, 1994, Lin e Chiang, 2002). A quantidade de pixels classificados como elementos de copa em relação ao número total de pixels da imagem traduz a abertura de copa (em percentagem), e o seu logaritmo negativo traduz o LAI (Norman e Jarvis, 1975, Norman e Campbell, 1989, Rich, 1990).

### 5.3.4 Estimativa do LAI por Índices de Vegetação e por equações de regressão

A determinação do Índice de Área Foliar (LAI) pode fazer-se através de Índices de Vegetação (VI) baseados nas reflectâncias da banda do vermelho e do infravermelho pela vegetação, medidas quer através de imagens de Detecção Remota (DR) quer através de medições directas no terreno com aparelhos apropriados (Nilson *et al.*, 1999, Aranha, 1998, Baret, *et al.*, 1995). De acordo com Gong *et al.* (1995) existe uma grande relação entre LAI e combinações das radiações VERM e IVP (índices de vegetação). No entanto, como a relação entre o LAI e a reflectância da copa é assintótica, quando aumenta o LAI reduz-se a significância da relação e por isso é mais difícil estabelecer uma relação rigorosa entre o LAI e as variações de PAR (Baret e Guyot, 1991; Baret *et al.*, 1995). Para ultrapassar este problema, Baret *et al.* (1995) propuseram o uso das bandas VERM e NIR no cálculo de índices de vegetação para estimativa do LAI. Apresentaram o modelo matemático de Baret-Guyot que é um ajustamento da Lei de Beer-Lambert's como forma de estimar o LAI através de índices de vegetação.

Eq. 59 
$$LAI = -\ln \left( \frac{VI - VI_{\infty}}{VI_s - VI_{\infty}} \right) / k$$

Em que:  $VI$  = índice de vegetação para a copa  
 $VI_s$  = índice de vegetação para o solo  
 $VI_{\infty}$  = valor assintótico do VI  
 $k$  = coeficiente de atenuação

O primeiro VI utilizado foi o RVI (Ratio Vegetation Index) (Pearson e Miller, 1972) seguido pelo NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)<sup>57</sup> (Rouse *et al.*, 1974). O NDVI é

---

<sup>57</sup>  $NDVI = \frac{IV - V_{erm}}{IV + V_{erm}}$ , IV – infravermelho; Verm - vermelho

muito usado, produzindo valores entre -1 e 1, sendo os valores negativos representativos de água (rios e albufeiras) e de superfícies não vegetadas quando húmidas. As áreas aridas e as superfícies de solo nu apresentam valores próximos de zero e as superfícies vegetadas apresentam valores positivos (Aranha *et al.*, 2001). O seu cálculo é bastante simples e tem uma vasta gama de aplicações tais como estimativa do LAI em várias épocas do ano (Curran *et al.*, 1992) ou mapeamento de áreas aridas ou modelação de taxas de recuperação de ecossistemas após fogo (Viedma *et al.*, 1997). No entanto, desde logo se verificou que sobretudo com imagens de satélite, a atmosfera e o solo podem afectar os valores do Índice de Vegetação (VI) e foram desde então efectuados diversos estudos no sentido de reduzir estes efeitos, nomeadamente através de algoritmos de correcção atmosférica (por exemplo os usados na secção 3.5.4). Castro (1997) refere também que como os efeitos da dispersão atmosférica são cumulativos, devem ser removidos antes de se aplicarem índices de vegetação, porque como estes consideram normalmente razões entre bandas, os seus efeitos seriam fortemente ampliados e sem hipótese de remoção posterior.

Existem muitos estudos que tentam relacionar a produtividade primária de povoamentos florestais com o LAI (Kozlowski *et al.*, 1991), ou com índices de vegetação (Richardson e Everitt, 1992), tendo sido testadas algumas equações de regressão para expressar essas relações (e.g. Gholz, 1982, Smith *et al.*, 1991, Burton *et al.*, 1991, Lucas, 1995). O ajustamento de equações de regressão relacionando LAI, VI e parâmetros dendrométricos tais como  $d$  (diâmetro à altura do peito, 1,30 m acima do solo),  $g$  (área basal viva) ou  $V$  (volume médio total), permitem estimar a produtividade primária dos povoamentos por DR à escala regional. Estas relações deverão no entanto ser validadas através de registos de sensores manuais (e.g. Sunfleck Ceptometer, Radiómetro VERM e IVP) (Decagon, 1989; Smith *et al.*, 1991), ou através de sensores em plataformas aéreas (ATM, CASI) ou plataformas de satélite (SPOT XS, Landsat TM e ETM+, NOAA AVHRR) (Hall *et al.*, 2003).

Aranha (1998) considerou vários Índices de Vegetação com aplicação potencial para o Pinheiro bravo. Após aferição de campo e processamento de imagem de satélite estabeleceu regressões com base no índice NDVI e também com as bandas VERM e IVP isoladamente, para estimar o LAI em Pinheiro bravo, na área do Alto Tâmega.

$$\text{Eq. 60} \quad \text{LAI} = 5.746 \cdot \text{NDVI}^{0.717}, \quad (r^2 = 0.291^*, \quad n = 40 \text{ e } \text{EQM} = 0.42 \text{m}^2/\text{m}^2)$$

$$\text{Eq. 61} \quad \text{LAI} = 3.772 \cdot \text{VERM}^{-0.559}, \quad (r^2 = 0.362^*, \quad n = 40 \text{ e } \text{EQM} = 0.41 \text{m}^2/\text{m}^2)$$

$$\text{Eq. 62} \quad \text{LAI} = 7.915 \cdot \text{IVP}^{-0.559}, \quad (r^2 = 0.235^*, \quad n = 40 \text{ e } \text{EQM} = 0.44 \text{m}^2/\text{m}^2)$$

O mesmo autor estabeleceu ainda relações entre LAI e área basal ( $G$ ) ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) e volume total ( $V_t$ ) ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ):

Eq. 63  $G=7.27 \cdot LAI^{1.397}$ , ( $r^2=0.339^{***}$ ,  $n = 40$  e  $EQM = 11.23m^2/ha$ )

Eq. 64  $V_t=7.27 \cdot LAI^{2.278}$ , ( $r^2=0.339^{***}$ ,  $n = 40$  e  $EQM = 11.23m^3/ha$ )

## **5.4 Inventário com base na medição de radiação solar dentro do povoamento e através de Detecção Remota**

### **5.4.1 Introdução**

Uma vez que o presente trabalho pretendeu apresentar uma metodologia de inventário florestal com base em fotografias aéreas e imagens de satélite, foi necessário medir a radiação fotossinteticamente activa no campo (dentro e fora do povoamento) como forma de relacionar a intersecção da radiação solar pela copa com as características biofísicas do povoamento. Verificando-se correlação significativa entre as características biofísicas do povoamento e a intersecção da PAR pela copa, então também será possível correlacionar a energia que é reflectida pelas copas, a qual foi também analisada através da informação registada por Detecção Remota (DR), com as mesmas variáveis. Assim, a intersecção da radiação solar pelas copas dos povoamentos foi medida no campo de forma absoluta com um ceptómetro e de forma relativa também com um ceptómetro e com fotografias hemisféricas.

Pretendia-se também recolher dados de reflectância da vegetação no terreno com um radiómetro “RED/FAR RED SKR 100/110” constituído por um sistema de dois canais de medição da luz: 660/730 nm (vermelho e infravermelho próximo) conforme foi feito por Aranha (1998) no Vale do Tâmega. No entanto a sua utilização viria a ser testada no Marão sem sucesso por dificuldades técnicas de manutenção e de calibração do aparelho, tendo sido abandonada. Também não foi tecnicamente possível utilizar um radiómetro multiespectral, que se antevia ter grande aplicabilidade, por não ter sido disponibilizado um aparelho a tempo de se fazerem as medições. Assim, os Índices de Vegetação e o LAI foram exclusivamente determinados através de imagens de DR, neste caso com as imagens de satélite Landsat ETM+ previamente corrigidas (correção geométrica, radiométrica e atmosférica) (secção 3.3.1).

Após a recolha e tratamento da informação procedeu-se a uma análise estatística semelhante à já utilizada atrás na secção 4.2.3 através do programa Microsoft Excel e do programa de estatística GraphPad Prism, para analisar a correlação conjunta entre as variáveis afins medidas

pelos vários tipos de inventário e comparando as suas médias utilizando-se um teste *t* de Student bi-caudal heterocedástico.

### 5.4.2 Recolha de dados de PAR com o ceptómetro

A estimativa do LAI através de equações invertidas (secção 5.3.2) foi realizada aplicando a equação invertida (Eq. 53) de Norman-Jarvis (Decagon Devices Inc., 1989) aos valores de PAR recolhidos com o ceptómetro no campo. Foi utilizado um ceptómetro modelo Sunfleck Ceptometer Delta-T Devices SF-80, constituído por 80 sensores espaçados de 1cm, sensíveis apenas à PAR (400-700nm), de utilização bastante simples. As medições com o ceptómetro foram realizadas apenas entre as 11:00h e as 13:30h, de forma a minimizar o ângulo zenital do Sol (ângulo formado entre a vertical e a radiação solar). Antes de se fazerem as medições dentro de cada parcela efectuaram-se as medições de controlo num estradão de acesso: Medição da PAR em pleno Sol (SolControlo PARMáx), Medição da PAR em sombra total (SombraControlo ParMin) debaixo do jeep (necessário para determinar a luz difusa). Seguidamente, dentro da parcela, mantendo a sonda do ceptómetro bem horizontal foram efectuadas várias medições de PAR: várias medições da PAR sob coberto das copas do povoamento (TPAR) de forma sistemática (um registo por cada 3 passos em redor do centro da parcela) e calculada a média por parcela; medição da PAR ao Sol em clareira dentro do povoamento (SPAR.Máx); medição da PAR à sombra dentro do povoamento (SPAR.Min) (à sombra dum tronco de árvore). Simultaneamente, era registada a hora exacta das leituras com o ceptómetro, para posterior determinação do ângulo zenital do Sol.

Com os dados obtidos determinou-se o LAI para cada parcela através do formulário apresentado no Anexo VIII, cujos resultados se apresentam nos Anexo XIII a Anexo XVI.

### Resultados

Conforme se apresenta no Quadro 104, relativamente à Bétula no Marão-Campeã – análise de correlação - foram encontradas correlações extremamente modestas entre as diversas formas de determinação do LAI e as variáveis dendrométricas, na maioria dos casos não significativas.

Quadro 104: Correlação entre as variáveis obtidas por ceptómetro e variáveis obtidas por outros processos para a Bétula (valores de *r* inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos) (n =14)

	N	$\bar{d}$	G	Vm	DCm	hd	LAI1	LAI2	LAI3
LAI1	-0.315	0.508 n.s. P= 0.0634	-0.005	0.177	-0.073	0.499	1.000		
LAI2	-0.016	0.230	0.169	0.367	-0.450	0.617 * P= 0.0188	0.866 *** P<0.0001	1.000	
LAI3	0.077	0.129	0.212	0.427	-0.528n.s. P= 0.0523	0.582 * P= 0.0289	0.794 *** P= 0.0007	0.988 *** P<0.0001	1.000

Também se verificou que as diversas formas de calcular a LAI não conduziam a diferenças significativas.

Bétula no Marão-Campeã - teste  $t$  de Student (probabilidade de 99%; n = 14):

H0: LAI1 ≠ LAI2? P= 0.0766 ⇒ Rejeição de H0

H0: LAI1 ≠ LAI3? P= 0.9915 ⇒ Rejeição de H0

H0: LAI2 ≠ LAI3? P= 0.1098 ⇒ Rejeição de H0

Conforme se observa no Quadro 105, para o Pinheiro negral no Marão-Campeã – análise de correlação - foram encontradas correlações significativas para 99% de probabilidade entre as diversas formas de determinação do LAI com as outras variáveis dendrométricas, na maioria dos casos não significativas.

Quadro 105: Correlação entre as variáveis obtidas por ceptómetro e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro negral (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos) (n =13)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	DCm	hd	LAI1	LAI2	LAI3
LAI1	0.443	0.231	0.690 ** P= 0.0090	0.899 *** P<0.0001	0.943 *** P<0.0001	0.210	0.747 ** P= 0.0034	1.000		
LAI2	0.281	0.244	0.646* P= 0.0170	0.809 *** P= 0.0008	0.808 *** P= 0.0008	0.105	0.589 * P= 0.0342	0.899 *** P<0.0001	1.000	
LAI3	0.233	0.234	0.629 * P=0.0213	0.781 ** P= 0.0016	0.779 ** P= 0.0017	0.098	0.562 * P= 0.0454	0.880 *** P<0.0001	0.998 *** P<0.0001	1.000

Também os valores de LAI apresentam correlações altamente significativas para 99% de probabilidade. Deverá ser feita por isso a comparação entre as suas médias e avaliada posteriormente a capacidade de utilização das variáveis para inferir valores dendrométricos físicos do povoamento.

Pinheiro negral no Marão-Campeã - teste  $t$  de Student (probabilidade de 99%):

H0: LAI1 ≠ LAI2? P= 0.1477, t=1.496, gl=24 ⇒ Rejeição de H0

H0: LAI1 ≠ LAI3? P= 0.8194, t=0.2308, gl=24 ⇒ Rejeição de H0

H0: LAI2 ≠ LAI3? P= 0.2357, t=1.216, gl=24 ⇒ Rejeição de H0

Relativamente ao Eucalipto em Amarante-Aboim, Quadro 106, encontraram-se correlações altamente significativas entre LAI2 e LAI3 e G e hd, embora não muito elevadas.

Quadro 106: Correlação entre as variáveis obtidas por ceptómetro e variáveis obtidas por outros processos para o Eucalipto (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	DCm	hd	LAI1	LAI2	LAI3
LAI1	0.403	0.178	0.440	0.496	0.422	0.031	0.470	1.000		
LAI2	0.450	0.183	0.456	0.537 *** P<0.0001	0.458	0.090	0.539 *** P<0.0001	0.924 *** P<0.0001	1.000	
LAI3	0.441	0.199	0.442	0.530 *** P<0.0001	0.453	0.072	0.537 *** P<0.0001	0.906 *** P<0.0001	0.997 *** P<0.0001	1.000

Tal como nos outros casos, a correlação entre os vários valores de LAI é altamente significativa e muito elevada. No entanto, ao contrário dos casos anteriormente apresentados, para esta espécie e neste local, as várias formas de calcular o LAI conduziram a resultados significativamente diferentes.

Eucalipto em Amarante-Aboim - teste **t** de Student (probabilidade de 99%):

H0: LAI1 ≠ LAI2? P=0.0002, t=3.873, gl=122 ⇒ Não se rejeita H0

H0: LAI1 ≠ LAI3 ? P=0.0275, t=2.231 gl=122 ⇒ Não se rejeita H0

H0: LAI2 ≠ LAI3? P= 0.1069, t=1.624 gl=122 ⇒ Rejeição de H0.

Conforme o observado no Quadro 107 para o Pinheiro bravo em Vidago-Boticas – análise de correlação - foram encontradas para o Pinheiro bravo em Vidago-Boticas correlações altamente significativas entre LAI1 e LAI2 com hd.

Quadro 107: Correlação entre as variáveis obtidas por ceptómetro e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro bravo (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	DCm	hd	LAI1	LAI2	LAI3
lai1	0.380	-0.010	0.226	0.292	0.349	0.293	0.520 *** P=0.0003	1.000		
lai2	0.350	-0.055	0.288	0.342	0.390	0.132	0.504 *** P=0.0004	0.916 *** P<0.0001	1.000	
lai3	0.341	-0.054	0.282	0.337	0.383	0.112	0.494	0.903 *** P<0.0001	0.999 *** P<0.0001	1.000

Tal como nos outros casos a correlação entre os vários valores de LAI é altamente significativa e as diferenças não significativas.

Pinheiro bravo em Vidago-Boticas - teste **t** de Student (probabilidade de 99%):

H0: LAI1 ≠ LAI2? P= 0.1975, t=1.2960, gl=122 ⇒ Rejeição de H0

H0: LAI1 ≠ LAI3? P= 0.8516, t=0.1874, gl=122 ⇒ Rejeição de H0

H0: LAI2 ≠ LAI3? P= 0.0912, t=1.7020, gl=122 ⇒ Rejeição de H0.

De modo geral não há diferenças significativas entre LAI1, LAI2 e LAI3. Apenas no Eucalipto se encontraram diferenças entre LAI1 e LAI2, facto que se poderá dever ao tipo e arranjo da copa destas árvores (copa pouco densa e irregular). Pode por isso considerar-se unitário o coeficiente de esfericidade das copas, facilitando a sua estimativa por se dispensarem as estimativas do diâmetro e da altura da copa. Aliás, este mesmo pressuposto já foi assumido pelo próprio fabricante do ceptómetro, (Decagon Devices Inc., 1989), e agora confirmado.

### **5.4.3 Abertura de copa por fotografias hemisféricas**

A estimação da abertura de copa para estimativa da LAI por equações invertidas foi também testada através da análise de fotografias hemisféricas. Uma vez que não se dispunha de equipamento e programas específicos para a aquisição e tratamento das fotografias hemisféricas, optou-se por utilizar uma câmara fotográfica digital Fujifilm S1 Pro digital de 35 mm com uma objectiva de 28 mm com campo de visão mais apertado. A câmara foi colocada num tripé no centro da parcela e com o eixo óptico vertical, orientada sistematicamente para Norte com uma bússola, e o disparo accionado com temporizador para evitar que as imagens ficassem tremidas. Regulou-se a focagem manualmente para o infinito, com grande profundidade de campo para evitar que os objectos mais próximos ficassem desfocados (valores de  $F$  elevados) (secção 3.2.1) e tempo de exposição longo para garantir uma adequada exposição. As fotografias hemisféricas foram captadas no período de 19 de Maio a 29 de Agosto de 2003, entre as 16:00h e as 17:00h, de forma a coincidir com um ângulo zenital do Sol próximo de  $57^\circ$  (Anexo LXII) e determinando o LAI através da equação invertida Eq. 58.

Não foram tiradas fotografias hemisféricas para todas as parcelas porque algumas arderam depois de terem sido inventariadas. Apresenta-se no Anexo XI o resumo dos valores obtidos para as parcelas medidas.

Por classificação digital automática separou-se o céu visível, restando os obstáculos do copado à penetração da luz (folhas, ramos e tronco) e posteriormente compararam-se e relacionaram-se os dados com os valores de LAI obtidos no terreno com o ceptómetro.

Uma vez que os programas de processamento digital de imagem (por exemplo o Idrisi Kilimanjaro) apenas permitem processar imagens quadradas ou rectangulares, após a aquisição das fotografias hemisféricas, foi cortada de ambos os lados uma porção igual, com centro no centro óptico da imagem. Para a medição da abertura de copa foram aplicados os algoritmos de classificação CLUSTER e ISOCLUSTER no Idrisi Kilimanjaro. A classificação automática com o módulo CLUSTER realizou uma “análise dos agregados” existentes numa imagem, neste caso numa composição colorida RGB, através da análise dos picos do seu histograma de frequência

(Eastman, 2003). O processo de aglutinação ISOCLUSTER classificou automaticamente a imagem por um processo iterativo, inicialmente proposto por Ball e Hall (1965) *in* Eastman (2003).

Foram testadas as três formas de agregação, das quais se apresenta o exemplo para a parcela 20 de Vidago (Figura 105): (i) Imagem original; (ii) CLUSTER - modo de generalização grosseiro. Neste modo, o tempo de processamento foi menor e a separação aparentou ser boa. Apresentou percentagens de não copa superiores aos obtidos pelos outros (17.33%); (iii) CLUSTER - modo de generalização fino. Neste caso deve-se limitar o número de agregados a um máximo de 6 para diminuir a confusão entre eles. A separação continuou a ser visualmente boa. Os valores das percentagens de não copa foram ligeiramente inferiores aos anteriores (14.98%); (iv) ISOCLUSTER. Este processo foi muito demorado, tendo-se encontrado os menores valores globais de percentagem de não copa (12.70%).

As diferenças de percentagem de não copa mantiveram sempre a mesma variação que a ilustrada no exemplo apresentado (parcela 20 de Vidago) e como o algoritmo ISOCLUSTER foi excessivamente moroso, optou-se por aplicar sistematicamente o segundo aglutinador às restantes parcelas – CLUSTER - modo de generalização fino.

Finalmente, deve referir-se ainda, que as medições de PAR para determinação da LAI com um ceptómetro foram feitas através de várias medições pontuais dentro da parcela, enquanto que as fotografias hemisféricas capturaram instantaneamente através dum campo de visão cónico toda ou pelo menos grande parte da parcela global<sup>58</sup>.

Conforme foi referido na secção 5.3.2, o coeficiente de extinção para a copa ( $k$ ) é igual a 1 para qualquer copa quando o ângulo zenital do Sol é cerca de 57°. Nessas condições pode então ser determinado o índice de área foliar com base na aplicação da Eq. 58. Assim, foram adquiridas fotografias hemisféricas durante o período do tempo que satisfizesse esse requisito e depois de processadas as fotografias hemisféricas e determinadas as densidades de copa determinaram-se os índices de área foliar que se apresentam no Anexo XII.

---

<sup>58</sup> Pode-se observar a partir da fotografia hemisférica que os troncos das árvores parecem estar a cair para o centro da parcela

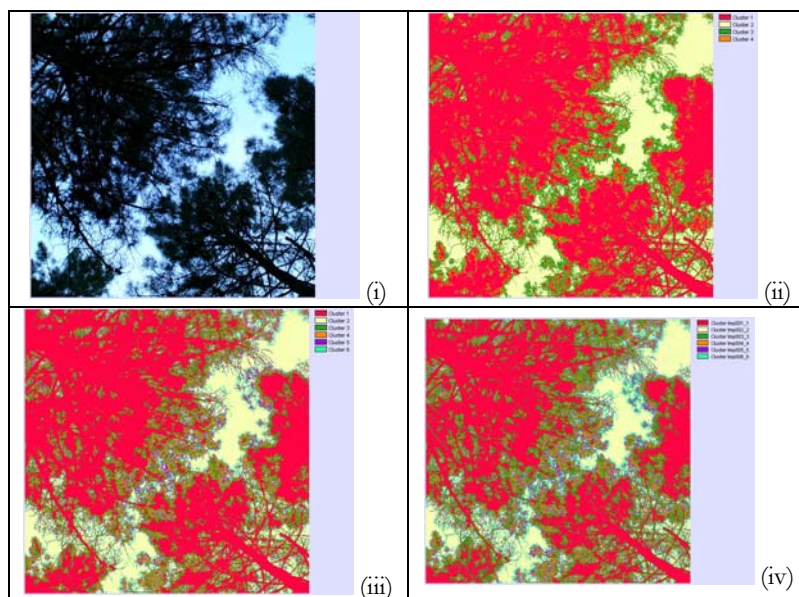


Figura 105: Processamento digital das fotografias hemisféricas (i) fotografia hemisférica, (ii) Cluster grosseiro, (iii) Cluster fino e (iv) IsoCluster. (cluster vermelho: copas; amarelo: céu visível; verde: auréola da copa; laranja: pontos de luz que atravessam as copas e cluster azul: pontos de luz na auréola da copa)

## Resultados

Relativamente à Bétula (Marão), como foram encontradas correlações extremamente modestas entre o LAI calculado com um ceptómetro no campo e as variáveis dendrométricas, não foram tiradas fotografias hemisféricas para esta espécie e local.

Para o Eucalipto em Amarante-Aboim, conforme o observado no Quadro seguinte, não foram encontradas correlações significativas entre a globalidade das variáveis. Conclui-se pois que a utilização das fotografias hemisféricas não se aplica a esta espécie tendo sido por isso rejeitada a sua aplicação.

Pela análise de correlação seguinte (Quadro 109) relativa ao Pinheiro bravo em Vidago-Boticas, pode também concluir-se que a utilização das fotografias hemisféricas também não se aplica, tendo sido por isso rejeitada a sua aplicação.

Já para o Pinheiro negral no Marão-Campeã – análise de correlação - foram encontradas correlações significativas entre os valores de DSDC\_H e LAI\_F\_H com as variáveis  $hd$  e  $V_m$ .

Conforme apresentado no Quadro 110, as restantes variáveis não estão correlacionadas.

Considerando a globalidade destes resultados optou-se por não se considerar a aplicação desta metodologia ainda que para o Pinheiro negral os resultados indicassem algum relacionamento entre as variáveis consideradas. Assim sendo, não foram comparadas as médias entre estes valores.

Quadro 108: Correlação entre as variáveis obtidas por fotografias hemisféricas e variáveis obtidas por outros processos para o Eucalipto (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos)

	t	N	$\bar{d}$	G	DCm	hd	Vm	LAI1	LAI2	LAI3
DSDC_H	0.09	0.30	0.15	0.29	0.04	0.19	0.17	0.06	0.15	0.16
LAI_F_H	-0.18	-0.27	-0.19	-0.29	0.01	-0.27	-0.20	-0.11	-0.18	-0.19

Quadro 109: Correlação entre as variáveis obtidas por fotografias hemisféricas e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro bravo (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos)

	t	N	$\bar{d}$	G	DCm	hd	Vm	LAI1	LAI2	LAI3
DSDC_H	0.17	-0.12	0.06	-0.15	-0.02	-0.27	-0.15	-0.35	-0.23	-0.22
LAI_F_H	-0.16	0.07	0.01	0.18	0.07	0.31	0.18	0.31	0.18	0.17

Quadro 110: Correlação entre as variáveis obtidas por fotografias hemisféricas e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro negral (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos)

	t	N	$\bar{d}$	G	DCm	hd	Vm	LAI1	LAI2	LAI3
DSDC_H	0.61 n.s. P= 0.1049	0.30	0.29	0.52	0.43	0.88 ** P= 0.0039	0.71 * P= 0.0485	0.63 n.s. P= 0.0935	0.55	0.51
LAI_F_H	-0.68 n.s. P= 0.0640	-0.24	-0.38	-0.58	-0.43	-0.89 ** P= 0.0034	-0.76 * P= 0.0300	-0.69 n.s. P= 0.0584	-0.62	-0.57

#### 5.4.4 Índices de vegetação em imagens de detecção remota

Após o processamento digital das imagens de satélite foi possível sobrepor-lhes as parcelas amostradas no terreno e por análise espacial recolher de forma automática o valor dos números digitais das bandas pancromático, vermelho e infravermelho e que correspondem aos valores de reflexão da vegetação nesse local para essa região do espectro electromagnético. O valor do índice de vegetação NDVI foi também calculado. Nesta fase do trabalho o SIG produzido demonstrou grande facilidade de extracção de dados, embora o tratamento prévio de toda a informação (dados de campo, ficheiros GPS, FAPMF, ortorrectificação de imagens, etc.) tenha sido um trabalho deveras fastidioso e moroso.

Os resultados obtidos até este ponto do trabalho apresentam-se nos Anexo XVII a Anexo XX. Dada a sua extensão, apresentando-se apenas nos quadros seguintes a análise estatística destes resultados.

### Resultados

#### Bétula no Marão-Campeã – análise de correlação

Também neste caso se retirou a idade da análise de correlação porque é constante para todos os povoamentos.

A informação da reflexão solar obtida através de sensores de satélite, neste caso Landsat ETM+, sobre Bétula no Marão-Campeã apenas se correlacionou bem com N e com  $\bar{d}$ .

Quadro 111: Correlação entre as variáveis obtidas por imagem de satélite e variáveis obtidas por outros processos para a Bétula (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos)

	N	$\bar{d}$	G	Vm	hd	LAI1	LAI2
Red	-0.202	-0.202	0.200	-0.103	0.024	0.316	0.111
IR	-0.566 * P= 0.0348	-0.566 * P=0.0321	0.573 n.s.	-0.245	-0.129	0.345	0.383
Pan	-0.568 * P= 0.0340	-0.568 * P=0.0318	0.574 n.s.	-0.296	-0.211	0.366	0.218
NDVI	-0.677 * P= 0.0078	-0.677 * P= 0.0142	0.637 n.s.	-0.307	-0.245	0.131	0.418

#### Pinheiro negral no Marão-Campeã – análise de correlação

A informação da reflexão solar obtida através de sensores de satélite, neste caso Landsat ETM+, sobre Pinheiro negral no Marão-Campeã apenas se correlacionou com  $\bar{d}$ .

Quadro 112: Correlação entre as variáveis obtidas por imagem de satélite e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro negral (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	hd	LAI1	LAI2
Red	-0.438	0.535 n.s. P>0.05	-0.530 n.s. P>0.05	-0.254	-0.239	-0.029	-0.094	-0.155
IR	-0.263	0.469	-0.604 * P= 0.0289	-0.345	-0.392	-0.195	-0.270	-0.348
Pan	-0.517	0.216	-0.601 * P= 0.0298	-0.487	-0.525 n.s. P>0.05	-0.214	-0.363	-0.558 * P= 0.0475
NDVI	0.494	-0.433	0.396	0.176	0.110	-0.109	-0.039	0.100

#### Eucalipto em Amarante-Aboim - análise de correlação

A informação da reflexão solar obtida através de sensores de satélite, neste caso Landsat ETM+, sobre Eucalipto em Amarante-Aboim correlacionou-se com um nível de significância muito elevado para a generalidade dos parâmetros dendrométricos obtidos no campo. Conforme já tinha sido apresentado em pontos anteriores, o estudo das características biofísicas dos povoamentos de eucalipto pode ser efectuado com base em medições de radiação solar e através de imagens de DR, o que abre muitas perspectivas à aplicação das metodologias desenvolvidas ao longo deste trabalho.

Quadro 113: Correlação entre as variáveis obtidas por imagem de satélite e variáveis obtidas por outros processos para o Eucalipto (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos) (n =62)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	hd	LAI1	LAI2
Red	-0.515 *** P<0.0001	-0.132	-0.595 *** P<0.0001	-0.652 *** P<0.0001	-0.601 *** P<0.0001	-0.644 *** P<0.0001	-0.589 *** P<0.0001	-0.633 *** P<0.0001
IR	-0.267* P= 0.0361	-0.328** P= 0.0094	-0.285*	-0.391**	-0.400**	-0.299*	-0.450***	-0.425***
Pan	-0.404** P= 0.0011	-0.277* P=	-0.444*** P= 0.0003	-0.538 *** P<0.0001	-0.530 *** P<0.0001	-0.510 *** P<0.0001	-0.592 *** P<0.0001	-0.625 *** P<0.0001
NDVI	0.535 *** P<0.0001	-0.019n.s. P= 0.8811	0.636*** P<0.0001	0.658 *** P<0.0001	0.586 *** P<0.0001	0.688 *** P<0.0001	0.580 *** P<0.0001	0.652 *** P<0.0001

### Pinheiro bravo em Vidago-Boticas – análise de correlação

A informação da reflexão solar obtida através de sensores de satélite, neste caso Landsat ETM+, sobre Pinheiro bravo em Vidago-Boticas não se correlacionou com nenhuma variável dendrométrica obtida no campo, contrariamente ao que seria de supor dadas as experiências realizadas por Aranha (1998). Este resultado pode dever-se ao facto das medições efectuadas por aquele autor se terem feito ao longo de todo o Alto Tâmega (192km<sup>2</sup>) e as medições que serviram de base a este trabalho se terem efectuado em áreas de estudo comparativamente muito mais pequenas, em manchas que arderam ou que foram sujeitas a corte.

O anteriormente exposto realça a característica regional das imagens de satélite com este tipo de resolução espacial. Os recentes avanços na criação de sensores com maior resolução espacial (Ikonos e QuickBird), associado à diminuição do custo de aquisição deste tipo de imagens, poderá abrir novas perspectivas mais optimistas. Este será um ponto a desenvolver em investigações futuras.

Quadro 114: Correlação entre as variáveis obtidas por imagem de satélite e variáveis obtidas por outros processos para o Pinheiro bravo (valores de r inferiores a 0.5 foram todos considerados não significativos)

	t	N	$\bar{d}$	G	Vm	hd	LAI1	LAI2
Red	0.161	-0.259	0.009	-0.138	-0.064	0.047	-0.130	-0.009
IR	0.261	-0.278	0.324	0.346	0.366	0.262	0.029	0.439
Pan	0.421	-0.371	0.402	0.326	0.458	0.367	0.032	0.376
NDVI	-0.072	0.173	0.100	0.284	0.213	0.059	0.161	0.204

## 5.5 Tabelas de volume aéreas

### 5.5.1 Introdução

Avery e Burkhart (1994) referem a possibilidade de se estabelecerem “tabelas de volume aéreas por hectare por estimativa do volume médio da árvore média (vg)”. No entanto, não

encontrámos qualquer referência portuguesa nesse sentido. Os mesmos autores referem também a possibilidade de estabelecimento de “tabelas de volume aéreas por hectare por ponderação de variáveis”. Também encontrámos poucas referências portuguesas sobre este assunto. São de realçar, no entanto, as experiências de Marques (1980) e Aranha (1998), que ajustaram rectas de regressão entre densidade de copa e volume por hectare de Pinheiro bravo em Carrazeda de Ansiães e no vale do Tâmega. Embora tenham simplesmente considerado o factor densidade de copa, enquadram-se neste grupo.

Teoricamente, deveria ter-se iniciado este trabalho com a cobertura aerofotográfica, seguindo-se a implantação sobre as fotografias aéreas das várias amostras a observar no terreno. As condições impostas neste estudo não o permitiram, por razões sobretudo ligadas à dificuldade inicial em adquirir fotografias com qualidade. Assim, optou-se por se iniciar o inventário florestal em 2001, continuado em 2002 e terminado em 2003. Apenas neste último ano se conseguiram obter fotografias aéreas de excelente qualidade. Por isso, as séries de dados utilizadas são relativamente pequenas porque não se dispunha da informação necessária para todas as parcelas amostradas por inventário convencional.

### 5.5.2 Métodos

Contrariamente ao que aconteceu com as tabelas hipsométricas e de volume, em que foram aplicadas várias equações lineares e não lineares propostas na literatura, neste ponto a metodologia baseou-se em processos iterativos de regressão (linear ou não).

O primeiro tipo de tabela de volume aérea - **tabelas de volume aéreas por hectare por estimativa do volume médio da árvore média**, foi apenas considerado quando ocorreu correlação significativa entre os pares de variáveis  $hd$  e  $htm$ ,  $hCAD$  e  $hd$ , e  $\bar{d}$  e  $htm$ . Isto porque se pretendia estimar o volume do povoamento com base na equação previamente estabelecida (Capítulo 4) mas recorrendo a estimativas do  $d$  a partir de medições de  $htm$  na FAPMF. Como sobre estas só é correcto avaliar a altura das árvores dominantes, foi necessário ajustar equações de regressão entre os pares de variáveis  $hd$  e  $htm$ ,  $hCAD$  e  $hd$ , e  $\bar{d}$  e  $htm$ .

Assim, estimou-se  $htm$  a partir de  $hCAD$ , estimou-se o  $d$  através da inversão da equação hipsométrica estabelecida, e estimou-se o  $vg$  aplicando a equação de volume de simples entrada também previamente estabelecida (Capítulo 4). Por fim, o volume por hectare foi estimado multiplicando  $vg$  por  $Nj\_F$ .

Para o segundo tipo de tabela de volume aérea - **tabelas de volume aéreas por hectare por ponderação de variáveis**, foram ajustadas equações de regressão através da minimização dos quadrados dos desvios entre os volumes por hectare medidos no terreno (variável dependente) e

os volumes por hectare estimados, considerando como estimadores todos os parâmetros passíveis de serem medidos através de FAPMF de grande escala, devidamente ponderados e associados por um processo empírico (variável independente).

Os parâmetros medidos sobre a FAPMF foram o número de árvores ( $N_{j\_F}$ ), a densidade de copas ( $D_{sdC\_F}$ ), a altura total das árvores dominantes ( $h_{CAD}$ ) e o diâmetro de copa das árvores dominantes ( $DC\_F$ ).

A selecção do melhor modelo de regressão entre a variável dependente volume por hectare ( $m^3$ ) e as variáveis independentes medidas na FAPMF baseou-se nas estatísticas associadas à análise de regressão: o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro residual ( $S_{yx}$ ) (Secção A.3 em Anexo).

### 5.5.3 Resultados e discussão

#### Bétula (Marão-Campeã)

Não foi possível produzir para esta espécie e local qualquer tabela de volume aérea. Tinha-se já constatado ausência de correlação entre as variáveis com interesse (ver secção 4.2.3, Quadro 33), razão para esse insucesso. Ainda que as correlações entre  $h_{tm}$ ,  $h_d$ ,  $h_{tDr}$  e  $\bar{d}$ , tenham sido reduzidas foram realizadas tentativas de ajustamento entre elas, cujos resultados se remetem para anexo (Anexo VII). Considerando ainda assim que pudesse haver alguma associação conjunta entre as variáveis, tentou-se através duma análise empírica ajustar vários modelos de regressão utilizando como variável dependente o volume por hectare ( $V$ ) e como independente ( $X$ ) combinações de variáveis medidas sobre a FAPMF. No entanto, não foi possível estabelecer uma equação aceitável de volume aérea. Das várias tentativas, aquela que apresentou o valor mais alto de  $R^2$ , ainda que não satisfatório, foi obtida com a seguinte equação:

Equação de regressão:

$$V = f(X) \text{ com } X = (D_{sdC\_F}^4) \cdot (h_{Cad}^3 \cdot n_{j\_F}^2) \cdot (DC\_F);$$

$$V = -0.0001 \cdot X^2 + 0.2001 \cdot X + 101.4; V_{mr} = 136.90 m^3/ha; V_{me} = 136.88 m^3/ha; R^2 = 0.27^*; n = 16; S_{yx} = 39.11 m^3/ha; MAR = 32.22 m^3/ha; KS = 0.2319; P > 0.10; n.s. (\alpha = 0.05).$$

A ausência de correlação (Quadro 33) entre as variáveis  $h_{tm}$ ,  $h_d$ ,  $h_{tDr}$  e  $\bar{d}$ , e também ausência de ajustamento entre elas (Anexo VII) e ainda a também baixa correlação entre LAI1, LAI2 e LAI3 e as restantes variáveis, impossibilitou o estabelecimento de qualquer tipo de equação de regressão alternativa aceitável para a Bétula no Marão-Campeã.

## Pinheiro negral (Marão-Campeã)

Neste caso, e tal como se constatou na secção 4.2.3 (Quadro 47) e na secção 5.4.2 (Quadro 105), houve boa correlação dos dados necessários para o estabelecimento de tabelas de volume aéreas e outras equações de regressão.

### Tabelas de volume aéreas por estimativa de vg

O procedimento proposto para a criação de tabelas de volume aéreas por estimativa de vg implica que haja elevada correlação entre htm e hd porque a partir da FAPMF só é possível inferir directamente hd. Para esta espécie encontrou-se uma elevada correlação ( $r=0.803^{**}$ ) entre as variáveis dendrométricas htm e hd (ver Quadro 47 na secção 4.2.3). Ajustando htm em função de hd pudemos estimar htm e seguidamente estimar  $\bar{d}$  a partir da inversão da equação hipsométrica já anteriormente estabelecida (secção 4.2.3). Encontrado o valor de  $\bar{d}$  por este processo, aplicou-se a equação de volume de simples entrada previamente estabelecida (ver secção 4.2.3), possibilitando a construção duma tabela de volume aérea (ver Quadro 115).

Quadro 115: Tabela de volume aérea de simples entrada por estimativa de vg para o Pinheiro negral no Marão-Campeã (unidades = m<sup>3</sup>)

(1) classe de hd (m)	(2) htm_est (m)	(3) $\bar{d}$ _est (m)	(4) vgme (m <sup>3</sup> )
8.00	7.12	0.107	0.0009
10.00	8.72	0.142	0.0443
12.00	10.31	0.177	0.1092
14.00	11.91	0.212	0.1955
16.00	13.51	0.247	0.3033
18.00	15.10	0.282	0.4324
20.00	16.70	0.317	0.5830
22.00	18.30	0.353	0.7549

(1) Medido a partir da FAPMF

(2) **Equação para estimativa de htm com base em hd –**

htm = f(hd) (linear com ordenada na origem):  $htm = 0.7318 + 0.7984 \cdot hd$ ;

htmr =  $14.18 \pm 1.154m$ ;

htme =  $14.22 \pm 1.081$ ;

n=11 ;  $R^2=0.9597^{***}$ ;  $S_{yx}=1.137$ ;  $t=0.1062$ ;  $gl=10$ ;  $P=0.9175n.s.$

(3) **Equação hipsométrica –**

Prodan (1965) (não linear):  $h = d / (0.0108 + 0.026 \cdot d)$ ;

$h(m) = 15.07 \pm 0.3455$ ;

$hest(m) = 15.29 \pm 0.2873$ ;

n = 150;  $R^2=0.740^{***}$ ;  $S_{yx} = 2.180m$ ;  $t=1.254$ ;  $gl=149$ ;  $P=0.2120n.s.$

### **Equação hipsométrica inversa –**

(linear com ordenada na origem):  $d = -0.05029 + 0.02172 \cdot h_{est}$ ;

$\bar{d} = 0.2901 \pm 0.008658$ ;

$\bar{d}_{est}(m) = 0.2768 \pm 0.007529$ ;

$n = 150$ ;  $R^2 = 0.843^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.059m$ ;  $t = 1.162$ ;  $gl = 149$ ;  $P = 0.2461n.s.$

### **(4) Equação de volume de simples entrada –**

(linear sem ordenada na origem de simples entrada) (ver secção 4.2.3):  $v = -0.917 \cdot d + 8.676 \cdot d^2$ ;

$v_{imr} = 0.4354 \pm 0.03335m^3$ ;

$v_{gme} = 0.4314 \pm 0.03281m^3$ ;

$n = 183$ ;  $R^2 = 0.9827^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.076m^3$ ;  $t = 0.6469$ ;  $gl = 149$ ;  $P = 0.5187n.s.$

Informações adicionais relativas à tabela de volume aérea:

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Pinus nigra*

**Área de estudo:** Marão

**Tipo de amostragem:** sistemática

**Parcelas:** circulares de 500 m<sup>2</sup>

**Parcelas amostradas:** 12 parcelas

Medindo na FAPMF a altura dominante (hd), contando o número de árvores dentro da fotoparcela ( $n_{j\_F}$ ) e extrapolando esse número para o hectare ( $N_{j\_F}$ ), foi possível determinar o volume por hectare relativo a cada fotoparcela inventariada e extrapolar esse valor para o povoamento. Apresenta-se no Quadro 116 uma tabela indicando o volume por hectare ( $V_{me}$ ) do pinheiro negral resultante das medições sobre FAPMF para cada parcela medida no perímetro florestal de Marão e Meia Via, assim como o correspondente valor obtido por inventário convencional de campo ( $V_{mr}$ ).

Fez-se a comparação emparelhada das médias  $V_{me}$  e  $V_{mr}$  através dum teste  $t$  de Student verificando-se que as diferenças não são significativas ( $t = 1.325$ ,  $gl = 8$ ,  $P = 0.2218n.s.$  para  $\alpha = 0.05$ ), estando os valores reais e estimados muito correlacionados ( $r = 0.9266^{***}$ ).

Quadro 116: Volume por hectare do pinheiro negral resultante das medições sobre FAPMF para cada parcela medida

Parcela	Ano	Chave1	hCAD (m)	htm_est (m)	$\bar{d}_{est}$ (m)	vgme (m <sup>3</sup> )	Nj <sub>F</sub>	Vme (m <sup>3</sup> /ha)	Vmr (m <sup>3</sup> /ha)
3.27	2003	3272003	16.06	13.55	0.248	0.3068	820	251.607	326.63
3.28	2003	3282003	9.58	8.38	0.134	0.0334	740	24.739	62.82
3.30	2003	3302003	10.64	9.23	0.153	0.0628	1020	64.032	190.45
3.31	2003	3312003	18.75	15.70	0.295	0.4864	580	282.090	282.60
3.32	2003	3322003	20.84	17.37	0.332	0.6526	780	509.017	458.31
3.38	2003	3382003	11.74	10.11	0.172	0.0996	880	87.639	71.08
3.41	2003	3412003	20.30	16.94	0.323	0.6074	800	485.919	581.31
3.50	2003	3502003	14.45	12.27	0.220	0.2179	780	169.978	229.43
3.51	2003	3512003	18.58	15.57	0.292	0.4739	480	227.458	162.86

Vmr = 281.02 m<sup>3</sup>/ha; Vme = 304.59 m<sup>3</sup>/ha ; Syx = 31.61m<sup>3</sup>/ha (com dados de campo)

Vmr = 262.83m<sup>3</sup>/ha; Vme = 233.61m<sup>3</sup>/ha; Syx = 55.24m<sup>3</sup>/ha; KS = 0.1175; P > 0.10; n.s. (com dados obtidos por FAPMF)

### Tabelas de volume aéreas por ponderação de variáveis

Através duma análise empírica foram ajustados vários modelos de regressão utilizando como variável depende o volume por hectare (V) e como independente (X) combinações de variáveis medidas sobre a FAPMF e seleccionada a equação de regressão que maximizou R<sup>2</sup> e minimizou Syx, tendo-se obtido o modelo abaixo representado:

Equação de regressão: V = f (X) com X= (hCad<sup>2</sup> ·DC<sub>F</sub>/DsdC)

V = 0.1074 ·X+28.954; Vmr=292.2m<sup>3</sup>/ha; Vme=292.2m<sup>3</sup>/ha; R<sup>2</sup>=0.81\*\*\*, n =11; Syx =68.77m<sup>3</sup>/ha; KS =0.1452; P > 0.10; n.s. ; (alpha = 0.05)

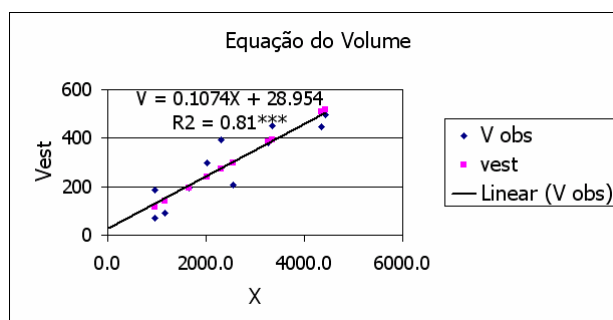


Figura 106: Equação de volume para o Pinheiro nigra (Marão) (unidades = m<sup>3</sup>/ha)

Pela análise destes resultados, verificou-se que nos povoamentos de Pinheiro negral no Marão-Campeã houve um bom ajustamento entre o volume por hectare e o factor combinado de variáveis medidas através de FAPMF. Fez-se a comparação emparelhada das médias Vme e Vmr através dum teste *t* de Student verificando-se que as diferenças não são significativas (t=0.00003591, gl=10, P=1.0000n.s. para alpha = 0.05), havendo ainda uma grande correlação entre os valores reais e estimados (r=0.8679\*\*\*). Embora esta relação só tenha aplicação local, permite ter

algum optimismo em relação às potencialidades destas metodologias, sobretudo quando aplicadas a povoamentos bem ordenados.

### Outras equações de regressão

Dadas as boas correlações encontradas entre as variáveis dendrométricas observadas no campo entre si e entre estas e o LAI ( $r_{(LAI1;V_m)}=0.943^{***}$ ), e ainda as correlações entre aquelas e a radiação PAN e o NDVI, ajustaram-se várias equações de regressão, das quais se apresentam apenas aquelas com  $R^2>0.5$  e com  $P<0.01$ .

Quadro 117: Equações de regressão para o Pinheiro negral com base em medições de PAR

Equação de regressão	Tipo	n	R <sup>2</sup>	Média	Syx	Unidades	t de Student
$V_m = -221.32 + 161.87 \cdot LAI1$	linear	13	0.86***	309.23	64.06	m <sup>3</sup> /ha	t=0.00004499 gl=12 P=1.0000n.s.
$V_m = e^{(2.95+2.00 \ln(LAI2))}$	não linear	13	0.82***	302.35	105.60	m <sup>3</sup> /ha	t=0.2460 gl=12 P=0.8099n.s.
$G = -7.59 + 15.78 \cdot LAI1$	linear	13	0.81***	44.14	7.48	m <sup>2</sup> /ha	t=0.0007740 gl=12 P=0.9994n.s.
$G = e^{(2.21+1.15 \ln(LAI2))}$	não linear	13	0.78***	43.44	9.52	m <sup>2</sup> /ha	t=0.2783 gl=12 P=0.7855n.s.
$\bar{d} = e^{(2.58+0.53 \ln(LAI1))}$	não linear	13	0.51***	24.40	3.75	cm	t=0.2375 gl=12 P=0.8163
$\bar{d} = e^{(2.56+0.48 \ln(LAI2))}$	não linear	13	0.51***	24.39	3.83	cm	t=0.2425 gl=12 P=0.8125n.s.
$hd = e^{(1.94+0.75 \ln(LAI1))}$	não linear	13	0.62**	16.90	2.92	m	t=0.2433 gl=12 P=0.8119n.s.
$htm = e^{(1.71+0.80 \ln(LAI1))}$	não linear	13	0.68***	14.25	2.14	m	t=0.2229 gl=12 P=0.8274n.s.
$htm = e^{(1.74+0.69 \ln(LAI2))}$	não linear	13	0.60**	14.20	2.62	m	t=0.2546 gl=12 P=0.8033n.s.

Para esta espécie os valores obtidos através de imagem de satélite não revelaram qualquer associação com os diversos parâmetros dendrométricos obtidos por inventário florestal clássico. Por sua vez, quer o LAI1 quer o LAI2 obtidos no campo, evidenciaram forte associação com os mesmos parâmetros. Os testes de *t* de Student de comparação de dados emparelhados não rejeitam a igualdade entre os valores reais e estimados. Assim, face a esses resultados, poderemos concluir que para esta espécie é possível realizar inferências estatísticas de vários parâmetros dendrométricos, que normalmente são obtidos por inventário de campo, através da medição da radiação fotossinteticamente activa retida pela copa com um ceptómetro.

### Eucalipto (Amarante-Aboim)

Conforme se observou na secção 4.2.3 (Quadro 63) e na secção 5.4.2 (Quadro 106), os dados obtidos para esta espécie potenciam um bom ajustamento de tabelas de volume aéreas e doutras equações de regressão.

## Tabelas de volume aéreas por estimativa de vg

Considerando as equações já estabelecidas para esta espécie (secção 4.2.3) e ainda a correlação com  $r=0.852^{***}$  entre as variáveis dendrométricas htm e hd (Quadro 63), foi produzida a seguinte tabela de volume aérea:

Quadro 118: Tabela de volume aérea de simples entrada

(1) classe de hd (m)	(2) htm_est (m)	(3) $\bar{d}_{est}$ (m)	(4) vgme (m <sup>3</sup> )
5.00	3.23	0.017	0.0006
7.00	5.14	0.032	0.0030
9.00	7.04	0.049	0.0084
11.00	8.94	0.068	0.0185
13.00	10.84	0.089	0.0349
15.00	12.74	0.110	0.0593
17.00	14.64	0.133	0.0938
19.00	16.54	0.157	0.1402
21.00	18.44	0.182	0.2007
23.00	20.35	0.208	0.2772
25.00	22.25	0.235	0.3720
27.00	24.15	0.262	0.4874
29.00	26.05	0.291	0.6255

(1) Medido a partir da FAPMF

(2) **Equação para estimativa de htm com base em hd –**

htm = f(hd) (linear com ordenada na origem):  $htm = -1.5183 + 0.9506 \cdot hd$ ;

htmr =  $13.10 \pm 0.9992m$ ;

htme =  $15.09 \pm 0.9362m$ ;

n=16 ;  $R^2=0.7260^{***}$ ;  $S_{yx}=2.324$ ;  $t=1.456$ ;  $gl=15$ ;  $P=0.1561n.s.$

(3) **Equação hipsométrica –**

Prodan (1965) (não linear):  $h = d / (0.0051 + 0.026 \cdot d)$ ;

ht =  $14.82 \pm 0.1578m$ ;

hest =  $14.52 \pm 0.1451m$ ;

n=725;  $R^2=0.923^{***}$ ;  $S_{yx}=1.654m$ ;  $MAR=1.369m$ ;  $t=1.358$ ;  $gl=724$ ;  $P=0.1745n.s.$

**Equação hipsométrica inversa –**

(logarítmica):  $d = e^{-5.6518 + 1.3547 \ln(h)}$ ;

$\bar{d} = 0.1102 \pm 0.001906m$ ;

$\bar{d}_{est} = 0.1089 \pm 0.001966m$ ;

n=725;  $R^2=0.8091^{***}$ ;  $S_{yx}=0.025m$ ;  $t=0.4537$ ;  $gl=724$ ;  $P=0.6501n.s.$

(4) **Equação de volume de simples entrada –**

(linear sem ordenada na origem de simples entrada) (ver secção 4.2.3):  $v = 12.608 \cdot d^{2.431}$ ;

$v_{mr}=0.06110\pm 0.002328m^3$ ;

$v_{gme}=0.06394\pm 0.002295m^3$ ;

$n=799$ ;  $R^2=0.8638^{***}$ ;  $S_{yx}=0.011m^3$ ;  $t=0.8692$ ;  $gl=798$ ;  $P=0.3849n.s.$

Informações adicionais relativas à tabela de volume aérea:

**Distrito:** Porto

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Eucalyptus globulus*

**Área de estudo:** Amarante – Aboim

**Tipo de amostragem:** sistemática

**Parcelas:** circulares de 500 m<sup>2</sup>

Apresenta-se no Quadro 119 uma tabela indicando o volume por hectare (Vme) do pinheiro negral resultante das medições sobre FAPMF para cada parcela medida nos povoamentos florestais de Amarante-Aboim, assim como o correspondente valor obtido por inventário convencional de campo (Vmr).

Fez-se a comparação das médias Vme e Vmr através dum teste *t* de Student verificando-se que as diferenças não são significativas ( $t=1.191$ ,  $gl=15$ ,  $P=0.2436n.s.$  para  $\alpha = 0.05$ ). Existe grande correlação entre ambos os valores, reais e estimados ( $r=0.9326^{***}$ ).

Quadro 119: Volume por hectare do eucalipto resultante das medições sobre FAPMF para cada parcela medida

Parcela	Ano	Chave1	hCAD (m)	htm_est (m)	$\bar{d}_{est}$ (m)	vgme (m <sup>3</sup> )	N <sub>j</sub> -F	Vme (m <sup>3</sup> /ha)	Vmr (m <sup>3</sup> /ha)
2.03	2002	2032002	14.21	11.99	0.102	0.0485	1120	54.34	25.88
2.04	2002	2042002	16.36	14.03	0.126	0.0815	1000	81.49	46.16
2.05	2002	2052002	17.57	15.18	0.140	0.1057	900	95.09	22.68
2.06	2002	2062002	15.32	13.04	0.114	0.0641	1520	97.43	91.59
2.08	2002	2082002	11.18	9.11	0.070	0.0197	960	18.87	19.08
2.09	2002	2092002	12.90	10.74	0.088	0.0338	1080	36.54	43.19
2.10	2002	2102002	12.06	9.94	0.079	0.0262	1000	26.21	23.54
2.11	2002	2112002	11.86	9.75	0.077	0.0246	1780	43.78	33.30
2.13	2002	2132002	11.33	9.25	0.071	0.0207	960	19.84	11.61
2.15	2002	2152002	7.10	5.23	0.033	0.0032	1040	3.29	16.01
2.16	2002	2162002	18.54	16.10	0.152	0.1284	1320	169.43	145.76
2.17	2002	2172002	19.92	17.42	0.169	0.1662	1120	186.14	130.44
2.21	2002	2212002	18.15	15.74	0.147	0.1190	1340	159.43	140.15
2.24	2002	2242002	19.15	16.69	0.159	0.1443	1200	173.13	129.47
2.26	2002	2262002	18.79	16.35	0.155	0.1348	1200	161.79	101.25
2.27	2002	2272002	17.84	15.45	0.143	0.1119	1200	134.23	92.14

$V_{mr} = 81.12m^3/ha$ ;  $V_{me} = 111.04m^3/ha$ ;  $S_{yx} = 39.41m^3/ha$  (com dados de campo)

$V_{mr} = 67.02m^3/ha$ ;  $V_{me} = 91.32m^3/ha$ ;  $S_{yx} = 36.94m^3/ha$ ;  $K_S = 0.1175$ ;  $P > 0.10$ ; n.s. ( $\alpha = 0.05$ ) (com dados obtidos por FAPMF)

## Tabelas de volume aéreas por ponderação de variáveis

Dos vários modelos de regressão analisados, foi seleccionado o seguinte:

Equação de regressão:  $V = f(X)$  com  $X = hCAD^2 \cdot DC_F \cdot n_F \cdot DsdC$

$V = 0.3072 \cdot X + 2.3925$ ;  $V_{mr} = 71.37 \text{ m}^3/\text{ha}$ ;  $V_{me} = 71.37 \text{ m}^3/\text{ha}$ ;  $R^2 = 0.85^{***}$ ,  $n = 16$ ;  $S_{yx} = 20.74 \text{ m}^3/\text{ha}$ ;  $KS = 0.1337$ ;  $P > 0.10$ ; n.s. ( $\alpha = 0.05$ )

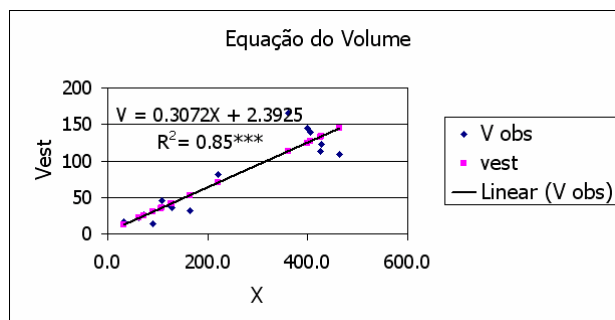


Figura 107: Equação de volume para o Eucalipto (Amarante - Aboim) - Vest ( $\text{m}^3/\text{ha}$ )

Conseguiu-se uma boa estimativa do volume por ponderação de variáveis. Fez-se a comparação emparelhada das médias  $V_{me}$  e  $V_{mr}$  através dum teste  $t$  de Student verificando-se que as diferenças não são significativas ( $t=0.0001250$ ,  $gl=15$ ,  $P=0.9999$  n.s. para  $\alpha = 0.05$ ), havendo ainda uma grande correlação entre ambas as médias ( $r=0.9244^{***}$ ).

Deverá ser continuado este estudo com base numa maior intensidade de amostragem porque os resultados foram animadores, embora se realce mais uma vez que este tipo de equações só tem aplicação local. A grande vantagem deste tipo de trabalho reside no facto de se poder estudar um povoamento de grandes dimensões com base num reduzido número de amostras de campo e na captação de FAPMF com baixos custos envolvidos.

## Outras equações de regressão

Dadas as boas correlações encontradas entre as variáveis dendrométricas medidas no campo, com o LAI, com a radiação PAN e com o NDVI, realizou-se o ajustamento destas variáveis, sendo apresentadas apenas aquelas que proporcionaram  $R^2 > 0.4$ .

Os resultados apresentados no Quadro 120 associados aos previamente apresentados em secções anteriores, mostram que esta espécie pode ser estudada com moderado sucesso com base em imagens de DR e que existe uma boa relação entre as variáveis biofísicas quer das árvores quer do povoamento e a reflexão da energia solar por parte da copa. Embora os testes de  $t$  de Student de comparação de dados emparelhados tenham confirmado a capacidade preditiva dos modelos propostos, não existindo diferenças significativas entre os valores reais e estimados, os coeficientes de determinação obtidos fazem-nos aceitar os resultados com algumas reservas.

Dado esta ser a terceira espécie florestal mais plantada em Portugal, pode-se antever um vasto campo de aplicação das metodologias desenvolvidas e testadas ao longo deste trabalho.

Quadro 120: Equações de regressão para o Eucalipto com base em medições de PAR e DR

Equação de regressão	Tipo	n	R <sup>2</sup>	Média	Syx	Unidades	t de Student
$LAI2 = -3.259 + 7.866 * NDVI$	linear	62	0.43***	1.92	0.53	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	t=0.0193 gl=61 P=0.9847n.s.
$Vm = e^{(7.15 + 7.39 * \ln(NDVI))}$	não linear	62	0.48***	68.82	56.87	m <sup>3</sup> /ha	t=1.760 gl=61 P=0.0835n.s.
$Vm = e^{(3.05 + 1.67 * \ln(LAI2))}$	não linear	62	0.43***	67.53	58.89	m <sup>3</sup> /ha	t=1.760 gl=61 P=0.0835n.s.
$G = e^{(4.36 + 4.74 * \ln(NDVI))}$	não linear	62	0.50***	11.51	5.24	m <sup>2</sup> /ha	t=1.337 gl=61 P=0.1861n.s.
$G = e^{(1.75 + 1.04 * \ln(LAI2))}$	não linear	62	0.43***	11.37	5.58	m <sup>2</sup> /ha	t=1.462 gl=61 P=0.1489n.s.
$htm = e^{(2.15 + 0.67 * \ln(LAI2))}$	não linear	62	0.45***	13.09	3.90	m	t=0.9328 gl=61 P=0.3546n.s.
$htm = e^{(3.74 + 2.83 * \ln(NDVI))}$	não linear	62	0.45***	13.09	3.85	m	t=0.9403 gl=61 P=0.3508n.s.

### Pinheiro bravo (Vidago-Boticas)

Neste caso, e tal como se constatou na secção 4.2.3 (Quadro 79) e na secção 5.4.2 (Quadro 107), houve boa correlação dos dados necessários para o estabelecimento de tabelas de volume aéreas e outras equações de regressão.

#### Tabelas de volume aéreas por estimativa de vg

Considerando as equações já estabelecidas para esta espécie (secção 4.2.3) e ainda a correlação de  $r=0.968***$  entre as variáveis dendrométricas htm e hd (Quadro 79), foi produzida a seguinte tabela de volume aérea:

Quadro 121: Tabela de volume aérea de simples entrada

(1) classe de hd (m)	(2) htm_est (m)	(3) $\bar{d}_{est}$ (m)	(4) vgme (m <sup>3</sup> )
9.00	8.07	0.097	0.0021
11.00	9.92	0.136	0.0517
13.00	11.77	0.181	0.1414
15.00	13.62	0.230	0.2821
17.00	15.47	0.283	0.4855
19.00	17.32	0.341	0.7635
21.00	19.18	0.402	1.1285
23.00	21.03	0.468	1.5932
25.00	22.88	0.538	2.1705
27.00	24.73	0.611	2.8739
29.00	26.58	0.688	3.7169
30.00	27.51	0.728	4.1952

(1) Medido a partir da FAPMF

**(2) Equação para estimativa de htm com base em hd –**

htm = f(hd) (linear com ordenada na origem):  $htm = -0.25976 + 0.9255 \cdot hd$ ;

$htmr = 13.75 \pm 0.5786m$ ;

$htme = 13.79 \pm 0.5695m$ ;

$n = 52$ ;  $R^2 = 0.968^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.591$ ;  $t = 0.05377$ ;  $gl = 51$ ;  $P = 0.9572n.s.$

**(3) Equação hipsométrica -**

Stoffels e Van Soest (1953) (não linear):  $h = e^{(3.841 + 1.775 \cdot \log d - 0.431 \cdot d)}$ ;

$h = 16.11 \pm 0.2374m$ ;

$hest = 15.94 \pm 0.2190$ ;

$n = 252$ ;  $R^2 = 0.7826^{***}$ ;  $S_{yx} = 1.706m$ ;  $t = 0.5174$ ;  $gl = 250$ ;  $P = 0.6051n.s.$

**Equação hipsométrica inversa –**

(linear com ordenada na origem): (não linear):  $d = e^{(-5.757 + 1.641 \cdot \ln(h))}$ ;

$\bar{d} = 28.35 \pm 1.039m$ ;

$\bar{d}_{est} = 28.26 \pm 1.050m$ ;

$n = 106$ ;  $R^2 = 0.9686^{***}$ ;  $S_{yx} = 1.726m$ ;  $t = 0.06056$ ;  $gl = 105$ ;  $P = 0.9518n.s.$

**(4) Equação de volume de simples entrada –**

Dissescu Meyer (linear sem ordenada na origem de simples entrada) (ver secção 4.2.3):  $v = 0.865 \cdot d + 9.115 \cdot d^2$ ;

$vimr = 0.3171 \pm 0.03316m^3$ ;

$vgme = 0.3086 \pm 0.03361m^3$ ;

$n = 81$ ;  $R^2 = 0.9347^{***}$ ;  $S_{yx} = 0.040m^3$ ;  $t = 0.1788$ ;  $gl = 80$ ;  $P = 0.8583n.s.$

Informações adicionais relativas à tabela de volume aérea:

**Distrito:** Vila Real

**Data de recolha de dados:** época estival dos anos 1995, 1996, 1997, 2001, 2002, 2003

**Espécie:** *Pinus pinaster* Ait.

**Área de estudo:** entre Vidago e Boticas

**Tipo de amostragem:** sistemática

**Parcelas** circulares de 500 m<sup>2</sup>

Apresenta-se no Quadro 122 uma tabela indicando o volume por hectare (Vme) do pinheiro negral resultante das medições sobre FAPMF para cada parcela medida nos povoamentos florestais de Amarante-Aboim, assim como o correspondente valor obtido por inventário convencional de campo (Vmr).

Quadro 122: Volume por hectare do Pinheiro bravo resultante das medições sobre FAPMF para cada parcela medida

Parcela	Ano	Chave1	hCAD (m)	htm_est (m)	$\bar{d}_{est}$ (m)	vgme (m <sup>3</sup> )	Nj <sub>F</sub>	Vme (m <sup>3</sup> /ha)	Vmr (m <sup>3</sup> /ha)
1.06	2001	1062001	10.75	9.69	0.131	0.0436	480	20.914	28.49
1.13	2002	1132002	12.71	11.50	0.174	0.1255	620	77.800	60.57
1.20	2002	1202002	19.16	17.47	0.346	0.7894	240	189.446	272.35
1.23	2002	1232002	26.67	24.42	0.599	2.7486	360	989.481	507.72
1.27	2001	1272001	20.68	18.88	0.392	1.0637	480	510.598	270.62
1.28	2002	1282002	9.76	8.77	0.112	0.0169	320	5.419	17.94
1.38	2002	1382002	16.39	14.91	0.266	0.4161	560	233.032	200.78
1.39	2002	1392002	13.43	12.17	0.191	0.1669	440	73.453	68.90
1.41	2002	1412002	20.81	19.00	0.396	1.0898	420	457.695	319.68
1.42	2002	1422002	16.58	15.09	0.271	0.4370	600	262.210	324.26
1.45	2001	1452001	16.75	15.24	0.276	0.4563	660	301.130	286.87
1.46	2002	1462002	17.14	15.60	0.287	0.5024	700	351.683	166.63
1.47	2002	1472002	19.12	17.44	0.344	0.7828	520	407.081	368.30
1.48	2002	1482002	15.58	14.16	0.245	0.3341	1400	467.784	389.06
1.48	2002	1482002	15.58	14.16	0.245	0.3341	1460	487.831	389.06
1.50	2002	1502002	13.85	12.56	0.201	0.1943	520	101.031	151.32

Vmr= 196.83 m<sup>3</sup>/ha; Vme=289.91 m<sup>3</sup>/ha; Syx = 117.48 m<sup>3</sup>/ha (com dados de campo)

Vmr= 238.91m<sup>3</sup>/ha; Vme= 308.54m<sup>3</sup>/ha; Syx = 163.76m<sup>3</sup>/ha; KS = 0.2120; P > 0.10; n.s. (alpha = 0.05) (com dados obtidos por FAPMF)

Fez-se a comparação emparelhada das médias Vme e Vmr através dum teste *t* de Student verificando-se que as diferenças não são significativas (t=1.976 , gl=15, P=0.0668 para alpha = 0.05), havendo inclusivamente uma grande correlação entre os valores reais e estimados (r=0.8787\*\*\*).

### Tabelas de volume aéreas por ponderação de variáveis

Dos vários modelos de regressão analisados para esta espécie, foi seleccionado o seguinte:

Equação de regressão:  $V = f(X)$  com  $X = hCad^2 \cdot DC\_F / DsdC\_F \ln(nj\_F)$

$Vm = 33.032 + 0.0269 \cdot X$ ;  $Vmr = 228.90 m^3/ha$ ;  $Vme = 228.90 m^3/ha$ ;  $R^2 = 0.78^{***}$ ,  $n = 15$ ;  $Syx = 70.31 m^3/ha$ ;  $KS = 0.2748$ ;  $P > 0.10$ ; n.s. (alpha = 0.05)

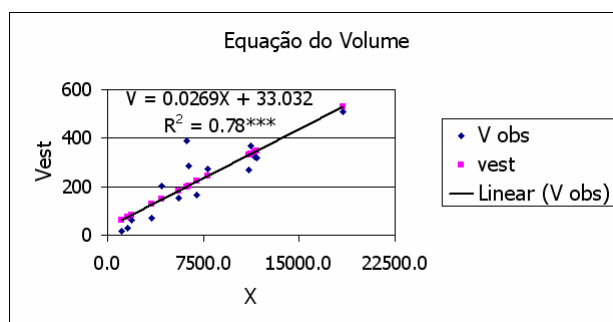


Figura 108: Equação de volume para o Pinheiro bravo (Vidago - Boticas) - gráfico dos resíduos e ajustamento da recta de regressão (tabela de volume aérea) (unidades = m<sup>3</sup>/ha)

Pela análise destes resultados, verifica-se que para os povoamentos de Pinheiro bravo em Vidago-Boticas houve um bom ajustamento na regressão entre o volume por hectare e o factor combinado de variáveis medidas através de FAPMF. Fez-se a comparação emparelhada das médias  $V_{me}$  e  $V_{mr}$  através dum teste  $t$  de Student verificando-se que as diferenças não são significativas ( $t=0.00003832$ ,  $gl=14$ ,  $P=1.0000$ n.s. para  $\alpha = 0.05$ ), havendo ainda uma grande correlação entre ambas as médias ( $r=0.8850^{***}$ ).

Trata-se duma relação cuja aplicação é apenas local, mas com interesse. Este estudo deverá por isso ser continuado e testada a hipótese de criação de equações deste tipo para várias classes etárias e de densidade. Mais uma vez se realça que estas aplicações poderiam ter maior sucesso se os povoamentos florestais fossem mais regulares e conduzidos segundo as boas práticas de ordenamento florestal.

### **Outras equações de regressão**

Dada a total ausência de correlação entre a  $DsdC\_F$  com as restantes variáveis e as baixas correlações entre  $LAI1$  e  $G$ , e  $V_m$ , e  $N$ , e  $hd$ , e entre  $PAN$  e  $G$  e  $V_m$ , apenas se analisou o ajustamento de regressões com estas. Dessa análise não resultaram quaisquer ajustamentos cujos valores de  $R^2$  fossem superiores a 0.4 (coeficiente de determinação).



## 6 CONCLUSÕES FINAIS

Os objectivos propostos inicialmente foram cumpridos integralmente, tendo sido mesmo ultrapassadas algumas das expectativas. Verificou-se que a tecnologia da Detecção Remota na gestão de povoamentos florestais ainda não esgotou a sua potencialidade, quer pela utilização das tecnologias de FAPMF, que tem sido muito pouco exploradas, quer pela utilização de imagens de satélite, as quais apresentam de dia para dia melhores características espectrais e espaciais. Verificou-se ainda neste estudo que as potencialidades de utilização da detecção remota na floresta foram muito além da mera cartografia de uso e ocupação do solo, tendo sido possível efectuar medições fiáveis de características físicas de povoamentos florestais, quer através de FAPMF quer através de imagens de satélite.

Relativamente à cartografia de uso e ocupação do solo, foi realizada com sucesso a fusão de imagens de satélite e fotografia aérea ortorrectificada digitalizada. A fusão permitiu manter a resolução espectral original sem a adulterar, melhorando a resolução espacial. Foram testadas várias formas de fusão com as seguintes razões de resolução espacial: 1 para 30, 5 para 30, 15 para 30. A primeira e a segunda resultaram da fusão entre fotografia aérea digitalizada ortorrectificada com imagens Landsat 5 e 7, ambas com resolução espacial de 30m. No primeiro caso foi considerada a resolução espacial original das fotografias e no segundo caso os seus pixels foram aglutinados resultando uma resolução espacial de 5m. No terceiro caso, fusão 15-30, resultou da fusão entre a banda pancromática com as restantes bandas multiespectrais do sensor Landsat ETM+. Embora a razão de 1 para 30 tenha sido de certa forma exagerada, a metodologia aplicada demonstrou mesmo assim bons resultados. Pela razão 5 para 30 obtiveram-se imagens com resolução espacial suficiente para a cartografia por vectorização visual à escala 1/10000, com a vantagem de serem comparativamente mais leves em termos de processamento digital. A razão de fusão 15 para 30 permitiu obter imagens apropriadas para o mapeamento regional de base, a qual foi complementada em pormenor pelas imagens resultantes das razões 1 ou 5 para 30. Esta tecnologia pode alargar-se a qualquer tipo de imagens de DR que registem energia electromagnética solar reflectida pela superfície terrestre desde que se apresente com igual georreferenciação.

Relativamente à tecnologia de Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato (FAPMF) ao longo deste estudo foram desenvolvidos dois suportes nos quais foi possível montar pelo menos uma câmara fotográfica para captar fotografia aérea vertical de pequeno formato. Embora tenha sido possível captar fotografias com ambos os suportes, aquele que foi expressamente concebido para ser montado na bagageira do Avião modelo Cessna 172 foi o mais eficiente, porque permitiu

utilizar três câmaras fotográficas em simultâneo, e fazer a comparação directa de três formatos de imagens (35mm e 70mm analógico e 35mm digital). Ao longo deste estudo foram testados vários tipos de películas fotográficas e filtros. Verificou-se que para o formato 35mm analógico, a melhor escolha de película foi a de sensibilidade de 200ASA positivo, que permitiu um bom compromisso entre a velocidade e granulometria. Já no formato 120 (70mm) analógico, porque as objectivas utilizadas eram mais luminosas e também porque a câmara fotográfica era de qualidade superior, foi possível utilizar uma película positivo de 100ASA, sem prejuízo da velocidade e com grão mais fino. Além disso, a escala resultante dos negativos neste formato foi maior, para uma área coberta sensivelmente igual, e a dimensão do negativo era também maior. Este resultado foi muito vantajoso, porque permitiu obter imagens com maior resolução no terreno, sendo o detalhe obtido suficiente para a realização de numerosas medições sobre a fotografia e posteriormente estimar com elas variáveis dendrométricas. A câmara digital SLR Fuji S1Pro apresentou algumas vantagens sobre as restantes, sobretudo pela possibilidade de obtenção de inúmeras fotografias sem necessidade de substituição de rolo e com a disponibilização imediata das imagens para processamento. A qualidade da imagem obtida foi mesmo superior à obtida pela câmara analógica de 35mm. Em relação a esta, apresentou apenas a desvantagem de não poder captar na região do infravermelho próximo. No entanto, essa desvantagem não foi efectiva neste estudo porque essa potencialidade não foi fundamental.

O sucesso das missões aerofotográficas só foi possível graças à integração dum sistema de navegação que permitiu sobrevoar os locais previamente estabelecidos. Este sistema foi desenvolvido pelo autor em colaboração com os Professores Luís Martins e Wolfgang Macedo da UTAD no âmbito do Projecto AGRO 172, intitulado “*Deteção remota da doença da tinta e cadastro da área de castanheiro na Terra Fria de Bragança e Padrela por fotografia aérea de infravermelho próximo*” Medida 8 - Desenvolvimento Tecnológico e Demonstração, Acção 8.1 - Desenvolvimento Experimental e Demonstração (DE&D), em curso até final de 2004.

Foram aplicadas com sucesso neste trabalho as tecnologias de fotogrametria digital, quer sobre FAC quer sobre FAPMF. O sucesso desta operação garantiu também o sucesso da realização de medições dendrométricas sobre FAPMF ortorrectificada, nomeadamente a medição de distâncias (DCm\_F) e densidades de copa (DsdC\_F). Para a ortorrectificação realçam-se os programas Orthoengine v.6.2 e Geomatica v.9.1 os quais demonstraram facilidade e eficiência quer na ortorrectificação, quer na exportação das imagens em vastos formatos georeferenciadas sobre sistemas de coordenadas portuguesas ou internacionais. Relativamente a este último ponto apresentaram excelente flexibilidade e compatibilidade.

Relativamente ao estabelecimento de curvas hipsométricas e tabelas de volume locais de simples e dupla entrada com dados obtidos em inventário de campo por Inventário Florestal Clássico, devemos referir que com os dados dendrométricos obtidos foi possível estabelecer para cada espécie e local uma curva hipsométrica, uma tabela de simples e outra de dupla entrada. Estas tabelas e curva são de aplicação local, e são apresentadas juntamente com os respectivos parâmetros da regressão. Estas regressões possibilitaram posteriormente o estabelecimento de tabelas de volume aéreas. O estabelecimento das curvas hipsométricas e tabelas de volume locais de simples e dupla entrada, embora não constituam uma inovação, foram de grande importância para o estudo, e podem ser aplicadas de futuro em trabalhos nesses locais, constituindo por isso outro valioso contributo deste estudo.

Relativamente à medição de parâmetros dendrométricos através de FAPMF (densidade de copa, densidade de árvores por hectare, altura total de árvores dominantes, e diâmetro de copa) (Avery e Burkhart, 1994, [http 8]) e estabelecimento de tabelas de volume aéreas, pode dizer-se que embora os conceitos associados não sejam inovadores, as metodologias aplicadas foram-no. Referimo-nos concretamente na utilização de FAPMF para esse fim que outrora ainda não tinha sido feita em Portugal e ainda à aplicação da metodologia de medição de alturas de árvores através do processo CAD, o qual também se pode considerar inovador embora os fundamentos teóricos sejam os mesmos das barras de paralaxe. Poderemos ainda considerar que a ortorrectificação de FAPMF não métricas embora já tivesse sido feita outrora por outros autores (por ex.: Graham & Mills, 1997, Baumker, *et al.*, 1997), nunca tinha sido feita especificamente para medição de parâmetros dendrométricos em Portugal. Relativamente à medição da densidade de copa, podem referir-se outros estudos como por exemplo Olthof *et al.* (1997) que utilizaram as medições de textura sobre FAPMF para estimar o LAI. No nosso estudo realizámos a separação das copas das árvores do que não era copa (solo nú ou mato) através de processos de tratamento digitais e semi-automáticos podendo ser também considerados como inovadores.

Relativamente ao Processamento Digital de Imagem (PDI). Estas tecnologias foram utilizadas para a fusão digital de imagens, tal como já foi referido. No entanto também foram utilizadas para a extracção de índices de vegetação por imagens de DR com os quais foi possível estabelecer alguma relação com parâmetros biofísicos dos povoamentos florestais. Essa tecnologia já não é inovadora mas foi ainda assim também utilizada neste estudo. No entanto, foram aplicados algoritmos de correcção atmosférica absolutos com sucesso, que podem viabilizar, por exemplo, a comparação directa entre imagens de distintas datas para avaliação de alterações no uso/ocupação do solo. Realça-se que a maioria dos estudos efectuados consultados durante a execução deste estudo apontavam para a utilização de processos relativos de correcção das

imagens sobretudo baseados na teoria inicialmente proposta por Chavez (1988). Relativamente ao estabelecimento de índices de vegetação apenas se determinou o já clássico e eficiente NDVI.

Relativamente à estimativa de Índices de Área Foliar (LAI) por processos não destrutivos, foram efectuadas medições de campo da quantidade de luz fotossinteticamente activa (PAR) retida pelo copado florestal com um ceptómetro. O procedimento embora também já não inovador foi fundamental para se estabelecer uma relação entre a medição da PAR directamente no terreno dentro do povoamento e a medição da mesma PAR através do seu registo sobre imagens de DR. Foi ainda avaliada a possibilidade de se estimar o LAI através da medição da percentagem de fecho do copado por fotografias hemisféricas captadas no campo, a qual embora referida por vários autores estrangeiros (Odum, 1997, Gill *et al.*, 1999, Gill *et al.*, 2000, Coops *et al.*, 2002, Lin e Chiang, 2002), nunca tinha sido realizada em Portugal. Embora a utilização desta última tecnologia não tivesse proporcionado os resultados que se esperavam, dadas as experiências dos autores consultados, esta técnica não deverá ser abandonada e por isso pretende-se alargar a sua aplicação a outros locais.

Relativamente à utilização dum Sistema de Informação Geográfica (SIG) associado a uma Base de Dados Relacional para integração global da informação. Efectivamente a gestão de tão vasto e complexo sistema de inventário só poderia ter sido feito com recurso a uma Base de Dados Relacional. Como praticamente toda a informação era passível de se georeferenciar a fusão entre as bases de dados e um SIG foi também fundamental e eficiente. Houve no entanto a necessidade de se conciliar um programa de SIG que pudesse fazer uma ligação directa com a bases de dados escolhida, neste caso o Microsoft Access 2000. A escolha do sistema Geomedia Professional v.5.0 demonstrou ser uma boa opção porque não só permitiu uma ligação biunívoca entre ambas as tabelas criadas (no SIG e na Base de dados) como também permitiu a programação numa linguagem também comum (neste caso Visual Basic). Além disso, as potencialidades de transformação de coordenadas apresentada por este SIG foram de extraordinária importância porque alguns dos sistemas utilizados (nomeadamente os sistemas de navegação por GPS) apresentavam incompatibilidades entre vários sistemas de georeferenciação, apenas permitindo o sistema WGS84. Através do SIG desenvolvido por este trabalho foi possível realizar ainda várias manipulações espaciais, operações de busca (consultas), filtrações de informação, criar uma interface amigável com o utilizador para a introdução e consulta da informação e finalmente, a não menos importante operação de elaboração de mapas finais, alguns dos quais apresentados ao longo desta tese.

## 7 REFERÊNCIAS

### 7.1 Referências Bibliográficas

- Ackermann, F. and H. Schade. 1993. Application of GPS for aerial triangulation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **59** (11): 1625-1632.
- Agroconsultores e Coba, 1991. Carta de solos. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Albuquerque, P.M., 1954. Carta Ecológica de Portugal. DGSA, Lisboa, Portugal. in Adaptação à base cartográfica do Atlas do Ambiente: CNA; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrográfico, 1984.
- Alves, A.A.M., 1988. Técnicas de produção florestal. INIC, 2ª Edição, Lisboa.
- Aranha, J.T.M., 1998. An integrated geographical information system for the Vale do Alto Tâmega (GISVAT). Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Kingston University. England.
- Aranha, J.T.M., Gonçalo, G.A., Lopes, D.M., 2001. Burnt areas identification and analysis by means of remotely sensed images classification. A case study in Northern Portugal. Pp. 629-641, In Proceedings of the First Annual Conference of the Remote Sensing & Photogrammetry Society, 12-14 de September, London. Edited by Remote Sensing & Photogrammetry Society 2001.
- Araújo, J.A.T., Figueiredo, T., Castro, J.P.M., 2004. Sistema de Informação Geográfica da Carta de Solos do Nordeste de Portugal. CICS2004 – I Congresso Ibérico da Ciência do Solo, Escola Superior Agrária de Bragança, 15 a 18 de Junho. [Póster].
- Aschbacher, J., Lichtenegger, J., 1990. Complementary nature of SAR and optical data: a case study in the Tropics. *Earth Observation Quarterly*. **38**:4-8
- Assmann, E., 1970. The principles of forest yield study. Trad. inglês: S.H. Gardiner. Pergamon Press, Oxford.
- Atlas do Ambiente, 1974a. Carta da Precipitação (Quantidade Total). Valores Médios Anuais (mm). Período 1931-1960. Serviço Meteorológico Nacional. 1974. Desenho e Montagem - D.G. dos Recursos Florestais; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrográfico, 1975.
- Atlas do Ambiente, 1974b. Carta da Temperatura (Temperatura média diária do ar). Valores Médios Anuais (graus centígrados). Período 1931-1960. Serviço Meteorológico Nacional. 1974. Desenho e Montagem - D.G. dos Recursos Florestais; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrográfico, 1975.
- Atlas do Ambiente, 1974c. Carta da Geada (Duração da época no ano agrícola - Outubro a Setembro). Valores Médios Anuais (meses). Período 1941-1960. Serviço Meteorológico Nacional. 1974. Desenho e Montagem - D.G. dos Recursos Florestais; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrográfico, 1975.
- Avery, T. E. e Burkhart, H. E., 1994. Forest Measurements. Fourth Edition. McGraw-Hill, Inc. New York. ISBN 0070025568.

- Avery, T.E. e Berlin, G.L., 1992. *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. V Ed. Macmillan Publishing Company. New York.
- Ball, G.H., and Hall, D.J., 1965. *A Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification*. Menlo Park, CA: Stanford Research Institute.
- Baret, F. e Guyot, G. 1991. Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and PAR Assessment. *Remote Sensing and Environment*. **35**:161-173.
- Baret, F., Clevers, J.G.P.W. e Steven, M.D., 1995. The Robustness of Canopy Gap Fraction Estimates from Red and Near-Infrared Reflectance: A Comparison of Approaches. *Remote Sensing and Environment*. **54**:141-151.
- Bassalo, G.H.M., Iochpe, C., Bigolin, N., 2002. Representando Esquemas de Bancos de Dados Geográficos no Formato Atributo-Valor para a Inferência de Padrões de Análise. Disponível em: [www.geoinfo.info/geoinfo2002/papers/bassalo.pdf](http://www.geoinfo.info/geoinfo2002/papers/bassalo.pdf)
- Bäumker, M. , Brechtken, R., Heimes, F.J., Richter, T., 1997. Practical experiences with a high-precision stabilized camera platform bases on INS/(D)GPS. *Proceedings of The First North American Symposium on Small Format Aerial Photography*, 14-17 October 1997. ASPRS. Minnesota, USA. pp.:45-54.
- Bloom, A., Fielding, E., Fu, X., 1988. A demonstration of stereophotogrammetry with combined SIR-B and Landsat-TM images. *International Journal of Remote Sensing*. N.º9. pp 1023-1038
- Bonhomme, R., C. V. Grancher, et al., 1974. Use of Hemispherical Photographs for Determining Leaf Area Index of Young Crops. *Photosynthetica* **8**(3): 299-301.
- Bonhomme, R., 1976. Determination of Leaf Area Index and Penetration of Solar-Radiation within Plant Canopies by Hemispherical Photographs Use. *Annales Agronomiques* **27**(1): 33-59.
- Broad, L.R. 1998. Allometry and growth. *Forest Science*. **44**(3):458-464.
- Brunner, A., 1998. A light model for spatially explicit forest stand models. *Forest Ecology and Management* **107**(1-3): 19-46.
- Burton, A.J., Pregitzer, K.S. e Reed, D.D., 1991. Leaf Area and Foliar Biomass. Relationships in Northern Hardwood Forests Located Along 800 Km Acid Deposition Gradient. *Forest Science*. **37**(4):1041-1059.
- Calado, N.J.G.G.M., 1997. Inventário e Cartografia dos Perímetros Florestais do Concelho de Ribeira de Pena. *Elaboração de Tabelas de Volume para a Espécie Pinus pinaster Ait. Relatório Final de Estágio*. UTAD. Vila Real. 95pp.
- Câmara, A., 2004. Realidade Aumentada e SIG. VIII Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica (ESIG2004). 2 - 4 de Junho, Tagus Park, Oeiras. Portugal (em publicação).
- Câmara, G. 1998. Modelagem Semântica: compreendendo as diferenças entre sistemas de geoprocessamento. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. S. José dos Campos. Brasil. Infogeo 4.
- Campbell, G.S. 1986. Extinction Coefficients for Radiation in Plant Canopies Calculated Using an Ellipsoidal Inclination Distribution. *Agriculture And Meteorology*. **36**:317-321.

- Cardoso, J.C., Marado, M.B., 1971. Carta de Solos do Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário. DGSA, Lisboa, Portugal. in Adaptação à base cartográfica do Atlas do Ambiente: CNA; Fotografia e Impressão - Instituto Hidrografico, 1978.
- Carper, W.J., Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., 1990. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT Panchromatic and multispectral image data. *ASPRS*. **54**(4):459-467.
- Castro, J. P. M. ; Martins, L. M. ; Aranha, J. T. ; Macedo, F W. , 2004. Sistema de Navegação para Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato. Silva Lusitana (submetido e aceite para publicação). INIAP.
- Castro, J. P. M. 1997. Cartografia do Uso do Solo em Zona de Montanha com recurso a detecção remota. Tese de Mestrado. UTAD. Vila Real. 87pp.
- Castro, J. P. M. e Aranha, J. T., 2004. Fusão de fotografias aéreas ortorrectificadas e imagens de satélite. VIII Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica (ESIG2004). 2 - 4 de Junho, Tagus Park, Oeiras. Portugal (em publicação).
- Castro, J.M.F., 2004. Estructura y Dinamica de los Elementos y Retículos Arbóreos en el Paisaje Rural Tradicional (Tras-os-Montes, Portugal). Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá.
- Chason, J. W., Baldocchi, D. D. and Huston, M. A., 1991. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agric. Forest Meteorol.*, **57**:107-128
- Chavez, P.S. Jr, 1986. Digital Merging of Landsat TM and Digitized NHAP Data for 1:24,000 - Scale Image Mapping. *ASPRS*. **52**(10):1637-1646.
- Chavez, P.S. Jr., Bowell, J.A., 1988. Comparison of the Spectral Information Content of Landsat Thematic Mapper and Spot for Three Different Sites in the Phoenix, Arizona Region. *ASPRS*. **54**(12):1699-1708.
- Chavez, P.S. Jr., Sides, S.C., Anderson, J.A., 1991. Comparison of Three Different Methods to Large Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. *ASPRS*. **57**(3):295-303.
- Chavez, P.S., 1996. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62**(9):1025-1036.
- Chuvieco, E., 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp, S.A. Madrid.
- Cicchetti, D.V., Allison, T., 1971. A New Procedure for Assessing Reliability of Scoring EEG Sleep Recordings. *American Journal of EEG Technology*, **11**, 101 -109.
- Clay, G.R.; Marsh, S.E. 2001. Monitoring Forest Transitions Using Scanned Ground Photographs as a Primary Data Source. *PERS*. **67**(3):319-330.
- Cliche, G., Bonn, F., 1985. Integration of the SPOT Panchromatic Channel into Its Multispectral Mode for Image Sharpness Enhancement. *ASPRS*. **51**(3):311-316.
- Codd, E. F., 1970. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. *Communications of the Association for Computing Machinery, Inc. (ACM)*, **13**(6):377-387. [http 50]
- Cogan, C.B., e Edwards, T.C., 1994. Metadata Standards for Gap Analysis. Gap Analysis Technical Bulletin 3. Fish and Wildlife Cooperative Unit, University of Idaho, Moscow, ID.
- Cohen, J., 1960. A Coefficient of Agreement of Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*. **20**(31): 37-46.

- Cohen, J., 1968. Weighted Kappa: nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological Bulletin*. **70**: 213-220.
- Congalton, R.G., Green, K., 1999. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Lewis Publishers. CRC Press, Inc. New York.
- Coops et al., 2002. *Assessing the Performance of HYPERIN in Relation to Eucalypt Biochemistry: Preliminary Project Design and Specifications*. Editor desconhecido. Austrália.
- Costa, L.F., César, R.M., 2001. *Shape Analysis and Classification: Theory and Practice*. CRC Press, Inc. New York.
- Costa, M.E.P., 1992. *Metodologias de Análise da Estrutura de Povoamentos Mistos*. Tese de Doutorado. UTL/ISA, Lisboa.
- Curran, P.J. 1992. *Principles of Remote Sensing*. Longman Scientific & Technical, Harlow. 282 p.
- Curran, P.J. e Foody, G.M. 1992. Seasonal LAI in Slash Pine Estimated with Landsat TM. *Remote Sensing and Environment*. **39**:3-13.
- D'Hainaut, L., 1997a. *Conceitos e Métodos da Estatística. Volume 1. Uma variável a uma dimensão*. 2ª edição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa
- D'Hainaut, L., 1997b. *Conceitos e Métodos da Estatística. Volume 2. Duas ou três variáveis segundo duas ou três dimensões*. 2ª edição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa
- Dagnelie, P., 1973a. *Estatística. Teoria e Métodos. 1. Publicações Europa América*. Lisboa.
- Dagnelie, P., 1973b. *Estatística. Teoria e Métodos. 2. Publicações Europa América*. Lisboa.
- David L. B. Jupp e Joe Walker, 1996. *Detecting Structural Changes in Woodlands and Forests: The Challenge for Remote Sensing and the Role of Geometric-Optical Modelling*.
- Decagon Devices, Inc, 1989. *Sunfleck Ceptometer – User Manual*. Delta-T Devices, Cambridge, England.
- Decagon Devices, Inc., 2000. *Sunfleck Ceptometer – User Manual*. Delta-T Devices, Cambridge, England.
- Dias, D., e Gazzaneo, G., 1975. *Projecto de Sistemas de Processamento de Dados*. Rio de Janeiro: LTC.
- Diciopédia 2003. *O Poder do Conhecimento*. Porto Editora, Lda., 2002. Porto
- Disperati, A. A., Mendes, C.J., Bernardi, D., Knapp, K.A., 1991. *Obtenção e uso de fotografias aéreas de pequeno formato*. Universidade Federal do Paraná. 1ª ed. Curitiba. 290 p.
- Disperati, A. A. 1991. *Experiência Inicial de mapeamento aéreo da Vespa-da-Madeira*. Seminário GIS BRASIL 98. Curitiba, Paraná, Brasil, 1998.
- Doruska, Paul F., 1998. *Methods for Quantitatively Describing Tree Crown Profiles of Loblolly pine (Pinus taeda L.)*. Dissertação de doutorado. Virginia Polytechnic Institute and State University. USA, 129 pp.
- Duguay, G., Holder, G., Howarth, P., LeDrew, E., 1987. *Integrating remotely sensed data from different sensors for change detection*. Proceedings of the I.E.E.E. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '87), Ann Arbor, U.S.A., 18-21 May 1987 (New York: I.E.E.E.).
- Eastman, J.R., 2003 (a). *IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing. Manual Version 14.00*. Clark Labs. Clark University. 950 Main Street. Worcester, MA. 01610-1477 USA

- Eastman, J.R., 2003 (b). IDRISI Kilimanjaro. Tutorial. Manual Version 14.00. Clark Labs. Clark University. 950 Main Street. Worcester, MA. 01610-1477 USA
- Ehlers, M., 1991. Multisensor Image Fusion Techniques In Remote-Sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. **46**(1):19-30.
- Ekin, W. H. 1988. A video tracking system for a light aircraft. *Photogrammetric Record* **12** (71): 575-588.
- Ekin, W. H. 1994. The use of a low cost GPS receiver for block aerial vertical photography. *Photogrammetric Record* **14** (84): 875-886.
- Fahsi, A., T. Tsegaye, W. Tadesse, T. Coleman. 1999. Incorporation of digital elevation models with Landsat-TM data to improve land cover classification accuracy. *Forest Ecology and Management* **128**:57-64.
- Fassnacht, K., Gower, S. T., Norman, J. M. and McMurtrie, R. E., 1994. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agric. For. Meteorol.* **71**:183-207.
- Fayyad, G., Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P., 1996. From data mining to discovery knowledge in databases. *AI Magazine*, **3**(17):37-54.
- Ferment, A., N. Picard, 2001. A comparison of five indirect methods for characterizing the light environment in a tropical forest. *Annals of Forest Science* **58**(8): 877-891.
- Fleiss, J.L., Cohen, J., Everitt, B.S., 1969. Large sample standard errors of kappa and weighted kappa. *Psychological Bulletin*. **72**:323-327.
- Fonseca, T.J.F., 1997. Estimação da Biomassa do Tronco em Eucalyptus globulus Labill. Tese de Mestrado. UTAD. Vila Real. 92pp.
- Fournier, R. A., P. M. Rich, 1997. Hierarchical characterization of canopy architecture for boreal forest." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* **102**(D24): 29445-29454.
- Franklin, S.E., 2001. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. CRC Press, Inc. New York.
- Franklin, S.E., Blodgett, C.F., 1993. An example of satellite multisensor data fusion. *Computers & Geosciences*. **19**(4):577-583.
- Franklin, S.E.; Maudie, A.J.; Lavigne, M.B., 2001. Using Spatial Co-Occurrence Texture to Increase Forest Structure and Species Composition Classification Accuracy. *ASPRS*. **67**(7):849-855.
- Furnival, G.M., 1961. An Index for Comparing Equations Used in Constructing Volume Tables. *For. Sci.*, **7**:337-341.
- Gering, L. R., McTague, J.P., 1988. Estimating stand density of loblolly pine in northern Louisiana using aerial photographs and probability proportional to size. In: *Technical Papers of 1988 Annual Convention of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*; **4**:222-228.
- Gering, Lawrence R., May, Dennis M., Teuber, Kurt B. 1989. The use of aerial photographs and angle-gauge sampling of tree crown diameters for forest inventory. In: *State-of-the-art methodology of forest inventory: a symposium proceedings*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: 286-289.
- Gholz, H.L., 1982. Environmental Limits on Aboveground Net Primary Production, Leaf Area, and Biomass in Vegetation Zones of the Pacific Northwest. *Ecology*. **63**(2):469-481

- Gholz, H.L., K. Nakane, e H. Shimoda (EDS). 1997. The use of remote sensing in the modeling of forest productivity. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 323 p.
- Gholz, H.L., Nakane, K., Shimoda, H., 1982. The Use of Remote Sensing in the Modelling of Forest Productivity. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands.
- Gilabert, A., Gandía, S., Segarra, D., Meliá, J., 1986. Análisis multitemporal de los valores de reflectividad en cultivos de cítricos mediante el sensor TM. Barcelona. I Reunión Científico del Grupo de Trabajo en Teledetección. Pp. 237-250.
- Gill, S.J., Biging, G. S., Murphy, E. C., 2000. Modeling conifer tree crown radius estimating canopy cover. *Forest Ecology and Management*. **126**:405-416.
- Giorgianni, E.J., and T.E. Madden. 1998. Digital Color Management: Encoding solutions. Addison - Wesley Press, Reading, Massachusetts.
- Goetz, A.F.H., Kindel, B. e Pilewskie, P., 1998. Issues in Absolute Spectral Radiometric Calibration: Intercomparison of Eight Sources. Seventh AVIRIS Conference, Pasadena, California.
- Gong, P., Pu, R. e Miller, J.R. 1995. Coniferous Forest Leaf Area Index Estimation along the Oregon Transept Using Compact Airborne Spectrographic Imager Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. **61**(9):1107-1117.
- Gong, P., Sheng, Y. e Biging, G.S., 2002. 3D Model-Based Tree Measurement from High-Resolution Aerial Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **68**(11):1203-1212.
- Goudriaan, J., 1977. Crop Micrometeorology: A Simulation Study, Center for Agriculture Publication Documentation, Wageningen, The Netherlands.
- Graham, R. e Mills, J., 1997. Experiences with airborne digital photography for photogrammetry and GIS. Proceedings of The First North American Symposium on Small Format Aerial Photography, 14-17 October 1997. ASPRS. Minnesota, USA. pp.: 17-36
- Graham, R. W., 1995. "Kodak Digital Cameras for Small Format Aerial-Photography." *Photogrammetric Record* **15**(86):325-327.
- Graham, R. W., Koh, A., 2002. Digital Aerial Survey: Theory and Practice. Lewis Publishers. CRC Press, Inc. New York.
- Graham, R. W., Read, R., 2002. Manual of Aerial Survey: Primary Data Acquisition. 2.<sup>a</sup> Ed. Lewis Publishers. CRC Press, Inc. New York.
- Gregoire, T.G., H.T. Valentine, e G.M. Furnival. 1995. Sampling methods to estimate foliage and characteristics of individual trees. *Ecology* **76**(4):1181-1194.
- Hale, S. E. and C. Edwards, 2002. Comparison of film and digital hemispherical photography across a wide range of canopy densities. *Agricultural and Forest Meteorology* **112**(1): 51-56.
- Hall, R. J., D. P. Davidson, 2003. Ground and remote estimation of leaf area index in Rocky Mountain forest stands, Kananaskis, Alberta. *Canadian Journal of Remote Sensing* **29**(3): 411-427.
- Hégarat-Masclé, S., Quesney, A., Vidal-Madjar, D., Taconet, O., Normand, M., Loumagne, C., 2000. Land cover discrimination from multitemporal ERS images and multispectral Landsat images: a study case in a agricultural area in France. *International Journal of Remote Sensing* **21**(3):435-456.

- Heimes, F. J., R. Brechtken e R. Puruckherr. 1992. Computer controlled survey flight based on a low cost GPS C/A code receiver. *Photogrammetric Record* **14** (80):293-301.
- Henry, J. B., Malet, J. P., Maquaire, O., Grussenmeyer, P., 2002. The use of small-format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas: Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms* **27**(12):1339-1350.
- Hoffman, R.R., Markman, A.B., 2001. *Interpreting Remote Sensing Imagery: Human Factors*. CRC Press, Inc. New York.
- Hungenford, R.D., Nemani, R.R., Running, S.W., e Coughlan, J., 1989. *MTCLIM: A Mountain Microclimate Simulation Model*. Research Paper, International Research Station, United States Department of Agriculture, Forest Service.
- Iliffe, J.C., 2000. *Datums and Map Projections For Remote Sensing, GIS and Surveying*. CRC Press, Inc. New York.
- Intergraph, sem data. *Manual do programa IRAS/C*. Intergraph. USA.
- Jensen, John, R., 1996. *Introductory Digital Image Processing - A Remote Sensing Perspective*. II ed. Prentice Hall. USA
- Knapp, K.A., Disperati, A, Hoppus, M., 1997. Evaluation of a Color Infrared Digital Camera System for Forest Health Protection Applications in the Western United States and Southern Brazil. *Proceedings of The First North American Symposium on Small Format Aerial Photography*, 14-17 October 1997. ASPRS. Minnesota, USA. pp.: 80-90.
- Kozlowski, T., Kramer, P.J., e Pallardy, S.G. 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. Academic Press, Inc. San Diego, New York, USA.
- Lang, A. R. G. and Xiang, Y., 1986. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agric. For. Meteorol.*, **37**:229- 243.
- Langford, M., 1996. "Fotografia Básica". Dinalivro. Lisboa
- Larcher, W., 1977. *Ecofisiologia Vegetal*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, Spain.
- Leckie, 1990. Land cover discrimination from multitemporal ERS images and multispectral Landsat images: a study case in a agricultural area in France. *International Journal of Remote Sensing*. **21**(3):435-456.
- Lillesand, T. M. e Kiefer, R. W., 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 1ª Ed. John Wiley & Sons. U.S.A.
- Lillesand, T. M. e Kiefer, R. W., 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 4ª Ed. John Wiley & Sons. U.S.A.
- Lin T.C., Chiang J.M., 2002. Applications of hemispherical photographs in studies of forest ecology. *Taiwan Journal for Science*, **17**(3):387-400.
- Loetsch, F., F. Zöhrer e K. Haller, 1974. *Forest Inventory*. 2, BLV Verlagsgellschaft, München, 469pp.
- Lopes, D.M.M., 1999. *Avaliação de parâmetros dendrométricos em povoamentos de Pinus Pinaster Ait. a partir de imagens Landsat TM*. Tese de Mestrado. UTAD.

- Lucas, N.S., 1995. Coupling Remotely Sensed Data to a Forest Ecosystem Simulation Model. Ph.D Thesis, University of Wales, Swansea. England.
- Macedo, F.W., 1997. Detecção Remota de Recursos Florestais em Portugal: Realidades e Perspectivas. *Silva Lusitana*. EFN, Lisboa, Portugal. **5**(2): 257-273.
- MapSite, 2001. MapSite™. Global Map-User Software, User Guide. Stellar Navigation Systems Inc., Ontario, 70p.
- Marques, C.P., 1980. Aplicação do Método das Tabelas de Volume Aéreas. (Inventário de Povoamentos Regulares de Pinheiro bravo no concelho de Carrazeda de Ansiães, distrito de Bragança). Instituto Universitário de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Marques, C.P., 1987. Qualidade das Estações Florestais. Povoamentos do Pinheiro bravo no Vale do Tâmega. Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Marques, C.P., 1996. Apontamentos de Detecção Remota. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Marques, C.P., Lopes, D., Fonseca, T., 2001. Apontamentos de Inventário Florestal. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Martens, S. N., S. L. Ustin, and R. A. Rousseau, 1993, Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *Forest Ecology and Management*.
- Martins, L.M., Lufinha, C.P., Marques, C.P., Abreu, C.G., 2001. Small format aerial photography to assess chestnut ink disease. *For. Snow Landsc. Res.* **76**(3): 357-360.
- Martins, L.M., Castro, J.P.M., 2002. Fotografia aérea de pequeno formato para auxílio na gestão e qualificação do espaço urbano. *In: Quinzena da Ciência e Tecnologia*, 18-30 Novembro, UTAD, Vila Real (póster).
- Mascarenhas, N.D.A., Banon, G.J.F., Candeias, A.L.B., 1996. Multispectral image data fusion under a Bayesian approach. *International Journal of Remote Sensing*. **17**(8):1457-1471.
- McTague, J.P., 1988. Estimation of stand density with probability proportional to size from aerial photography. *West. J. Appl. For.* **3**(3):89-92.
- Myers, R.H., 1986. *Classical and Modern Regression with Applications*. PWS Publishers, USA, 359pp.
- Motulsky, H.J., 2003. *Prism 4 Statistical Guide – Statistical Analyses for laboratory and clinical researchers*. GraphPad Software Inc., San Diego CA.
- Naesset, E., 1996. Use of the weighted Kappa coefficient in classification error assessment of thematic maps. *International Journal of Geographical Information Systems*. **10**(5):591-604.
- Nekel, H. e D. Labs, 1984. The Solar Radiation between 3300 and 12500 Angstroms, *Solar Physics*, **90**(205).
- Nemani, R.R. e Running, S.W., 1989. Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation. *Agric. For. Meteorol.*, **44**:245-260.
- Nemani, R.R., Pierce, L., Running, S. e Band, L., 1993. Forest Ecosystem Processes at the Watershed Scale: Sensitivity to Remotely-sensed Leaf Area Index Estimates. *International Journal Of Remote Sensing*. **14**(13):2519-2534.

- Neter, J.W., Wasserman e M.H. Kutner, 1983. Applied linear regression models. IRWIN, USA, 547pp.
- Neumann, H. H., Den Hartog, G. and Shaw, R. H., 1989. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. *Agric. Forest Meteorol.*, **45**:325-345.
- Nilson T., 1999. Inversion of Gap Frequency Data in Forest Stands. *Agricultural and Forest Meteorology* **98-99**:437-448.
- Nilson T., Anniste J., Lang M., Praks J., 1999. Determination of Needle Area Indices of Coniferous Forest Canopies in the NOPEX Region by Ground-Based Optical Measurements and Satellite Images. *Agricultural and Forest Meteorology* **98-99**:449-462.
- Nilson, T. and Peterson, U., 1991. A forest reflectance model and a test case. *Remote Sens. Environ.*, **37**:131-142.
- Norgren, O., B. Elfving e O. Olsson. 1995. Non-destructive biomass estimation of tree seedlings using image analysis. *Scand. J. FOR. RES.* **10**:347-352.
- Norman, J. M. e G. S. Campbell, 1989. Canopy Structure. In: R. W. Pearcy, J. Ehleringer, H. A. Mooney and P. W. Rundel (Eds.), *Plant Physiological Ecology: field methods and instrumentation*. Chapman and Hall, New York, pp. 301-325.
- Odum, E. P., 1997. *Fundamentos de Ecologia*. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.
- Olthof, I, King e D.J., 1997. Evaluation of textural information in airborne CIR digital camera imagery for estimation of forest stand leaf area index. *Proceedings of The First North American Symposium on Small Format Aerial Photography*, 14-17 October 1997. ASPRS. Minnesota, USA. pp.: 154-164.
- Pardé, J. e Bouchon, J., 1988. *Dendrométrie*. École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 2<sup>a</sup> Edicção, Nancy.
- Parresol, B. R., 1999. Assessing Tree and Stand Biomass: A Review With Examples and Critical Comparisons. *Forest Science.* **45**(4):573-593.
- Patrício, M.S.F., 1996. *Análise do crescimento da fase juvenil de um ensaio de densidade de varas numa talhadia de castanheiro*. Tese de Mestrado. UTL/ISA. Lisboa. 152pp.
- PCI Geomatics Enterprises Inc, 2003. *Geomatica Version 9.1 – User Manual*. Richmond Hill. Ontario, Canada.
- Pearson, R.L., Miller, L.D., 1972. Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of the Productivity of the Short Grass Prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment, ERIM. USA. Pp. 1357-1381.
- Pohl, C., Van Genderen, J.L., 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing.* **19**(5): 823-854.
- Pontailleur, J. Y., G. J. Hymus, 2003. Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques. *Canadian Journal of Remote Sensing* **29**(3): 381-387.
- Rego, F.C., 2001. *Florestas públicas*. Direcção Geral das Florestas. Lisboa.

- Rezende, C.G., 2003. Conceitos e Perspectivas em Sistemas de Informação e de Apoio a Tomada de Decisão. Tematec. Tema 168 - ANO IX - Nº 68 – 2003. Companhia de Processamento de Dados do Estado de Rondônia – CEPRORD. [http 51]
- Riccheti, E., 2001. Visible-infrared and radar imagery fusion for geological application: a new approach using DEM and sun-illumination model. *International Journal of Remote Sensing*. **22**(11): 2219-2230.
- Rich, P. M., 1989, A manual for analysis of hemispherical canopy photography. Los Alamos National Laboratory Report LA-11733-M.
- Rich, P. M., 1990, Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing of Environment* **5**:13-29.
- Richardson, A.J., Everitt, J.H., 1992. Using Spectral Vegetation Indices to Estimate Rangeland Productivity. *Geocarto International*. **7**(1):63-69.
- Rodrigues, O., 2000. Utilização do Território e Propriedade Fundiária”. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia. [Tese de doutoramento].
- Rosenfield, G.H. e Fitzpatrick-Lins, K., 1996. A Coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. **52**(2):223-227.
- Rosenfield, G.H. e Fitzpatrick-Lins, K., Ling, H., 1982. Sampling for Thematic Map Accuracy Testing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. **48**(1):131-137.
- Ross J., Sulev M., 2000. Sources of Error in Measurements of PAR. *Agricultural and Forest Meteorology* **100**:103-125.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. e Harlan, J.C. 1974. Monitoring the Vernal Advancement Retrogradation of Natural Vegetation. Final Report Type III, NASA/GSFC.
- Saraf AK, 1999. IRS-1C-LISS-III and PAN data fusion: An approach to improve remote sensing based mapping techniques. *International Journal of Remote Sensing*. **20**(10):1929-1934.
- Schetselaar, E.M., 2001. On preserving Spectral Balance in Image Fusion and Its Advantages for Geological Image Interpretation. *ASPRS*. **67**(8):925-934.
- Schistad-Solberg, A., Jain, A.K., Taxt, T., 1994. Multisource classification of remotely sensed data: fusion of Landsat TM and SAR images. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **32**:768-778.
- Smith, 1978. espaços coloridos RGB e HIS
- Smith, F.W., Sampson, D.A. e Long, J.N., 1991. Comparison of Leaf Area Index Estimates from Tree Allometrics and Measured Light Interception. *Forest Science*. **37**(6):1682-1688.
- Smith, J.L., 1986. Evaluation of the effects of photo measurement errors on predictions of stand volume from aerial photography. *Photo. Eng. and Rem. Sens.* **52**:401-410.
- Smith, N. J., Chen, J. M. and Black, T. A., 1993. Effects of clumping on estimates of stand leaf area index using the LI-COR LAI-2000. *Can. J. For. Res.*, **23**:1940- 1943.
- Soudani, K., J. Trautmann, *et al.*, 2002. Leaf area index and canopy stratification in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *International Journal of Remote Sensing* **23**(18): 3605-3618.
- Spencer, R.D., Green, M.A., Biggs, P.H., 1997. Ground control Points / Accuracy Verification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. **63**(2):179-181.

- Strahler, A.H., Li, X., 1981. An invertible coniferous forest canopy reflectance model. – In: Proceedings of the 15th International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, MI. pp. 1237-1244. – In: David L. B. Jupp e Joe Walker, 1996.
- Strobl, D., Raggam, J., e Cuchroithner, M.F., 1990. Terrain correction geocoding of a multi-sensor image data set.. Proceedings 10th EARSeL Symposium, Toulouse, France (Paris: European Space Agency). pp. 98-107.
- Sylvia R. E, Joseph J. O'Brien, e David B. C., 2000. Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densiometry for measuring forest light environments. *Can. J. For. Res.* **30**:1999–2005.
- Thomas, S.C. e Winner, W.E., 2000. Leaf area index of an old-growth Douglas-fir forest estimated from direct structural measurements in the canopy. *Can. J. For. Res.* **30**:1922–1930.
- Tomé, M., 1988. Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. (1ª rotação). Região Centro de Portugal. Tese de doutoramento, UTL / ISA, Lisboa.
- Tortora, R., 1978. A note on sample size estimation for multinomial populations. *The American Statistician.* **32**(3):100-102.
- Trimble Navigation Limited, 2001. GPS Pathfinder® Office 2.80. Manual do Utilizador. Copyright © 1996-2001, Trimble Navigation Limited.
- Ustin, S. L., 1994. Leaf Area Index Data. Oregon Transect Ecosystem Research (OTTER). Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- Viedma, O., Meliá, J., Segarra, D., Garcia-Haro, J., 1997. Modelling Rates of Ecosystem Recovery After Fires by Using Landsat TM Data. *Remote Sensing and Environment.* **61**:383-398.
- Walter, J. M. N. and C. G. Himmler, 1996. Spatial heterogeneity of a Scots pine canopy: An assessment by hemispherical photographs. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* **26**(9): 1610-1619.
- Warner, W. S. 1994. Evaluating a low-cost, non-metric aerial mapping system for waste site investigation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **60**(8):983-988.
- Warner, W.S., Graham, R.W., Read, R.E., 1996. *Small Format Aerial Photography*. ASPRS. USA. ISBN 1-57083-034-7.
- Welch, R., Ehlers, M., 1987. Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM Data. *ASPRS.* **53**(3):301-303.
- West G.B., J.H. Brown, e B.J. Enquist., 1997. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science* **276**:122-126.
- Wolf, Paul R., 1996. *Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry, Elements of Photogrammetry Third Edition*. ASPRS.
- Zeide, B., 1999. Contemporary issues of forest science. UTAD. Department of Forestry. Workshop: november 22-December 3, 1999.

## 7.2 Páginas Internet consultadas

- http 1: [www.gis.leica-geosystems.com/products/ads40/](http://www.gis.leica-geosystems.com/products/ads40/) (consultado a 1 de setembro de 2004)
- http 2: [www.dweb.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/db/biblio/biblio.cfm?startrow=1&keyword=&author=&startdate=1990&enddate=2001&cat=forestry](http://www.dweb.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/db/biblio/biblio.cfm?startrow=1&keyword=&author=&startdate=1990&enddate=2001&cat=forestry)
- http 3: [www.orbimage.com/prods/high\\_res.html](http://www.orbimage.com/prods/high_res.html)
- http 4: [www.geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/data.html](http://www.geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/data.html) (em junho de 2002)
- http 5: [www.hemisoft.com/products.html](http://www.hemisoft.com/products.html) (em julho de 2004)
- http 6: [www.kodak.com/cluster/global/en/consumer/products/techinfo/e7006/e7006.shtml](http://www.kodak.com/cluster/global/en/consumer/products/techinfo/e7006/e7006.shtml)
- http 7: [www.simbios.gsfc.nasa.gov/~simbiosd/idl/atmocorr/esdist.pro](http://www.simbios.gsfc.nasa.gov/~simbiosd/idl/atmocorr/esdist.pro) (14/06/02)
- http 8: [www.sres.anu.edu.au/associated/mensuration/brackhandwood1998/crown.htm](http://www.sres.anu.edu.au/associated/mensuration/brackhandwood1998/crown.htm) (01/03/2004)
- http 9: [www.agfaphoto.com/library/agfachrome\\_rsx\\_ii\\_50-data\\_sheet.html](http://www.agfaphoto.com/library/agfachrome_rsx_ii_50-data_sheet.html)
- http 10: [www.daac.gsfc.nasa.gov/campaign\\_docs/ftp\\_site/int\\_dis/readmes/sol\\_irrad.html](http://www.daac.gsfc.nasa.gov/campaign_docs/ftp_site/int_dis/readmes/sol_irrad.html) (em 14/06/02) (link a seguir): [internet\irradiance\total\\_solar\\_irradiance.htm](http://internet\irradiance\total_solar_irradiance.htm)
- http 11: [www.cnr.berkeley.edu/~gong/textbook/chapter3/html/sect34.htm](http://www.cnr.berkeley.edu/~gong/textbook/chapter3/html/sect34.htm)
- http 12: [www.jsc.nasa.gov/er/seh/math10.html](http://www.jsc.nasa.gov/er/seh/math10.html) (14/06/02)
- http 13: [www.cnn.com/2001/tech/space/07/04/sun.distant/](http://www.cnn.com/2001/tech/space/07/04/sun.distant/) (14/06/02)
- http 14: [www.jsc.nasa.gov/er/seh/math10.html](http://www.jsc.nasa.gov/er/seh/math10.html) (14/06/02) (link a seguir): [internet\sun-distance\nasa\\_space\\_mathematics.htm](http://internet\sun-distance\nasa_space_mathematics.htm)
- http 15: [www.cnn.com/2001/tech/space/07/04/sun.distant/](http://www.cnn.com/2001/tech/space/07/04/sun.distant/) (14/06/02)
- http 16: [www.simbios.gsfc.nasa.gov/~simbiosd/idl/atmocorr/esdist.pro](http://www.simbios.gsfc.nasa.gov/~simbiosd/idl/atmocorr/esdist.pro) (14/06/02) (link a seguir): [internet\sun-distance\esdist\\_pro.htm](http://internet\sun-distance\esdist_pro.htm)
- http 17: [www.digitalglobe.com/?goto=products/quickbird](http://www.digitalglobe.com/?goto=products/quickbird), consultado em 7/1/2002
- http 18: [www.dynamax.com](http://www.dynamax.com) (em julho de 2004)
- http 19: [www.gsfc.nasa.gov/ias/handbook/handbook\\_htmls/chapter8/htmls/spectral\\_band\\_quant.html](http://www.gsfc.nasa.gov/ias/handbook/handbook_htmls/chapter8/htmls/spectral_band_quant.html)
- http 20: [www.fujifilm.com/jsp/fuji/epartners/products.jsp?nav=1&parent=product\\_category\\_238617&product=2302805](http://www.fujifilm.com/jsp/fuji/epartners/products.jsp?nav=1&parent=product_category_238617&product=2302805) (em 14/06/2004)
- http 21: [www.gsfc.nasa.gov/landsat\\_etm/etm+calibration.htm](http://www.gsfc.nasa.gov/landsat_etm/etm+calibration.htm)
- http 22: [www.gsfc.nasa.gov/landsat\\_etm/calibration\\_parameter\\_file.htm](http://www.gsfc.nasa.gov/landsat_etm/calibration_parameter_file.htm)
- http 23: [www.kodak.com/go/professional/aerochromeiiiinfraredfilm1443andnplfilmso-](http://www.kodak.com/go/professional/aerochromeiiiinfraredfilm1443andnplfilmso-) http 24: 734.htm
- http 25: [www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_htmls/chapter8/htmls/spectral\\_band\\_quant.html](http://www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter8/htmls/spectral_band_quant.html)
- http 26: [www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_htmls/chapter8/htmls/ETM+-TM\\_Cross\\_Calibration.html](http://www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter8/htmls/ETM+-TM_Cross_Calibration.html)
- http 27: [www.kodak.com/cluster/global/en/professional/support/techpubs/f13/f13.jhtml](http://www.kodak.com/cluster/global/en/professional/support/techpubs/f13/f13.jhtml)
- http 28: [www.orbimage.com/prods/orbview\\_3.html](http://www.orbimage.com/prods/orbview_3.html)
- http 29: [www.kodak.com/country/us/en/motion/students/handbook/anatomy2.jhtml](http://www.kodak.com/country/us/en/motion/students/handbook/anatomy2.jhtml)
- http 30: [www.kodak.com/global/en/professional/support/techpubs/e190/e190.shtml](http://www.kodak.com/global/en/professional/support/techpubs/e190/e190.shtml)
- http 31: [www.nysaes.cornell.edu/hort/faculty/lakso/](http://www.nysaes.cornell.edu/hort/faculty/lakso/) (em julho de 2004)
- http 32: [www.nysaes.cornell.edu/hort/faculty/lakso/canopylightmeasurements.html](http://www.nysaes.cornell.edu/hort/faculty/lakso/canopylightmeasurements.html) (em julho de 2004)
- http 33: [www.regentinstruments.com](http://www.regentinstruments.com) (em julho de 2004)
- http 34: [www.weather.com](http://www.weather.com)
- http 35: [www.gsfc.nasa.gov/ias/handbook/handbook\\_htmls/chapter8/htmls/etm+-tm\\_cross\\_calibration.html](http://www.gsfc.nasa.gov/ias/handbook/handbook_htmls/chapter8/htmls/etm+-tm_cross_calibration.html)
- http 36: [www.accuweather.com](http://www.accuweather.com)
- http 37: [www.gsfc.nasa.gov/ias/handbook/handbook\\_htmls/chapter8/htmls/spectral\\_band\\_quant.html](http://www.gsfc.nasa.gov/ias/handbook/handbook_htmls/chapter8/htmls/spectral_band_quant.html)
- http 39: [internet\sect34.htm](http://internet\sect34.htm)
- http 40: [internet\KODAK\\_Exposure\\_Information.htm](http://internet\KODAK_Exposure_Information.htm)
- http 41: [internet\películas\\_fotográficas\K\\_PORTRA\\_iso160.pdf](http://internet\películas_fotográficas\K_PORTRA_iso160.pdf)
- http 42: [internet\películas\\_fotográficas\k\\_gold\\_iso200.pdf](http://internet\películas_fotográficas\k_gold_iso200.pdf)
- http 43: [internet\películas\\_fotográficas\AGFACHROME\\_RSX\\_II\\_50\\_PROFESSIONAL.pdf](http://internet\películas_fotográficas\AGFACHROME_RSX_II_50_PROFESSIONAL.pdf)
- http 44: [www.kodak.com/go/professional/peltmax.pdf](http://www.kodak.com/go/professional/peltmax.pdf)
- http 45: [internet\películas\\_fotográficas\Kodak\\_High\\_Speed\\_Infrared.pdf](http://internet\películas_fotográficas\Kodak_High_Speed_Infrared.pdf)
- http 46: [internet\películas\\_fotográficas\tmax100.pdf](http://internet\películas_fotográficas\tmax100.pdf) e [internet\películas\\_fotográficas\PelITMAX.pdf](http://internet\películas_fotográficas\PelITMAX.pdf)
- http 47: [internet\películas\\_fotográficas\Kodak\\_Ektachrome\\_pro\\_EIR\\_Infrared\\_color\\_film.pdf](http://internet\películas_fotográficas\Kodak_Ektachrome_pro_EIR_Infrared_color_film.pdf)
- http 48: [internet\películas\\_fotográficas\Fujichrome\\_Provia\\_100F\\_Professional\\_Data\\_Sheet.pdf](http://internet\películas_fotográficas\Fujichrome_Provia_100F_Professional_Data_Sheet.pdf)
- http 49: [internet\Fujifilm\\_Film\\_Professional\\_Color\\_Reversal\\_Film\\_Fujichrome\\_Provia\\_100F\\_Professional\\_\(RDPIII\).htm](http://internet\Fujifilm_Film_Professional_Color_Reversal_Film_Fujichrome_Provia_100F_Professional_(RDPIII).htm)
- http 50: [www.acm.org/classics/nov95/toc.html](http://www.acm.org/classics/nov95/toc.html). Consultado em 24/08/04.
- http 51: [www.ceprord.ro.gov.br/show.jsp?PgAtual=3&CdMateria=144](http://www.ceprord.ro.gov.br/show.jsp?PgAtual=3&CdMateria=144) (consulta em 24/08/2004)
- http 52: [..\internet\landsat\\_etm\Landsat\\_Cross\\_Calibration\\_Data\\_Sets.htm](http://..\internet\landsat_etm\Landsat_Cross_Calibration_Data_Sets.htm)
- http 53: [www.TigerDirect.com](http://www.TigerDirect.com) (CF-256-40-380 Lexar Media 256MB 40x Speed Compact Flash) (em 04-06-2003)
- http 54: [www.ibm.com/storage/microdrive](http://www.ibm.com/storage/microdrive) (em 12-11-2001)

- http 55: [www.cnr.berkeley.edu/~gong/textbook/chapter3/html/sect34.htm](http://www.cnr.berkeley.edu/~gong/textbook/chapter3/html/sect34.htm) (em junho de 2002)
- http 56: [www.digitalfilm.com/](http://www.digitalfilm.com/) (em 12-11-2003)
- http 57: [www.digitalfilm.com/dynamic-frameset\\_dm.html](http://www.digitalfilm.com/dynamic-frameset_dm.html)
- http 58: [www.lexarmedia.com/digfilm/cf.html](http://www.lexarmedia.com/digfilm/cf.html) (em 12-11-2003)
- http 59: [www.sandisk.com/main.htm](http://www.sandisk.com/main.htm) (em 12-11-2003)
- http 60: [www.sandisk.com/tech/faq\\_search.asp](http://www.sandisk.com/tech/faq_search.asp) (em 12-11-2003)
- http 61: [www.sandisk.com/tech/faq/149.html](http://www.sandisk.com/tech/faq/149.html) (em 12-11-2003)
- http 62: [www.publico.pt](http://www.publico.pt)
- http 63: [www.daac.ornl.gov/otter/datasets/lai\\_data.html](http://www.daac.ornl.gov/otter/datasets/lai_data.html) (em dezembro de 2002)
- http 64: [www.ceprord.ro.gov.br/show.jsp?pgatual=3&cdmateria=144](http://www.ceprord.ro.gov.br/show.jsp?pgatual=3&cdmateria=144) (consulta em 24/08/2004): rezende, c.g., 2003. conceitos e perspectivas em sistemas de informação e de apoio a tomada de decisão.
- http 65: [http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/special/oeepe\\_publ\\_no43.htm](http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/special/oeepe_publ_no43.htm) (Integrated Sensor Orientation Test Report and Workshop Proceedings)

## AGRADECIMENTOS

No final desta tese cumpre-me expressar na primeira pessoa uma palavra de apreço a todos aqueles que contribuíram para a sua conclusão.

Ao Magnífico Reitor, Professor Catedrático Armando Mascarenhas Ferreira, manifesto o meu agradecimento por todos os meios disponibilizados e a oportunidade dada para a realização desta tese.

Ao Excelentíssimo Presidente do Instituto Politécnico de Bragança, Professor Doutor Dionísio Afonso Gonçalves, e ao Excelentíssimo Director da Escola Superior Agrária de Bragança, Professor Doutor Orlando Rodrigues, expresso o meu reconhecimento pela disponibilização dos meios necessários à execução deste trabalho.

Ao Professor Doutor F. Wolfango Macedo expresso a minha gratidão pela paciente e sábia orientação científica assim como a sua constante disponibilidade, fundamentais à realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor José Tadeu Aranha expresso igualmente a minha gratidão pela paciente e sábia orientação científica e, mais importante que tudo, a amizade que partilhamos já desde os tempos de Tuna.

Ao colega e amigo Luís Miguel Martins, agora felizmente já com a categoria de Professor Doutor, com quem passei grande parte dos últimos 4 anos, quer em terra quer no ar. A ele ficarei sempre grato pela sua amizade e pelo seu espírito positivo e empreendedor.

Ao amigo José Barreira, piloto de elevada mestria, que tão pacientemente executou as missões aéreas necessárias, manifesto o meu agradecimento. Desejo-lhe uma longa e excelente carreira aeronáutica.

Ao colega Eng. Domingos Lopes que me acompanhou tantas vezes durante o trabalho de campo que realizámos conjuntamente, sem nunca esquecer a preciosa ajuda dos seus pais (a Sr.<sup>a</sup> D. Maria Conceição Oliveira e o Sr. Carlos Lopes) que ao ajudarem o filho me ajudaram a mim a dobrar.

Ao Professor Doutor Carlos Pacheco Marques, o meu agradecimento pelas sugestões dadas.

Ao Professor Doutor Hermínio Botelho do Departamento Florestal da UTAD agradeço a cedência de equipamento.

Ao Professor Doutor Pereira do Departamento de Fisiologia da UTAD agradeço a cedência de equipamento.

Agradeço também à minha colega Mestre Maria José Castanheira por me ter substituído tão eficientemente nas minhas funções docentes, e aos meus colegas de Departamento pela sua solidariedade.

Manifesto ainda o meu agradecimento ao Técnico de 1ª Carlos Pinto de Brito e ao Téc. Prof. de 2ª Carlos Alberto Madeira Guerra Fernandes, meu antigo aluno, pela preciosa ajuda no trabalho de campo.

Ao Instituto Geográfico do Exército e ao Instituto Geográfico Português agradeço a amabilidade pela cedência de valiosa informação, sem a qual não teria sido possível terminar este trabalho.

Agradeço igualmente à empresa “Aliança Florestal”, a amável cedência da cartografia e informação relativa aos povoamentos de Amarante-Aboim, e a permissão para aí realizar os estudos necessários.

Ao colega Eduardo da Direcção Geral das Florestas de Vila Real, agradeço as informações dadas sobre os povoamentos florestais do perímetro florestal de Marão e Meia Via.

À Circunscrição Florestal de Vila Real e à Direcção Geral das Florestas quero também agradecer a possibilidade de realizar o estudo no perímetro florestal de Marão e Meia Via, e ainda pela cedência de valiosa informação por parte da sua biblioteca geral.

À Eng. Maria Alzira Lima Viseu de Carvalho, minha mulher, pela colaboração dada na programação em Access 2000, e aos meus filhos, como auxiliares de campo, manifesto o meu agradecimento.



Figura 109: Ajudantes de campo Alzira e Afonso em regime de ocupação dos tempos livres

Finalmente, peço desculpa se me esqueci de alguém em particular. Especialmente para eles o meu profundo reconhecimento.

À minha mulher Alzira e aos meus filhos (Alzira, Afonso e também ao João David que à última hora adormeceu antes de nascer), pelos sacrifícios e privações, ausências forçadas de férias, etc., etc., o meu maior reconhecimento e amor.



## **A. ANEXOS**

### **A.1. Símbolos, Abreviaturas, Formulários, Tabelas e Figuras**

Anexo I: Lista de símbolos e abreviaturas

Símbolo ou abreviatura	Descrição	Unidades
$\tau$	(medição de sunflecks)/100 (ceptómetro)	
Z	Abcissa da curva normal para um determinado nível de probabilidade (tabela de $t$ de Student)	
$\tau_a$	Absorção	
a	Absorvância foliar na banda PAR	
$h_{d/2}$	Altura ao nível do d/2	m
$h_{bcopa}$	Altura até à base da copa da árvore	m
$hc_i$	Altura de copa de cada árvore amostra (Dominante, Draudt ou Média)	m
$hc_{i,m}$	Altura de copa de cada árvore amostra “Média”	m
hcd	Altura de copa média das árvores amostra “Dominantes”	m
hcd <sub>r</sub>	Altura de copa média das árvores amostra “Draudt”	m
hcm	Altura de copa média das árvores amostra “Média”	m
H	Altura de voo	m
$\phi$	Altura do Sol (ou ângulo entre o plano da Terra e os raios solares)	graus
hd	Altura dominante	m
ht	Altura total da árvore	m
hPRX	Altura total da árvore medida com a barra de paralaxe	m
hCAD	Altura total da árvore medida com o CAD	m
hest	Altura total da árvore por estimativa	m
ht <sub>d</sub>	Altura total de cada árvore “Dominante”	m
ht <sub>d,r</sub>	Altura total de cada árvore “Draudt”	m
ht <sub>m</sub>	Altura total de cada árvore “Média”	m
hd	Altura total média das árvores dominantes por parcela	m
ht <sub>d,r</sub>	Altura total média das árvores Draudt por parcela	m
ht <sub>m</sub>	Altura total média das árvores médias por parcela	m
ASA	American Standards Association (sensibilidade dum filme)	
$\theta_v$	Ângulo de visão nadir do sensor satélite ou ângulo de varrimento	graus ou rad
$\theta_0$ ou $\theta$	Ângulo zenital do Sol	graus ou rad
$g_i$	Área basal da árvore i	m <sup>2</sup>
$g_d$	Área basal média das árvores amostra “Dominantes”	m <sup>2</sup>
$g_{d,r}$	Área basal média das árvores amostra “Draudt”	m <sup>2</sup>
$g_m$	Área basal média das árvores amostra “Média”	m <sup>2</sup>
G	Área basal viva por hectare	m <sup>2</sup> /ha
AP	Área da parcela	m <sup>2</sup>
ACEL	Associação das Empresas de Celulose de Portugal	
CELPA	Associação das Empresas de Celulose de Portugal	
ACM	Association for Computing Machinery	
b	Base fotográfica ou distância entre pontos de observação (filme)	mm
B	Base fotográfica ou distância entre pontos de observação (terreno)	m
BRDF	Bi-directional Reflectance Distribution Function	
CVA	Campo de visão angular	graus
CVI	Campo de Visão Instantâneo	
C <sub>v</sub>	Cavalos de potência	
CNIG	Centro Nacional de Informação Geográfica	
CCD	Charge Coupled Device	
S	Claridade da cena (scene brightness) (J.mm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	
R	Coeficiente de correlação	
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinação	
R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Coeficiente de determinação ajustado	
x	Coeficiente de esfericidade da copa	
K	Coeficiente de extinção da luz para a copa	
$\tau(\theta)$	Coeficiente de transmissão da luz para a copa	
CIE	Commission Internationale de L'eclairage	

Símbolo ou abreviatura	Descrição	Unidades
$L_P$	Componente da radiação total no sensor resultante de dispersão múltipla	$Wm^{-2}sr^{-1}$
$L_T$	Componente da radiação total registada no sensor resultante da irradiação do alvo de interesse para o sensor	$Wm^{-2}sr^{-1}$
PC	Computador pessoal (personal computer)	
CL	Correcção da longitude (CL)	°
$\mu$	$\cos \theta$	
CMYK	Cyan, magenta, yellow, black	
D	Declinação Solar (radianos)	Rad
$D_p$	Densidade D no ponto p	
DsdCopa	Densidade de copas	%
DsdC_H	Densidade de copas medida na fotografia hemisférica	%
DsdC_F	Densidade de copas medida na fotoparcela	%
D	Densidade dum filme (película fotográfica)	
CAD	Desenho Assistido por Computador	
DR	Detecção Remota	
DIN	Deutsche Industrie Normen (sensibilidade dum filme)	
$d_m$	Diâmetro à altura do peito de cada árvore média	m
$\bar{d}$	Diâmetro à altura do peito médio	m
$d_{mm}$	Diâmetro à altura do peito médio das árvores médias	m
$d_g$	Diâmetro à altura do peito médio quadrático	m
d	Diâmetro à altura do peito, 1,30 acima do solo	m
D	Diâmetro de abertura das lentes numa câmara fotográfica	mm
DC	Diâmetro de copa (média de duas direcções perpendiculares)	m
DCm	Diâmetro de copa médio das árvores dominantes	m
DC_F	Diâmetro de copa médio determinado através de fotografia aérea	m
$\tau_m$	Difusão de Rayleigh	
$\tau_p$	Difusão Mie (não-selectiva)	
DGF	Direcção Geral das Florestas	
I	Distância entre as lentes e o plano da imagem	
O	Distância entre as lentes e os objectos a fotografar	
D	Distância entre o Sol e a Terra, em Unidades Astronómicas	UA
F	Distância focal das lentes da câmara fotográfica	mm
E	Eficiência de conversão	
EE	Energia electromagnética	
SE	Erro de amostragem	
Syx	Erro residual	
ESAB	Escola Superior Agrária de Bragança	
EUA	Estados Unidos da América	
E	Exposição do filme (câmara fotográfica)	J.mm-2
E	Factor de escala da fotografia	
Gain <sub>i</sub>	Factor de ganho usado para a banda i, valor fornecido e que representa o declive da recta	
Offset <sub>i</sub>	Factor de offset usado para a banda i, valor fornecido e que representa a intersecção da recta na origem; é a radiação registada pelo sensor correspondente ao ND mínimo	$Wm^{-2}sr^{-1}$
FAP	Força Aérea Portuguesa	
FAC	Fotografia Aérea Convencional	
FAPMF	Fotografia Aérea de Pequeno e Médio Formato	
T	Fracção da luz incidente que é transmitida pela copa	$m^2/m^2$
R	Fracção da luz incidente reflectida para o sensor por cima da copa	
fa	Fracção da radiação incidente interceptada pela copa (absorvida)	
FDRB	Função de Distribuição de Reflectância Bidireccional	
GO	Geométrico-ópticos	
GB	Gigabytes	
HGD73	Hayford Gauss Militares Datum de 1973	
HGML	Hayford Gauss Militares Datum de Lisboa	
tcept	Hora da leitura com o sensor (tcept)	hora

Símbolo ou abreviatura	Descrição	Unidades
		decimal
HIS	Hue (croma), Intensity (intensidade) e Saturation (saturação)	
T	Idade	Anos
IVA	Imposto sobre o Valor Acrescentado	
C <sub>p</sub>	Índice de área de copa	
LAI	Índice de Área Foliar	
K ou KIA	Índice de Concordância de Cohen	
KIA <sub>verd</sub>	Índice de concordância de Cohen na perspectiva do produtor	
KIA <sub>mapa</sub>	Índice de concordância de Cohen na perspectiva do utilizador	
KHAT	Índice de Concordância Ponderado	
ICE	Índice de copas efectivo	
Fm ou Fg	Índice de Fiabilidade Global	
VI	Índice de vegetação	
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	
IVC	Infravermelho colorido	
NIR	Infravermelho próximo	
IVV	Instituto do Vinho e da Vinha	
IGeoE	Instituto Geográfico do Exército	
IGP	Instituto Geográfico Português	
INGA	Instituto Nacional de Garantia Agrícola	
IPB	Instituto Politécnico de Bragança	
IPP	Instituto Politécnico do Porto	
I	Intensidade da irradiação	
ISO	International Standards Organization (valores de sensibilidade)	
$\lambda$	Intervalo de comprimento de onda	nm ou $\mu\text{m}$ ou $\text{\AA}$
IC	Intervalo de confiança	
IF	Inventário Florestal	
KB	kilobytes	
L	Latitude (radianos)	rad
L <sub>bcopa</sub>	Leitura (visada) com o relascópio para o nível da base da copa viva	Uh
L <sub>d</sub>	Leitura (visada) com o relascópio para o nível do <b>d</b>	Uh
L <sub>d/2</sub>	Leitura (visada) com o relascópio para o nível do <b>d</b> /2	Uh
L <sub>t</sub>	Leitura (visada) com o relascópio para o topo da árvore	Uh
LUT	Look up table	
PAR	Luz Fotossinteticamente Activa	$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
MAR	Média absoluta dos resíduos	
$E_{0,\lambda}$	Média da radiação espectral no intervalo da banda $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$	$\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}$
Marp	Média do valor absoluto dos resíduos de predição	
Mrp	Média dos resíduos de predição	
SPAR.Min	Medição da PAR à sombra dentro do povoamento	
SPAR.Máx	Medição da PAR ao Sol em clareira dentro do povoamento	
TPAR	Medição da PAR dentro do povoamento	
ParMáx	Medição da PAR em pleno Sol ( SolControlo )	
ParMin	Medição da PAR em sombra total (SombraControlo )	
MB	Mega Bytes	
MDT	Modelo Digital de Elevação do Terreno	
LCD	Monitor de cristais líquidos	
n <sub>j_F</sub>	Número de árvores na parcela j medida na fotoparcela	
n <sub>j</sub>	Número de árvores na parcela j medida no campo	
N	Número de árvores por hectare	
N_F	Número de árvores por hectare contadas na fotoparcela	
J	Número de dias desde o início do ano	dias
n	Número de indivíduos numa amostra (estatística descritiva)	
N	Número de indivíduos numa População (estatística descritiva)	
X <sub>ii</sub>	Número de observações correctamente interpretadas (traço da matriz)	

Símbolo ou abreviatura	Descrição	Unidades
ND	Número digital	
O <sub>p</sub>	Opacidade O no ponto p	
PAN	Pancromático	
R	PAR reflectida pela copa	
U	PAR reflectida pelo solo	
dP	Paralaxe diferencial	mm
P	Paralaxe estereoscópica absoluta na base do objecto a medir	Mm
p <sub>ii</sub>	Percentagem de acertos observada (X <sub>ii</sub> /N)	
P	Percentagem estimada de acertos (precisão de interpretação)	
Que	Percentagem estimada de erros (q=1-p)	
τ(λ)	Permeabilidade óptica da atmosfera para um determinado intervalo de comprimento de onda	
PP1	Ponto central ou principal da fotografia 1	
PPC1	Ponto principal conjugado da fotografia 1	
PCT	Pontos de controlo no terreno	
ppp	Pontos por polegada	
PDOP	Precision dilution of precision (GPS)	
p <sub>+j</sub>	Probabilidade marginal na coluna j (X <sub>+j</sub> /N)	
p <sub>+i</sub>	Probabilidade marginal na linha i (X <sub>+i</sub> /N)	
PID	Processamento de Imagem Digital	
P	Produção de Matéria Seca	Ton
P <sub>e</sub>	Proporção esperada de concordância puramente aleatória	
P <sub>0</sub>	Proporção observada de concordância	
QTE	Quadrado total do erro	
f <sub>d</sub>	Radiação difusa	Wm <sup>-2</sup>
E <sub>d</sub>	Radiação difusa do céu	Wm <sup>-2</sup>
f <sub>b</sub>	Radiação directa da PAR incidente	Wm <sup>-2</sup>
E <sub>dλ</sub>	Radiação espectral difusa do céu para um determinado comp. de onda	Wm <sup>-2</sup> μm <sup>-1</sup>
E <sub>gλ</sub>	Radiação global espectral incidente na superfície	Wm <sup>-2</sup> μm <sup>-1</sup>
L <sub>l</sub>	Radiação intrínseca do alvo	Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>
E <sub>0λ</sub>	Radiação solar espectral no topo da atmosfera	Wm <sup>-2</sup> μm <sup>-1</sup>
E <sub>g</sub>	Radiação solar incidente na superfície da Terra	Wm <sup>-2</sup>
E <sub>0</sub>	Radiação solar no topo da atmosfera	Wm <sup>-2</sup>
S	Radiação Total Incidente ou PAR incidente	
L <sub>s</sub>	Radiação total registada no sensor	Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>
RVI	Ratio Vegetation Index	
RGB	Red Green Blue	
ρ <sub>i</sub>	Reflectância absoluta no topo da atmosfera num determinado intervalo de comprimento de onda registada pela banda i	Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> μm <sup>-1</sup>
r <sub>s</sub>	Reflectância da superfície do solo	
R	Reflectância média do alvo (%)	
R <sub>b</sub>	Reflectância média do fundo de contraste resultante dum pixel vizinho	%
RDD	Região Demarcada do Douro	
Dr	Relativo às árvores amostra do método de Draudt	
Dom	Relativo às árvores dominantes	
Med	Relativos às árvores média	
rp <sub>i</sub>	Resíduo de predição para a observação i	
D	Resolução no terreno pretendida	
RO	Resolução óptica	
GPS	Sistema de Posicionamento Global	
SIG	Sistemas de Informação Geográfica	
SQR	Soma de quadrados resíduos (ANOVA)	
SQT	Soma de quadrados total (ANOVA)	
T	Tempo de exposição dum filme numa câmara fotográfica	Seg
TM	Thematic Mapper	
TP	Tie Points	

Símbolo ou abreviatura	Descrição	Unidades
$R_b$	Tonalidade do fundo de contraste das árvores	
$T_\theta$	Transmitância atmosférica a um ângulo do zénite $\theta$	
T	Transmitância da copa	
$T_p$	Transmitância num dado ponto p	
$\tau$	Transparência óptica normal da atmosfera (processamento de imagem)	
UV	Ultravioleta	
UA	Unidades Astronómicas (1UA = 10 <sup>6</sup> km)	Km
Uh	Unidades hipsométricas	Cm
UTM	Universal Transversa de Mercator	
UTM WGS84	Universal Transversa de Mercator Datum Internacional de 1984	
UTAD	Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro	
F	Valor de regulação de exposição numa câmara fotográfica	
$R_d$	valor médio da tonalidade das árvores	
VE	Valores de exposição	
$V_{rp}$	Variância dos resíduos de predição	
VERM	Vermelho	
$v_{jDom}$	Volume médio das árvores amostra “Dominantes”	m <sup>3</sup>
$v_{jDr}$	Volume médio das árvores amostra “Draudt”	m <sup>3</sup>
$V_g$	Volume médio das árvores amostra “Média”	m <sup>3</sup>
$V_{me}$	Volume médio estimado por hectare	m <sup>3</sup> /ha
$v_{ime}$	Volume médio estimado sobre casca da árvore i	m <sup>3</sup>
$V_m$	Volume médio por hectare pelo processo da árvore média	m <sup>3</sup> /ha
$V_{Dr}$	Volume médio por hectare pelo processo de Draudt	m <sup>3</sup> /ha
$V_{mg}$	Volume médio por hectare pelo volume médio das árvores média	m <sup>3</sup> /ha
$V_{mr}$	Volume médio real por hectare	m <sup>3</sup> /ha
$v_{imr}$	Volume médio real sobre casca da árvore i	m <sup>3</sup>
V	Volume médio total por hectare	m <sup>3</sup> /ha
$v_i$	Volume sobre casca da árvore i	m <sup>3</sup>
WGS	World Geodetic System	

Anexo II: Parâmetros e Formulário de inventário florestal

Designação	Unidades	Equação	Ligação
Altura da copa (m) de cada árvore amostra (hc <sub>i</sub> )	m	$hc_i = (Lt - Lbcopa) \cdot Uh$	Eq. 65
Altura da copa média das árvores médias (hcm)	m	$hcm = \frac{\sum_{i=1}^{n_m} bc_{im}}{n_m}$	
Altura total (ht)	m	$ht = (Lt - Ld) \cdot Uh + 1.3$	Eq. 66
Altura total média das árvores dominantes (hd), ou Altura Dominante	m	$hd = \frac{\sum_{id=1}^{n_d} h_{tid}}{n_d}$	Eq. 67
Altura total média das árvores médias (htm)	m	$htm = \frac{\sum_{im=1}^{n_m} h_{tim}}{n_m}$	Eq. 68
Área basal por ha (G)	m <sup>2</sup> /ha	$G = \frac{10000}{AP} \cdot \sum g_i$	Eq. 69
Área basal unitária (cada árvore) (g <sub>i</sub> )		$g_i = \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2$	Eq. 70
Coefficiente de esfericidade da copa 1 (cec1 ou x)		$x = \frac{DCm}{bc_g}$	Eq. 71
Coefficiente de esfericidade da copa 2 (cec2 ou x <sub>-</sub> )		$x_- = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot DCm^2}{bc_g \cdot DCm}$	Eq. 72
Diâmetro médio das árvores ( $\bar{d}$ )	cm	$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$	Eq. 73
Diâmetro médio das árvores médias (dmm)	cm	$d_{mm} = \frac{\sum_{im=1}^{n_{Med}} d_{im}}{n_m}$	Eq. 74
Média quadrática dos diâmetros de todas as árvores da parcela ( $d_g$ )	cm	$d_g = \sqrt{\frac{\sum d^2}{n}}$	Eq. 75
Número de arvores por ha (N)		$N = \frac{10000}{AP} \cdot n$	Eq. 76
Unidades hipsométricas (Uh) obtidas com o relascópio de Bitterlich:			
• Banda 1	Uh	$Uh = 2 \cdot \mathbf{d} / 100$	Eq. 77
• Banda 4		$Uh = \mathbf{d} / 100$	Eq. 78
• Duas bandas estreitas		$Uh = 4 \cdot \mathbf{d} / 100$	Eq. 79
• Banda 1 e Duas bandas estreitas		$Uh = (4 / 3) \cdot \mathbf{d} / 100$	Eq. 80
Volume de cada árvore amostra, média ou dominante (v <sub>i</sub> )	m <sup>3</sup>	$v_i = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2}{3} \cdot d^2 \cdot (L_{d/2} - L_d) \cdot Uh + 1,8$	Eq. 81

Designação	Unidades	Equação	Ligação
Volume médio das árvores médias (vg) média aritmética dos volumes de cada árvore média (vim)	m <sup>3</sup>	$v_g = \frac{\sum_{i=1}^n v_{iMed}}{n}$	Eq. 82
Volume médio por ha através do volume médio das árvores médias (Vmg)	m <sup>3</sup> /ha	$V_{mg} = v_g \cdot n \cdot \frac{10000}{AP}$	Eq. 83
Volume médio por ha pelo "Método de Árvore Média" (Vm)	m <sup>3</sup> /ha	$V_m = \frac{10000}{AP} \cdot \frac{\sum g_i}{\sum g_{iMed}} \cdot \sum v_{iMed}$	Eq. 84
Volume médio por ha pelo "Método de Draudt" (VDr)	m <sup>3</sup> /ha	$V_{Dr} = \frac{10000}{AP} \cdot \frac{\sum g_i}{\sum g_{iDr}} \cdot \sum v_{iDr}$	Eq. 85

#### Anexo III: Valores de Transmitância (T), Opacidade (O) e Densidade (D)

% Transmitância	T	O	D
100	1,000	1	0,00
50	0,500	2	0,30
25	0,250	4	0,60
10	0,100	10	1,00
1	0,010	100	2,00
0,1	0,001	1000	3,00

#### Anexo IV: Funções utilizadas na modelação das curvas hipsométricas

Modelo	Referência	Equação	Observações
1	Curtis (1967)	$h = b_0 + b_1 \frac{1}{d} + b_2 \frac{1}{d^2}$	linear com ordenada na origem
2	Freese (1964)	$h = e^{b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot d}$	não linear
3	Henricksen (1950)	$h = b_0 + b_1 \cdot \log d$	linear com ordenada na origem
4	Korsun (1935)	$h = e^{b_0 + b_1 \cdot \log d + b_2 \cdot \log^2 d}$	não linear
5	Michailoff (1943)	$h = e^{b_0 + b_1 \cdot (1/d)}$	não linear
6	Petterson (1955)	$h = ((1/(b_0 + b_1/d))^{b_2}) + 1.3$	não linear
7	Prodan (1951)	$h = (d^2/(b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2)) + 1.3$	não linear
8	Prodan (1965)	$h = d/(b_0 + b_1 \cdot d)$	não linear
9	Recta	$h = b_0 + b_1 \cdot d$	linear com ordenada na origem
10	Stoffels e Van Soest (1953)	$h = e^{b_0 + b_1 \cdot \log d}$	não linear
11	Trorey (1932)	$h = b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2$	linear com ordenada na origem
12	s.r.	$h = b_0 + b_1 \cdot 1/d + b_2 \cdot d$	linear com ordenada na origem

#### Anexo V: Modelos de equação de volume de simples entrada

Modelo	Referência	Equação	Observações
1	Berkhout	$v = b_0 \cdot d^{b_1}$	não linear
1.a	Berkhout	$\log v = \log b_0 + b_1 \log d$	logaritimizada
2	s.r.	$v = b_0 + b_1 \cdot d$	linear com ordenada na origem
3	Hohenadl-Krenn	$v = b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2$	linear com ordenada na origem
4	Dissescu Meyer	$v = b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2$	linear sem ordenada na origem

Com v=volume por árvore, d=diâmetro à altura do peito,

Anexo VI: Modelos de equação de volume de dupla entrada

Modelo	Referência	Equação	Observações
5	Spurr (1952)	$v = b_0 + b_1 \cdot d^2 \cdot h$	linear com ordenada na origem
6	Spurr (1952)	$v = b_1 \cdot d^{2h}$	linear sem ordenada na origem
7	Santos Hall-Schumacher	$v = b_0 \cdot d^{b_1} \cdot h^{b_2}$	não linear
7.a	Santos Hall-Schumacher	$\log v = \log b_0 + b_1 \log d + b_2 \log h$	logaritimizada
8	jpmc	$v = b_0 + d^{b_1} \cdot h^{b_2}$	não linear
9	Burkhardt	$v = b_0 + b_1 \cdot d^{b_2} \cdot h^{b_3}$	não linear
10	Takata	$v = d^2 \cdot h / (b_0 + b_1 \cdot d)$	não linear

Com v=volume por árvore, d=diâmetro à altura do peito, h=altura total, b<sub>0</sub>,b<sub>1</sub>,b<sub>2</sub>,b<sub>3</sub>=constantes a determinar

Anexo VII: Quadro resumo das tentativas de ajustamento entre as variáveis dendrométricas altura e diâmetro à altura do peito medidas no campo para a Bétula no Marão-Campeã (n =14)

Equação / Função	R <sup>2</sup>	Syx
[htm = f ( $\bar{d}$ )]	0.08 n.s.	2.70m
[hd = f ( $\bar{d}$ )]	0.04 n.s.	2.82m
[htDr = f ( $\bar{d}$ )]	0.41 n.s.	1.52m
[htDr = f ( hd )]	0.26 n.s.	1.71m
[htm = f ( hd )]	0.20 n.s.	2.52m
[htm = f ( htDr )]	0.56**	1.86m

Anexo VIII: Parâmetros e Formulário para determinação do LAI

Designação	Unidades	Equação	Ligação
Factor de Extinção da Luz ( $k$ )		(inserida no texto)	Eq. 54
Índice de área foliar 1 (com $K = K1$ ) (LAI1)			
Índice de área foliar 2 (com $K = K2$ ) (LAI2)	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	(inserida no texto)	Eq. 53
Índice de área foliar 3 (com $K = K3$ ) (LAI3)			
Ângulo zenital (graus) (teta ou $\theta$ ) Ângulo formado entre a vertical e a radiação solar (equação apresentada por Decagon Devices Inc., 1989)	graus	$\theta = \arccos(\sin L \sin D + \cos L \cos D \cos 0.2618(t_{\text{cept}} - t_0))$	Eq. 86
Declinação Solar (D)	radianos		Eq. 87
meio-dia solar ( $t_0$ )	hora decimal	$t_0 = 12 - CL - ET$	Eq. 88
Correcção da longitude (CL)	graus	Diferença entre as longitudes do meridiano central e do meridiano do lugar, a dividir pela amplitude de cada fuso horário (15 °)	
Equação do Tempo (ET)	hora	$ET = [-104,7 \sin \varphi + 596,2 \sin 2\varphi + 4,3 \sin 3\varphi - 12,7 \sin 4\varphi - 429,3 \cos \varphi - 2,0 \cos 2\varphi + 19,3 \cos 3\varphi] / 3600$	Eq. 89
Constante de correcção da Equação do Tempo (sigma ou $\Phi$ )	hora	$\varphi = (279.575 + 0.986 J) \cdot \pi / 180$	Eq. 90
Altura do Sol (SA)	graus	$SA = 90 - \theta$	Eq. 91
Coefficiente de extinção da copa, assumindo-se a copa esférica (K1)		(inserida no texto)	Eq. 55
Coefficiente de extinção da copa 2, considerando um coeficiente de esfericidade da copa ( $x$ ) determinado pela Eq. 71 (K2)		(inserida no texto)	Eq. 54
Coefficiente de extinção da copa 3, considerando um coeficiente de esfericidade da copa ( $x_{-}$ ) determinado pela Eq. 72 (K3)			
Absorvância foliar na banda PAR ( $a$ )		(assume-se que $a = 0,9$ )	
Factor A		$A = 0.283 + 0.785a - 0.159a^2$	Eq. 92
Fracção difusa da PAR ( $f_d$ )		$f_d = \frac{\text{SombraControlo}}{\text{SolControlo}}$	Eq. 93
Fracção incidente da PAR ( $f_b$ )		$f_b = 1 - f_d$	Eq. 94

Anexo IX: Coordenadas rectangulares das parcelas do Marão encontradas por GPS com e sem correcção diferencial, e ainda as diferenças entre ambos em X e em Y

PMagellan	xMagellan	yMagellan	xTrimble	yTrimble	difX	difY
P301	220254.15	478332.50	220253.66	478332.77	0.49	-0.27
P302	220268.02	478367.71	220267.53	478366.75	0.49	0.96
P303	220244.46	478302.86	220244.43	478301.90	0.03	0.96
P304	220279.35	478310.36	220279.32	478311.25	0.03	-0.89
P305	220231.78	478341.70	220232.68	478341.97	-0.9	-0.27
P306	220534.48	476972.78	220498.92	477002.80	35.56	-30.02
P307	220534.55	476945.02	220499.00	476975.04	35.55	-30.02
P308	220537.18	477004.26	220501.16	477033.66	36.02	-29.4
P309	220558.22	476972.85	220522.20	477002.87	36.02	-30.02
P310	220507.94	476972.71	220473.31	477002.73	34.63	-30.02
P311	220823.68	477921.33	220823.19	477920.97	0.49	0.36
P312	220816.62	477949.07	220816.12	477948.72	0.5	0.35
P313	220826.56	477893.57	220827.45	477893.22	-0.89	0.35
P314	220801.38	477908.31	220801.11	477908.57	0.27	-0.26
P315	220848.82	477923.25	220848.31	477924.13	0.51	-0.88
P316	220550.79	477628.09	220551.55	477627.87	-0.76	0.22
P317	220587.02	477655.96	220586.05	477656.22	0.97	-0.26
P318	220559.00	477685.50	220558.81	477685.82	0.19	-0.32
P319	220555.51	477657.82	220555.79	477657.99	-0.28	-0.17
P320	220529.52	477660.08	220529.70	477660.90	-0.18	-0.82
P326	220561.64	478731.34	220561.64	478731.34	0	0
P327	220443.13	478666.22	220443.54	478666.53	-0.41	-0.31
P328	220576.53	478403.75	220576.53	478403.75	0	0
P329	220518.24	478275.86	220518.24	478275.86	0	0
P330	220625.66	478315.03	220624.90	478313.94	0.76	1.09
P331	220628.82	478183.62	220628.91	478184.62	-0.09	-1
P332	220626.18	478129.93	220626.71	478130.05	-0.53	-0.12
P338	220833.39	478434.09	220833.56	478434.33	-0.17	-0.24
P339	220992.81	478354.95	220992.69	478354.76	0.12	0.19
P341	219841.14	478205.50	219841.14	478205.50	0	0
P342	219827.83	478477.56	219827.84	478477.79	-0.01	-0.23
P347	220609.79	477010.02	220609.79	477010.02	0	0
P348	219855.49	478579.45	219855.13	478579.08	0.36	0.37
P349	220705.69	478654.00	220705.69	478654.00	0	0
P350	220591.18	478655.53	220591.60	478655.58	-0.42	-0.05
P351	220401.71	477999.73	220392.97	478019.74	8.74	-20.01
P352	220391.92	477956.02	220383.17	477976.03	8.75	-20.01
P353	220952.78	478193.8	220952.78	478193.80	0	0
P354	220409.51	478207.07	220408.88	478207.17	0.63	-0.1
P355	221232.22	478624.05	221232.22	478624.05	0	0
P356	221333.99	478683.58	221333.99	478683.58	0	0

Anexo X: Volume médio por parcela de acordo com os 3 processos de cálculo (unidades = m<sup>3</sup>/ha)

Parcela	Ano	Chave1	Especie	VDr	Vm	Vmg
2.03	2002	2032002	EucGlob	26.35	25.88	23.68
2.04	2002	2042002	EucGlob	45.90	46.16	46.93
2.05	2002	2052002	EucGlob	36.14	22.68	24.88
2.06	2002	2062002	EucGlob	81.60	91.59	92.90
2.08	2002	2082002	EucGlob	22.04	19.08	17.86
2.09	2002	2092002	EucGlob	32.00	43.19	44.33
2.10	2002	2102002	EucGlob	35.34	23.54	23.33
2.11	2002	2112002	EucGlob	37.17	33.30	30.70
2.13	2002	2132002	EucGlob	14.32	11.61	10.94
2.15	2002	2152002	EucGlob	16.22	16.01	14.55
2.16	2002	2162002	EucGlob	139.70	145.76	145.68
2.17	2002	2172002	EucGlob	122.71	130.44	135.92
2.21	2002	2212002	EucGlob	144.38	140.15	140.00
2.24	2002	2242002	EucGlob	165.13	232.20	226.80
2.26	2002	2262002	EucGlob	109.50	101.25	89.60
2.27	2002	2272002	EucGlob	113.36	92.14	94.40
3.01	2001	3012001	Betula	137.72	149.20	139.62
3.02	2001	3022001	Betula	156.76	110.85	108.00
3.03	2001	3032001	Betula	166.49	140.40	144.00
3.04	2001	3042001	Betula	133.36	107.10	120.00
3.05	2001	3052001	Betula	129.81	108.79	102.00
3.06	2001	3062001	Betula	174.68	153.45	152.00
3.07	2001	3072001	Betula	111.02	72.31	70.00
3.08	2001	3082001	Betula	135.10	169.81	171.00
3.09	2001	3092001	Betula	132.70	163.68	169.00
3.10	2001	3102001	Betula	250.30	268.87	266.00
3.16	2001	3162001	PBravo	293.03	279.77	273.00
3.17	2001	3172001	PBravo	202.28	248.58	330.00
3.18	2001	3182001	PBravo	207.53	221.01	208.00
3.19	2001	3192001	PBravo	535.38	401.00	462.00
3.20	2001	3202001	PBravo	304.72	456.70	492.00
3.26	2003	3262003	Betula	82.83	61.79	59.00
3.27	2003	3272003	PNigra	393.50	405.41	631.45
3.28	2003	3282003	PNigra	72.29	62.82	67.20
3.29	2003	3292003	Betula	104.43	90.87	92.40
3.30	2003	3302003	PNigra	186.46	190.45	193.20
3.31	2003	3312003	PNigra	381.44	282.60	182.00
3.32	2003	3322003	PNigra	450.78	440.16	431.20
3.38	2003	3382003	PNigra	90.25	71.08	68.80
3.39	2003	3392003	PNigra	296.43	278.45	285.00
3.41	2003	3412003	PNigra	497.28	581.31	680.40
3.42	2003	3422003	PNigra	445.90	472.82	470.40
3.50	2003	3502003	PNigra	193.99	229.43	232.00
3.51	2003	3512003	PNigra	205.94	162.86	180.00
3.53	2003	3532003	Betula	98.24	106.46	104.40
3.54	2003	3542003	Betula	103.15	128.85	122.40

Anexo XI: Densidade de copa através das fotografias hemisféricas (DsdC\_H)

Parcela	Ano	Chave1	FotoParcela	DsdC_H	Parcela	Ano	Chave1	FotoParcela	DsdC_H
1.09	2002	1092002	109_dscf0431	65.57%	2.15	2002	2152002	15_qua	5.75%
1.13	2002	1132002	113_dscf0433	42.78%	2.16	2002	2162002	16_qua	11.51%
1.2	2002	1202002	120_dscf0434	85.02%	2.17	2002	2172002	17_qua	19.26%
1.22	2002	1222002	122_dscf0427	58.38%	2.18	2002	2182002	18_qua	11.45%
1.23	2002	1232002	123_dscf0430	57.21%	2.19	2002	2192002	19_qua	20.49%
1.24	2001	1242001	124_dscf0428	68.46%	2.2	2002	2202002	20_qua	28.80%
1.27	2001	1272001	127_dscf0429	41.78%	2.21	2002	2212002	21_qua	57.35%
1.28	2002	1282002	128_dscf0426	69.08%	2.22	2002	2222002	22_qua	46.88%
1.38	2002	1382002	138_dscf0425	36.95%	2.23	2002	2232002	23_qua	21.55%
1.39	2002	1392002	139_dscf0424	78.71%	2.24	2002	2242002	24_qua	35.52%
1.4	2002	1402002	140_dscf0423	53.19%	2.25	2002	2252002	25_qua	29.54%
1.41	2002	1412002	141_dscf0422	36.77%	2.26	2002	2262002	26_qua	49.19%
1.42	2002	1422002	142_dscf0418	56.84%	2.27	2002	2272002	27_qua	27.81%
1.44	2002	1442002	144_dscf0415	53.90%	2.28	2002	2282002	28_qua	39.42%
1.45	2001	1452001	145_dscf0416	69.67%	2.29	2002	2292002	29_qua	37.37%
1.46	2002	1462002	146_dscf0421	69.36%	2.3	2002	2302002	30_qua	62.72%
1.47	2002	1472002	147_dscf0420	91.29%	2.31	2002	2312002	31_qua	22.50%
1.48	2002	1482002	148_dscf0419	63.25%	3.26	2003	3262003	p326 quad	65.98%
1.5	2002	1502002	150_dscf0417	87.50%	3.27	2003	3272003	p327 quad	61.27%
1.53	2002	1532002	153_dscf0432	51.16%	3.28	2003	3282003	p328 quad	52.04%
2.01	2002	2012002	1_qua	36.60%	3.29	2003	3292003	p329 quad	82.80%
2.02	2002	2022002	2_qua	42.64%	3.3	2003	3302003	p330 quad	67.68%
2.03	2002	2032002	3_qua	31.79%	3.31	2003	3312003	p331 quad	80.73%
2.04	2002	2042002	4_qua	35.35%	3.32	2003	3322003	p332 quad	85.56%
2.05	2002	2052002	5_qua	17.72%	3.38	2003	3382003	p338 quad	40.25%
2.06	2002	2062002	6_qua	23.90%	3.39	2003	3392003	p339 quad	89.35%
2.07	2002	2072002	7_qua	29.61%	3.42	2003	3422003	p342 quad	87.19%
2.08	2002	2082002	8_qua	34.22%	3.48	2003	3482003	p348 quad	57.79%
2.09	2002	2092002	9_qua	14.91%	3.49	2003	3492003	p349 quad	72.83%
2.1	2002	2102002	10_qua	5.15%	3.5	2003	3502003	p350 quad	59.32%
2.11	2002	2112002	11_qua	31.47%	3.51	2003	3512003	p351 quad	83.29%
2.12	2002	2122002	12_qua	11.15%	3.52	2003	3522003	p352 quad	77.85%
2.13	2002	2132002	13_qua	22.78%	3.53	2003	3532003	p353 quad	83.30%
2.14	2002	2142002	14_qua	4.49%	3.54	2003	3542003	p354 quad	90.45%

Anexo XII: Densidade de copa e índice de área foliar através da análise das fotografias hemisféricas, considerando  $k=1$ ,  $\theta=57^\circ$ ,  $LAI = -\ln(\tau_{57})$

Parcela	Ano	Chave1	Especie	FotoParcela	DSDC_H	LAI_F_H
3.29	2003	3292003	Betula	p329 quad	0.8280	0.188742
3.54	2003	3542003	Betula	p354 quad	0.9045	0.100373
2.19	2002	2192002	EucGlob	19_qua	0.2049	1.585233
2.18	2002	2182002	EucGlob	18_qua	0.1145	2.16718
2.17	2002	2172002	EucGlob	17_qua	0.1926	1.64714
2.16	2002	2162002	EucGlob	16_qua	0.1151	2.161954
2.15	2002	2152002	EucGlob	15_qua	0.0575	2.85597
2.13	2002	2132002	EucGlob	13_qua	0.2278	1.479287
2.2	2002	2202002	EucGlob	20_qua	0.2880	1.244795
2.1	2002	2102002	EucGlob	10_qua	0.0515	2.966173
2.14	2002	2142002	EucGlob	14_qua	0.0449	3.103317
2.09	2002	2092002	EucGlob	9_qua	0.1491	1.903138
2.08	2002	2082002	EucGlob	8_qua	0.3422	1.07236
2.07	2002	2072002	EucGlob	7_qua	0.2961	1.217058
2.06	2002	2062002	EucGlob	6_qua	0.2390	1.431292
2.05	2002	2052002	EucGlob	5_qua	0.1772	1.730476
2.04	2002	2042002	EucGlob	4_qua	0.3535	1.039872
2.02	2002	2022002	EucGlob	2_qua	0.4264	0.852377
2.11	2002	2112002	EucGlob	11_qua	0.3147	1.156135
2.31	2002	2312002	EucGlob	31_qua	0.2250	1.491655
2.22	2002	2222002	EucGlob	22_qua	0.4688	0.757579
2.23	2002	2232002	EucGlob	23_qua	0.2155	1.534794
2.24	2002	2242002	EucGlob	24_qua	0.3552	1.035074
2.25	2002	2252002	EucGlob	25_qua	0.2954	1.219425
2.27	2002	2272002	EucGlob	27_qua	0.2781	1.279775
2.29	2002	2292002	EucGlob	29_qua	0.3737	0.984302
2.12	2002	2122002	EucGlob	12_qua	0.1115	2.193731
2.21	2002	2212002	EucGlob	21_qua	0.5735	0.555997
1.42	2002	1422002	PBravo	142_dscf0418	0.5684	0.56493
1.5	2002	1502002	PBravo	150_dscf0417	0.8750	0.133531
1.48	2002	1482002	PBravo	148_dscf0419	0.6325	0.458075
1.47	2002	1472002	PBravo	147_dscf0420	0.9129	0.091129
1.45	2001	1452001	PBravo	145_dscf0416	0.6967	0.3614
1.23	2002	1232002	PBravo	123_dscf0430	0.5721	0.558441
1.46	2002	1462002	PBravo	146_dscf0421	0.6936	0.36586
1.41	2002	1412002	PBravo	141_dscf0422	0.3677	1.000488
1.28	2002	1282002	PBravo	128_dscf0426	0.6908	0.369905
1.44	2002	1442002	PBravo	144_dscf0415	0.5390	0.61804
1.24	2001	1242001	PBravo	124_dscf0428	0.6846	0.378921
1.53	2002	1532002	PBravo	153_dscf0432	0.5116	0.670212
1.22	2002	1222002	PBravo	122_dscf0427	0.5838	0.538197
1.2	2002	1202002	PBravo	120_dscf0434	0.8502	0.162284
1.09	2002	1092002	PBravo	109_dscf0431	0.6557	0.422052
1.27	2001	1272001	PBravo	127_dscf0429	0.4178	0.872752
3.5	2003	3502003	PNigra	p350 quad	0.5932	0.522224
3.49	2003	3492003	PNigra	p349 quad	0.7283	0.317042
3.42	2003	3422003	PNigra	p342 quad	0.8719	0.137081
3.39	2003	3392003	PNigra	p339 quad	0.8935	0.112609
3.38	2003	3382003	PNigra	p338 quad	0.4025	0.91006

Parcela	Ano	Chave1	Especie	FotoParcela	DSDC_H	LAI_F_H
3.31	2003	3312003	PNigra	p331 quad	0.8073	0.21406
3.27	2003	3272003	PNigra	p327 quad	0.6127	0.48988
3.52	2003	3522003	PNigra	p352 quad	0.7785	0.250386
3.48	2003	3482003	QPyr	p348 quad	0.5779	0.548354

Anexo XIII: Valores de LAI para a Bétula através da medição da PAR com o ceptómetro

Parcela	Ano	Chave1	Especie	LAI1	LAI2	LAI3
3.04	2001	3042001	Betula	6.7042	7.2377	6.0006
3.26	2003	3262003	Betula	3.9538	4.7189	4.0555
3.01	2001	3012001	Betula	7.3601	9.2476	7.9755
3.02	2001	3022001	Betula	4.5087	4.2645	3.5360
3.10	2001	3102001	Betula	5.2963	6.9937	6.2610
3.03	2001	3032001	Betula	4.4700	5.2030	4.3692
3.29	2003	3292003	Betula	4.3342	4.9397	4.2422
3.05	2001	3052001	Betula	6.7396	7.6710	6.4096
3.06	2001	3062001	Betula	5.2207	6.7132	5.9375
3.07	2001	3072001	Betula	5.3608	6.3263	5.4777
3.08	2001	3082001	Betula	5.2275	5.6950	4.9189
3.53	2003	3532003	Betula	4.6256	4.9135	4.1291
3.54	2003	3542003	Betula	5.6870	5.3544	4.5200
3.09	2001	3092001	Betula	5.2615	7.4304	6.9833

Anexo XIV: Valores de LAI para a Eucalipto através da medição da PAR com o ceptómetro

Parcela	Ano	Chave1	Especie	LAI1	LAI2	LAI3
2.13	2002	2132002	EucGlob	0.7166	0.7997	0.6829
2.14	2001	2142001	EucGlob	1.5998	2.0301	1.8317
2.14	2002	2142002	EucGlob	1.5998	2.0849	1.9209
2.15	2002	2152002	EucGlob	1.1356	1.2938	1.1323
2.12	2001	2122001	EucGlob	0.9274	1.0582	0.9096
2.16	2001	2162001	EucGlob	1.7916	2.2378	1.9987
2.17	2001	2172001	EucGlob	1.4300	1.5975	1.3675
2.18	2001	2182001	EucGlob	1.6709	2.2587	2.1330
2.18	2002	2182002	EucGlob	1.6709	2.1102	1.8867
2.19	2001	2192001	EucGlob	1.6982	1.7154	1.4477
2.19	2002	2192002	EucGlob	1.6982	2.0265	1.7663
2.20	2001	2202001	EucGlob	1.3439	1.7066	1.5348
2.20	2002	2202002	EucGlob	1.3439	1.7362	1.5802
2.21	2001	2212001	EucGlob	1.5491	2.1333	1.9578
2.21	2002	2212002	EucGlob	1.5491	2.1265	1.9467
2.22	2001	2222001	EucGlob	1.1404	1.7682	1.5842
2.15	2001	2152001	EucGlob	1.1356	1.3761	1.2322
2.07	2001	2072001	EucGlob	0.7651	1.0128	0.9033
2.01	2001	2012001	EucGlob	1.5912	2.6785	2.5577
2.01	2002	2012002	EucGlob	1.5912	2.5223	2.2842
2.02	2001	2022001	EucGlob	1.1278	1.4956	1.3338
2.02	2002	2022002	EucGlob	1.1278	1.5066	1.3491
2.03	2001	2032001	EucGlob	1.1860	1.4911	1.3286
2.03	2002	2032002	EucGlob	1.1860	1.5517	1.4200
2.04	2001	2042001	EucGlob	1.2535	1.6702	1.5677
2.04	2002	2042002	EucGlob	1.2535	1.6549	1.5395
2.05	2001	2052001	EucGlob	1.7046	2.2454	2.0664
2.05	2002	2052002	EucGlob	1.7046	2.2674	2.1044
2.13	2001	2132001	EucGlob	0.7166	0.8607	0.7528
2.06	2002	2062002	EucGlob	2.3044	3.1028	2.9080
2.22	2002	2222002	EucGlob	1.1404	1.8165	1.6557
2.07	2002	2072002	EucGlob	0.7651	0.9781	0.8584
2.08	2001	2082001	EucGlob	1.1148	1.4822	1.3194
2.08	2002	2082002	EucGlob	1.1148	1.4121	1.2317
2.09	2001	2092001	EucGlob	0.7568	0.9036	0.7883
2.09	2002	2092002	EucGlob	0.7568	0.9665	0.8762
2.10	2001	2102001	EucGlob	1.1840	1.4296	1.2538
2.10	2002	2102002	EucGlob	1.1840	1.3541	1.1649
2.11	2001	2112001	EucGlob	1.1305	0.7585	0.7196
2.11	2002	2112002	EucGlob	1.1305	1.4300	1.2811
2.17	2002	2172002	EucGlob	1.4300	1.8296	1.6544
2.12	2002	2122002	EucGlob	0.9274	1.0950	0.9499
2.06	2001	2062001	EucGlob	2.3044	3.0815	2.8690
2.29	2001	2292001	EucGlob	1.7000	2.1498	1.9351
2.23	2001	2232001	EucGlob	1.4020	1.8362	1.6885
2.31	2001	2312001	EucGlob	2.8662	3.5296	3.1265
2.30	2002	2302002	EucGlob	1.6538	2.0252	1.7884
2.30	2001	2302001	EucGlob	1.6538	2.0677	1.8478

Parcela	Ano	Chave1	Especie	LAI1	LAI2	LAI3
2.29	2002	2292002	EucGlob	1.7000	2.2033	2.0200
2.31	2002	2312002	EucGlob	2.8662	3.5639	3.1742
2.28	2002	2282002	EucGlob	1.1382	1.4026	1.2166
2.16	2002	2162002	EucGlob	1.7916	2.2561	2.0254
2.28	2001	2282001	EucGlob	1.1382	1.5187	1.3613
2.24	2001	2242001	EucGlob	2.8208	3.3892	2.9579
2.27	2001	2272001	EucGlob	2.3453	2.6942	2.3154
2.26	2002	2262002	EucGlob	1.2778	2.6327	2.3617
2.26	2001	2262001	EucGlob	1.2778	2.6975	2.4591
2.25	2002	2252002	EucGlob	1.7531	2.1932	1.9533
2.25	2001	2252001	EucGlob	1.7531	2.0843	1.8087
2.24	2002	2242002	EucGlob	2.8208	3.6774	3.3804
2.27	2002	2272002	EucGlob	2.3453	2.5896	2.2039
2.23	2002	2232002	EucGlob	1.4020	1.6747	1.4599

Anexo XV: Valores de LAI para o Pinheiro bravo através da medição da PAR com o ceptómetro

Parcela	Ano	Chave1	Especie	LAI1	LAI2	LAI3
1.47	2002	1472002	PBravo	2.4849	2.6149	2.2019
1.48	2001	1482001	PBravo	4.5054	5.4219	4.7256
1.48	2002	1482002	PBravo	4.5054	4.8292	4.0764
1.50	2001	1502001	PBravo	2.2409	2.1078	1.7763
1.50	2002	1502002	PBravo	2.2409	2.1672	1.8229
1.53	2001	1532001	PBravo	2.7551	3.5248	3.2093
1.39	2001	1392001	PBravo	1.3916	1.2016	1.0330
3.55	2003	3552003	PBravo	1.2049	1.1902	1.0016
1.47	2001	1472001	PBravo	2.4849	2.5334	2.1290
1.53	2002	1532002	PBravo	2.7551	2.7638	2.3458
1.46	2002	1462002	PBravo	4.0204	4.4615	3.7882
1.46	2001	1462001	PBravo	4.0204	4.1701	3.5087
1.45	2001	1452001	PBravo	3.8454	5.9271	5.2064
1.44	2002	1442002	PBravo	2.6893	2.6077	2.1927
1.44	2001	1442001	PBravo	2.6893	2.6156	2.1990
1.42	2002	1422002	PBravo	2.1577	1.8318	1.5763
1.42	2001	1422001	PBravo	2.1577	2.1839	1.8437
1.41	2001	1412001	PBravo	3.4383	3.4817	2.9297
1.22	2001	1222001	PBravo	4.1975	5.1092	4.4350
1.40	2002	1402002	PBravo	1.6433	1.6748	1.4142
1.40	2001	1402001	PBravo	1.6433	1.5961	1.3484
1.41	2002	1412002	PBravo	3.4383	3.5508	2.9903
3.20	2001	3202001	PBravo	1.5148	2.4907	2.1591
3.56	2003	3562003	PBravo	1.2060	1.2308	1.0386
1.06	2001	1062001	PBravo	2.0201	1.8904	1.5959
1.09	2001	1092001	PBravo	1.8899	2.1181	1.7987
1.09	2002	1092002	PBravo	1.8899	2.1424	1.8244
1.13	2001	1132001	PBravo	2.3634	2.7753	2.3929
1.13	2002	1132002	PBravo	2.3634	3.1325	2.9102
1.20	2001	1202001	PBravo	2.0339	2.1348	1.8024
3.16	2001	3162001	PBravo	2.3743	3.5766	3.1202
3.17	2001	3172001	PBravo	1.5344	2.5488	2.2996
1.23	2001	1232001	PBravo	4.1428	6.4966	5.7065
3.19	2001	3192001	PBravo	2.3335	3.8263	3.3395
1.38	2002	1382002	PBravo	1.0339	1.2329	1.0755
1.20	2002	1202002	PBravo	2.0339	1.8971	1.6041
1.22	2002	1222002	PBravo	4.1975	6.1212	5.2732
1.39	2002	1392002	PBravo	1.3916	1.4748	1.2501
1.23	2002	1232002	PBravo	4.1428	6.1780	5.3508
1.24	2001	1242001	PBravo	3.6101	5.1262	4.4109
1.27	2001	1272001	PBravo	3.4959	3.8545	3.2735
1.28	2001	1282001	PBravo	2.3124	2.5813	2.2060
1.28	2002	1282002	PBravo	2.3124	2.6758	2.3095
1.38	2001	1382001	PBravo	1.0339	1.1257	0.9594
3.18	2001	3182001	PBravo	1.7173	2.8402	2.5148

Anexo XVI: Valores de LAI para o Pinheiro negral através da medição da PAR com o ceptómetro

Parcela	Ano	Chave1	Especie	LAI1	LAI2	LAI3
3.49	2003	3492003	PNigra	3.4878	4.8963	4.3129
3.31	2003	3312003	PNigra	2.9638	3.3942	2.9194
3.27	2003	3272003	PNigra	3.7719	4.7035	4.0485
3.51	2003	3512003	PNigra	2.4727	2.6655	2.2547
3.30	2003	3302003	PNigra	2.0902	3.0211	2.5938
3.52	2003	3522003	PNigra	4.0226	3.9879	3.3538
3.32	2003	3322003	PNigra	4.8273	5.9018	5.1568
3.38	2003	3382003	PNigra	2.1287	2.0448	1.8347
3.39	2003	3392003	PNigra	3.3577	4.8440	4.2428
3.41	2003	3412003	PNigra	4.6843	5.2421	4.4648
3.42	2003	3422003	PNigra	3.6703	3.8223	3.1893
3.50	2003	3502003	PNigra	3.0482	4.1025	3.5963
3.28	2003	3282003	PNigra	2.0903	2.1798	1.8180

Anexo XVII: Valores de reflexão relativa e NDVI para a Bétula<sup>59</sup>

Parcela	Ano	Chave1	Verm	INFRAV	Pan	NDVI
3.01	2001	3012001	6.75	100	117	0.87
3.02	2001	3022001	7	102.25	128	0.87
3.03	2001	3032001	6.5	98.25	148	0.88
3.04	2001	3042001	6	98.75	165	0.89
3.05	2001	3052001	6.75	101.75	152	0.88
3.06	2001	3062001	6	81.75	122	0.86
3.07	2001	3072001	5.75	85	125	0.87
3.08	2001	3082001	6	70.25	98	0.84
3.09	2001	3092001	6.5	78.75	118	0.85
3.10	2001	3102001	5.75	78.25	116	0.86
3.26	2003	3262003	5.5	66	103	0.85
3.29	2003	3292003	5	74.5	114	0.87
3.53	2003	3532003	7.75	105.75	167	0.86
3.54	2003	3542003	4.5	74.75	106	0.89

<sup>59</sup> Os valores de reflexão relativa foram posteriormente convertidos em formato byte binário mas para efeitos de cálculo ainda foram utilizados os valores em formato real binário e por isso alguns dos valores apresentados no quadro são números fraccionários.

Anexo XVIII: Valores de reflexão relativa e NDVI para o Pinheiro negral

Parcela	Ano	Chave1	Verm	INFRAV	Pan	NDVI
3.27	2003	3272003	3.75	48.75	26	0.86
3.28	2003	3282003	6	61	62	0.82
3.30	2003	3302003	4.75	52	51	0.83
3.31	2003	3312003	5.25	51.25	58	0.81
3.32	2003	3322003	6	52.5	58	0.79
3.38	2003	3382003	7	56.75	75	0.78
3.39	2003	3392003	9.75	67.75	77	0.75
3.41	2003	3412003	4.5	45.5	36	0.82
3.42	2003	3422003	5.5	51.75	40	0.81
3.49	2003	3492003	4	40.75	28	0.82
3.50	2003	3502003	4	45.5	33	0.84
3.51	2003	3512003	4.75	51.75	50	0.83
3.52	2003	3522003	5.75	57.5	52	0.82

Anexo XIX: Valores de reflexão relativa e NDVI para o Eucalipto

Parcela	Ano	Chave1	Verm	INFRAV	Pan	NDVI
2.01	2001	2012001	13	74	109	0.70
2.01	2002	2012002	13	74	109	0.70
2.02	2001	2022001	18.5	74.75	126	0.60
2.02	2002	2022002	18.5	74.75	126	0.60
2.03	2001	2032001	18.5	76.25	123	0.61
2.03	2002	2032002	18.5	76.25	123	0.61
2.04	2001	2042001	15.25	65.25	105	0.62
2.04	2002	2042002	15.25	65.25	105	0.62
2.05	2001	2052001	15.75	85.75	107	0.69
2.05	2002	2052002	15.75	85.75	107	0.69
2.06	2001	2062001	16.25	65.25	93	0.60
2.06	2002	2062002	16.25	65.25	93	0.60
2.07	2001	2072001	16.5	61.25	108	0.58
2.07	2002	2072002	16.5	61.25	108	0.58
2.08	2001	2082001	16	70.75	114	0.63
2.08	2002	2082002	16	70.75	114	0.63
2.09	2001	2092001	16.5	75	110	0.64
2.09	2002	2092002	16.5	75	110	0.64
2.10	2001	2102001	15.25	62.5	136	0.61
2.10	2002	2102002	15.25	62.5	136	0.61
2.11	2001	2112001	15.75	60.75	92	0.59
2.11	2002	2112002	15.75	60.75	92	0.59
2.12	2001	2122001	15.5	67.25	114	0.63
2.12	2002	2122002	15.5	67.25	114	0.63
2.13	2001	2132001	19.25	73.25	122	0.58
2.13	2002	2132002	19.25	73.25	122	0.58
2.14	2001	2142001	15.5	72.5	110	0.65
2.14	2002	2142002	15.5	72.5	110	0.65
2.15	2001	2152001	22.25	70.75	129	0.52
2.15	2002	2152002	22.25	70.75	129	0.52
2.16	2001	2162001	14.5	67.75	106	0.65
2.16	2002	2162002	14.5	67.75	106	0.65
2.17	2001	2172001	11.75	58.5	79	0.67
2.17	2002	2172002	11.75	58.5	79	0.67
2.18	2001	2182001	15	67.5	106	0.64
2.18	2002	2182002	15	67.5	106	0.64
2.19	2001	2192001	14.25	69.75	111	0.66
2.19	2002	2192002	14.25	69.75	111	0.66
2.20	2001	2202001	9.5	53	56	0.70
2.20	2002	2202002	9.5	53	56	0.70
2.21	2001	2212001	11	64	93	0.71
2.21	2002	2212002	11	64	93	0.71
2.22	2001	2222001	12	67	93	0.70
2.22	2002	2222002	12	67	93	0.70
2.23	2001	2232001	13.25	67	95	0.67
2.23	2002	2232002	13.25	67	95	0.67
2.24	2001	2242001	7.25	51	50	0.75
2.24	2002	2242002	7.25	51	50	0.75
2.25	2001	2252001	13	59.5	82	0.64
2.25	2002	2252002	13	59.5	82	0.64

Parcela	Ano	Chave1	Verm	INFRAV	Pan	NDVI
2.26	2001	2262001	7.25	49.5	48	0.74
2.26	2002	2262002	7.25	49.5	48	0.74
2.27	2001	2272001	6	47	59	0.77
2.27	2002	2272002	6	47	59	0.77
2.28	2001	2282001	10.5	59.75	75	0.70
2.28	2002	2282002	10.5	59.75	75	0.70
2.29	2001	2292001	11	68.5	90	0.72
2.29	2002	2292002	11	68.5	90	0.72
2.30	2001	2302001	9	51.25	61	0.70
2.30	2002	2302002	9	51.25	61	0.70
2.31	2001	2312001	7.25	47.75	43	0.74
2.31	2002	2312002	7.25	47.75	43	0.74

Anexo XX: Valores de reflexão relativa e NDVI para o Pinheiro bravo

Parcela	Ano	Chave1	Verm	INFRAV	Pan	NDVI
1.03	2001	1032001	9.75	55.5	56	0.70
1.04	2001	1042001	5	47	40	0.81
1.05	2001	1052001	5.5	45	33	0.78
1.06	2001	1062001	5.25	45	31	0.79
1.07	2001	1072001	9.75	55.75	67	0.70
1.09	2001	1092001	9.25	47.75	51	0.68
1.09	2002	1092002	9.25	47.75	51	0.68
1.12	2001	1122001	11.75	63	56	0.69
1.13	2001	1132001	9	59.25	83	0.74
1.13	2002	1132002	9	59.25	83	0.74
1.14	2001	1142001	11.25	45.25	42	0.60
1.15	2001	1152001	12	62.75	81	0.68
1.16	2001	1162001	13.5	63	120	0.65
1.17	2001	1172001	9.75	51	54	0.68
1.18	2001	1182001	8.75	52.75	52	0.72
1.19	2001	1192001	12.25	52.75	79	0.62
1.20	2001	1202001	10.75	60.25	87	0.70
1.20	2002	1202002	10.75	60.25	87	0.70
1.22	2001	1222001	8.5	67	78	0.77
1.22	2002	1222002	8.5	67	78	0.77
1.23	2001	1232001	9.5	62	97	0.73
1.23	2002	1232002	9.5	62	97	0.73
1.24	2001	1242001	17.25	78	91	0.64
1.25	2001	1252001	11	62	88	0.70
1.27	2001	1272001	9	57.5	94	0.73
1.28	2001	1282001	16	62.75	94	0.59
1.28	2002	1282002	16	62.75	94	0.59
1.29	2001	1292001	13	63.25	106	0.66
1.36	2001	1362001	11.5	67.5	106	0.71
1.38	2001	1382001	13.5	65.25	88	0.66
1.38	2002	1382002	13.5	65.25	88	0.66
1.39	2001	1392001	13	63	93	0.66
1.39	2002	1392002	13	63	93	0.66
1.40	2001	1402001	13	63	87	0.66
1.40	2002	1402002	13	63	87	0.66
1.41	2001	1412001	11	71.75	103	0.73
1.41	2002	1412002	11	71.75	103	0.73
1.42	2001	1422001	15.75	60.75	112	0.59
1.42	2002	1422002	15.75	60.75	112	0.59
1.44	2001	1442001	21	61.5	94	0.49
1.44	2002	1442002	21	61.5	94	0.49
1.45	2001	1452001	11.25	78.75	110	0.75
1.46	2001	1462001	13.5	59.25	84	0.63
1.46	2002	1462002	13.5	59.25	84	0.63
1.47	2001	1472001	8.5	62	82	0.76
1.47	2002	1472002	8.5	62	82	0.76
1.48	2001	1482001	10.25	68.5	104	0.74
1.48	2002	1482002	10.25	68.5	104	0.74
1.50	2001	1502001	9	53.5	67	0.71
1.50	2002	1502002	9	53.5	67	0.71

Parcela	Ano	Chave1	Verm	INFRAV	Pan	NDVI
1.53	2001	1532001	13.5	62.75	100	0.65
1.53	2002	1532002	13.5	62.75	100	0.65
3.16	2001	3162001	9	79.5	112	0.80
3.17	2001	3172001	8	79.5	116	0.82
3.18	2001	3182001	9	84.5	118	0.81
3.19	2001	3192001	9	84.5	104	0.81
3.20	2001	3202001	9.5	77.5	115	0.78
3.55	2003	3552003	13.75	70	98	0.67
3.56	2003	3562003	15	68.5	109	0.64

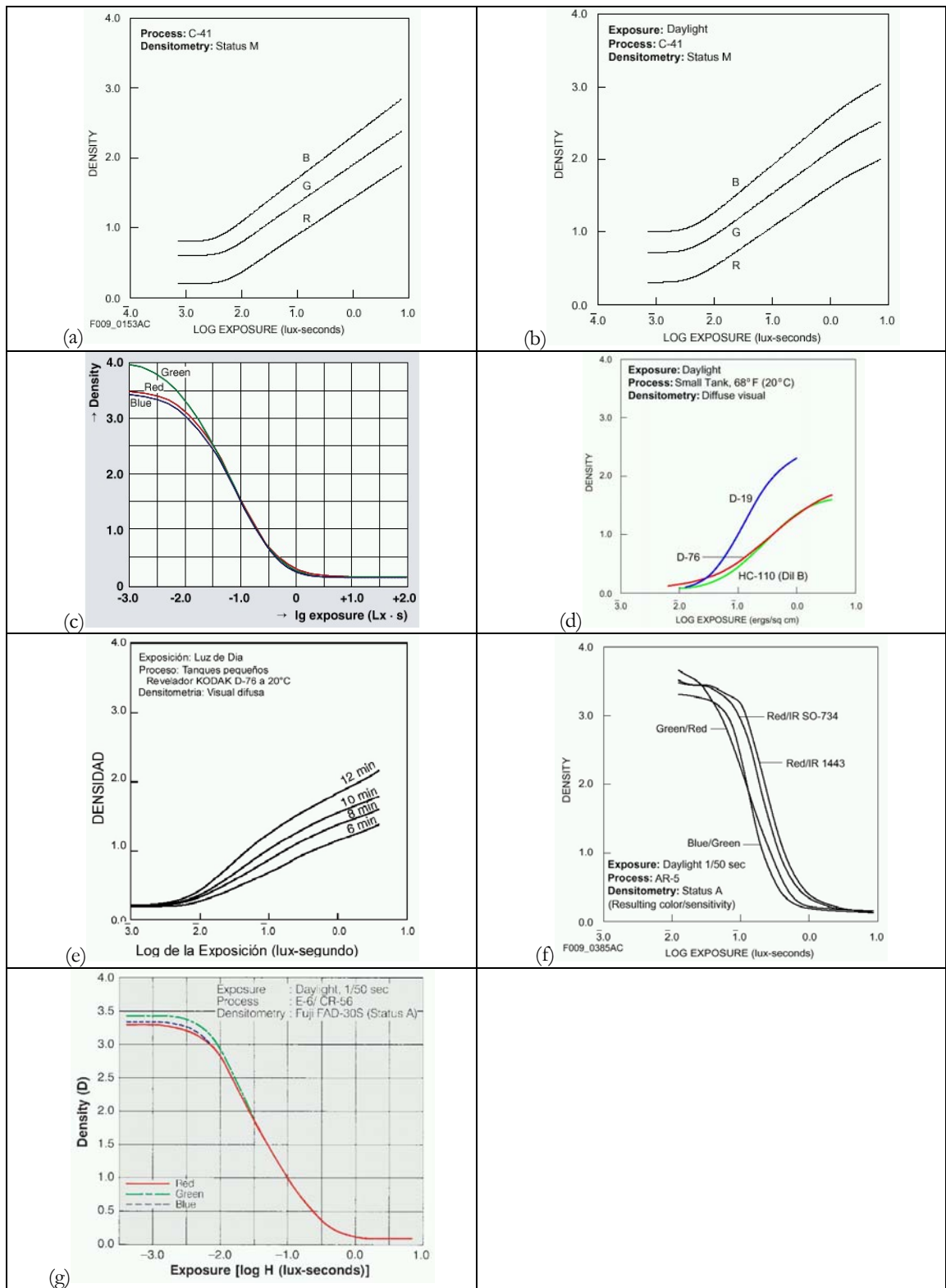


Figura 110: Curvas características das películas utilizadas

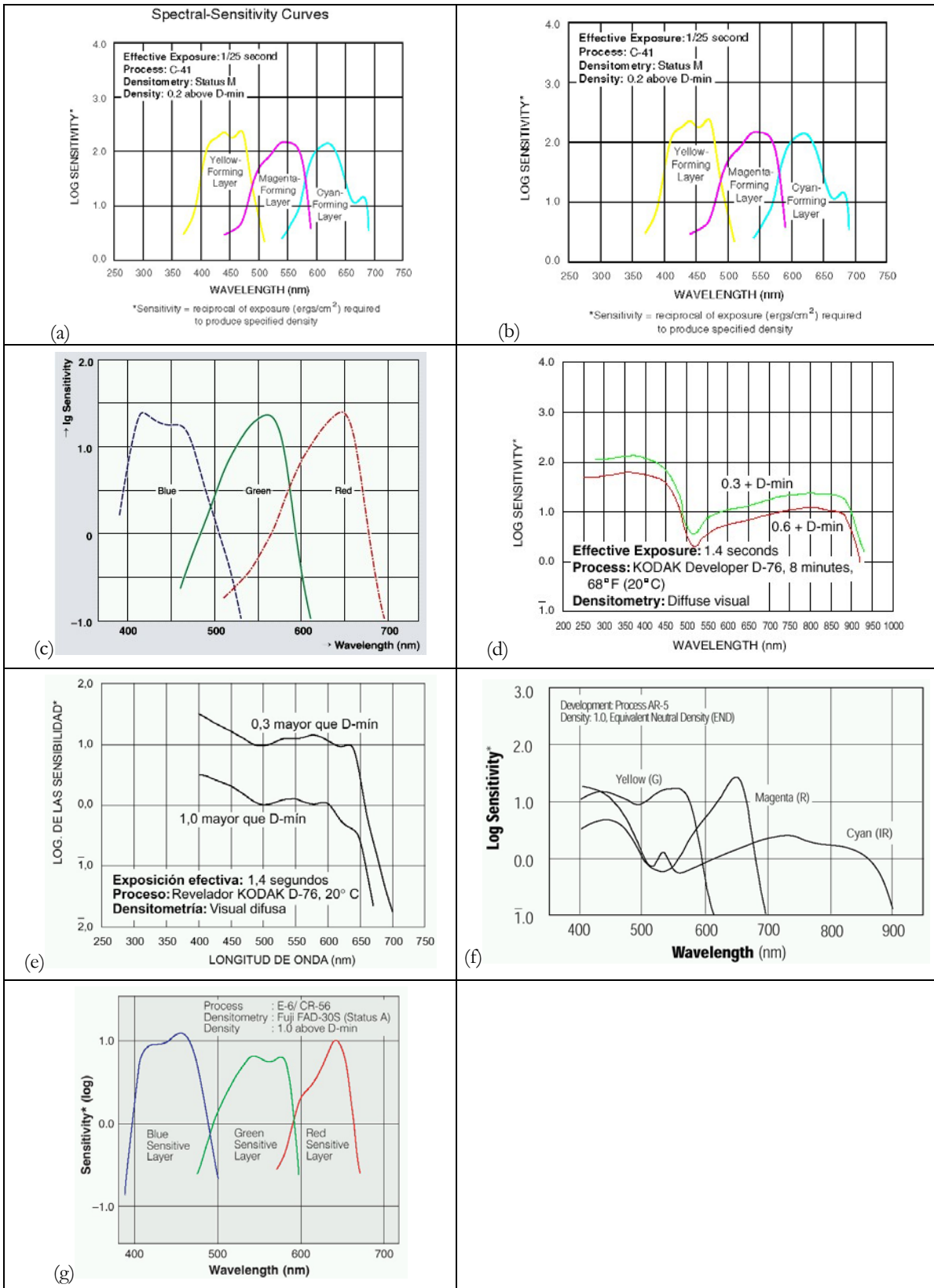


Figura 111: Curvas de sensibilidade espectral das películas utilizadas



Figura 112: Cartões Ultra CompactFlash para câmaras fotográficas digitais profissionais

#### Anexo XXI: Estereoscopia

A estereoscopia é a capacidade que o ser humano possui de ver imagens tridimensionais. A partir da visão estereoscópica adquire-se percepção tanto da distância como do relevo dos objectos, sendo tanto maior quanto maior for a distância interpupilar. Ambos os olhos convergem para um mesmo ponto gerando-se no cérebro a fusão das imagens relativas a cada um dos olhos. O ângulo formado pelos eixos dos dois globos oculares quando focalizam a um objecto é designado por paralaxe angular ou paralaxe estereoscópica (Marques, 1996). Pode considerar-se ser esta uma visão estereoscópica natural. Com os estereoscópios e com os estereorestituidores cria-se uma visão estereoscópica artificial fusionando-se imagens com uma certa paralaxe e, conseqüentemente, a visão em relevo.



Figura 113: Estreito de Gibraltar – (Fonte: Avery e Berlin, 1992)

Com algum treino consegue-se obter a percepção tridimensional à vista desarmada da imagem apresentada na Figura 113.<sup>(60)</sup>

---

<sup>60</sup> Se estiver a observar esta imagem no monitor tem que seleccionar um zoom de 100%. Tente focar um ponto algures por trás da imagem. Seguidamente coloque no campo de visão esta imagem e deverá ver 3 imagens, estando a do meio em relevo. Não forçando a vista, quando conseguirmos ver tridimensionalmente, a percepção é evidente.

Anexo XXII: Valores de reflectância (Landsat ETM+) cruzada com valores dendrométricos de campo por parcela

Parcela	Ano	Especie	t	nj	N	$\bar{d}$	G	Vm	hd	LAI1	LAI2	Red	IR	Pan	NDVI
1.03	2001	PBravo	24	72	1440	15.34	27.62	35.98	13.46	4.43	0.00	9.75	55.5	56	0.70
1.04	2001	PBravo	22	162	3240	11.43	35.50	147.82	11.75	3.39	0.00	5	47	40	0.81
1.05	2001	PBravo	21	152	3040	12.70	41.96	215.25	12.40	3.25	0.00	5.5	45	33	0.78
1.06	2001	PBravo	21	24	480	13.04	6.94	28.49	11.25	2.02	1.89	5.25	45	31	0.79
1.07	2001	PBravo	16	70	1400	12.51	17.92	70.38	10.36	1.83	0.00	9.75	55.75	67	0.70
1.09	2001	PBravo	18	55	1100	13.34	16.35	63.77	9.09	1.89	2.12	9.25	47.75	51	0.68
1.09	2002	PBravo	19	55	1100	14.70	19.79	97.62	6.68	1.89	2.14	9.25	47.75	51	0.68
1.12	2001	PBravo	21	65	1300	11.58	15.16	47.77	9.53	1.97	0.00	11.75	63	56	0.69
1.13	2001	PBravo	22	31	620	12.98	8.85	34.98	8.96	2.36	2.78	9	59.25	83	0.74
1.13	2002	PBravo	23	31	620	13.67	9.76	60.57	13.14	2.36	3.13	9	59.25	83	0.74
1.14	2001	PBravo	50	16	320	30.31	23.56	189.52	17.93	0.95	0.00	11.25	45.25	42	0.60
1.15	2001	PBravo	20	83	1660	16.51	36.96	166.51	13.15	3.04	0.00	12	62.75	81	0.68
1.16	2001	PBravo	63	25	500	33.84	52.62	444.12	21.59	3.82	0.00	13.5	63	120	0.65
1.17	2001	PBravo	21	118	2360	15.09	44.80	257.08	11.35	3.45	0.00	9.75	51	54	0.68
1.18	2001	PBravo	44	24	480	25.39	24.80	129.26	17.01	2.02	0.00	8.75	52.75	52	0.72
1.19	2001	PBravo	48	11	220	26.41	12.22	91.65	16.45	2.14	0.00	12.25	52.75	79	0.62
1.20	2001	PBravo	53	12	240	38.94	28.98	255.84	18.51	2.03	2.13	10.75	60.25	87	0.70
1.20	2002	PBravo	54	12	240	39.89	30.36	272.35	19.74	2.03	1.90	10.75	60.25	87	0.70
1.22	2001	PBravo	36	24	480	22.76	21.61	111.30	15.79	4.20	5.11	8.5	67	78	0.77
1.22	2002	PBravo	37	24	480	23.53	22.89	160.41	18.89	4.20	6.12	8.5	67	78	0.77
1.23	2001	PBravo	53	19	380	35.17	38.95	357.20	20.81	4.14	6.50	9.5	62	97	0.73
1.23	2002	PBravo	54	19	380	35.93	40.57	507.72	25.65	4.14	6.18	9.5	62	97	0.73
1.24	2001	PBravo	31	21	420	26.24	25.19	168.77	17.93	3.61	5.13	17.25	78	91	0.64
1.25	2001	PBravo	19	77	1540	14.91	28.84	142.02	11.52	3.30	0.00	11	62	88	0.70
1.27	2001	PBravo	34	25	500	27.55	33.21	270.62	20.86	3.50	3.85	9	57.5	94	0.73
1.28	2001	PBravo	19	16	320	12.34	4.00	14.48	9.83	2.31	2.58	16	62.75	94	0.59
1.28	2002	PBravo	20	16	320	13.03	4.42	17.94	9.99	2.31	2.68	16	62.75	94	0.59
1.29	2001	PBravo	22	90	1800	13.64	28.41	127.22	12.80	2.91	0.00	13	63.25	106	0.66
1.36	2001	PBravo	55	21	420	24.48	21.09	144.35	17.86	1.46	0.00	11.5	67.5	106	0.71
1.38	2001	PBravo	45	30	600	20.80	22.54	137.90	15.55	1.03	1.13	13.5	65.25	88	0.66
1.38	2002	PBravo	46	29	580	21.84	23.69	200.78	16.04	1.03	1.23	13.5	65.25	88	0.66
1.39	2001	PBravo	37	26	520	18.95	16.42	76.62	10.14	1.39	1.20	13	63	93	0.66
1.39	2002	PBravo	38	20	400	19.05	13.09	68.90	13.28	1.39	1.47	13	63	93	0.66
1.40	2001	PBravo	39	72	1440	17.16	36.20	296.92	17.74	1.64	1.60	13	63	87	0.66
1.40	2002	PBravo	40	72	1440	17.78	38.87	273.96	17.82	1.64	1.67	13	63	87	0.66
1.41	2001	PBravo	41	23	460	30.96	37.01	351.37	21.63	3.44	3.48	11	71.75	103	0.73
1.41	2002	PBravo	42	22	440	31.47	36.69	319.68	21.32	3.44	3.55	11	71.75	103	0.73
1.42	2001	PBravo	47	31	620	26.34	35.42	320.18	18.05	2.16	2.18	15.75	60.75	112	0.59
1.42	2002	PBravo	48	31	620	26.79	36.56	324.26	17.88	2.16	1.83	15.75	60.75	112	0.59
1.44	2001	PBravo	43	28	560	25.60	32.34	221.30	18.94	2.69	2.62	21	61.5	94	0.49
1.44	2002	PBravo	44	28	560	26.11	33.55	238.55	16.58	2.69	2.61	21	61.5	94	0.49
1.45	2001	PBravo	61	35	700	25.59	37.83	286.87	17.91	3.85	5.93	11.25	78.75	110	0.75
1.46	2001	PBravo	61	39	780	19.45	26.08	159.61	15.60	4.02	4.17	13.5	59.25	84	0.63
1.46	2002	PBravo	62	39	780	20.05	27.58	166.63	16.54	4.02	4.46	13.5	59.25	84	0.63
1.47	2001	PBravo	50	27	540	29.21	39.49	342.50	20.02	2.48	2.53	8.5	62	82	0.76
1.47	2002	PBravo	51	27	540	29.79	41.03	368.30	19.34	2.48	2.61	8.5	62	82	0.76

Parcela	Ano	Especie	t	nj	N	$\bar{d}$	G	Vm	hd	LAI1	LAI2	Red	IR	Pan	NDVI
1.48	2001	PBravo	44	75	1500	18.70	47.22	366.74	17.99	4.51	5.42	10.25	68.5	104	0.74
1.48	2002	PBravo	45	73	1460	19.28	48.55	389.06	16.95	4.51	4.83	10.25	68.5	104	0.74
1.48	2002	PBravo	45	73	1460	19.28	48.55	389.06	16.95	4.51	4.83	10.25	68.5	104	0.74
1.50	2001	PBravo	35	28	560	23.24	25.09	143.43	14.23	2.24	2.11	9	53.5	67	0.71
1.50	2002	PBravo	36	27	540	23.97	25.57	151.32	13.63	2.24	2.17	9	53.5	67	0.71
1.53	2001	PBravo	35	60	1200	17.27	30.38	193.23	15.86	2.76	3.52	13.5	62.75	100	0.65
1.53	2002	PBravo	36	58	1160	18.34	32.92	205.96	16.38	2.76	2.76	13.5	62.75	100	0.65
2.01	2001	EucGlob	11	53	1060	12.02	12.96	100.21	20.71	1.59	2.68	13	74	109	0.70
2.01	2002	EucGlob	12	53	1060	12.37	13.75	78.46	22.26	1.59	2.52	13	74	109	0.70
2.02	2001	EucGlob	5	63	1260	7.33	5.70	18.09	10.20	1.13	1.50	18.5	74.75	126	0.60
2.02	2002	EucGlob	6	63	1260	7.71	6.27	22.24	13.88	1.13	1.51	18.5	74.75	126	0.60
2.03	2001	EucGlob	5	54	1080	8.02	5.62	19.80	9.48	1.19	1.49	18.5	76.25	123	0.61
2.03	2002	EucGlob	6	54	1080	8.44	6.23	25.88	12.67	1.19	1.55	18.5	76.25	123	0.61
2.04	2001	EucGlob	5	58	1160	8.23	6.69	28.89	13.07	1.25	1.67	15.25	65.25	105	0.62
2.04	2002	EucGlob	6	58	1160	8.57	7.26	46.16	15.44	1.25	1.65	15.25	65.25	105	0.62
2.05	2001	EucGlob	6	48	960	8.03	5.29	19.55	13.11	1.70	2.25	15.75	85.75	107	0.69
2.05	2002	EucGlob	7	48	960	8.41	5.82	22.68	18.64	1.70	2.27	15.75	85.75	107	0.69
2.06	2001	EucGlob	6	80	1600	9.38	12.22	67.87	14.18	2.30	3.08	16.25	65.25	93	0.60
2.06	2002	EucGlob	7	80	1600	9.71	13.14	91.59	14.93	2.30	3.10	16.25	65.25	93	0.60
2.07	2001	EucGlob	5	58	1160	5.78	3.17	9.15	8.06	0.77	1.01	16.5	61.25	108	0.58
2.07	2002	EucGlob	6	58	1160	6.12	3.54	10.11	9.86	0.77	0.98	16.5	61.25	108	0.58
2.08	2001	EucGlob	5	50	1000	7.20	4.33	15.45	9.01	1.11	1.48	16	70.75	114	0.63
2.08	2002	EucGlob	6	50	1000	7.62	4.85	19.08	11.22	1.11	1.41	16	70.75	114	0.63
2.09	2001	EucGlob	5	52	1040	8.43	6.20	21.83	10.48	0.76	0.90	16.5	75	110	0.64
2.09	2002	EucGlob	6	52	1040	9.06	7.18	43.19	13.19	0.76	0.97	16.5	75	110	0.64
2.10	2001	EucGlob	5	53	1060	8.08	5.95	24.14	10.72	1.18	1.43	15.25	62.5	136	0.61
2.10	2002	EucGlob	6	53	1060	8.73	6.96	23.54	12.73	1.18	1.35	15.25	62.5	136	0.61
2.11	2001	EucGlob	6	102	2040	6.07	6.87	24.12	11.00	1.13	0.76	15.75	60.75	92	0.59
2.11	2002	EucGlob	7	101	2020	6.28	7.27	33.30	12.36	1.13	1.43	15.75	60.75	92	0.59
2.12	2001	EucGlob	5	59	1180	7.83	6.17	20.72	11.47	0.93	1.06	15.5	67.25	114	0.63
2.12	2002	EucGlob	6	59	1180	8.18	6.73	25.84	11.45	0.93	1.10	15.5	67.25	114	0.63
2.13	2001	EucGlob	5	50	1000	6.30	3.45	5.81	9.22	0.72	0.86	19.25	73.25	122	0.58
2.13	2002	EucGlob	6	50	1000	6.65	3.85	11.61	11.09	0.72	0.80	19.25	73.25	122	0.58
2.14	2001	EucGlob	5	53	1060	8.72	6.65	22.75	11.94	1.60	2.03	15.5	72.5	110	0.65
2.14	2002	EucGlob	6	53	1060	9.00	7.11	37.93	12.50	1.60	2.08	15.5	72.5	110	0.65
2.15	2001	EucGlob	5	51	1020	6.96	4.16	13.08	7.93	1.14	1.38	22.25	70.75	129	0.52
2.15	2002	EucGlob	6	51	1020	7.30	4.57	16.01	7.14	1.14	1.29	22.25	70.75	129	0.52
2.16	2001	EucGlob	8	71	1420	12.36	19.70	133.66	19.90	1.79	2.24	14.5	67.75	106	0.65
2.16	2002	EucGlob	9	71	1420	12.44	20.04	145.76	18.81	1.79	2.26	14.5	67.75	106	0.65
2.17	2001	EucGlob	8	59	1180	12.32	15.22	90.56	17.53	1.43	1.60	11.75	58.5	79	0.67
2.17	2002	EucGlob	9	59	1180	12.62	15.97	130.44	18.15	1.43	1.83	11.75	58.5	79	0.67
2.18	2001	EucGlob	11	54	1080	15.54	22.75	173.19	23.07	1.67	2.26	15	67.5	106	0.64
2.18	2002	EucGlob	12	54	1080	15.66	23.47	260.91	24.94	1.67	2.11	15	67.5	106	0.64
2.19	2001	EucGlob	11	35	700	17.35	17.44	124.62	20.98	1.70	1.72	14.25	69.75	111	0.66
2.19	2002	EucGlob	12	35	700	17.67	18.14	147.17	20.79	1.70	2.03	14.25	69.75	111	0.66
2.20	2001	EucGlob	8	58	1160	13.26	17.19	175.58	19.35	1.34	1.71	9.5	53	56	0.70
2.20	2002	EucGlob	9	58	1160	13.53	17.92	162.33	19.22	1.34	1.74	9.5	53	56	0.70
2.21	2001	EucGlob	8	70	1400	12.54	19.35	122.74	18.82	1.55	2.13	11	64	93	0.71

Parcela	Ano	Especie	t	nj	N	$\bar{d}$	G	Vm	hd	LAI1	LAI2	Red	IR	Pan	NDVI
2.21	2002	EucGlob	9	70	1400	12.77	20.06	140.15	18.98	1.55	2.13	11	64	93	0.71
2.22	2001	EucGlob	8	66	1320	14.30	23.51	146.36	18.18	1.14	1.77	12	67	93	0.70
2.22	2002	EucGlob	9	66	1320	14.47	24.39	191.40	18.64	1.14	1.82	12	67	93	0.70
2.23	2001	EucGlob	11	43	860	16.03	19.25	130.28	23.39	1.40	1.84	13.25	67	95	0.67
2.23	2002	EucGlob	12	43	860	16.22	19.72	173.78	22.50	1.40	1.67	13.25	67	95	0.67
2.24	2001	EucGlob	8	63	1260	13.26	19.03	117.88	18.93	2.82	3.39	7.25	51	50	0.75
2.24	2002	EucGlob	9	63	1260	13.53	19.86	129.47	19.51	2.82	3.68	7.25	51	50	0.75
2.25	2001	EucGlob	8	53	1060	11.78	12.54	62.28	15.87	1.75	2.08	13	59.5	82	0.64
2.25	2002	EucGlob	9	53	1060	12.10	13.26	89.90	16.18	1.75	2.19	13	59.5	82	0.64
2.26	2001	EucGlob	8	65	1300	11.23	14.54	89.91	18.08	1.28	2.70	7.25	49.5	48	0.74
2.26	2002	EucGlob	9	64	1280	11.64	15.29	101.25	19.38	1.28	2.63	7.25	49.5	48	0.74
2.27	2001	EucGlob	8	59	1180	12.05	14.90	92.63	17.65	2.35	2.69	6	47	59	0.77
2.27	2002	EucGlob	9	59	1180	12.22	15.52	92.14	17.25	2.35	2.59	6	47	59	0.77
2.28	2001	EucGlob	8	55	1100	12.37	14.29	87.46	18.00	1.14	1.52	10.5	59.75	75	0.70
2.28	2002	EucGlob	9	55	1100	12.68	15.01	84.28	18.44	1.14	1.40	10.5	59.75	75	0.70
2.29	2001	EucGlob	7	53	1060	14.91	19.90	122.71	18.06	1.70	2.15	11	68.5	90	0.72
2.29	2002	EucGlob	8	53	1060	15.27	20.86	124.78	18.36	1.70	2.20	11	68.5	90	0.72
2.30	2001	EucGlob	8	54	1080	12.23	13.77	114.13	19.38	1.65	2.07	9	51.25	61	0.70
2.30	2002	EucGlob	9	54	1080	12.57	14.51	149.95	20.54	1.65	2.03	9	51.25	61	0.70
2.31	2001	EucGlob	8	70	1400	11.05	14.64	86.07	16.21	2.87	3.53	7.25	47.75	43	0.74
2.31	2002	EucGlob	9	70	1400	11.42	15.66	116.51	17.46	2.87	3.56	7.25	47.75	43	0.74
3.01	2001	Betula	40	60	1200	15.96	25.78	149.20	19.24	7.36	9.25	6.75	100	117	0.87
3.02	2001	Betula	40	45	900	18.49	24.83	110.85	11.20	4.51	4.26	7	102.25	128	0.87
3.03	2001	Betula	40	60	1200	16.33	27.82	140.40	20.49	4.47	5.20	6.5	98.25	148	0.88
3.04	2001	Betula	40	30	600	22.17	23.82	107.10	17.62	6.70	7.24	6	98.75	165	0.89
3.05	2001	Betula	40	30	600	20.12	21.12	108.79	19.24	6.74	7.67	6.75	101.75	152	0.88
3.06	2001	Betula	40	95	1900	13.64	30.38	153.45	18.02	5.22	6.71	6	81.75	122	0.86
3.07	2001	Betula	40	70	1400	12.90	19.79	72.31	14.83	5.36	6.33	5.75	85	125	0.87
3.08	2001	Betula	40	95	1900	14.24	33.34	169.81	16.43	5.23	5.69	6	70.25	98	0.84
3.09	2001	Betula	40	65	1300	14.18	23.76	163.68	17.16	5.26	7.43	6.5	78.75	118	0.85
3.10	2001	Betula	40	95	1900	15.92	41.56	268.87	13.73	5.30	6.99	5.75	78.25	116	0.86
3.16	2001	PBravo	40	35	700	27.11	41.07	279.77	15.70	2.37	3.58	9	79.5	112	0.80
3.17	2001	PBravo	40	30	600	27.07	36.35	248.58	13.73	1.53	2.55	8	79.5	116	0.82
3.18	2001	PBravo	40	20	400	29.03	28.27	221.01	13.49	1.72	2.84	9	84.5	118	0.81
3.19	2001	PBravo	40	55	1100	27.05	66.59	401.00	18.40	2.33	3.83	9	84.5	104	0.81
3.20	2001	PBravo	40	30	600	32.53	54.51	456.70	18.15	1.51	2.49	9.5	77.5	115	0.78
3.26	2003	Betula	40	59	1180	13.96	19.85	61.79	13.63	3.95	4.72	5.5	66	103	0.85
3.27	2003	PNigra	40	41	820	30.78	63.21	405.41	16.11	3.77	5.33	3.75	48.75	26	0.86
3.28	2003	PNigra	40	42	840	16.42	19.32	62.82	9.29	2.09	2.18	6	61	62	0.82
3.29	2003	Betula	45	66	1320	14.69	24.81	90.87	14.21	4.33	4.94	5	74.5	114	0.87
3.30	2003	PNigra	40	46	920	21.90	37.03	190.45	11.27	2.09	3.02	4.75	52	51	0.83
3.31	2003	PNigra	40	26	520	30.27	46.23	282.60	20.81	2.96	3.39	5.25	51.25	58	0.81
3.32	2003	PNigra	40	44	880	27.66	58.11	440.16	21.01	4.83	4.25	6	52.5	58	0.79
3.38	2003	PNigra	25	43	860	16.93	20.64	71.08	11.62	2.13	2.04	7	56.75	75	0.78
3.39	2003	PNigra	35	57	1140	20.24	41.19	278.45	17.95	3.36	4.84	9.75	67.75	77	0.75
3.41	2003	PNigra	45	42	840	30.93	69.84	581.31	20.90	4.68	5.24	4.5	45.5	36	0.82
3.42	2003	PNigra	45	56	1120	22.59	49.66	472.82	22.04	3.67	4.09	5.5	51.75	40	0.81
3.49	2003	PNigra	40	35	700	28.39	47.26	388.14	16.21	3.49	4.81	4	40.75	28	0.82

Parcela	Ano	Especie	t	nj	N	$\bar{d}$	G	Vm	hd	LAI1	LAI2	Red	IR	Pan	NDVI
3.50	2003	PNigra	40	40	800	22.33	33.73	229.43	15.49	3.05	4.10	4	45.5	33	0.84
3.51	2003	PNigra	45	25	500	24.79	26.67	162.86	19.31	2.47	2.67	4.75	51.75	50	0.83
3.52	2003	PNigra	50	46	920	27.04	60.91	454.51	20.18	4.02	3.99	5.75	57.5	52	0.82
3.53	2003	Betula	40	58	1160	14.36	20.35	106.46	14.82	4.63	4.91	7.75	105.75	167	0.86
3.54	2003	Betula	45	51	1020	15.64	22.13	128.85	12.83	5.69	5.35	4.5	74.75	106	0.89
3.55	2003	PBravo	22	46	920	13.51	13.50	36.64	7.51	1.20	1.19	13.75	70	98	0.67
3.56	2003	PBravo	22	72	1440	12.64	18.75	58.29	6.47	1.21	1.23	15	68.5	109	0.64

### Anexo XXIII: Parâmetros de voo (formulário)

Descrição	Unidades	Equação	Ligação
Denominador da escala pretendida (E)		constante a introduzir	
Distância focal (f) das lentes:	mm	constante a introduzir	
Altura de voo (H):	m	$H = E \cdot f$	Eq. 95
Cota média ou datum (EL):	m	constante a introduzir	
Altitude real (ALT):	m	$ALT = H + EL$	Eq. 96
Lado do Negativo (Ne):	mm	constante a introduzir	
Lado do Negativo (Nt):	mm	constante a introduzir	
Distância longitudinal de terreno por foto (SL):	m	$SL = Ne1 \cdot E$	Eq. 97
Distância transversal de terreno por foto (ST):	m	$ST = Ne2 \cdot E$	Eq. 98
Área coberta por frame (FA):	m <sup>2</sup>	$FA = SL / 1000 \cdot ST$	Eq. 99
Sobreposição longitudinal (p)	%	constante a introduzir	
Comprimento da base (B):	m	$B = SL \cdot (1 - (p / 100))$	Eq. 100
Largura da base (A):	m	$= A$	
Base over height Ratio (R):		$R = B / H$	Eq. 101
Sobreposição transversal (q)	%	constante a introduzir	
Distância entre linhas de voo (A):	m	$A = ST \cdot (1 - (q / 100))$	Eq. 102
Comprimento da linha de voo (Lp):	m	constante a introduzir	
Largura do Bloco (Lq):	m	constante a introduzir	
Área do Bloco (Ga):	m <sup>2</sup>	$Ga = Lp \cdot Lq$	Eq. 103
Nº de Fotografias/Linha (+ 2 antes e 2 depois) (Np):		$Np = (Lp / B) + 5$	Eq. 104
Número de Linhas de Voo (Nq):		$Nq = ((Lq - ST) / A) + 1$	Eq. 105
Área do Modelo (Cobertura estereoscópica) (Fm):	ha	$Fm = ((SL - B) \cdot SL) / 10000$	Eq. 106
Área estereoscópica (Sa):	ha	$Sa = (A \cdot B) / 10000$	Eq. 107
Nº de fotos requerido / Bloco (Nt):		$Nt = Ga / (Sa / 100) + Nq \cdot 5$	Eq. 108
VELOCIDADE DO AVIÃO (Vg):		(nós; m/s; MPH; km/h)	
Intervalo entre exposições (T):	s	$T = B / Vg$ (com Vg em m/s)	Eq. 109
Velocidade do disparo (Shutter Speed) (SS):	s	constante a introduzir	
Arrastamento (Apparent Image Motion) (AIM):	µm	$AIM = (SS \cdot Vg \cdot F) / H$	Eq. 110
resolução no terreno (com digitalização a 600 ppp)	m	$ResSolo = E \cdot 2.54 / 600 / 100$	Eq. 111
Conversão de pés para m:		dividir por 0.3048	
Conversão de m para pés:		multiplique por 3.2808	
Conversão de nós em (m/s) :		dividir por 1.9417	
Conversão de (milhas / h) em (m/s) :		multiplicar por 0.447	
Conversão de (km / h) em (m/s) :		multiplicar por 0.276	
m/s para km/h:		multiplicar por 3.6	

Anexo XXIV: Planeamento de voo das missões efectuadas (missão do dia xx/xx/200x)

<b>Descrição</b>	<b>valor</b>	<b>unidades</b>
<b>Introduza denominador da escala (m) pretendida:</b>	<b>15000</b>	escala
<b>Introduza a distância focal (F) das lentes:</b>	<b>50</b>	mm
Altura acima do terreno (H) pretendida:	2461	pés
	750	m
Cota média (EL) ou datum:	2461	pés
<b>Introduza cota média (EL) ou datum:</b>	<b>750</b>	m
altitude real (TALT):	4922	pés
	1500	m
<b>Introduza o lado do Negativo (Ne):</b>	<b>15.6</b>	mm
<b>Introduza o lado do Negativo (Nt):</b>	<b>23.3</b>	mm
Distância longitudinal de terreno coberta por frame:	234	m
Distância transversal de terreno coberta por frame:	349.5	m
Area coberta por frame:	0.0818	km <sup>2</sup>
<b>Introduza sobreposição longitudinal p(%):</b>	<b>60</b>	%
Comprimento da base (B):	93.6	m
Largura da base: (mesmo que Dist. Entre linhas):	244.65	m
Base over height Ratio:	0.12	
<b>Introduza sobreposição transversal q(%):</b>	<b>30</b>	%
Distância entre linhas de voo (a):	244.65	m
<b>Introduza Comprimento da linha de voo:</b>	<b>1.2</b>	km
<b>Introduza Largura do Bloco:</b>	<b>0.8</b>	km
Area do Bloco:	0.96	km <sup>2</sup>
Número de Fotografias/Linha (mais 2 antes & 2 depois).	18	fotografias por fiada
Número de Linhas de Voo:	3	fiadas
Fm = Area do Modelo (Cobertura estereoscópica):	3.29	ha
Sa = New Stereo Area = a.B:	2.29	ha
Required Number of Photos/Block (Nt) = ";	57	fotografias
<b>Introduza código para velocidade do avião (C.):</b>	<b>2</b>	(1 (m/s); 2 (knots); 3 (MPH); 4 (km/hr))
<b>Introduza Velocidade do Avião (Vg):</b>	<b>90</b>	nós
Velocidade do avião (Vg <sub>g</sub> ):	46	m/seg
Velocidade do avião:	165.6	km/h
Intervalo entre exposições (T):	2.0	seg
<b>Introduza Shutter Speed - velocidade do disparo (SS):</b>	<b>0.002</b>	seg (decimal)
velocidade do disparo (SS):	<b>1/500</b>	seg
arrastamento (AIM):	6	μm

Anexo XXV: Planejamento de voo das missões efectuadas (missão do dia 11/07/2002)

<b>Descrição</b>	<b>valor</b>	<b>unidades</b>
<b>Introduza denominador da escala (m) pretendida:</b>	<b>10000</b>	escala
<b>Introduza a distância focal (F) das lentes:</b>	<b>50</b>	mm
Altura acima do terreno (H) pretendida:	1641	pés
Altura acima do terreno (H) pretendida:	500	m
Cota média (EL) ou datum:	2461	pés
<b>Introduza cota média (EL) ou datum:</b>	<b>750</b>	m
altitude real (TALT):	4102	pés
altitude real (TALT):	1250	m
<b>Introduza o lado do Negativo (Ne):</b>	<b>24</b>	mm
<b>Introduza o lado do Negativo (Nt):</b>	<b>36</b>	mm
Distância longitudinal de terreno coberta por frame:	240	m
Distância transversal de terreno coberta por frame:	360	m
Area coberta por frame:	0.0864	km <sup>2</sup>
<b>Introduza sobreposição longitudinal p(%):</b>	<b>60</b>	%
Comprimento da base (B):	96	m
Largura da base: (mesmo que Dist. Entre linhas):	252	m
Base over height Ratio:	0.19	
<b>Introduza sobreposição transversal q(%):</b>	<b>30</b>	%
Distância entre linhas de voo (a):	252	m
<b>Introduza Comprimento da linha de voo:</b>	<b>3</b>	km
<b>Introduza Largura do Bloco:</b>	<b>0.252</b>	km
Area do Bloco:	0.756	km <sup>2</sup>
Número de Fotografias/Linha (mais 2 antes & 2 depois):	37	fotografias por fiada
Número de Linhas de Voo:	1	fiadas
Fm = Area do Modelo (Cobertura estereoscópica):	3.46	ha
Sa = New Stereo Area = a.B:	2.42	ha
Required Number of Photos/Block (Nt) = ";	37	fotografias
<b>Introduza código para velocidade do avião (C.):</b>	<b>2</b>	(1 (m/s); 2 (knots); 3 (MPH); 4 (km/hr))
<b>Introduza Velocidade do Avião (Vg):</b>	<b>90</b>	nós
Velocidade do avião (Vg.):	46	m/seg
Velocidade do avião:	165.6	km/h
Intervalo entre exposições (T):	2.1	seg
<b>Introduza Shutter Speed - velocidade do disparo (SS):</b>	<b>0.002</b>	seg (decimal)
velocidade do disparo (SS):	1/500	seg
arrastamento (AIM):	9	µm

Anexo XXVI: Planeamento de voo das missões efectuadas (missão do dia 03/07/2002)

<b>Descrição</b>	<b>valor</b>	<b>unidades</b>
<b>Introduza denominador da escala (m) pretendida:</b>	<b>15000</b>	escala
<b>Introduza a distância focal (F) das lentes:</b>	<b>50</b>	mm
Altura acima do terreno (H) pretendida:	2461	pés
Altura acima do terreno (H) pretendida:	750	m
Cota média (EL) ou datum:	2461	pés
<b>Introduza cota média (EL) ou datum:</b>	<b>750</b>	m
altitude real (TALT):	4922	pés
altitude real (TALT):	1500	m
<b>Introduza o lado do Negativo (Ne):</b>	<b>24</b>	mm
<b>Introduza o lado do Negativo (Nt):</b>	<b>36</b>	mm
Distância longitudinal de terreno coberta por frame:	360	m
Distância transversal de terreno coberta por frame:	540	m
Area coberta por frame:	0.1944	km <sup>2</sup>
<b>Introduza sobreposição longitudinal p(%):</b>	<b>10</b>	%
Comprimento da base (B):	324	m
Largura da base: (mesmo que Dist. Entre linhas):	486	m
Base over height Ratio:	0.43	
<b>Introduza sobreposição transversal q(%):</b>	<b>10</b>	%
Distância entre linhas de voo (a):	486	m
<b>Introduza Comprimento da linha de voo:</b>	<b>1.2</b>	km
<b>Introduza Largura do Bloco:</b>	<b>0.8</b>	km
Area do Bloco:	0.96	km <sup>2</sup>
Número de Fotografias/Linha (mais 2 antes & 2 depois).	9	fotografias por fiada
Número de Linhas de Voo:	2	fiadas
Fm = Area do Modelo (Cobertura estereoscópica):	1.30	ha
Sa = New Stereo Area = a.B:	15.75	ha
Required Number of Photos/Block (Nt) = ";	17	fotografias
<b>Introduza código para velocidade do avião (C.):</b>	<b>2</b>	(1 (m/s); 2 (knots); 3 (MPH); 4 (km/hr))
<b>Introduza Velocidade do Avião (Vg):</b>	<b>90</b>	nós
Velocidade do avião (Vg <sub>g</sub> ):	46	m/seg
Velocidade do avião:	165.6	km/h
Intervalo entre exposições (T):	7.0	seg
<b>Introduza Shutter Speed - velocidade do disparo (SS):</b>	<b>0.002</b>	seg (decimal)
velocidade do disparo (SS):	1/500	seg
arrastamento (AIM):	6	μm

Anexo XXVII: Especificações teóricas de planeamento de voo para uma altura de voo de 800m

Descrição	Rolleiflex			unidades
	6008	Nikon F3	Fuji S1 Pro	
<b>Factor da escala (E)</b>	<b>10000</b>	<b>16000</b>	<b>28571</b>	escala
<b>Distância focal (f) das lentes</b>	<b>80.000</b>	<b>50.000</b>	<b>28.000</b>	mm
Altura de voo (h) (pés)	2625	2625	2625	pés
Altura de voo (h) (m)	800	800	800	m
Cota média do ponto principal (C) (pés)	2484	2484	2484	pés
<b>Cota média do ponto principal (C) (m)</b>	<b>757</b>	<b>757</b>	<b>757</b>	m
Altitude de voo (H) (pés)	5109	5109	5109	pés
Altitude de voo (H) (m)	1557	1557	1557	m
<b>Lado do Negativo (d1) (mm)</b>	<b>42.0</b>	<b>24.0</b>	<b>15.6</b>	mm
<b>Lado do Negativo (d2) (mm)</b>	<b>56.0</b>	<b>36.0</b>	<b>23.3</b>	mm
Distância longitudinal de terreno coberta por fotografia (D1) (m)	420	384	446	m
Distância transversal de terreno coberta por fotografia (D2) (m)	560	576	666	m
Área coberta por frame	0.2352	0.2212	0.2967	km <sup>2</sup>
<b>Sobreposição longitudinal p(%)</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	%
Comprimento da base (B) (m)	168	154	178	m
Largura da base: (mesmo que Dist. Entre linhas):	560	576	666	m
Razão entre comprimento e largura da base:	0.21	0.19	0.22	
<b>Introduza sobreposição transversal q(%):</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	%
Distância entre linhas de voo (a):	560	576	666	m
<b>Comprimento da linha de voo (L) (m)</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	km
<b>Introduza Largura do Bloco:</b>	<b>0.800</b>	<b>0.800</b>	<b>0.800</b>	km
Área do Bloco:	0.800	0.960	0.960	km <sup>2</sup>
Número de Fotografias/Linha (mais 2 antes & 2 depois) (N)	11	13	12	fotografias por fiada
Número de Linhas de Voo:	2	2	2	fiadas
Fm = Área do Modelo (Cobertura estereoscópica):	10.58	8.85	11.92	ha
Sa = Nova área estereoscópica = a.B:	9.41	8.85	11.87	ha
Número de fotografias requeridas/Bloco (Nt) = ";	19	21	19	fotografias
SELECCIONE CÓDIGO PARA VELOCIDADE DO AVIÃO (Vg):"				
<b>Introduza código para velocidade do avião (C.):</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	(1 (m/s); 2 (nós); 3 (ft/s))
<b>Velocidade do Avião (V) (nós)</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	nós
Velocidade do avião (V) (m/seg)	46	46	46	m/seg
Velocidade do avião (V) Km/h)	165.6	165.6	165.6	km/h
Intervalo entre exposições (T) (seg)	3.7	3.3	3.9	seg
<b>Introduza Shutter Speed - velocidade do disparo (SS):</b>	<b>0.002</b>	<b>0.002</b>	<b>0.002</b>	seg (decimal)
velocidade do disparo (s) (seg)	1/500	1/500	1/500	seg
arrastamento (A) (mm)	9	5	3	µm
resolução ao solo (m)	0.4	0.7	0.22	m

Nota: este quadro foi feito numa Folha de cálculo Excel que serve para a introdução de dados em células apropriadas (células a negrito) e calcula os parâmetros essenciais a dar ao piloto e/ou para introduzir nos diversos aparelhos que é realçada visualmente (células sombreadas).

Anexo XXVIII: Especificações teóricas de planeamento de voo para uma altura de voo de 520m

Descrição	Rolleiflex			unidades
	6008	Nikon F3	Fuji S1 Pro	
<b>Factor da escala (E)</b>	<b>6500</b>	<b>10400</b>	<b>18571</b>	escala
<b>Distância focal (f) das lentes</b>	<b>80.000</b>	<b>50.000</b>	<b>28.000</b>	mm
Altura de voo (h) (pés)	1707	1707	1707	pés
Altura de voo (h) (m)	520	520	520	m
Cota média do ponto principal (C) (pés)	2484	2484	2484	pés
<b>Cota média do ponto principal (C) (m)</b>	<b>757</b>	<b>757</b>	<b>757</b>	m
Altitude de voo (H) (pés)	4191	4191	4191	pés
Altitude de voo (H) (m)	1277	1277	1277	m
<b>Lado do Negativo (d1) (mm)</b>	<b>42.0</b>	<b>24.0</b>	<b>15.6</b>	mm
<b>Lado do Negativo (d2) (mm)</b>	<b>56.0</b>	<b>36.0</b>	<b>23.3</b>	mm
Distância longitudinal de terreno coberta por fotografia (D1) (m)	273	250	290	m
Distância transversal de terreno coberta por fotografia (D2) (m)	364	374	433	m
Área coberta por frame	0.0994	0.0935	0.1254	km <sup>2</sup>
<b>Sobreposição longitudinal p(%)</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	%
Comprimento da base (B) (m)	109	100	116	m
Largura da base: (mesmo que Dist. Entre linhas):	364	374	433	m
Razão entre comprimento e largura da base:	0.21	0.19	0.22	
<b>Introduza sobreposição transversal q(%):</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	%
Distância entre linhas de voo (a):	364	374	433	m
<b>Comprimento da linha de voo (L) (m)</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	km
<b>Introduza Largura do Bloco:</b>	<b>0.800</b>	<b>0.800</b>	<b>0.800</b>	km
Área do Bloco:	0.800	0.960	0.960	km <sup>2</sup>
Número de Fotografias/Linha (mais 2 antes & 2 depois) (N)	15	18	16	fotografias por fiada
Número de Linhas de Voo:	3	3	2	fiadas
Fm = Área do Modelo (Cobertura estereoscópica):	4.47	3.74	5.04	ha
Sa = Nova área estereoscópica = a.B:	3.97	3.74	5.01	ha
Número de fotografias requeridas/Bloco (Nt) = ":	36	41	30	fotografias
SELECCIONE CÓDIGO PARA VELOCIDADE DO AVIÃO (Vg):"				
<b>Introduza código para velocidade do avião (C.):</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	(1 (m/s); 2 (nós); 3 (N
<b>Velocidade do Avião (V) (nós)</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	nós
Velocidade do avião (V) (m/seg)	46	46	46	m/seg
Velocidade do avião (V) Km/h)	165.6	165.6	165.6	km/h
Intervalo entre exposições (T) (seg)	2.4	2.2	2.5	seg
<b>Introduza Shutter Speed - velocidade do disparo (SS):</b>	<b>0.002</b>	<b>0.002</b>	<b>0.002</b>	seg (decimal)
velocidade do disparo (s) (seg)	1/500	1/500	1/500	seg
arrastamento (A) (mm)	14	8	4	µm
resolução ao solo (m)	0.3	0.4	0.14	m

Anexo XXIX: Folha de rosto da Base de dados das FAPMF – neste caso relativo ao voo de 21 de Julho de 2001

Local	Formato	Base de dados das rotas:	Nº de fiadas:
Marão	24 por 36 mm	ipmc_doutoramento_rotas.mdb	3
Data	Abertura (F/STOP)	Tabela da Rota prevista:	sentido de voo:
21 de Julho de 2001		ipmc_doutoramento_rotas.RotaPrevistaMaraoDia21072001	N-S
Hora de voo	Velocidade disparo	Tabela da Rota feita:	prefixo
		ipmc_doutoramento_rotas.RotaFeitaMaraoDia21072001b	marao_2001_slide_
Altitude de voo	Filtros	Pasta de arquivo das fotografias:	série
		D:\ACTIVIDADE PEDAGOGICA E CIENTIFICA\Doutoramento2001\FAPMF	
Película	Condições atmosféricas	Comentário:	fiada
Positivo	Boas	As imagens também estão num CD (NO_NAME) criado na própria loja de fotografia FOTOMARIUS digitalizados por máquina deles. Também digitalizámos com o scanner do Luís Miguel. (D:\ACTIVIDADE PEDAGOGICA E CIENTIFICA\Doutoramento2001\FAPMF 2001 e 2002\marao_slides_2001) e estamos a trabalhar com estes.	1
Sensibilidade	Luminosidade		
50 ASA	Boa		
Digitalizador	largura (pixels)	altura (polegadas)	
NIKON COOLSCAN IV	3072	0.9448819	
resolução (ppp)	altura (pixels)	largura (polegadas)	
2167.5	2048	1.4173228	

Anexo XXX: Valores estatísticos das imagens

	pan	TM1-1m	TM2-1m	TM3-1m	TM4-1m	TM5-1m	TM7-1m
min	0	49	17	14	36	26	8
max	199	151	79	108	147	221	130
média	84.8078	62.1371	27.3401	27.3884	80.7456	73.7525	28.9909
desvio-padrão	36.1921	7.8383	5.7862	9.475	18.2405	22.9418	13.5681
variância	1309.868	61.43895	33.48011	89.77563	332.7158	526.3262	184.0933
df	14849999	14849999	14849999	14849999	14849999	14849999	14849999

Anexo XXXI: Matriz de variâncias e covariâncias

VAR/COVAR	pan	TM1-1m	TM2-2m	TM3-1m	TM4-1m	TM5-1m	TM7-1m
pan	1307.36						
TM1-1m	150.28	61.44					
TM2-2m	119.69	42.91	33.48				
TM3-1m	189.46	70.26	52.94	89.78			
TM4-1m	118.04	12.43	24.15	10.23	332.72		
TM5-1m	448.24	140.45	110.77	177.54	159.28	523.36	
TM7-1m	271.33	91.19	69.32	116.83	31.47	285.74	184.09

Anexo XXXII: Matriz de correlações

COR MATRX	pan	TM1-1m	TM2-2m	TM3-1m	TM4-1m	TM5-1m	TM7-1m
pan	1.000000						
TM1-1m	0.530264	1.000000					
TM2-2m	0.572112	0.946018	1.000000				
TM3-1m	0.553022	0.946097	0.965627	1.000000			
TM4-1m	0.178974	0.086926	0.228769	0.059195	1.000000		
TM5-1m	0.541888	0.783262	0.836841	0.819063	0.381710	1.000000	
TM7-1m	0.553062	0.857402	0.882942	0.908796	0.127140	0.920551	1.000000

Anexo XXXIII: Percentagem de variância de cada componente, valores e vectores próprios

COMPONENT	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
% var.	68.17	18.05	11.85	1.37	0.36	0.12	0.07
eigenval.	1726.33	457.09	300.17	34.73	9.17	2.92	1.82
eigvec.1	0.820785	-0.553321	0.137494	-0.035012	0.001991	0.000120	-0.003651
eigvec.2	0.136324	0.131357	-0.171470	0.494530	-0.168925	-0.578937	-0.571398
eigvec.3	0.107350	0.110766	-0.082033	0.350504	-0.115150	-0.401481	0.819865
eigvec.4	0.170847	0.159639	-0.225163	0.588413	-0.213812	0.709000	-0.000860
eigvec.5	0.130462	0.399530	0.876377	0.196608	0.120337	0.030001	-0.035832
eigvec.6	0.431999	0.624572	-0.185932	-0.494490	-0.379612	-0.007874	-0.005320
eigvec.7	0.251738	0.298518	-0.302751	0.044232	0.868274	0.001112	0.000000

Anexo XXXIV: Peso de cada componente

LOADING	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
pan	0.943177	-0.327173	0.065883	-0.005706	0.000167	0.000006	-0.000136
TM1-1m	0.722620	0.358284	-0.379010	0.371804	-0.065265	-0.126231	-0.098315
TM2-2m	0.770848	0.409270	-0.245630	0.356981	-0.060267	-0.118585	0.191096
TM3-1m	0.749191	0.360213	-0.411723	0.365974	-0.068339	0.127887	-0.000122
TM4-1m	0.297172	0.468285	0.832413	0.063520	0.019979	0.002811	-0.002649
TM5-1m	0.784595	0.583690	-0.140813	-0.127381	-0.050252	-0.000588	-0.000314
TM7-1m	0.770885	0.470380	-0.386590	0.019211	0.193797	0.000140	0.000000

Anexo XXXV: Peso de cada imagem em cada componente na ACP Março imagens TM

PESOS	C1	C2	C3	C4	C5	C6
TM1-1m	0.945602	-0.160194	-0.216651	-0.177400	0.040474	0.011553
TM2-1m	0.973299	-0.015901	-0.188500	0.086560	-0.032128	-0.091554
TM3-1m	0.966472	-0.184003	-0.103651	0.106984	-0.043889	0.089234
TM4-1m	0.232651	0.966313	-0.102919	0.011773	0.032312	0.018401
TM5-1m	0.922691	0.209071	0.295858	-0.072610	-0.109878	-0.006909
TM7-1m	0.954268	-0.076427	0.250943	0.046487	0.135477	-0.006248

Anexo XXXVI: Cálculo do OIF (imagens TM Landsat5)

BANDAS TM			Variância			Correlação			OIF
			1	2	3	1/2	1/3	2/3	
3	4	5	9.475	18.241	22.877	0.059	0.819	0.382	40.154
1	4	5	7.838	18.241	22.877	0.087	0.783	0.382	39.105
4	5	7	18.241	22.877	13.568	0.382	0.127	0.921	38.258
3	4	7	9.475	18.241	13.568	0.059	0.909	0.127	37.698
1	4	7	7.838	18.241	13.568	0.087	0.857	0.127	37.002
1	3	4	7.838	9.475	18.241	0.946	0.087	0.059	32.552
2	4	5	5.786	18.241	22.877	0.229	0.837	0.382	32.407
2	4	7	5.786	18.241	13.568	0.229	0.883	0.127	30.346
2	3	4	5.786	9.475	18.241	0.966	0.229	0.059	26.725
1	2	4	7.838	5.786	18.241	0.946	0.087	0.229	25.255
3	5	7	9.475	22.877	13.568	0.819	0.909	0.921	17.339
1	5	7	7.838	22.877	13.568	0.783	0.857	0.921	17.290
2	5	7	5.786	22.877	13.568	0.837	0.883	0.921	15.995
2	3	5	5.786	9.475	22.877	0.966	0.837	0.819	14.548
1	2	5	7.838	5.786	22.877	0.946	0.783	0.837	14.224
1	3	7	7.838	9.475	13.568	0.946	0.857	0.909	11.386
2	3	7	5.786	9.475	13.568	0.966	0.883	0.909	10.455
1	2	7	7.838	5.786	13.568	0.946	0.857	0.883	10.122
1	2	3	7.838	5.786	9.475	0.946	0.946	0.966	8.083

Anexo XXXVII: Matriz de Variâncias/Covariâncias da ACP de todas as imagens

VAR/COVAR	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	PANS
TM1	379.68	439.29	473.77	73.17	458.03	475.81	375.82
TM2	439.29	566.53	589.96	230.41	597.91	598.37	495.09
TM3	473.77	589.96	658.56	67.00	630.82	663.72	515.60
TM4	73.17	230.41	67.00	1746.04	480.58	155.03	272.24
TM5	458.03	597.91	630.82	480.58	894.41	782.49	588.26
TM7	475.81	598.37	663.72	155.03	782.49	805.83	570.14
PANS	375.82	495.09	515.60	272.24	588.26	570.14	1347.77

Anexo XXXVIII: Matriz de correlações da ACP de todas as imagens

COR MATRX	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	PANS
TM1	1.000000	0.947182	0.947460	0.089868	0.785993	0.860206	0.525375
TM2	0.947182	1.000000	0.965856	0.231666	0.839954	0.885592	0.566587
TM3	0.947460	0.965856	1.000000	0.062479	0.821941	0.911102	0.547280
TM4	0.089868	0.231666	0.062479	1.000000	0.384565	0.130693	0.177464
TM5	0.785993	0.839954	0.821941	0.384565	1.000000	0.921702	0.535788
TM7	0.860206	0.885592	0.911102	0.130693	0.921702	1.000000	0.547083
PANS	0.525375	0.566587	0.547280	0.177464	0.535788	0.547083	1.000000

Anexo XXXIX: Percentagem de variação por componente, valores próprios e vectores próprios da ACP de todas as imagens

COMPONENT	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
% var.	71.16	14.94	8.80	3.56	0.80	0.50	0.24
eigenval.	4.98	1.05	0.62	0.25	0.06	0.04	0.02
eigvec.1	0.420373	-0.172150	-0.130841	-0.431985	-0.732161	0.214101	0.089566
eigvec.2	0.434270	-0.029964	-0.116971	-0.372644	0.360221	-0.172957	-0.705898
eigvec.3	0.430125	-0.194281	-0.111904	-0.203466	0.448877	-0.230959	0.684466
eigvec.4	0.108444	0.937774	-0.127744	-0.203504	0.051434	0.169681	0.140178
eigvec.5	0.412112	0.187907	-0.151771	0.587492	-0.302129	-0.576765	-0.052292
eigvec.6	0.425404	-0.089628	-0.118042	0.496553	0.195799	0.713761	-0.052024
eigvec.7	0.295167	0.094652	0.950468	-0.001154	-0.020623	0.000348	0.010073

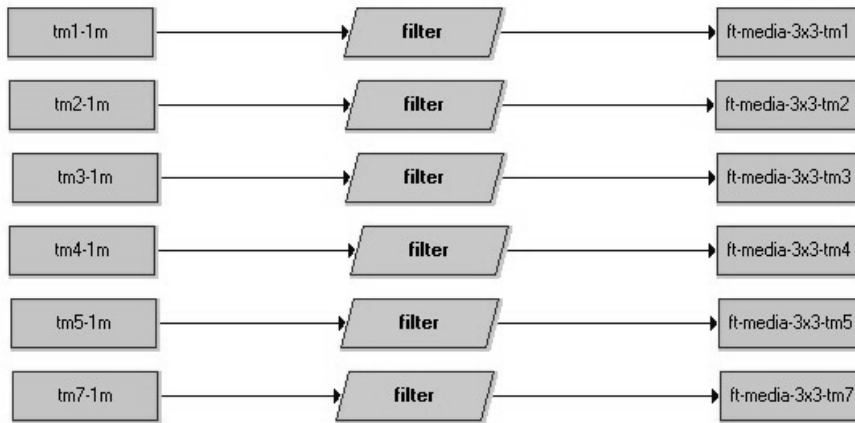
Anexo XL: Pesos das componentes da ACP de todas as imagens

LOADING	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
TM1	0.938202	-0.176034	-0.102705	-0.215719	-0.173104	0.040148	0.011570
TM2	0.969219	-0.030640	-0.091817	-0.186087	0.085167	-0.032433	-0.091186
TM3	0.959969	-0.198664	-0.087841	-0.101604	0.106128	-0.043309	0.088417
TM4	0.242028	0.958933	-0.100274	-0.101624	0.012161	0.031819	0.018108
TM5	0.919765	0.192147	-0.119134	0.293375	-0.071432	-0.108154	-0.006755
TM7	0.949432	-0.091651	-0.092659	0.247963	0.046293	0.133844	-0.006720
PANS	0.658764	0.096788	0.746081	-0.000576	-0.004876	0.000065	0.001301

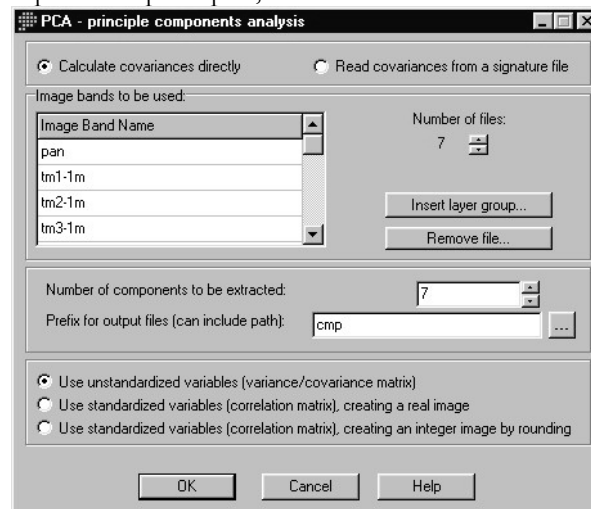
Anexo XLI: Cálculo do OIF (imagens ETM+ Landsat 7)

Bandas TM			Variância			Correlação			OIF
a	b	c	a	b	c	a/b	a/c	b/c	
4	5	7	394.47	915.08	601.22	19.861	30.250	24.520	74.631
3	4	7	367.69	394.47	601.22	19.175	19.861	24.520	63.556
3	4	5	367.69	394.47	915.08	19.175	19.861	30.250	69.287
1	4	5	129.53	394.47	915.08	11.381	19.861	30.250	61.493
1	4	7	129.53	394.47	601.22	11.381	19.861	24.520	55.762
2	4	7	166.76	394.47	601.22	12.914	19.861	24.520	57.295
2	4	5	166.76	394.47	915.08	12.914	19.861	30.250	63.025
1	3	4	129.53	367.69	394.47	11.381	19.175	19.861	50.418
2	3	4	166.76	367.69	394.47	12.914	19.175	19.861	51.950
3	5	7	367.69	915.08	601.22	19.175	30.250	24.520	73.945
1	5	7	129.53	915.08	601.22	11.381	30.250	24.520	66.151
1	2	4	129.53	166.76	394.47	11.381	12.914	19.861	44.156
2	5	7	166.76	915.08	601.22	12.914	30.250	24.520	67.684
2	3	5	166.76	367.69	915.08	12.914	19.175	30.250	62.339
1	2	5	129.53	166.76	915.08	11.381	12.914	30.250	54.545
2	3	7	166.76	367.69	601.22	12.914	19.175	24.520	56.609
1	3	7	129.53	367.69	601.22	11.381	19.175	24.520	55.076
1	2	7	129.53	166.76	601.22	11.381	12.914	24.520	48.814
1	2	3	129.53	166.76	367.69	11.381	12.914	19.175	43.470

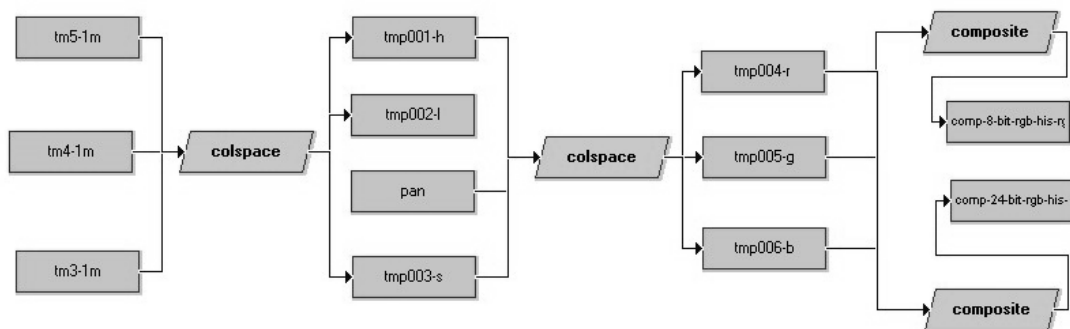
Anexo XLII: Organigrama da suavização das imagens TM. Filtração passa baixo (média) numa matriz 3x3.



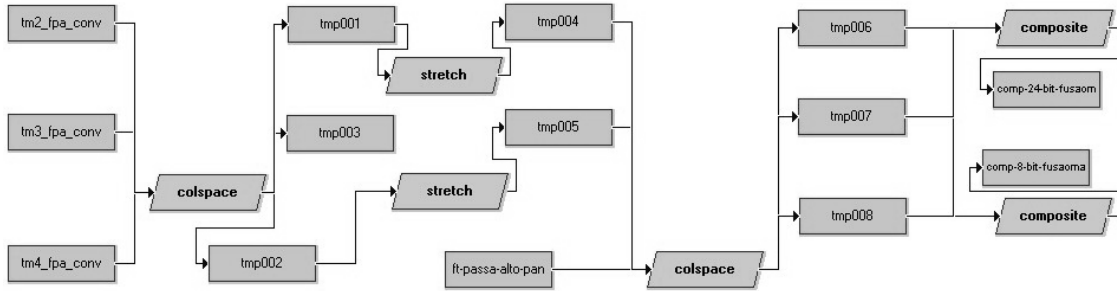
Anexo XLIII: Análise de componentes principais, com cálculo directo das covariâncias



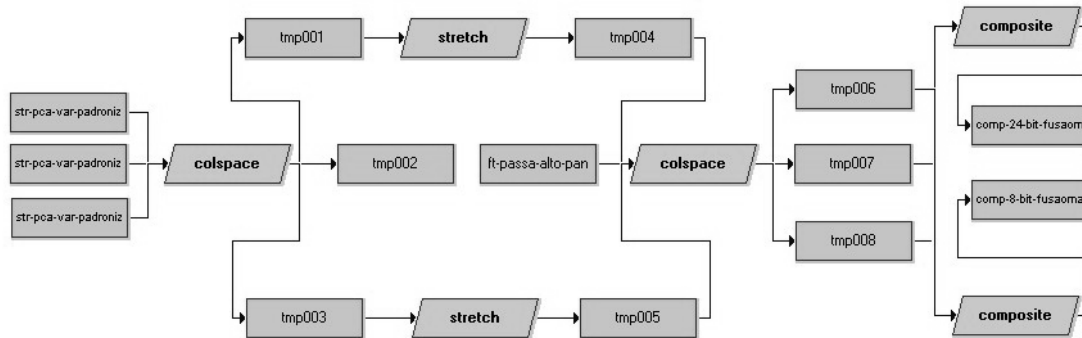
Anexo XLIV: Organigrama da fusão RGB-HIS-BRUTO – imagens em bruto



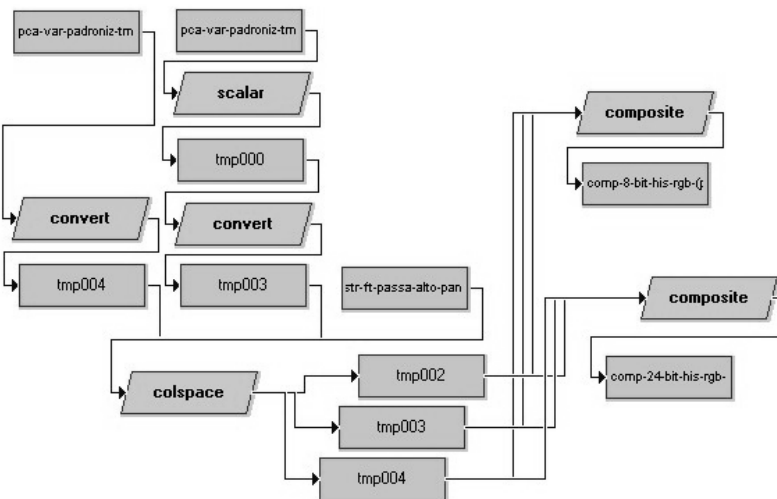
Anexo XLV: Organigrama da fusão RGB-HIS – FusaoMarao1



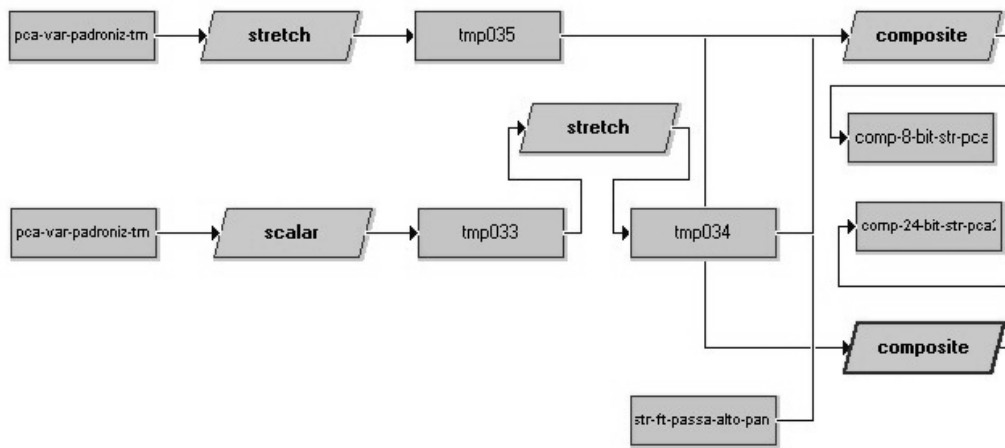
Anexo XLVI: Organigrama da fusão RGB-HIS (RGB-HIS-CP123) utilizando as componentes principais extraídas das imagens TM, com ampliação de contraste linear e ampliação de contraste linear das componentes H e S



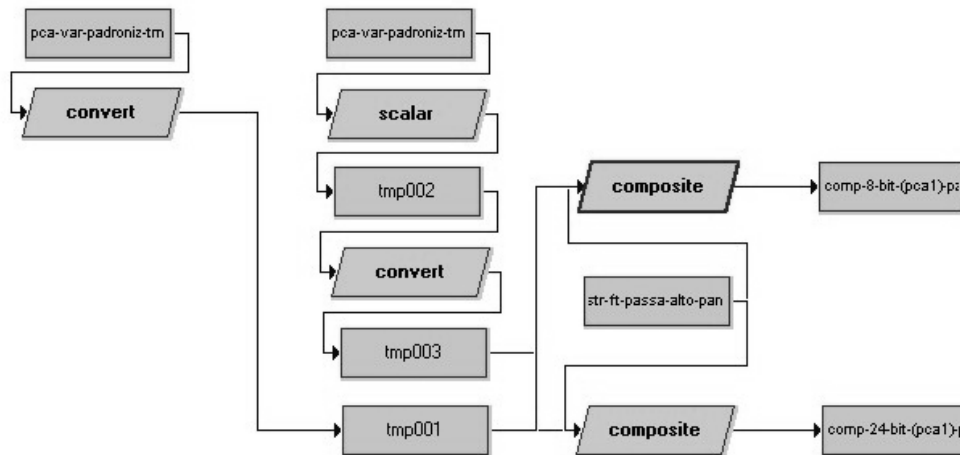
Anexo XLVII: Organigrama da substituição directa da CP1 pela PAN, conversão IHS-RGB e composição colorida 8 e 24-bit [HIS-RGB-comp-(pca1)-pan-pca2-pca3.imm]



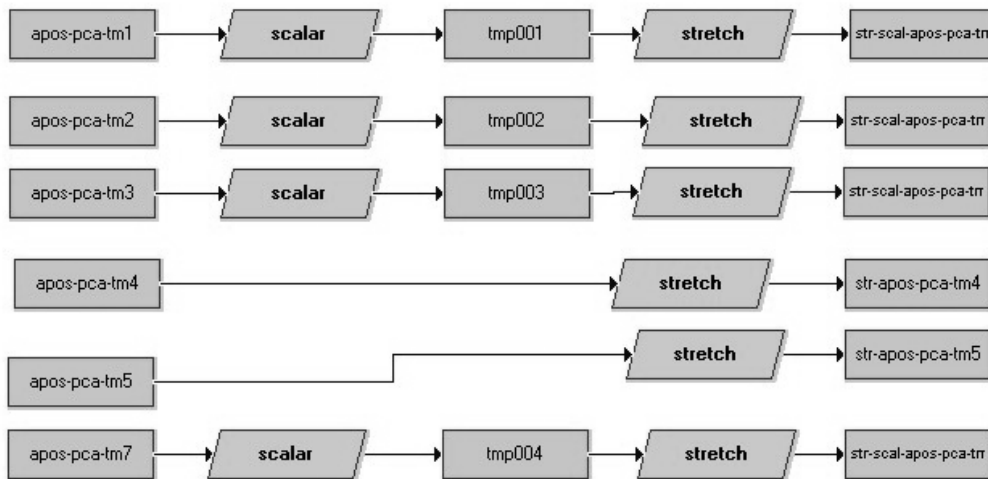
Anexo XLVIII: Organigrama da substituição directa da CP1 pela PAN (ampliação de contraste linear de todas as imagens) e composição colorida 8 e 24-bit [comp-8e24-bit-str-pca2.imm]



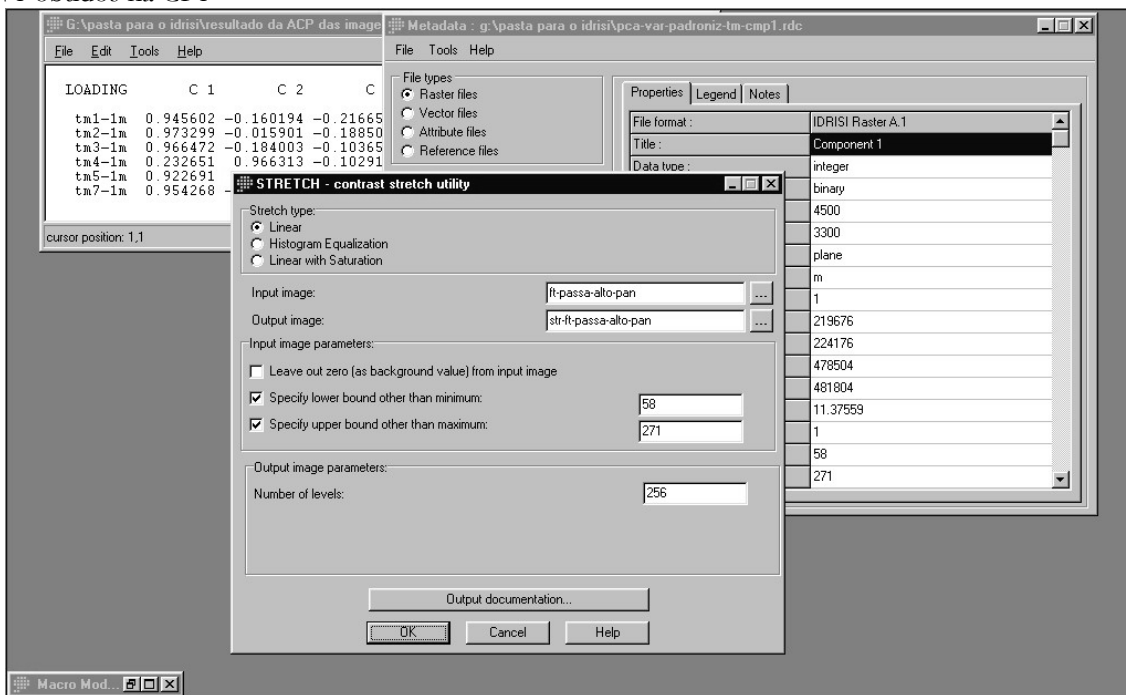
Anexo XLIX: Organigrama da substituição directa da CP1 pela PAN (ampliação de contraste linear de apenas a PAN) e composição colorida 8 e 24-bit [comp-8e24-bit-(pca1)-pan-pca2-pca3.imm]



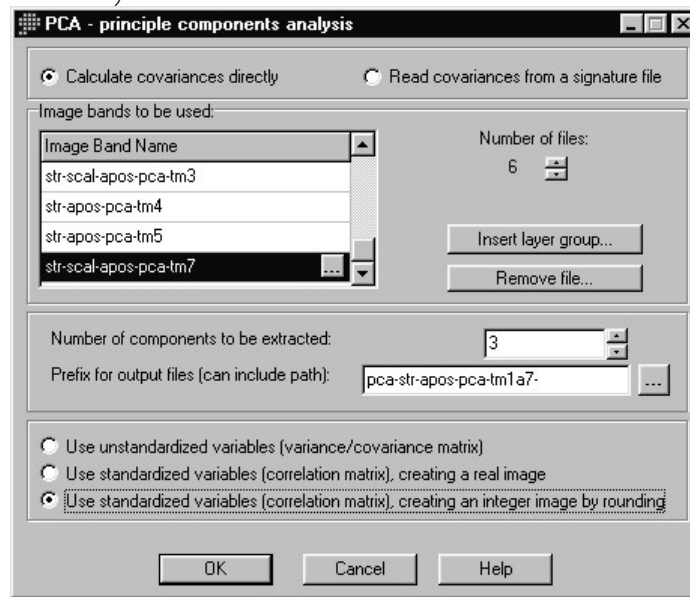
Anexo L: TransformaçãoQueAntecedeACP-apos-pca-tm1a7 (operação escalar para evitar dados negativos; ampliação de contraste linear)



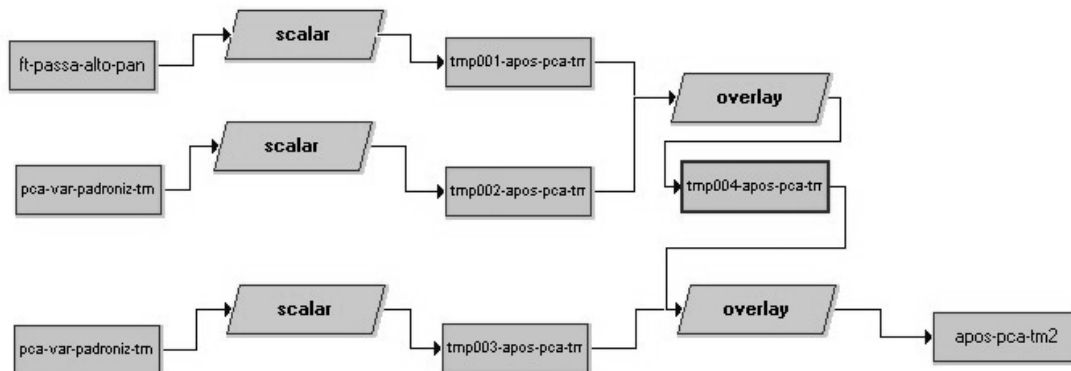
Anexo LI: Ampliação de contraste (stretch) da imagem pancromática, forçando o mínimo = 58 e o máximo = 271 obtidos na CP1



Anexo LII: Nova transformação de ACP com extracção de 3 componentes e que constituirão uma composição colorida (na composição colorida pode variar-se a ordem RGB para tentar realçar mais ou menos determinados fenómenos)



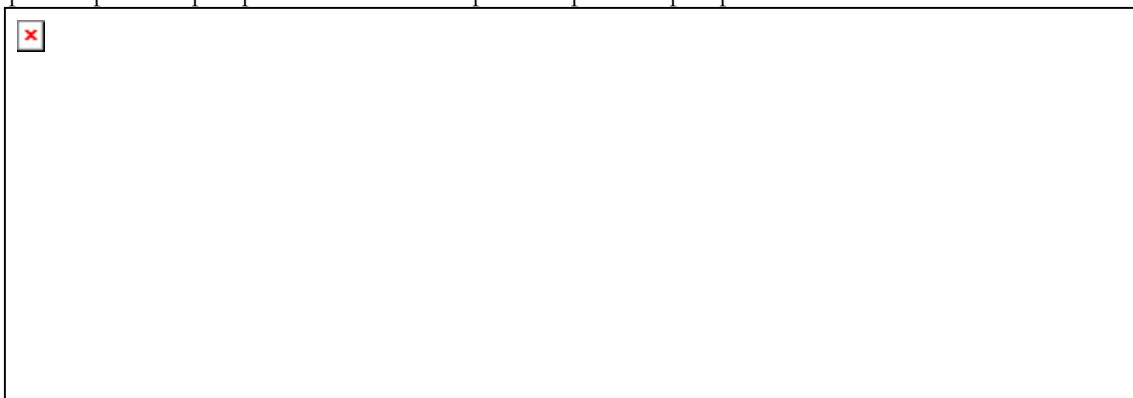
Anexo LIII: Organigrama relativo ao caminho inverso da ACP das imagens TM, após substituição da CP1 pela imagem pancromática devidamente transformada (a ponderação das componentes consta do Anexo XXXIV). Ilustra-se neste caso a determinação da imagem apos-pca-TM2



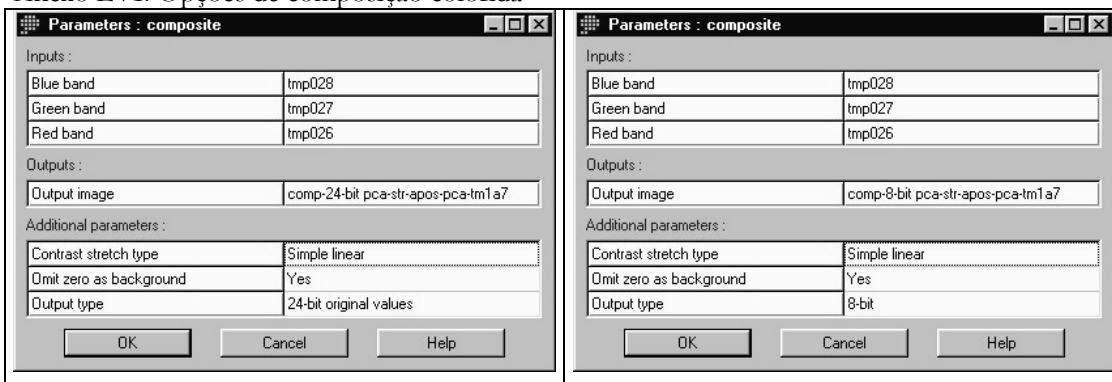
Anexo LIV: Operações escalares efectuadas no Idrisi necessárias para a transformação inversa do processo da ACP com substituição indirecta da CP1 (nomes entre parêntesis rectos referem-se a imagens; a parte cinzento claro foi retirada, uma vez que as três primeiras componentes já explicam 98.07% da variância total; consultar macros d:\...\apos-PCA-TM1.imm, ..., apos-PCA-TM7.imm)

$[\text{apos-PCA-TM1}] = 0.945602 \times [\text{ft-passa-alto-PAN}] - 0.160194 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp2}] - 0.216651 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp3}] - 0.177400 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp4}] + 0.040474 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp5}] + 0.011553 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp6}]$
$[\text{apos-PCA-TM2}] = 0.973299 \times [\text{ft-passa-alto-PAN}] - 0.015901 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp2}] - 0.188500 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp3}] + 0.086560 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp4}] - 0.032128 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp5}] - 0.091554 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp6}]$
$[\text{apos-PCA-TM3}] = 0.966472 \times [\text{ft-passa-alto-PAN}] - 0.184003 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp2}] - 0.103651 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp3}] + 0.106984 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp4}] - 0.043889 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp5}] + 0.089234 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp6}]$
$[\text{apos-PCA-TM4}] = 0.232651 \times [\text{ft-passa-alto-PAN}] + 0.966313 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp2}] - 0.102919 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp3}] + 0.011773 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp4}] + 0.032312 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp5}] + 0.018401 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp6}]$
$[\text{apos-PCA-TM5}] = 0.922691 \times [\text{ft-passa-alto-PAN}] + 0.209071 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp2}] + 0.295858 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp3}] - 0.072610 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp4}] - 0.109878 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp5}] - 0.006909 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp6}]$
$[\text{apos-PCA-TM7}] = 0.954268 \times [\text{ft-passa-alto-PAN}] - 0.076427 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp2}] + 0.250943 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp3}] + 0.046487 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp4}] + 0.135477 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp5}] - 0.006248 \times [\text{PCA-var-padroniz-TM-cmp6}]$

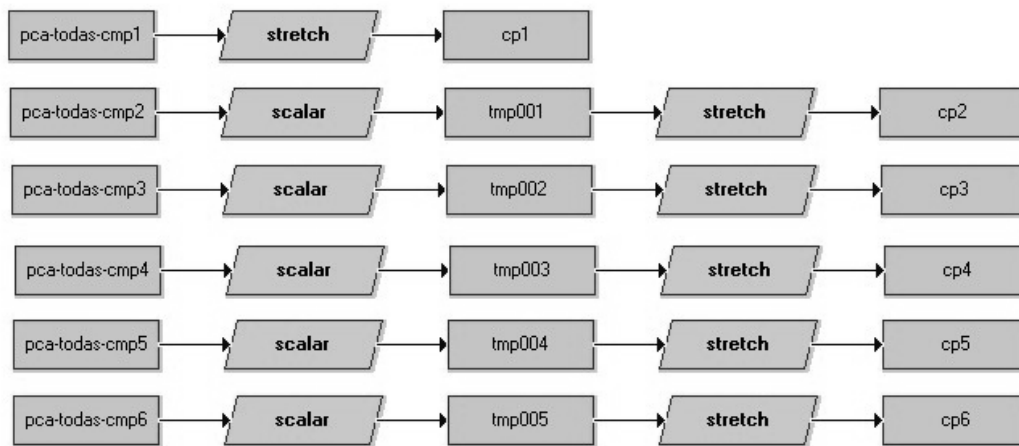
Anexo LV: Criação de composição colorida através das três primeiras componentes principais da transformação pca-invPca-pca (comp-8e24-bit-pca-str-apos-pca-tm1a7.imm) com a criação das imagens comp-8-bit pca-str-apos-pca-tm1a7.rst e comp-24-bit pca-str-apos-pca-tm1a7.rst



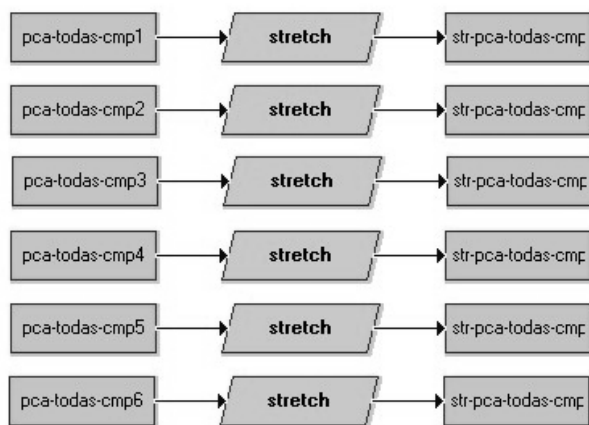
Anexo LVI: Opções de composição colorida



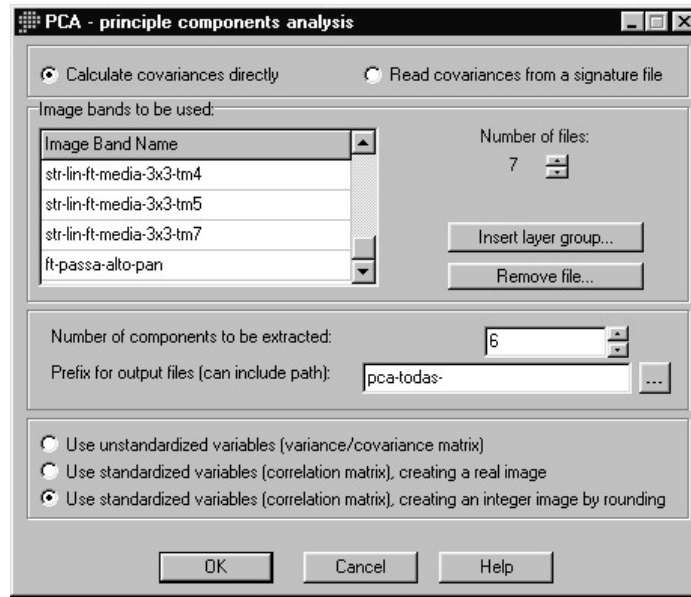
Anexo LVII: Scal-str-pca-todas-cmp.imm



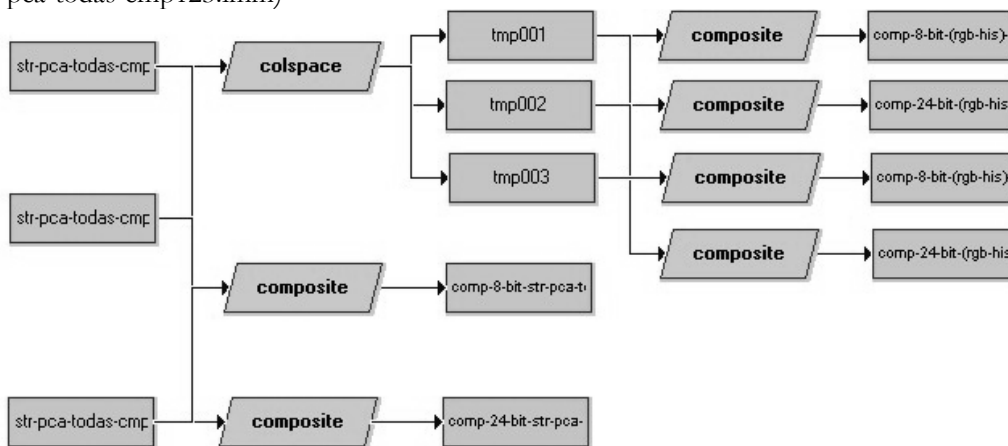
Anexo LVIII: Stretch-linear-componentes-principais.imm



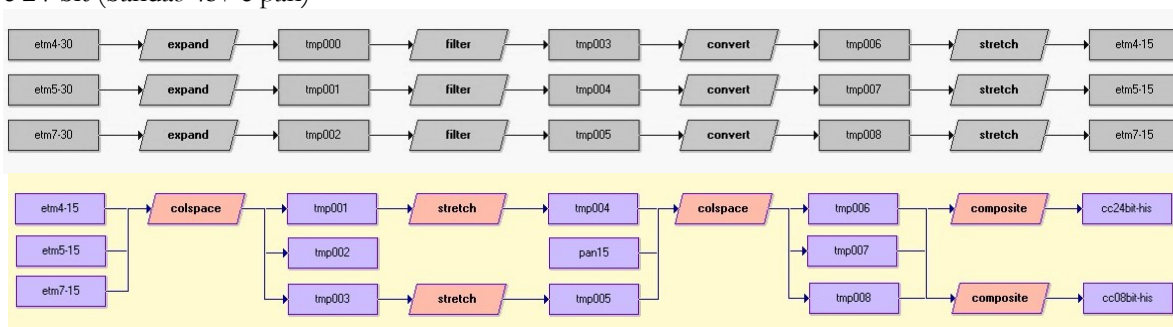
Anexo LIX: ACP usando variáveis padronizadas, de todas as imagens após transformação, com extração de seis componentes



Anexo LX: Organigrama das composições coloridas 8 e 24-bit da ACP de todas as imagens (Comp-8e24-bit-str-pca-todas-cmp123.imm)



Anexo LXI: Organigramas da transformação HIS a imagens Landsat 7 e criação de composições coloridas 8 e 24-bit (bandas 457 e pan)



## **A.2. Características de Instrumentos referidos neste estudo**

### **Ceptómetro**

Foi utilizado neste estudo um ceptómetro modelo Sunfleck Ceptometer Delta-T Devices SF-80, constituído por 80 sensores espaçados de 1cm, sensíveis apenas à PAR (400-700nm) instrumento de utilização bastante simples. As medições da PAR absoluta (PAR - “*Photosynthetically Active Radiation*”) ( $\text{Wm}^2\text{sr}^{-1}$ ) com o ceptómetro foram realizadas apenas entre as 11:00h e as 13:30h, de forma a minimizar o ângulo zenital do Sol (ângulo formado entre a vertical e a radiação solar). As medições da abertura ou transparência de copa (%) medem a PAR relativa, isto é, a proporção dos 80 sensores interceptados por raios de luz sob coberto da copa. (Decagon Devices Inc., 1989).

### **Equipamento para aquisição e processamento de fotografias hemisféricas**

A aquisição de fotografias hemisféricas necessita de equipamento específico sendo normalmente utilizada uma câmara fotográfica, de preferência digital (Sylvia *et al.*, 2000, <http://www.nysaes.cornell.edu/hort/faculty/lakso/>, Hale & Edwards, 2002) equipada com uma objectiva de grande angular (“olho de peixe”) (Figura 114). A câmara deve ser orientada para Norte e nivelada com um nível de bolha, no centro da parcela. Alguns autores preferem as primeiras horas matinais ou dias encobertos com nuvens para a aquisição de fotografias hemisféricas (Lin e Chiang, 2002). Martens *et al.* (1993), após a aquisição das fotografias hemisféricas processaram-nas digitalmente através do programa CANOPY desenvolvido por Scott N. Martens (Rich 1989, 1990). Nesse processamento cada fotografia hemisférica é seccionada em 160 partes iguais (8 azimutes por 20 classes de zénite) e a abertura da copa resulta da média aritmética dessas 160 medições. Como exemplos doutros programas específicos para o tratamento de fotografias hemisféricas digitais ou digitalizadas indicamos o “WINSCANNOPY” da “Regent Instruments Inc.” ([www.regentinstruments.com](http://www.regentinstruments.com)), o “HEMIVIEW” da “Dynamax Delta-T Devices” ([www.dynamax.com](http://www.dynamax.com) e <http://hemisoft.com/products.html>).



Figura 114: Câmera fotográfica analógica com objectiva “olho de peixe” ([http 32](http://32)) e Fotografia hemisférica em processamento no programa “Winscanopy” ([http 18](http://18))

### A.3. Textos de apoio

#### Critérios de Seriação e Validação dos Modelos de regressão

Para aligeirar a leitura deste anexo não se refere novamente a bibliografia consultada, citada ao longo da tese.

A metodologia aplicada na fase de ajustamento permite estimar e seleccionar alguns dos modelos de regressão. Na fase de validação, mede-se a capacidade dos modelos em predizer os restantes dados. Seguidamente indicamos as estatísticas calculadas em cada uma dessas fases.

#### Análise da Qualidade de Ajustamento

Coefficiente de determinação:  $R^2$  (valores óptimos próximos de 1)

Eq. 112 
$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

em que:  $SQR$  = soma de quadrados de resíduos para um modelo com p parâmetros  
 $SQT$  = soma de quadrados total corrigida (regressão linear com ordenada na origem); quando a regressão é linear sem ordenada na origem a  $SQT$  é não corrigida ( $SQT = \sum y_i^2$ )

Coefficiente de determinação ajustado:  $R^2_{aj}$  (valores óptimos próximos de 1)

$$\text{Eq. 113} \quad R^2_{aj} = 1 - \left( \frac{n-i}{n-p} \right) \frac{SQR}{SQT}$$

Sendo:  $n$  = o número de observações,  
 $p$  = o número de parâmetros do modelo;  
 $i$  = um factor que assume valor nulo nas equações lineares sem ordenada na origem e, unitário nas lineares com ordenada na origem diferente de zero e não lineares.

Quadrado Médio dos Resíduos: QMR (valores óptimos próximos de 0)

$$\text{Eq. 114} \quad QMR = \frac{SQR}{n-p}$$

Embora o  $R^2_{aj}$  e o QMR sejam critérios de ajustamento equivalentes (são inversamente proporcionais) o QMR fornece também indicação sobre a variância residual.

Erro padrão ou erro residual:  $s_{yx}$  (valores óptimos próximos de 0)

$$\text{Eq. 115} \quad s_{yx} = \sqrt{QMR} = \sqrt{\left( \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right) - b^2 \times \left( \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right)} / n-p$$

O erro residual indica em termos absolutos o valor da dispersão média dos pontos em torno da linha de regressão.

### **Avaliação da Capacidade Preditiva dos Modelos**

Média absoluta dos resíduos tradicionais: MAR (valores óptimos próximos de 0)

$$\text{Eq. 116} \quad MAR = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

sendo uma medida de enviesamento do modelo.

## Determinação da Capacidade Preditiva dos Modelos através de Validação Cruzada

Através da validação cruzada são avaliadas as diferenças entre os valores observados e os preditos pelos modelos estimados. As estatísticas para o efeito são a média dos resíduos de predição ( $Mrp$ ), a média do valor absoluto dos resíduos de predição ( $Marp$ ), a variância dos resíduos de predição ( $Vrp$ ), o quadrado total do erro (QTE) e a percentagem de variação explicada pelo modelo ( $R^2rp$ ) ou eficiência do modelo.

Média dos resíduos de predição:  $Mrp$  (valores ótimos próximos de 0)

Eq. 117

$$Mrp = \frac{\sum_{i=1}^n rp_i}{n}$$

sendo  $rp_i$  = o resíduo de predição para a observação  $i$  ( $rp_i = y_i - \hat{y}_i$ ) e

$n$  = número de observações na validação do modelo

Valores desta estatística próximos de zero indicam não enviesamento do modelo.

Média do valor absoluto dos resíduos de predição:  $Marp$  (valores ótimos próximos de 0)

Eq. 118

$$Marp = \frac{\sum_{i=1}^n |rp_i|}{n}$$

que também é uma medida de enviesamento do modelo e valores desta estatística próximos de zero indicam também não enviesamento do modelo.

Variância dos resíduos de predição:  $Vrp$  (valores ótimos próximos de 0)

Eq. 119

$$Vrp = \frac{\sum_{i=1}^n (rp_i - \bar{rp})^2}{n-1}$$

servindo para avaliar a precisão das predições, com  $\bar{rp}$  igual à média dos resíduos de predição.

Quadrado total do erro: QTE (valores óptimos próximos de 0)

Eq. 120 
$$QTE = Mrp^2 + Vrp$$

utilizado para avaliar o erro médio da aplicação dos modelos, e que deverão ser também próximos de zero.

Percentagem de variação explicada pelo modelo ou eficiência do modelo:  $R^2_{rp}$  (valores óptimos próximos de 1)

Eq. 121 
$$R^2_{rp} = 1 - \frac{SQ_{rp}}{SQT} = 1 - \frac{\sum rp_i}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

e que indica a grau do ajustamento. Enquanto que  $R^2$  indica a percentagem de variação explicada pelo modelo de regressão estimado,  $R^2_{rp}$  refere-se à linha  $y_i = \hat{y}_i$ . Aceitam-se valores de  $R^2_{rp}$  próximos de 1 e rejeitam-se valores negativos.

### Teste t de Student heterocedástico

O valor estatístico do teste  $t$  de Student é dado pela equação seguinte:

Eq. 122 
$$t = \frac{|\bar{x}_2 - \bar{x}_1|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{N_1} + \frac{S_2^2}{N_2}}}$$

em que:  $\bar{x}_1$  e  $\bar{x}_2$  = médias das amostras 1 e 2

$S_1$  e  $S_2$  = desvio padrão das amostras 1 e 2

$N_1$  e  $N_2$  = efectivos das amostras 1 e 2

A natureza deste teste é bilateral porque a condição de rejeição da hipótese nula de igualdade de médias é independente do sinal da diferença entre as médias (Dagnelie, 1973). O número de graus de liberdade necessário para encontrar o valor crítico da tabela de t, deve obter-se por arredondamento para o inteiro mais próximo obtido através da equação seguinte:

Eq. 123

$$gl = \frac{\left(\frac{S_1^2}{m} + \frac{S_2^2}{n}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{m}\right)^2}{m-1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n}\right)^2}{n-1}}$$

Anexo LXII: Pesquisa da hora com ângulo zenital do Sol próximo de 57° (intervalos de meia-hora) para a latitude do Marão

data inicial	data final e hora	J (dias)	Latitude (graus,min)	Latitude (rad)	Long (graus,min)	Long Meridiano Central g,min	D (rad)	D (graus)	hora (h)	min. (min)	t (hora decimal)	t0 (hora decimal)	θ (rad)	θ (°)	LC (horas)	φ (°)	ET (hora decimal)	SA (°)	cos θ (°)
31-Dez-02	1-5-03 15:00	121	41.309	0.721	7.5	8.1	0.258	14.799	15	0	15.00	11.91	0.84	47.92	0.04	6.962	0.05	42.08	0.67
31-Dez-02	1-5-03 15:30	121	41.309	0.721	7.5	8.1	0.258	14.799	15	30	15.50	11.91	0.93	53.32	0.04	6.962	0.05	36.68	0.60
31-Dez-02	1-5-03 16:00	121	41.309	0.721	7.5	8.1	0.258	14.799	16	0	16.00	11.91	1.03	58.86	0.04	6.962	0.05	31.14	0.52
31-Dez-02	1-5-03 16:30	121	41.309	0.721	7.5	8.1	0.258	14.799	16	30	16.50	11.91	1.13	64.47	0.04	6.962	0.05	25.53	0.43
31-Dez-02	1-5-03 17:00	121	41.309	0.721	7.5	8.1	0.258	14.799	17	0	17.00	11.91	1.22	70.10	0.04	6.962	0.05	19.90	0.34
31-Dez-02	1-5-03 17:30	121	41.309	0.721	7.5	8.1	0.258	14.799	17	30	17.50	11.91	1.32	75.71	0.04	6.962	0.05	14.29	0.25
31-Dez-02	16-5-03 15:00	136	41.309	0.721	7.5	8.1	0.330	18.887	15	0	15.00	11.90	0.79	45.36	0.04	7.220	0.06	44.64	0.70
31-Dez-02	16-5-03 15:30	136	41.309	0.721	7.5	8.1	0.330	18.887	15	30	15.50	11.90	0.89	50.86	0.04	7.220	0.06	39.14	0.63
31-Dez-02	16-5-03 16:00	136	41.309	0.721	7.5	8.1	0.330	18.887	16	0	16.00	11.90	0.99	56.46	0.04	7.220	0.06	33.54	0.55
31-Dez-02	16-5-03 16:30	136	41.309	0.721	7.5	8.1	0.330	18.887	16	30	16.50	11.90	1.08	62.09	0.04	7.220	0.06	27.91	0.47
31-Dez-02	16-5-03 17:00	136	41.309	0.721	7.5	8.1	0.330	18.887	17	0	17.00	11.90	1.18	67.71	0.04	7.220	0.06	22.29	0.38
31-Dez-02	16-5-03 17:30	136	41.309	0.721	7.5	8.1	0.330	18.887	17	30	17.50	11.90	1.28	73.28	0.04	7.220	0.06	16.72	0.29
31-Dez-02	31-5-03 15:00	151	41.309	0.721	7.5	8.1	0.380	21.783	15	0	15.00	11.92	0.76	43.31	0.04	7.478	0.04	46.69	0.73
31-Dez-02	31-5-03 15:30	151	41.309	0.721	7.5	8.1	0.380	21.783	15	30	15.50	11.92	0.85	48.87	0.04	7.478	0.04	41.13	0.66
31-Dez-02	31-5-03 16:00	151	41.309	0.721	7.5	8.1	0.380	21.783	16	0	16.00	11.92	0.95	54.49	0.04	7.478	0.04	35.51	0.58
31-Dez-02	31-5-03 16:30	151	41.309	0.721	7.5	8.1	0.380	21.783	16	30	16.50	11.92	1.05	60.12	0.04	7.478	0.04	29.88	0.50
31-Dez-02	31-5-03 17:00	151	41.309	0.721	7.5	8.1	0.380	21.783	17	0	17.00	11.92	1.15	65.72	0.04	7.478	0.04	24.28	0.41
31-Dez-02	31-5-03 17:30	151	41.309	0.721	7.5	8.1	0.380	21.783	17	30	17.50	11.92	1.24	71.26	0.04	7.478	0.04	18.74	0.32
31-Dez-02	15-6-03 15:00	166	41.309	0.721	7.5	8.1	0.406	23.270	15	0	15.00	11.97	0.73	41.91	0.04	7.736	-0.01	48.09	0.74
31-Dez-02	15-6-03 15:30	166	41.309	0.721	7.5	8.1	0.406	23.270	15	30	15.50	11.97	0.83	47.48	0.04	7.736	-0.01	42.52	0.68
31-Dez-02	15-6-03 16:00	166	41.309	0.721	7.5	8.1	0.406	23.270	16	0	16.00	11.97	0.93	53.11	0.04	7.736	-0.01	36.89	0.60
31-Dez-02	15-6-03 16:30	166	41.309	0.721	7.5	8.1	0.406	23.270	16	30	16.50	11.97	1.03	58.73	0.04	7.736	-0.01	31.27	0.52
31-Dez-02	15-6-03 17:00	166	41.309	0.721	7.5	8.1	0.406	23.270	17	0	17.00	11.97	1.12	64.32	0.04	7.736	-0.01	25.68	0.43
31-Dez-02	15-6-03 17:30	166	41.309	0.721	7.5	8.1	0.406	23.270	17	30	17.50	11.97	1.22	69.84	0.04	7.736	-0.01	20.16	0.34
31-Dez-02	30-6-03 15:00	181	41.309	0.721	7.5	8.1	0.405	23.231	15	0	15.00	12.02	0.72	41.34	0.04	7.994	-0.06	48.66	0.75

data inicial	data final e hora	J (dias)	Latitude (graus,min)	Latitude (rad)	Long (graus,min)	Long Meridiano Central g,min	D (rad)	D (graus)	hora (h)	min. (min)	t (hora decimal)	t0 (hora decimal)	$\theta$ (rad)	$\theta$ ( $^\circ$ )	LC (horas)	$\varphi$ ( $^\circ$ )	ET (hora decimal)	SA ( $^\circ$ )	cos $\theta$ ( $^\circ$ )
31-Dez-02	30-6-03 15:30	181	41.309	0.721	7.5	8.1	0.405	23.231	15	30	15.50	12.02	0.82	46.91	0.04	7.994	-0.06	43.09	0.68
31-Dez-02	30-6-03 16:00	181	41.309	0.721	7.5	8.1	0.405	23.231	16	0	16.00	12.02	0.92	52.53	0.04	7.994	-0.06	37.47	0.61
31-Dez-02	30-6-03 16:30	181	41.309	0.721	7.5	8.1	0.405	23.231	16	30	16.50	12.02	1.02	58.16	0.04	7.994	-0.06	31.84	0.53
31-Dez-02	30-6-03 17:00	181	41.309	0.721	7.5	8.1	0.405	23.231	17	0	17.00	12.02	1.11	63.76	0.04	7.994	-0.06	26.24	0.44
31-Dez-02	30-6-03 17:30	181	41.309	0.721	7.5	8.1	0.405	23.231	17	30	17.50	12.02	1.21	69.28	0.04	7.994	-0.06	20.72	0.35
31-Dez-02	15-7-03 15:00	196	41.309	0.721	7.5	8.1	0.378	21.678	15	0	15.00	12.06	0.73	41.86	0.04	8.252	-0.10	48.14	0.74
31-Dez-02	15-7-03 15:30	196	41.309	0.721	7.5	8.1	0.378	21.678	15	30	15.50	12.06	0.83	47.38	0.04	8.252	-0.10	42.62	0.68
31-Dez-02	15-7-03 16:00	196	41.309	0.721	7.5	8.1	0.378	21.678	16	0	16.00	12.06	0.92	52.99	0.04	8.252	-0.10	37.01	0.60
31-Dez-02	15-7-03 16:30	196	41.309	0.721	7.5	8.1	0.378	21.678	16	30	16.50	12.06	1.02	58.62	0.04	8.252	-0.10	31.38	0.52
31-Dez-02	15-7-03 17:00	196	41.309	0.721	7.5	8.1	0.378	21.678	17	0	17.00	12.06	1.12	64.24	0.04	8.252	-0.10	25.76	0.43
31-Dez-02	15-7-03 17:30	196	41.309	0.721	7.5	8.1	0.378	21.678	17	30	17.50	12.06	1.22	69.80	0.04	8.252	-0.10	20.20	0.35
31-Dez-02	30-7-03 15:00	211	41.309	0.721	7.5	8.1	0.327	18.748	15	0	15.00	12.07	0.76	43.63	0.04	8.511	-0.11	46.37	0.72
31-Dez-02	30-7-03 15:30	211	41.309	0.721	7.5	8.1	0.327	18.748	15	30	15.50	12.07	0.86	49.08	0.04	8.511	-0.11	40.92	0.65
31-Dez-02	30-7-03 16:00	211	41.309	0.721	7.5	8.1	0.327	18.748	16	0	16.00	12.07	0.95	54.66	0.04	8.511	-0.11	35.34	0.58
31-Dez-02	30-7-03 16:30	211	41.309	0.721	7.5	8.1	0.327	18.748	16	30	16.50	12.07	1.05	60.28	0.04	8.511	-0.11	29.72	0.50
31-Dez-02	30-7-03 17:00	211	41.309	0.721	7.5	8.1	0.327	18.748	17	0	17.00	12.07	1.15	65.91	0.04	8.511	-0.11	24.09	0.41
31-Dez-02	30-7-03 17:30	211	41.309	0.721	7.5	8.1	0.327	18.748	17	30	17.50	12.07	1.25	71.50	0.04	8.511	-0.11	18.50	0.32
31-Dez-02	14-8-03 15:00	226	41.309	0.721	7.5	8.1	0.256	14.666	15	0	15.00	12.04	0.81	46.68	0.04	8.769	-0.08	43.32	0.69
31-Dez-02	14-8-03 15:30	226	41.309	0.721	7.5	8.1	0.256	14.666	15	30	15.50	12.04	0.91	52.03	0.04	8.769	-0.08	37.97	0.62
31-Dez-02	14-8-03 16:00	226	41.309	0.721	7.5	8.1	0.256	14.666	16	0	16.00	12.04	1.00	57.53	0.04	8.769	-0.08	32.47	0.54
31-Dez-02	14-8-03 16:30	226	41.309	0.721	7.5	8.1	0.256	14.666	16	30	16.50	12.04	1.10	63.13	0.04	8.769	-0.08	26.87	0.45
31-Dez-02	14-8-03 17:00	226	41.309	0.721	7.5	8.1	0.256	14.666	17	0	17.00	12.04	1.20	68.76	0.04	8.769	-0.08	21.24	0.36
31-Dez-02	14-8-03 17:30	226	41.309	0.721	7.5	8.1	0.256	14.666	17	30	17.50	12.04	1.30	74.38	0.04	8.769	-0.08	15.62	0.27
31-Dez-02	29-8-03 15:00	241	41.309	0.721	7.5	8.1	0.169	9.708	15	0	15.00	11.98	0.89	50.82	0.04	9.027	-0.02	39.18	0.63
31-Dez-02	29-8-03 15:30	241	41.309	0.721	7.5	8.1	0.169	9.708	15	30	15.50	11.98	0.98	56.04	0.04	9.027	-0.02	33.96	0.56
31-Dez-02	29-8-03 16:00	241	41.309	0.721	7.5	8.1	0.169	9.708	16	0	16.00	11.98	1.07	61.46	0.04	9.027	-0.02	28.54	0.48
31-Dez-02	29-8-03 16:30	241	41.309	0.721	7.5	8.1	0.169	9.708	16	30	16.50	11.98	1.17	67.01	0.04	9.027	-0.02	22.99	0.39

data inicial	data final e hora	J (dias)	Latitude (graus,min)	Latitude (rad)	Long (graus,min)	Long Meridiano Central g,min	D (rad)	D (graus)	hora (h)	min. (min)	t (hora decimal)	t0 (hora decimal)	θ (rad)	θ (°)	LC (horas)	φ (°)	ET (hora decimal)	SA (°)	cos θ (°)
31-Dez-02	29-8-03 17:00	241	41.309	0.721	7.5	8.1	0.169	9.708	17	0	17.00	11.98	1.27	72.62	0.04	9.027	-0.02	17.38	0.30
31-Dez-02	29-8-03 17:30	241	41.309	0.721	7.5	8.1	0.169	9.708	17	30	17.50	11.98	1.37	78.25	0.04	9.027	-0.02	11.75	0.20

Declinação solar:  $D = \arcsin \{0.39785 \sin [4.869+0.0172 \cdot J + 0.03345 \sin (6.224+0.0172 \cdot J)]\}$ ; Meio-dia solar:  $t_0 = 12 - LC - ET$ ; ângulo zenital do Sol em radianos (ângulo formado entre a vertical e a radiação solar):

$$\theta = \arccos(\sin L \sin D + \cos L \cos D \cos 0.2618(t - t_0));$$

$$\text{Longitude correcção: } LC (^\circ) = (\text{Longitude do meridiano central} - \text{Longitude do local}) / 15 ;$$

$$\text{Altura do Sol (ou ângulo entre o plano da Terra e os raios solares): } \varphi = (279.575 + 0.986 \cdot J) \cdot \pi / 180 ;$$

$$\text{Equação de tempo: } ET = [-104.7 \sin \varphi + 596.2 \sin 2\varphi + 4.3 \sin 3\varphi - 12.7 \sin 4\varphi - 429.3 \cos \varphi - 2.0 \cos 2\varphi + 19.3 \cos 3\varphi] / 3600 ;$$

$$\text{Altura do Sol: } SA = 90 - \theta$$